

КОМБИНИРОВАНИЕ СИНТЕТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО УСИЛЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-11-16

Варламов Олег Витальевич,
*Московский технический университет связи
 и информатики, Москва Россия,
vov@mtuci.ru*

Нгуен Данг Кань,
*Московский технический университет связи
 и информатики, Москва Россия,
nguyendangcanh1319951@gmail.com*

Грычkin Сергей Евгеньевич,
*Московский технический университет связи
 и информатики, Москва Россия,
sg@radiotest-mtuci.ru*

Manuscript received 05 July 2021;
Accepted 02 August 2021

Ключевые слова: усилитель мощности, КПД, дефазирование, сложение мощности, импульсно-ступенчатая модуляция, раздельное усиление, шифротно-импульсная модуляция, широкополосная радиосвязь

Для усиления современных телекоммуникационных радиосигналов, имеющих высокий пик-фактор, с высоким КПД используются ключевые режимы работы транзисторов и синтетические методы усиления. Наиболее распространенными из них являются метод Кана (раздельное усиление составляющих) и метод дефазирования. Однако применение этих методов имеет ряд технологических (по возможностям элементной базы) ограничений по ширине полосы частот и динамическому диапазону усиливаемого сигнала. Для расширения области применения высокoeffективных радиочастотных усилителей мощности рассматриваются возможности комбинирования нескольких различных синтетических методов усиления. Получены выражения для теоретически достижимого КПД при комбинировании метода дефазирования с мостовым сумматором мощности и импульсно-ступенчатой модуляцией напряжения питания. Определена зависимость среднего КПД от количества уровней питающего напряжения. Для усилителя с раздельным усилением составляющих определяется минимально необходимая ширина импульса ШИМ модулятора в зависимости от ширины полосы усиливаемого ВЧ сигнала и его динамического диапазона. Обсуждаются варианты зависимости этих характеристик от количества уровней питающего напряжения при совместном использовании ШИМ и импульсно-ступенчатой модуляции напряжения питания. Формулируются направления дальнейших исследований.

Информация об авторах:

Варламов Олег Витальевич, д.т.н., профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Нгуен Данг Кань, аспирант, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Грычkin Сергей Евгеньевич, аспирант, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия

Для цитирования:

Варламов О.В., Нгуен Д.К., Грычkin С.Е. Комбинирование синтетических методов высокoeffективного высокочастотного усиления // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №9. С. 11-16.

For citation:

Varlamov O.V., Nguyen D.C., Grychkin S.E. (2021) Combination of synthetic high-performance RF amplification techniques. *T-Comm*, vol. 15, no.9, pp. 11-16. (in Russian)

1. Введение

Усилитель мощности радиочастотного тракта является наиболее энергоемким узлом любого передающего радиооборудования и во многом определяет его массогабаритные характеристики (через соответствующие системы электропитания и охлаждения), а также время эксплуатации от одного источника батарей (время жизни) для мобильных устройств.

Достижение высокого КПД усилителя мощности возможно в ключевом режиме работы (классы D, E, F), когда активный прибор поочередно находится в состоянии насыщения (полностью открыт) либо отсечки (полностью закрыт). Потери в этом случае определяются соотношением сопротивления насыщения активного прибора к приведенному сопротивлению нагрузки (активные потери), а также, в ряде случаев, выходной емкостью активного прибора - коммутативные потери. Данные классы усиления и особенности их применения в зависимости от назначения усилителя мощности широко описаны в литературе [1-5]. Фильтрация высших гармоник при использовании ключевых режимов работы необходима в несколько большей степени, чем при использовании режимов работы классов В или С, но не настолько существенно [6, 7]. Однако, непосредственно в ключевом режиме могут усиливаться только сигналы с постоянной амплитудой (с частотной либо фазовой модуляцией).

Современные системы связи и вещания [8-10] для повышения спектральной эффективности используют амплитудно-фазовые (АФМ) методы модуляции (например, OFDM), отличающиеся высоким значением пик-фактора (до 10 дБ) и требующие высокой линейности от усилителя мощности для выполнения требований на электромагнитную совместимость. Для усиления таких сигналов с помощью ключевых режимов работы применяют синтетические методы усиления: метод Кана [11-13], метод дефазирования [14-15], цифровое усиление мощности [16], дельта-сигма модуляцию [17].

