

Основные подходы к построению схем управления питанием GaN СВЧ-усилителей мощности

Е. Савченко, к.т.н.¹, А. Мартынов², А. Першин³, М. Селиванов⁴

УДК 621.375.026 | ВАК 2.2.2

СВЧ-усилители мощности на основе нитрида галлия являются ключевыми компонентами в телекоммуникационных системах, радарной технике и контрольно-измерительном оборудовании. Как известно, усилители мощности данного типа работают в режиме обеднения. Для обеспечения безопасной работы таких устройств и достижения максимальных выходных характеристик, необходимы специализированные схемы управления питанием. В статье рассмотрены принципы построения схем управления питанием GaN СВЧ-усилителей мощности, представлен обзор коммерчески доступных решений.

ВВЕДЕНИЕ

Неотъемлемой частью современной СВЧ-электроники являются нитрид-галлиевые (GaN) усилители мощности (УМ), которые находят применение в локационных, телекоммуникационных и измерительных системах [1–3]. К GaN УМ предъявляют ряд требований, включая высокую плотность компоновки, работу в широкой полосе частот, низкое энергопотребление, высокое значение коэффициента полезного действия [4, 5]. С уменьшением размеров СВЧ-блоков УМ с целью миниатюризации конечных устройств ведущие мировые производители совершенствуют систему управления питанием УМ, повышая степень функционального наполнения и эффективность, делая акцент на универсальности и надежности.

Данная статья представляет собой первую часть цикла из трех частей по схемам управления питанием GaN СВЧ УМ, которая посвящена принципам построения схем и обзору доступных решений на рынке. Во второй части планируется сравнить отечественную и зарубежную ЭКБ для систем данного класса, а в заключительной части – представить результаты разработки субмодулей.

СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПИТАНИЕМ ДЛЯ GaN СВЧ-УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

СВЧ УМ на основе GaN обеспечивают высокий уровень выходной мощности; применение в усилителях нормально открытых полевых транзисторов требует реализации схемы контроля очередности подачи питающих напряжений, которую также называют схемой секвенсора.

Для обеспечения импульсного режима работы УМ в цепь питания включается коммутирующий элемент – обычно каскад из МОП-транзисторов и схема управления. Указанные элементы являются основными, но не единственными, элементами схемы. Как правило, в состав схемы управления включают схему защиты от перегрузки по току, схему защиты от повышенной температуры, схему контроля напряжения и тока в нагрузке. Всё вышеперечисленное представляет собой систему управления питанием.

Данный класс устройств, выполненных в виде микросхем или модулей, появился с распространением GaN-транзисторов [6, 7]. Интерес потребителей к данным устройствам растет, о чем косвенно свидетельствует увеличение номенклатуры зарубежных изделий данного класса [8, 9]. О тенденциях развития данных изделий будет сказано ниже, в целом можно отметить актуальность разработки систем управления питанием на отечественной ЭКБ.

Рабочий режим СВЧ-усилителя задается системой управления питанием, пример которой представлен на рис. 1. В случае мощных СВЧ-усилителей в состав схемы входит контроллер смещения (в англоязычной литературе используется термин active bias controller),

¹ ООО «Центр инновационных разработок ВАО», президент компании.

² ООО «Центр инновационных разработок ВАО», ведущий инженер, planet209@mail.ru.

³ ООО «Центр инновационных разработок ВАО», начальник центра проектирования, pad@icvao.ru.

⁴ ООО «Центр инновационных разработок ВАО», инженер 2 категории, тел. +7-925-900-28-09, smv@icvao.ru.

а в усилителях, работающих в импульсном режиме, к схеме добавляется модулятор питания.

КОНТРОЛЛЕРЫ СМЕЩЕНИЯ

Контроллер смещения предназначен для соблюдения последовательности включения СВЧ УМ, отслеживания уровня напряжения смещения, опционально может содержать схемы защиты по току, уровню напряжения питания, температуры.

