

Увеличение мощности высокоэффективных усилителей СВЧ инверсного класса F

Мью Мин Тхант, Виталий Романюк (Национальный исследовательский университет «МИЭТ»)

Проведено сравнение схем двухканальных сумматоров мощностей с синфазными, противофазными и квадратурными каналами. Схемы усилителей с суммированием мощностей созданы на основе одноканального усилителя СВЧ инверсного класса F, на GaN-транзисторе структуры НЕМТ частоты 4 ГГц, с КПД 88% и выходной мощностью 13 дБм. Отмечены достоинства и недостатки различных усилителей с суммированием мощности по эффективности, уровню шума, величине высших гармоник в спектре выходной мощности, согласованием с источником колебаний.

Введение

Для СВЧ-усилителей мощности с увеличенным КПД применяют полигармонические режимы работы транзисторов [1], из которых наиболее эффективен инверсный класс F [2]. Выходная мощность усилителя на одном транзисторе определяется параметрами его конструкции и полупроводника, из которого он изготовлен. Простейшим способом увеличения мощности усилителя является разделение его напряжения на два канала, мощности в которых усиливаются и далее суммируются. Входные напряжения каналов могут быть синфазными, противофазными, квадратурными.

В настоящей работе разработана схема высокоэффективного усилителя мощности инверсного класса F на транзисторе структуры НЕМТ, изготовленном на базе GaN, и проведено сравнение трёх вариантов суммирования мощностей:

- деление и суммирование мощности с помощью синфазных каналов;
- применение делителей и сумматоров с противофазными каналами;
- использование квадратурных каналов.

Режимы работы транзисторов оптимизированы по максимуму коэффици-

ента полезного действия $\eta = P_1/P_0$ и КПД добавленной мощности:

$$\text{PAE} = (P_1 - P_{\text{вх}})/P_0,$$

где P_1 – выходная мощность первой гармоники, $P_{\text{вх}}$ – входная мощность усилителя, P_0 – мощность, потребляемая транзисторами из источника питания.

Одноканальный усилитель мощности инверсного класса F на GaN-транзисторе структуры НЕМТ

В качестве основы разработана схема усилителя на одном интегральном GaN-транзисторе структуры НЕМТ длиной затвора 0,25 и шириной 200 мкм [3]. Рабочая частота усилителя 4 ГГц, входная мощность 10 дБм. Электрическая схема одноканального усилителя приведена на рис. 1.

В схеме, помимо разделительных ёмкостей C_1, C_3 , блокировочной индуктивности L_2 , имеется входная C_2, L_1 и выходная, согласующие цепи L_3, C_4 . Блокировочным элементом цепи смещения, а также формирователем формы выходного тока транзистора является отрезок линии TL1 длиной около четверти длины волны входной частоты. Для формирова-

ния формы напряжения на стоке включена подсхема S1, показанная на рис. 2, содержащая последовательно соединённые параллельные резонансные контуры [4]. Контур LC1 настроен на частоту 4 ГГц, а LC2 – на вторую гармонику 8 ГГц.

Путём выбора режима работы транзистора по постоянному току и применения четвертьволнового отрезка линии в цепи смещения получена форма тока стока транзистора, содержащая, кроме первой, достаточно выраженную третью гармонику. Помимо этого, в спектре выходного тока имеется небольшая вторая гармоника I_{a2} . Высокое значение модуля импеданса транзистора на частоте второй гармоники $Z(2\omega_{\text{вх}})$, где $\omega_{\text{вх}}$ – входная частота, привело к созданию напряжения на стоке, в спектре которого существенны две гармоники: первая U_{a1} и вторая $U_{a2} = I_{a2}Z(2\omega_{\text{вх}})$ (2).

Зависимости от времени тока стока и напряжения на стоке одноканального усилителя приведены на рис. 3. КПД одноканального усилителя $\eta = 88\%$, PAE = 84% на частоте 4 ГГц при коэффициенте усиления $K_p = 12,3$ дБ. Так как в полигармонических усилителях выходной ток и выходное напряжение транзистора содержат высшие гармоники, для получения высокого КПД требуется выполнения условия $P_1 \gg P_n$, n – номер высшей гармоники (2, 3, 4, ...) [5].