Статья организована следующим образом. В следующем разделе описывается краткая история развития разработки и применения синтетических методов для высокоеффективного усиления радиочастот. В разделе 3 анализируются радиочастотные усилители мощности с дефазированием. Для совместного использования метода дефазирования с мостовым сложением мощности и импульсно-ступенчатой модуляции напряжения источника питания определяется зависимость среднего КПД от числа уровней напряжения питания. В разделе 4 для усилителя по методу Кана определяется минимально необходимая длительность импульса ШИМ модулятора в зависимости от ширины полосы радиочастот усиливаемого сигнала и его динамического диапазона. Обсуждаются варианты размена этих характеристик на число уровней напряжения питания при совместном использовании импульсно-ступенчатой модуляции. В разделах 3 и 4 также формулируются направления дальнейших исследований. В разделе 5 приведены выводы по работе.

2. Краткая история развития

Разработку и применение синтетических методов для высокоеффективного усиления радиочастот вызвала отрасль мощного радиовещания в диапазонах частот НЧ, СЧ и ВЧ. Мощности вещательных передатчиков составляли сотни кВт – единицы МВт, и повышение КПД приводило с существенной экономии потребляемой электроэнергии и стоимости

вещания. При появлении потенциальной перспективы перехода к цифровому радиовещанию, выяснилось, что технические характеристики отдельных методов с использованием имеющейся элементной базы уже не удовлетворяют растущим требованиям. Например, для достижения коэффициента гармоник, не превышающего 1% в передатчике с амплитудной модуляцией (типичное значение), достаточно 7 разрядов цифрового тракта. Для передатчиков АФМ сигналов, в частности, сигнала цифрового радиовещания стандарта Digital Radio Mondiale (DRM), допустимая величина искажений типа "отсечка" составляет не более 0,1% от амплитудной характеристики [18], что соответствует 10 разрядам цифрового тракта.

По этой причине были разработаны варианты комбинированного использования синтетических методов. Например, в тракт огибающей передатчиков диапазона ВЧ с импульсно-ступенчатым модулятором (ИСМ) стали добавлять одну ячейку с ШИМ модуляцией – для снижения искажений огибающей усиливаемого сигнала при малых амплитудах, к которым особенно чувствительны современные АФМ сигналы. В передатчики диапазонов НЧ и СЧ с цифровым формированием огибающей стали добавлять одну ячейку с модуляцией методом дефазирования – также для устранения искажений вблизи нуля амплитудной характеристики.

Описанные методы были разработаны для применения в передатчиках очень большой мощности, которая генерировалась большим (десятками и сотнями) количеством одновременно работающих блоков (или переключаемых источников питания в случае с ИСМ модулятором). Использование подключения различного количества блоков для "грубого" формирования амплитудной характеристики с последующей "линеаризацией" ее самым маломощным блоком было достаточно очевидным решением.

В отличии от передатчиков радиовещания диапазонов частот НЧ, СЧ и ВЧ, в радиопередающих устройствах КВ радиосвязи и УКВ радиовещания в большинстве случаев мощности гораздо меньше и составляют сотни Ватт – единицы киловатт. Такие уровни мощности на современной элементной базе могут быть получены с одной – двух (иногда нескольких) усилительных ячеек. Малое количество усилительных ячеек делает нецелесообразным использование цифровых методов формирования огибающей (к тому же, осуществление непосредственного сложения мощностей отдельных блоков в диапазонах ВЧ и УВЧ гораздо более проблематично, чем в диапазонах НЧ и СЧ [15]). Таким образом, в данных приложениях получило распространение использование метода раздельного усиления с ШИМ модулятором. В качестве перспективного направления рассматривается возможность использования методов дефазирования – в диапазоне ВЧ с непосредственным сложением мощностей, а в диапазоне ОВЧ – с мостовым суммированием.

Рассмотрим существующие ограничения данных методов и предложения по их преодолению.

3. Радиочастотные усилители мощности с дефазированием

Радиочастотные усилители мощности (УМ) с дефазированием известны с 30-х годов XX века [19]. Они были разработаны для повышения КПД и линейности радиовещательных передатчиков с амплитудной модуляцией. Коммерческое использование в передатчиках фирмы RCA осуществлялось

лялось под названием "ampliphase". В передатчиках диапазонов ОВЧ и СВЧ общее название метода дефазирования обычно называют "LINC," – как акроним от "linear amplification using nonlinear components" – линейное усиление с использованием нелинейных компонентов [14].

Упрощенная блок-схема УМ с дефазированием представлена на рисунке 1. Идеальные канальные сигналы описываются выражениями [20]:

$$S_1(t) = U \cdot \cos(\omega t + \arccos(U_{in}) + \theta);$$

$$S_2(t) = U \cdot \cos(\omega t - \arccos(U_{in}) + \theta);$$

где $U_{in} = U / U_{max}$ – нормированное входное напряжение огибающей.