Можно выделить два подхода построения контроллера смещения. Первый подход основан на применении аналоговых схем, данные решения могут быть реализованы в виде модулей с использованием дискретной ЭКБ или в виде интегральных микросхем. Второй подход – аналоговые интегральные решения с цифровым управлением.

Каждый из вариантов реализации отличается способом установки рабочего режима СВЧ УМ, габаритами изделий и вариантами эксплуатации. Функциональные схемы двух вариантов контроллеров смещения приведены на рис. 2.

Доступные решения схем контроллеров смещения представлены в источниках [8–11]. Информацию по законченным решениям отечественного производства на момент подготовки статьи найти не удалось.

Схемы контроллеров смещения с аналоговым и цифровым управлением имеют общие функциональные блоки. К базовым узлам относятся линейный стабилизатор напряжения, DC/DC-преобразователь, компаратор, операционный усилитель. Линейный стабилизатор напряжения предназначен для работы с высокими рабочими напряжениями от 20 до 80 В, выполняет функцию стабилизации и преобразования входного напряжения в низковольтное для более прецизионной работы последующих блоков. DC/DC-преобразователь инвертирует пониженное напряжение в отрицательное напряжение смещения. Компаратор контролирует уровень напряжения смещения, а операционный усилитель

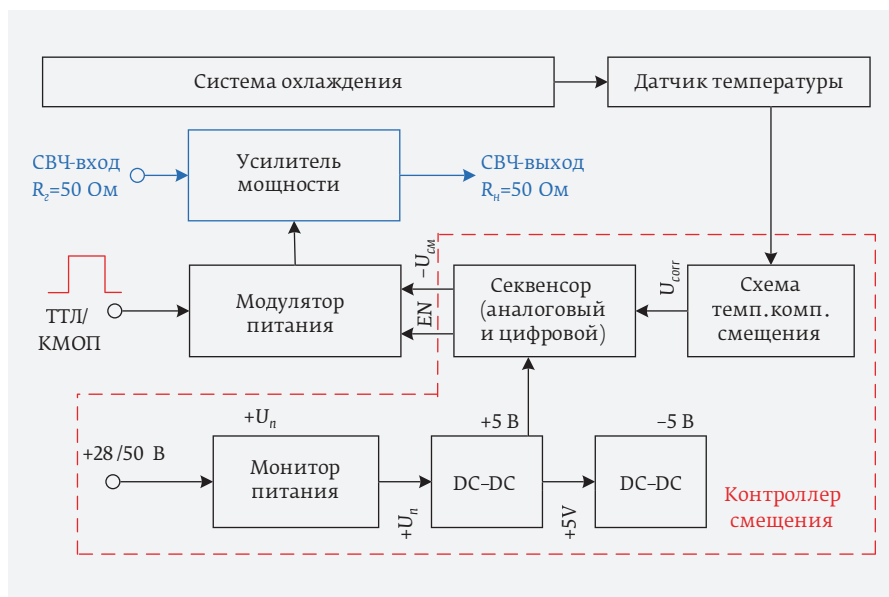


Рис. 1. Пример схемы управления питанием

общего назначения используется как выходной буфер. Разделение аналоговых схем по конструктивному исполнению на два типа (модули и микросхемы) обусловлено стоимостью, функциональными требованиями и ограничениями к занимаемой площади.