На рис. 4 показан спектр выходной мощности одноканального усилителя. В спектре выходной мощности одноканального усилителя мощности высших

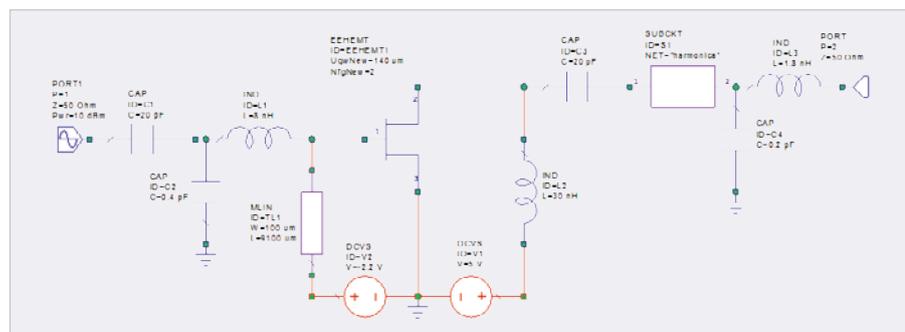


Рис. 1. Электрическая схема усилителя мощности инверсного класса F на одном GaN-транзисторе

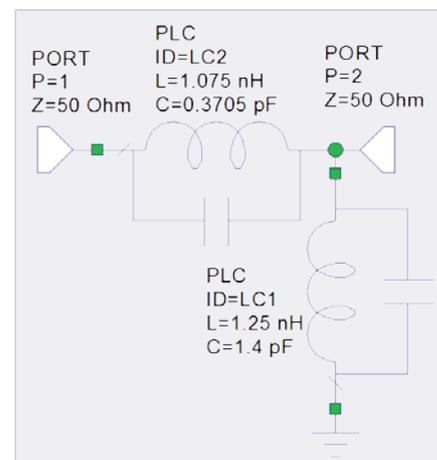


Рис. 2. Схема выходной формирующей цепи

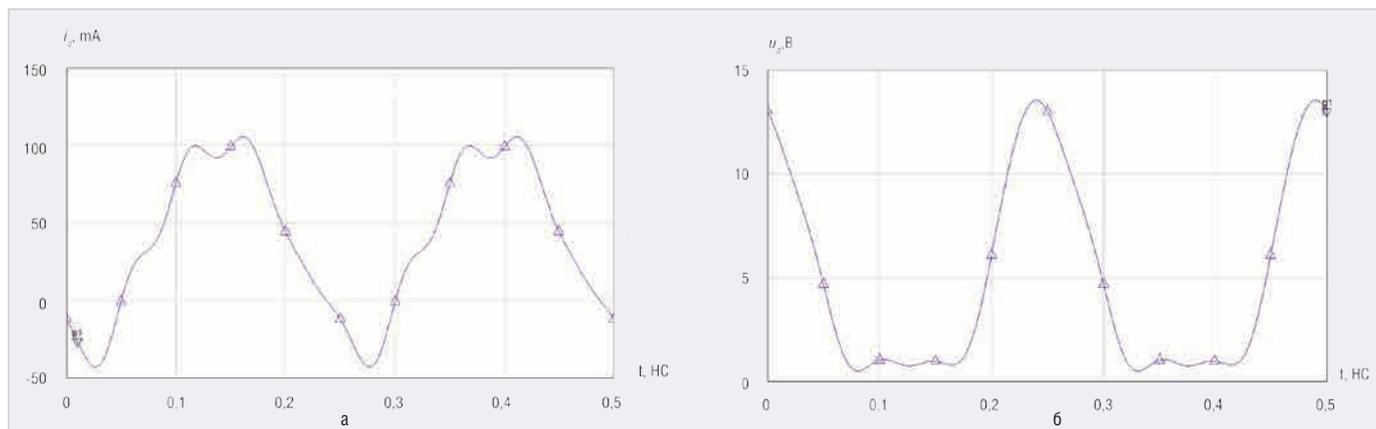


Рис. 3. Зависимости в однотактном усилителе инверсного класса F: а) от времени тока стока; б) от напряжения на стоке