Разница фаз между канальными сигналами составит:

$$\varphi = 2 \arccos(U_{in}).$$

Рассмотрим использование мостового сложения мощности, обеспечивающего развязку между двумя усилительными трактами и работу их на согласованную нагрузку. Работа на согласованную нагрузку уменьшает искажения амплитудной (AM-AM) и фазоамплитудной (AM-PM) характеристик, свойственных вариантам реализации, использующих метод Ширекса [19].

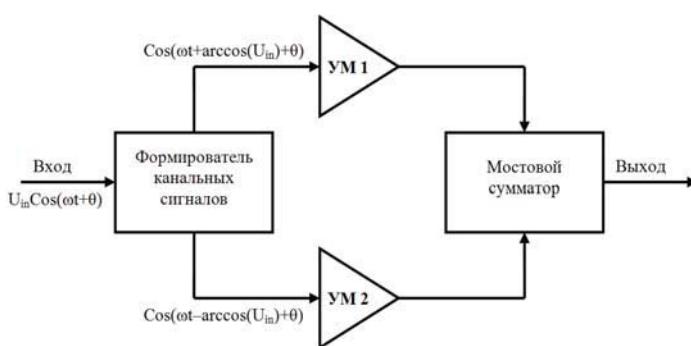


Рис. 1. Упрощенная блок-схема УМ с дефазированием

Рассмотрим мостовое сложение мощности (рис. 2)

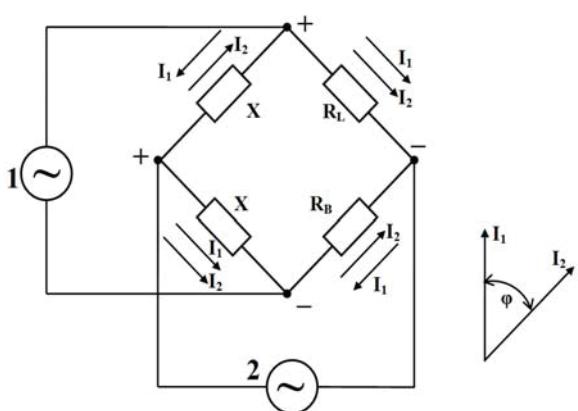


Рис. 2. Протекание токов в мостовом сумматоре мощности

Обозначим:

$$I_2 = K I_1 e^{j\varphi} = K I_1 (\cos \varphi + j \sin \varphi),$$

где $K = I_2 / I_1$ – отношение токов складываемых сигналов, φ – разность фаз между ними. Ток, протекающий через сопротивление нагрузки, равен:

$$I_L = I_1 + I_2 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos \varphi},$$

а мощность в нагрузке

$$P_L = 0.5 I_L^2 R_L = 0.5 I_1^2 R_L (1 + K^2 + 2K \cos \varphi).$$

Ток, протекающий через сопротивление балласта, равен:

$$I_B = I_1 - I_2 = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 - 2I_1 I_2 \cos \varphi},$$

а мощность в балласте

$$P_B = 0.5 I_B^2 R_B = 0.5 I_1^2 R_B (1 + K^2 - 2K \cos \varphi).$$

КПД идеальной (без учета потерь в элементах) мостовой схемы суммирования мощности при равных значениях сопротивлений нагрузки и балласта:

$$\eta = \frac{P_L}{P_L + P_B} = \frac{1 + K^2 + 2K \cos \varphi}{1 + K^2 + 2K \cos \varphi + 1 + K^2 - 2K \cos \varphi} = \frac{1 + K^2 + 2K \cos \varphi}{2(1 + K^2)}.$$

При равенстве токов складываемых сигналов ($K = 1$) КПД идеальной (без собственных потерь) мостовой схемы суммирования выражается как:

$$\eta = (1 + \cos \varphi) / 2 \quad (\text{рис. 3a}),$$

а КПД усилителя мощности с дефазированием, соответственно, как (рис. 3b):

$$\eta = 0.5 \eta_{RF} (1 + \cos(2 \arccos(U_{in}))) = \eta_{RF} U_{in}^2,$$

где η_{RF} – КПД ВЧ усилителя.