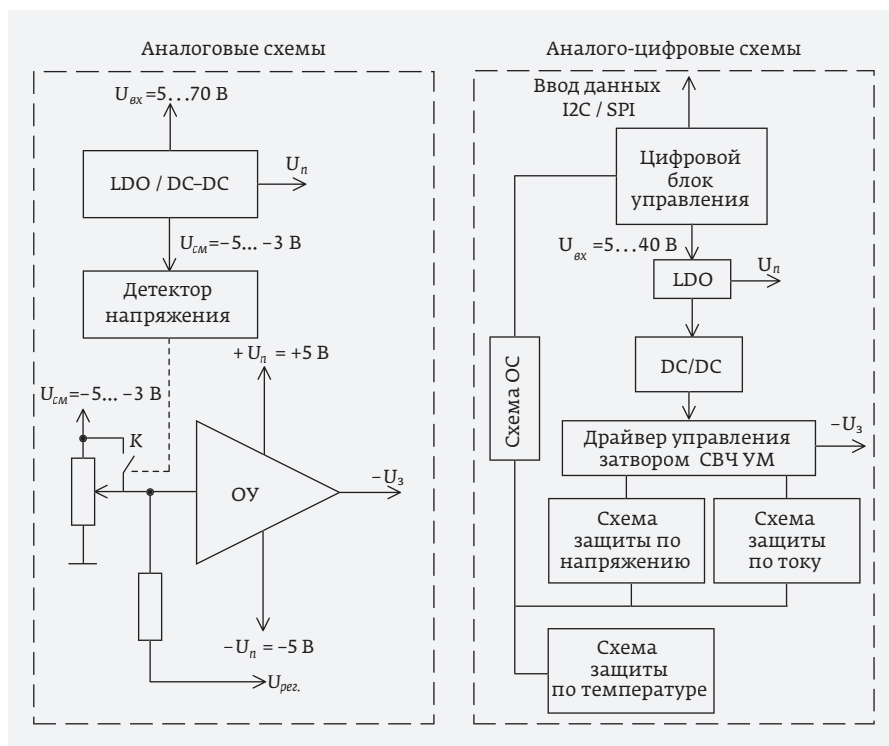


Рис. 2. Функциональные схемы вариантов контроллеров смещения

Компания Xsystor (США) предлагает специализированную линейку модульных решений контроллеров смещения с возможностью выбора встроенных опций и логики управляющего ТТЛ-сигнала. Другим вариантом модульного исполнения является MABC-001000-DP000L от компании MACOM (США). Переход от модульных решений к микросхемам для контроллеров смещения с аналоговым управлением, главным образом, продиктован тенденцией миниатюризации СВЧ УМ и схем управления питанием. Для рассмотренных микросхем контроллеров смещения с аналоговым управлением характерно наличие обратной связи с СВЧ УМ, что обеспечивает мгновенную стабилизацию тока стока УМ.

Примерами микросхем являются HMC920, HMC980 от Analog Devices (США). Стабилизация выходного тока основана на схеме «токовое зеркало». Входное напряжение микросхем ограничено значением 16,5 В, допустимый ток потребления – до 500 мА, то есть данные микросхемы подходят для маломощных СВЧ УМ, работающих в линейном режиме. Таким образом, преимуществом представленных на рынке микросхем с аналоговым управлением по сравнению с модульными является наличие обратной связи с СВЧ УМ, а недостатком – ограниченные параметры входного напряжения и выходного тока.

Развитие многоканальных радиосистем, таких как 5G (MIMO), значительно увеличило спрос на ИС управления питанием и оказало влияние на появление нового поколения микросхем контроллеров смещения с внедрением цифровой электроники. Интеграция цифровых блоков позволяет более гибко задавать параметры УМ настройкой доступных режимов, получая на выходе максимальные характеристики УМ. Меньшее количество дорожек на плате и внешних компонентов, по сравнению с аналоговыми решениями, ускоряет разработку СВЧ УМ. Контроллеры смещения с цифровым управлением отличаются от схем с аналоговым управлением особенностями эксплуатации: для настройки параметров схемы необходимо предварительно выполнить программирование требуемых режимов. При регистрации сбоя или ошибки работы контроллера смещения с цифровым управлением есть возможность программирования схемы с последующим срабатыванием защиты при повторении недопустимого режима, тем самым повышая надежность работы СВЧ УМ. Использовать при этом громоздкие цепи с внешними элементами не требуется. Управление выходными параметрами микросхемы осуществляется через протоколы I2C/SPI. Примерами таких микросхем являются ACT40000 от Qorvo (США), AFE10004RGER от Texas Instruments (США). В табл. 1 представлена сравнительная характеристика вариантов контроллеров смещения.