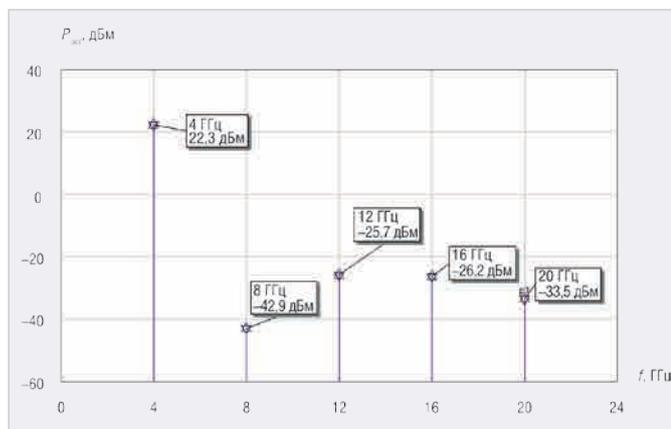


Рис. 4. Спектр выходной мощности однотактного усилителя инверсного класса F

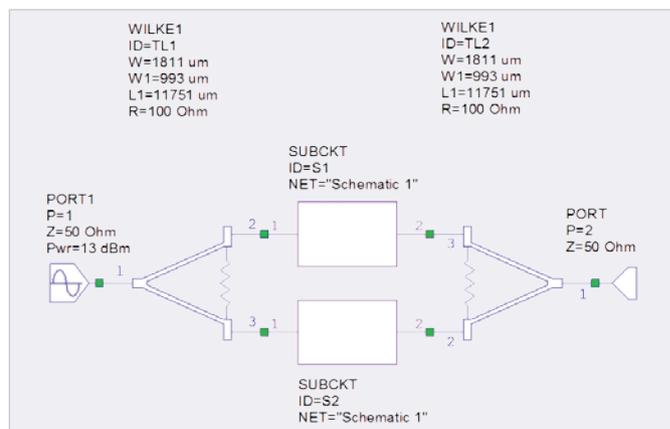


Рис. 5. Сумматор мощностей с синфазными каналами

гармоник существенно меньше первой: наибольшая из высших гармоник, третья, меньше основной на 48 дБ, вторая гармоника меньше первой на 65 дБ.

Выходную мощность усилителей класса F увеличивают в двухканальных схемах. Для деления и суммирования мощностей применяют мостовые устройства: мост Уилкинсона (синфазные каналы), кольцевой мост (противофазные каналы), квадратный мост (квадратурные каналы).

Усилитель мощности с синфазными каналами

Схема усилителя с синфазными каналами приведена на рис. 5. В качестве делителя и сумматора мощностей использован мост Уилкинсона. В каждом канале имеется подсхема Schematic 1, соответствующая однотактному усилителю (см. рис. 1). Входная мощность усилителя с синфазными каналами 13 дБм, коэффициент усиления мощности равен 12,12 дБ.

Усилитель мощности с противофазными каналами (двухтактный усилитель)