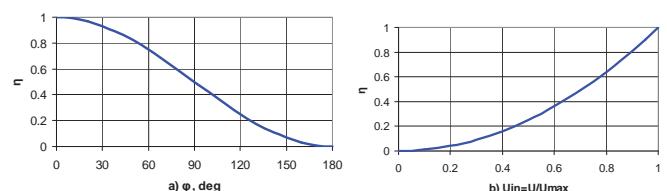


Рис. 3. Зависимость КПД идеального мостового сумматора мощности от разности фаз (a). Зависимость КПД идеального УМ с дефазированием от нормированной огибающей входного сигнала (b)

При одновременном применении метода дефазирования и импульсно-ступенчатой модуляции напряжения питания ВЧ УМ или разновидности метода цифрового формирования огибающей с использованием ВЧ УМ различной мощности, теоретически достижимый КПД можно записать как:

$$\eta = \eta_{RF} \begin{cases} (U_{in}/U_n)^2, & U_{n-1} < U_{in} \leq U_n \\ \dots \\ (U_{in}/U_i)^2, & U_{i-1} < U_{in} \leq U_i \\ \dots \\ (U_{in}/U_1)^2, & 0 < U_{in} \leq U_1 \end{cases},$$

где n – число уровней квантования.

Графическое представление зависимости КПД от уровня усиливаемого сигнала при равномерной шкале квантования для $n=1, 4$ и 8 представлено на рисунке 4.

Рассчитанная зависимость среднего КПД от числа уровней квантования n (без учета статистики распределения амплитуд огибающей усиливаемого сигнала) приведена на рисунке 5. Как видно из рисунка 5, значение n около восьми представляется достаточно разумным компромиссом между средним КПД и сложностью реализации УМ с дефазированием и импульсно-ступенчатой модуляцией напряжения питания. Действительно, такой ИСМ модулятор может быть реализован на основе всего трех гальванически развязанных источников питания, выходные напряжения которых находятся в двоичном соотношении, как, например, в [21]. Применение ступенчато-регулируемого источника питания также упрощает схемотехническую реализацию широко известной системы рекуперации энергии из балластной нагрузки мостового сумматора [22, 23] и повышает ее КПД за счет уменьшения динамического диапазона преобразователя напряжения.

Дальнейшим направлением работы будет являться моделирование схемы с целью определения длительности и формы переходных процессов, изменения коэффициента усиления (AM-AM) и фазового сдвига (AM-PM) ВЧ УМ при изменении напряжения питания, и внесение этих изменений в алгоритм работы формирователя канальных сигналов как элемента цифровых предыскажений.

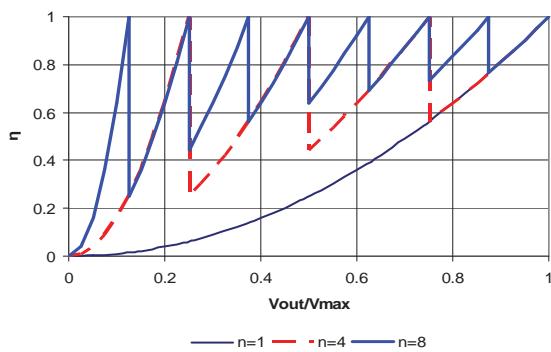


Рис. 4. Зависимость КПД от уровня усиливаемого сигнала при равномерной шкале квантования для $n = 1, 4$ и 8

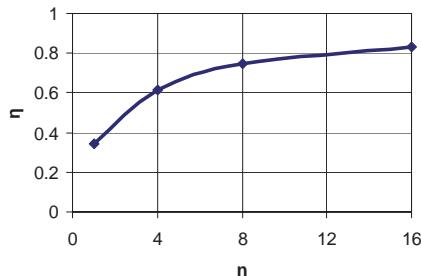


Рис. 5. Средний КПД в зависимости от количества уровней квантования

4. Усилители мощности с раздельным усилением составляющих АФМ сигнала

В классическом методе раздельного усиления [11] в тракте усиления огибающей в настоящее время обычно используется ШИМ модулятор. Для выполнения требований на электромагнитную совместимость полоса пропускания тракта огибающей должна быть более, чем 3,5 (лучше 5) ширины полосы частот усиливаемого радиосигнала. С учетом не идеально прямоугольной характеристики ФНЧ и теоремы Котельникова получим значение тактовой частоты ШИМ, равное 120-150 кГц для радиосигнала с шириной полосы частот 10 кГц. Минимальная длительность импульса должна быть в требуемый динамический диапазон раз меньше периода тактовой частоты ШИМ сигнала. Таким образом, можно записать:

$$\tau_{min} = 2(3,5...5)F_{RF}K_{LPF}10^{D/20},$$

где τ_{min} – минимальная длительность импульса, формируемого в модуляционном тракте без существенных искажений;

F_{RF} – ширина полосы радиочастот усиливаемого сигнала;

K_{LPF} – коэффициент прямоугольности ФНЧ модулятора;

D – требуемый динамический диапазон модуляционного тракта.