Из данных табл. 1 следует, что контроллеры с цифровым управлением превосходят модульные и ин-

тегральные решения с аналоговым управлением по доступным функциям. Ограничивающим фактором их применения являются особенности эксплуатации. Контроллеры смещения с аналоговым управлением представлены более широким номенклатурным рядом и не требуют глубокого изучения технических особенностей изделия для интеграции с СВЧ УМ. Модули контроллеров смещения с аналоговым управлением характеризуются большими габаритами по сравнению с интегральными решениями от Analog Devices и Qorvo, но в то же время позволяют работать с большими входными напряжениями, свыше 50 В.

МОДУЛЯТОРЫ ПИТАНИЯ

Модулятор необходим для обеспечения требуемого импульсного режима работы [14]. Для формирования импульсного СВЧ-сигнала выделяют четыре вида модуляции:

- модуляция по затвору при постоянном напряжении на стоке;
- модуляция по стоку при постоянном напряжении на затворе;
- модуляция по СВЧ-входу;
- комбинированная модуляция.

Варианты схем модуляции приведены на рис. 3.

Краткие данные по каждому из видов модуляции приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены результаты анализа литературных источников в части разработки модуляторов [15–19]. Из рассмотренных работ следует, что схемы модуляторов питания преимущественно строятся на основе одного или более МОП-транзисторов, используемых в качестве ключей, управление которыми осуществляется синхросигналами, поступающими с драйвера. Силовые каскады с использованием биполярных транзисторов распространены в меньшей степени из-за большей мощности управления биполярных транзисторов. Опционально схемы модуляторов могут быть оснащены защитными и фильтрующими цепями, датчиками уровней основных сигналов, цепями обратной связи, обеспечивающими компенсацию падения напряжения. Значения выходных параметров устройства при разных типах модуляции определяются конструкцией и особенностями эксплуатации СВЧ УМ.

По данным табл. 3 можно сделать вывод, что комбинированная модуляция по всем рассматриваемым параметрам превосходит модуляцию по стоку и затвору [15]. В свою очередь, данный тип модуляции отличается сложными схемотехническими решениями – наличием фильтров электромагнитных помех, микросхем DC/DC-преобразователей, контроллеров для создания и управления задержкой распространения управляющих сигналов, стабилизаторами напряжения и др. Комбинированная модуляция из-за сложности реализации используется реже двух других типов.

Таблица 1. Сравнение контроллеров смещения GaN-усилителей мощности

Параметр	HMC980LP4E (Analog Devices) [10]	ACT41000 (Qorvo) [11]	MAVC-00100-DP000L (MACOM) [12]	100X/200X (Xsystor) [13]
Исполнение	 QFN	 QFN	 Модуль	 Модуль
Тип управления	Аналоговое	Цифровое	Аналоговое	Аналоговое
Габариты изделия, мм	5,0×5,0×1,0	5,0×5,0×0,8	22,5×6,6×5,1	26,0×6,1×3,6
Диапазон напряжений питания, В	5,0...16,5	4,5...40,0	12...70	-6...0/28...80
Диапазон напряжений смещения, В	-2,5...1, 0...5	3...24	-8...-2	-4,3...-0,5
Максимальный выходной ток, А	1,6 (по стоку)	4,0 (по стоку)	–	0,3 (по затвору)
Встроенные функции	• Источники 5/-5 В; • сигнал PowerGood; • установка режима внешним резистором; • защита от перегрева; • защита от КЗ; • стабилизация тока в петле с ОС	• Программирование выходного напряжения и тока; • интерфейс I2C; • OCP; • OVP; • сигнал PowerGood; • стабилизация тока стока в замкнутой петле ОС; • режим CC, CV; • импульсное преобразование входной мощности	• Температурная компенсация; • встроенный драйвер внешнего MOSFET	• Источники 5/-5 В; • температурная компенсация (внешняя); • сигнал PowerGood
Режим модуляции	–	По затвору	По стоку	По стоку; по затвору