Двухтактный усилитель выполнен на кольцевых мостах (см. рис. 6). С помо-

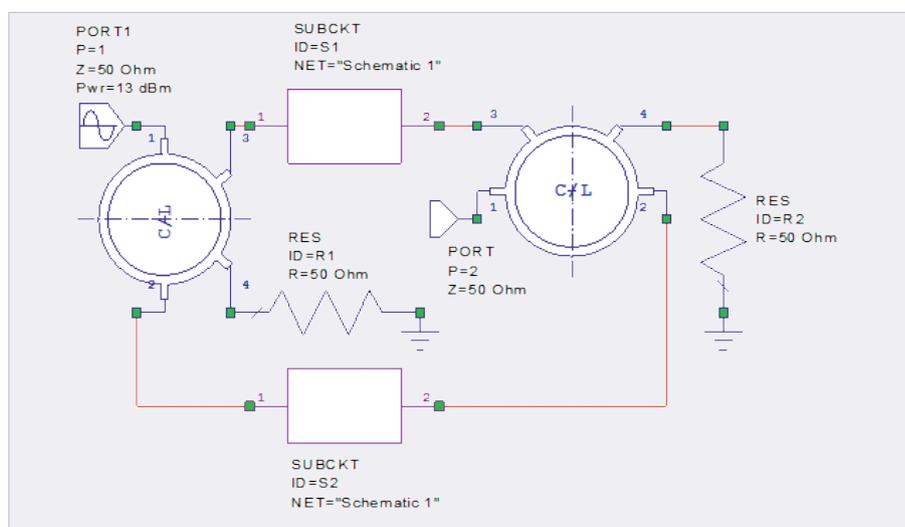


Рис. 6. Двухтактный усилитель мощности

щью первого моста входные колебания разделяются на два равных по мощности канала, напряжения на входе сдвинуты по фазе на 180°. На втором кольцевом мосте мощности каналов суммируются. Подсхемы Schematic 1 соответствуют однотактному усилителю, схема которого представлена на рис. 1. Выходная мощность первой гармоники двухтактного усилителя равна 25,27 дБ.

Квадратурный усилитель мощности

На базе усилителя на одном транзисторе составлена схема квадратурного усилителя, в которой входная мощность с помощью первого квадратного моста делится пополам на два канала. При этом входные напряжения сдвинуты по фазе на 90°. Мощность каждого канала усиливается с помощью однотактных усилителей, схема которых соответ-

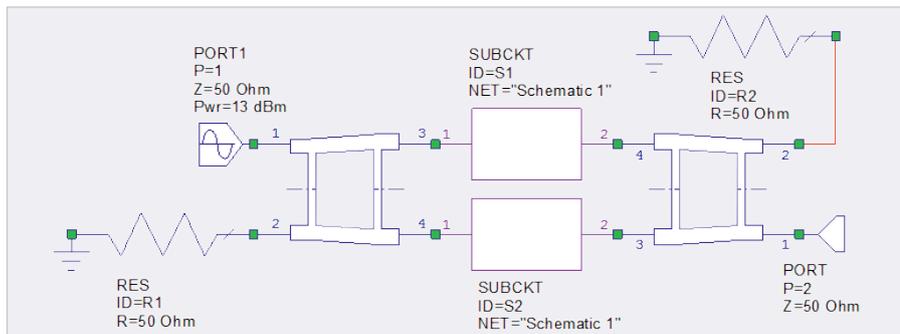


Рис. 7. Схема квадратурного усилителя

стует рисунку 1 и суммируется на втором квадратном сумматоре (см. рис. 7). Коэффициент усиления мощности квадратурного усилителя 12,27 дБ при входной мощности составляет 13 дБм.

Сравнение вариантов суммирования мощностей

В комплексе программ Microwave Office (MWO) измерены основные параметры усилителей с суммированием мощностей: КПД добавленной мощности PAE, коэффициент шума в режиме большого сигнала, спектр выходной мощности, коэффициент отражения от входа усилителя. Зависимость PAE от частоты для трёх типов усилителей с суммированием показана на рис. 8. Коэффициент шума в зависимости от частоты измерен в нелинейном режиме работы программы MWO [6] (см. рис. 9). Для измерения коэффициента отражения от входа усилителя между источником входных колебаний и усилителем включён двойной направленный ответвитель, который изображён на рисунке 10.

Амплитуда тока I_{in} , измеряемого амперметром AMP1 на сопротивлении R_1 , позволяет судить о падающей мощности, амплитуда тока I_{out} амперметра AMP2 – об отражённой мощности. Модуль коэффициента отраже-

ния $|\Gamma| = I_{out} / I_{in}$. Коэффициент шума усилителей с синфазными и противофазными каналами примерно одинаков и соответствует шуму одиночного усилителя. Наиболее шумящим оказался усилитель с квадратурными каналами. При частоте входных колебаний 4 ГГц коэффициент шума ~4 дБ.

Измеренные в MWO параметры усилителей с суммированием мощности и однотактного усилителя приведены в таблице. Там же показаны рассчитанные КПД η , входная мощность однотактного усилителя 10 дБм, усилителей с суммированием 13 дБм.

В таблице приняты следующие обозначения: $\Delta P_{1-2} = P_1 - P_2$, $\Delta P_{1-3} = P_1 - P_3$, P_1, P_2, P_3 – мощности соответствующих гармоник. По результатам моделирования в MWO можно сделать следующие выводы:

- наряду с двойным увеличением выходной мощности, КПД усилителей с суммированием лишь немного отличается от η одиночного усилителя. Наибольший КПД в усилителе с синфазными каналами $\eta = 88\%$, наименьший КПД в квадратурном усилителе равен 85%;
- существенное преимущество квадратурного усилителя в наименьшем коэффициенте отражения от входа усилителя. Даже при плохо настроенном

однотактном усилителе ($|\Gamma| = 50\%$) коэффициент отражения квадратурного усилителя $|\Gamma| < 2\%$. Этот результат соответствует другим публикациям [5];

- уровень наибольших спектральных составляющих высших гармоник (второй и третьей) в усилителях с суммированием несколько меньше, чем в одиночном усилителе. Наименьшая величина высших гармоник в квадратурном усилителе: мощность второй гармоники меньше основной на 67,5 дБ, мощность третьей гармоники – на 52 дБ, в то время как в одиночном усилителе эти показатели равны 65 и 50 дБ.
- коэффициент шума в режиме больших сигналов наибольший в квадратурном усилителе.

Заключение

Разработана схема однотактного усилителя мощности на интегральном GaN-транзисторе структуры НЕМТ, имеющая КПД 88%, на частоте 4 ГГц с выходной мощностью 22,3 дБм. Проведено сравнение трёх вариантов суммирования мощностей однотактных усилителей: с синфазными, противофазными и квадратурными каналами, построенными на базе однотактного усилителя.

Наибольший КПД наблюдается в усилителе с синфазными каналами на мостах Уилкинсона, этот КПД не меньше, чем в одиночном усилителе. Достоинство усилителя с квадратурными каналами – существенно меньший коэффициент отражения, чем в одиночном и других видах усилителей с суммированием. Кроме того, в спектре выходной мощности квадратурного усилителя меньший уровень высших гармоник. Однако квадратурный усилитель имеет недостаток – более высокий уровень шума в режиме больших амплитуд колебаний.

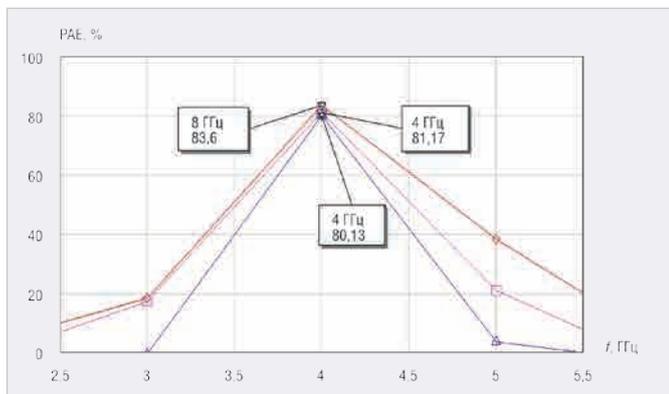


Рис. 8. Зависимость от частоты КПД добавленной мощности усилителей инверсного класса F с двумя каналами (◊ – синфазными, ◻ – противофазными, ◻ – квадратурными)

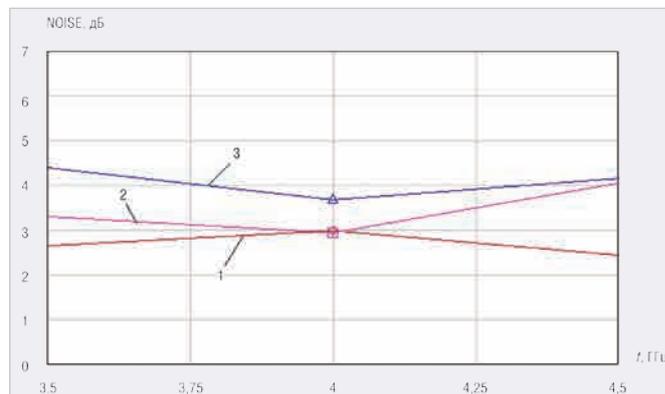


Рис. 9. Зависимость коэффициента шума усилителей с суммированием мощностей от частоты (1 – синфазные каналы, 2 – противофазные, 3 – квадратурные)