В данной статье рассматривается модуляция напряжением питания СВЧ-усилителя, форма огибающей которого имеет вид импульса, близкий к прямоугольному. Формирование импульса напряжения стока из постоянного напряжения питания происходит в схеме модулятора, основными компонентами которой являются силовой ключ (одиночный транзистор) или силовой каскад, а также драйвер. Функция драйвера заключается в преобразовании входного сигнала управления уровня ТТЛ или КМОП (далее – синхросигнал) в напряжения затворов силового каскада. Обычно драйверы реализуются в виде интегральных микросхем и на выходе содержат силовую

часть в виде полумостовой схемы, обеспечивающей необходимый уровень тока и быструю перезарядку паразитных емкостей силового ключа. Импульсное напряжение питания от силового ключа поступает на усилитель мощности. Для обеспечения питания и модуляции СВЧ-усилителей, как правило, используются специализированные схемы, разрабатываемые под конкретный усилитель мощности.

Компания Xsystor выпускает ряд силовых модулей – как одиночные силовые ключи (362P/362N, 332P/332N и 392P), так и полумостовые схемы (365CT, 335CT и 395CT) с различным уровнем выходного тока, причем

Таблица 2. Характеристики видов модуляции

Вариант модуляции	Время фронта/спада радио-импульса, нс	Подавление СВЧ-сигнала в паузе	Сложность реализации	Стоимость
По стоку (модуляция напряжения питания)	119/340	Полное	Средней сложности (необходимо использовать высоковольтную ЭКБ)	Средняя
По затвору (модуляция напряжения смещения)	>120	Частичное	Простая (работа с малыми токами и напряжениями)	Низкая
По входу СВЧ	220/1000	Полное	Средней сложности (характерна повышенная рассеиваемая мощность)	Средняя
Комбинированная	13/11	Полное	Сложная (необходима синхронизация)	Высокая

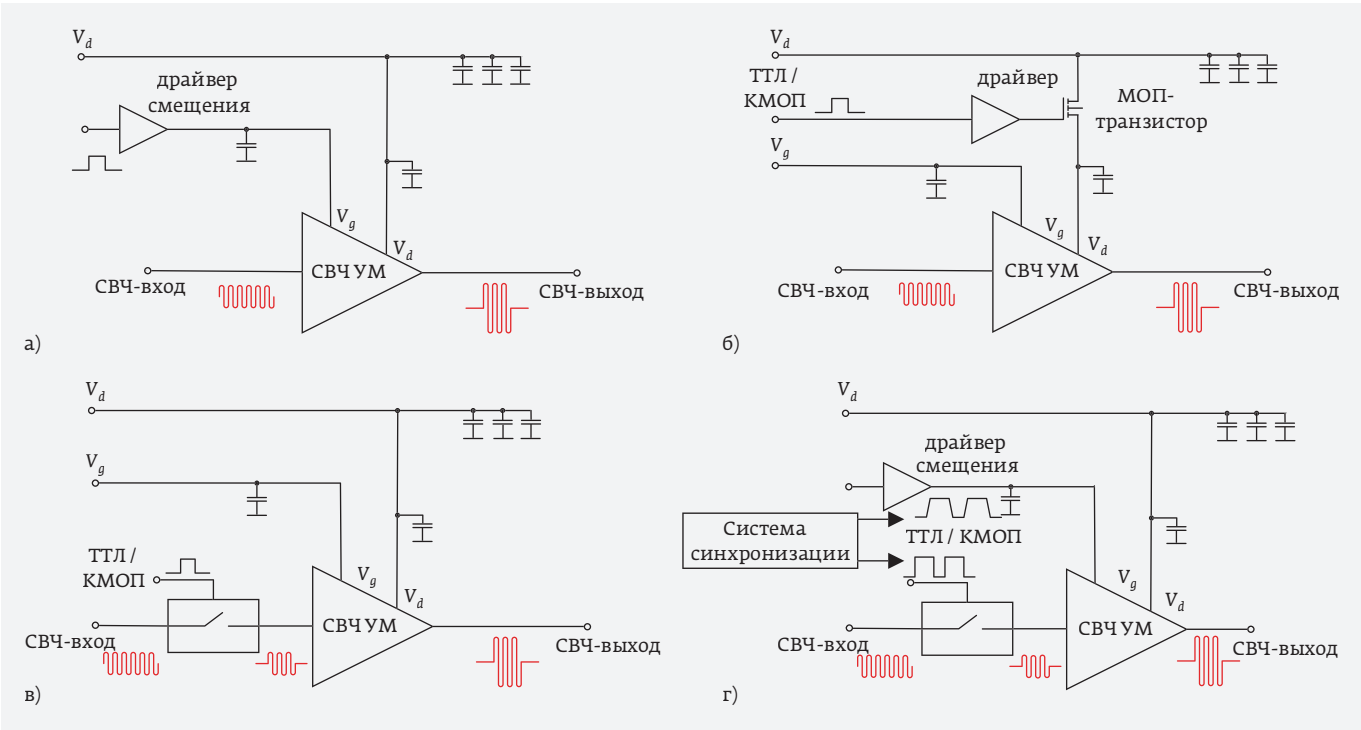


Рис. 3. Варианты схем модуляции: а – модуляция по цепи смещения; б – модуляция по цепи питания; в – модуляция по СВЧ-входу; г – комбинированная модуляция

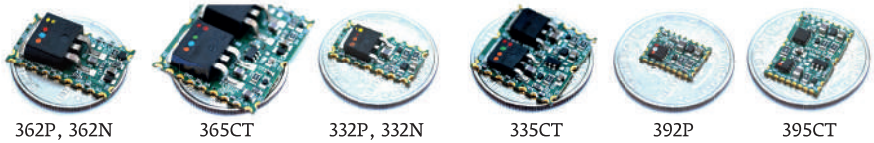


Рис. 4. Линейка модуляторов Xsystor [11]

подключение контроллера смещения с ключом унифицировано и не требует от пользователя дополнительных трудозатрат (рис. 4). Компания Texas Instruments предлагает в качестве силового

Таблица 3. Параметры различных типов модуляции

Параметр	Модулятор питания (литературный источник)					
	[15]	[16]	[17]	[18]	[19]	
Режим модуляции	Комбинированная	Сток	Затвор	Сток	Сток	Затвор
Время фронта/время спада, нс	12,5/11,1	53,7/53,9	80/24	–	–	–
Технология изготовления СВЧ УМ	GaN HEMT + GaAs FET	GaN HEMT + GaAs FET	GaN HEMT	GaN HEMT + GaAs MMIC	GaN HEMT	GaN HEMT
$P_{\text{вых}}$, Вт	100	100	45	250	100	870
S21, дБ	47	47	–	38,2	10	13,8
PAE, %	28,2	28,2	51	24,5	53	52,7
Длительность импульса, мкс	1-100	10	100	64	10	200
Частота импульсов, кГц	1-100	10	1	1,1	10	0,5