Литература

1. *Тхант М. М., Романюк В. А.* Монолитные микроволновые интегральные схемы высокоэффективных усилителей мощности (обзор литературы). Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 6. С. 52–65.
2. *Гадзиковский А. Г.* Усилители мощности инверсного класса F – эффективное средство улучшения энергетических характеристик радиопередатчиков. Вестник ЮУрГУ. Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2018. Т. 18. № 1. С. 75–82.
3. *Гуминов Н. В., Тхант М. М., Романюк В. А., Шахмадов Д. П.* Сравнение характеристик и параметров СВЧ-транзисторов структур НЕМТ, изготовленных из GaAs и GaN. Известия вузов. Электроника. 2019. № 24(1). С. 43–50.
4. *Rassokbina Y.V., Krizhanovski V.G., Colantonio P., Giofre R.* Inverse class-F power amplifier using slot resonators as a harmonic filter. International Journal of Microwave and Optical Technology. 2014. № 9(1). 49–53.
5. *Dellier S., Debaene T. and Peragin E.* GaN High-Efficiency S-band Power Amplifier with Power Flexibility from 1 to 10 Watts. 2014 IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications (PAWR). 2014.

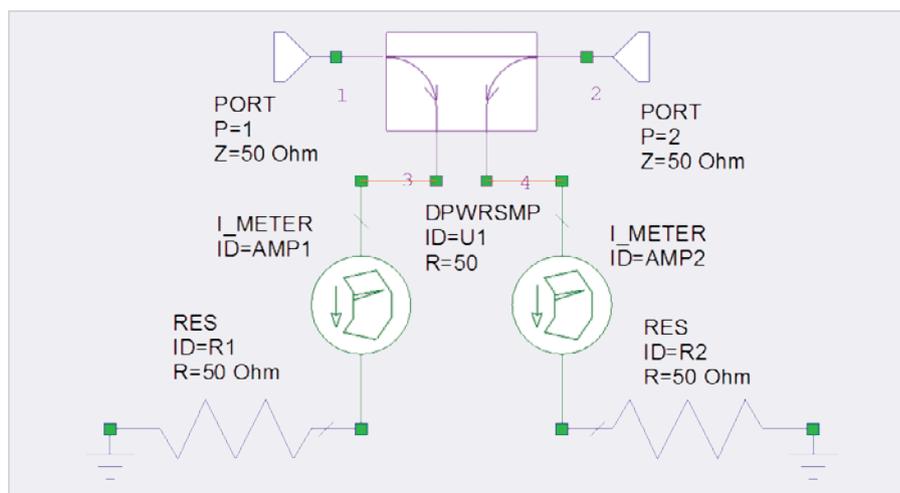


Рис. 10. Схема для измерения коэффициента отражения от входа транзистора

Параметры усилителей

Усилители	Выходная мощность P_{out} , дБм	η , %	PAE, %	NOISE, дБ	ПГ, %	ΔP_{1-2} , дБ	ΔP_{1-3} , дБ
Однотактный	22,3	88	84	3	50	65	48
С синфазными каналами	25,1	88	83,6	3	44	64	49
Двухтактный	25,3	85	81	3	49	67	46
Квадратурный	25,3	85	80	3,7	1,9	67,5	52

6. *Бахвалова С. А., Романюк В. А.* Основы моделирования и проектирования

радиотехнических устройств Microwave Office. СОЛОН-Пресс. М. 2016.



Надежные тестовые решения требуют лучших технологий



РАЗРАБОТКА

Получайте полностью работоспособные опытные образцы



ПРОИЗВОДСТВО

Сделайте производственную линию совершенной с технологиями JTAG



СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ

Ремонтируйте цифровые платы даже при отсутствии CAD-данных на них



JTAG TECHNOLOGIES 25

We are boundary-scan.®

Реклама

www.jtag.com • www.jtaglive.com • +7 812 602 09 15 • russia@jtag.com