IF/RF & Microwave Design

advantex UNO-2XM 100 кГц – 21 ГГц

Малошумящий синтезатор частот

Уровень фазового шума: -140 дБн/Гц при отстройке 10 кГц @1 ГГц

Время перестройки: < 60 мкс

Шаг перестройки: 0.0001 Гц

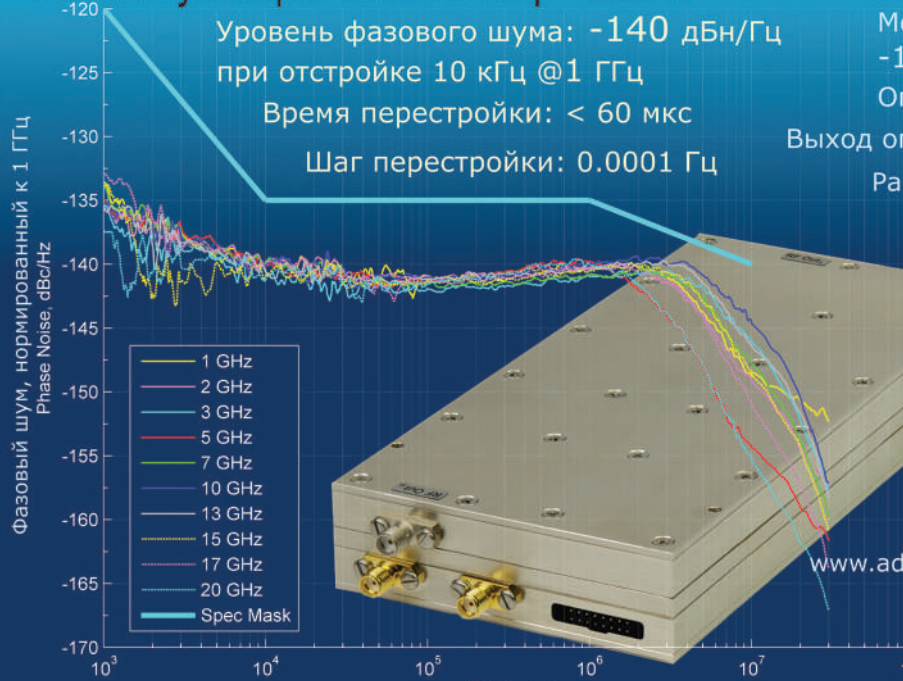
Мощность выходного сигнала: -10..+15 дБм, шаг 0,5 дБ

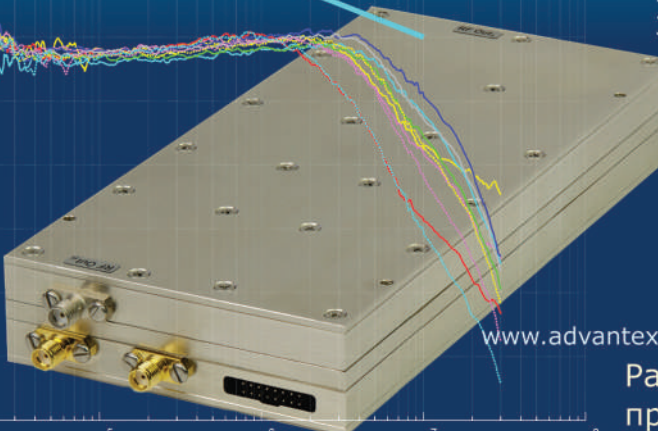
Опорный сигнал: 1-250 МГц

Выход опорной частоты: 10/100 МГц

Рабочий диапазон: -40...+60 °C

Габаритные размеры: 30,5 × 87,5 × 195,0 мм







Электронный каталог

www.advantex.ru/docs/adx_catalog_ru.pdf

Разработано и произведено в России!

www.advantex.ru

каскада микросхему LMG5200 [20]. Интегральное решение от Texas Instrument содержит драйвер управления силовыми ключами, включенными по схеме полумоста и два нормально-закрытых eGaN-транзистора. Данная схема, благодаря использованию eGaN в качестве силового каскада, отличается возможностью работы с высоким входным напряжением (до 80 В) и малыми временами фронта и спада выходного импульса (до 50 нс).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Системы управления питанием являются отдельным классом устройств, необходимым для безопасной эксплуатации GaN СВЧ УМ и достижения максимальных выходных параметров. Данный тип схем включает две основные части – контроллер смещения и модулятор питания. Серийно выпускаемые схемы управления питанием представлены достаточно узким номенклатурным рядом зарубежных производителей.

Разработка отечественных универсальных схем управления питанием позволит уменьшить сроки разработки, повысить функциональность контроля и мониторинга, уменьшить габаритные размеры, обеспечить технологическую независимость при производстве широкого круга изделий.

Во второй части цикла статей по данной теме будут рассмотрены технические особенности схем управления питанием, выполненных на отечественной и зарубежной электронной компонентной базе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Савченко Е.М., Першин А.Д., Кузьмин А.Ю.** СВЧ МИС широкополосных усилителей как универсальные компоненты современной радиоэлектронной аппаратуры // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. 2020. Т. 3, № 1. С. 75–97.
2. **Савченко Е.М., Будяков А.С., Гаранович Д.И., Огурцова К.М.** Состояние и перспективы развития интегральных схем программно-конфигурируемых радиочастотных передатчиков // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. Т. 1. С. 15–20.
3. **Лебедев А.А., Будяков А.С., Савченко Е.М.** Проектирование микроэлектронной аналоговой ЭКБ с улучшенными характеристиками в рамках синергетической парадигмы // Сборник материалов конференции «Микроэлектроника-2019». 2020. Т.1. С. 137–140.
4. **Lamarche M.** The benefits and challenges of using GaN technology in AESA radar systems. Military Embedded Systems // <https://militaryembedded.com/radar-ew/rf-and-microwave/> the-benefits-and-challenges-of-using-gan-technology-in-aesa-radar-systems
5. **Yuk K., Branner G.R., Cui C.** Future directions for GaN in 5G and satellite communications // Conference: 2017 IEEE 60th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)
6. Switched active bias control and power-on sequencing circuit for an amplifier. Hittite Microwave Corporation, Chelmsford, USA: патент, 2012. US 8,319,560 B2
7. Active bias control circuit for an amplifier and method of power up sequencing the same. Hittite Microwave Corporation, Chelmsford, USA: патент, 2012. US 8,319,559 B2
8. GaN transistor with integrated drain voltage sense for fast overcurrent and short circuit protection. GaN Systems Inc., Ottawa, Canada: патент, 2021. US 11,082,039 B2
9. Gate drivers and auto-zero comparators. Texas Instruments, Dallas. USA: патент, 2022. US 11,394,380 B2
10. <https://www.analog.com/en/index.html>
11. <https://www.qorvo.com/>
12. <https://www.macom.com/>
13. <https://www.xsystor.com>
14. **Савченко Е.М., Пронин А.А., Першин А.Д., Кузьмин А.Ю.** Особенности применения СВЧ-усилителей средней мощности в импульсном режиме работы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18, № 3. С. 803–806.
15. **Kim H.J., Cho W.J., Kwon J.H., Lee J.W.** An X-Band 100W GaN HEMT Power Amplifier Using a Hybrid Switching Method for Fast Pulse Switching. Progress In Electromagnetics Research B, Vol. 78. 1–14, 201.
16. **Dhanyal H.R., Ahmed A., Javed M., Javed T., Burney A., Ahsan N.** Design & Development of 45 Watt GaN HEMT Power Amplifier with High Speed Gate Switching for Pulsed Radar Application. Conference: 2018 15th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). January, 2018.
17. **Kanto K., Satomi A., Asahi Y., Kashiwabara Y., Matsushita K., Takagi K.** An X-band 250W solid-state power amplifier using GaN power HEMTs // IEEE Radio and Wireless Symp., PP. 77–80, Jan. 2008.
18. **Shigematsu H., Inoue Y., Akasegawa A., Yamada M., Masuda S., Kamada Y., Yamada A. et al.** C-band 340-W and X-band 100-W GaN power amplifiers with over 50% PAE // IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig., PP. 1265–1268, Jun. 2008.
19. **Mitani E., Aojima M., Sano S.** A kW-class AlGaIn/GaN HEMT power amplifier for S-band high power application // European Microwave Integrated Circuits Conf., PP. 176–179, Oct. 2007.
20. <https://www.ti.com/>

Генераторы Nosean серии **MSG5000**



Основные характеристики

- Диапазон частот: от 9 кГц до 20 ГГц
- Количество каналов: от 2 до 8
- Мощность выходного сигнала: от -30 до +13 дБм
- Поддержка аналоговой модуляции: АМ, ЧМ, ФМ, ИМ (минимальная длительность импульса 10 нс)
- Уровень фазового шума: -130 дБн/Гц на несущей 1 ГГц при отстройке 10 кГц

Сервисный центр:
+7 495 981 35 67
SERVICE@RSH-TECH.RU

Отдел продаж:
+7 495 981 35 60
INFO@RSH-TECH.RU

ООО «РШ ТЕХНОЛОГИИ»
WWW.RSH-TECH.RU