При требуемом динамическом диапазоне модуляционного тракта не менее 40 дБ, что соответствует коэффициенту гармоник для АМ сигнала 1%, минимальная длительность импульса составит 60-80 нс. Данные значения были успешно реализованы в прошлое десятилетие при уровнях мощности 0,5-1 кВт.

При повышении мощности модуляционного тракта до уровней единиц киловатт, даже на современных приборах минимальная длительность импульса составляет 30-80 наносекунд. При этом минимальная длительность импульса современного драйвера полумостовой схемы LMG1210 (200-V, 1.5-A, 3-A half-bridge MOSFET and GaN FET driver) составляет 4 нс.

Для перспективных цифровых систем радиосвязи диапазона ВЧ требуется передача данных со скоростями от 64 кбит/с и более, что возможно в радиоканале с шириной полосы частот 18-20 кГц. Это требует не менее чем двукратного уменьшения минимальной длительности импульса. Альтернативными решениями можно считать применение многофазной ШИМ, которое оправдывается только при высоких (десятка киловатт) уровнях выходной мощности, или использование ШИМ с дополнительной сигма-дельта модуляцией [24].

Использование ступенчатой модуляции источника питания позволит расширить или динамический диапазон при той же тактовой частоте, или увеличить тактовую частоту при том же динамическом диапазоне, в соответствии с изменением питающего напряжения раз. Направлениями дальнейшей работы будут являться оценка требований на скорость переключения, разработка схемотехнических решений и их моделирование для оценки переходных процессов и оценке результирующего КПД.

5. Заключение

Рассмотрены наиболее распространенные высокоеффективные синтетические методы усиления сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией: дефазирование и раздельное усиление составляющих. Показаны их ограничения при усилении сигналов перспективных систем радиосвязи и радиовещания. Предложено одновременное использование нескольких методов, что позволит или повысить энергетические характеристики ВЧ УМ, или расширить допустимую полосу модулирующих частот. Рассмотрены перспективы применения дополнительной импульсно-ступенчатой модуляции напряжения источника питания в радиочастотных УМ с дефазированием и раздельным усилением составляющих и определены направления дальнейших исследований.

Литература

1. Sokal N. O. "RF power transistor storage time: theory and measurements" // IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 11, no. 2, pp. 344-346, April 1976.
2. Sheikhi A., Abdipour A., Grebennikov A., Hemesi H. "Effect of Shunt Capacitances on Performance of Current-Mode Class-DE Power Amplifier at Any Active Time" // IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 33, no. 8, pp. 7038-7045, Aug. 2018.
3. Kozyrev V.B. "Class-E amplifier with a parallel filtering circuit" // Synchroinfo Journal, vol. 2, no. 1, pp. 2-5, 2016.
4. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N. "High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path" // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651
5. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N. "Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch Conditions" // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131508.
6. Громорушкин В.Н. Разработка фильтра гармоник для коротковолнового ключевого передатчика // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 10. С. 20-23.
7. Varlamov O. V. "Power Capacity of HF Automatic Antenna Tuner Switched by PIN Diodes under Load Mismatch Conditions" // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166046.
8. Varlamov O., Varlamov V., Dolgopyatova A. "Digital Radio Broadcasting Network in the Arctic Region" // 2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Moscow, Russia, 2019, pp. 457-462. DOI: 10.23919/FRUCT.2019.8711933
9. Varlamov O.V. "Public digital broadcasting network organization in the range of long waves"// Synchroinfo Journal, vol. 4, no. 6, pp. 2-5, 2018.
10. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G. Efficient modulation of RF signals // Патент на изобретение EP 1450479 B1. Заявка № EP20030003830 от 20.02.2003.
11. Kahn L. R. "Single-Sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration" // Proceedings of the IRE, vol. 40, no. 7, pp. 803-806, July 1952, doi: 10.1109/JRPROC.1952.273844.
12. Gromorushkin V. N., Varlamov O. V., Dolgopyatova A. V., Voronkov A. A. "Operation Problems of the EER Transmitter with Narrowband Antenna" // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706736
13. Varlamov O.V., Pestyakov A.V., Chugunov I.V. "Research of RF power amplifiers based on the method of separate amplification of modulated signal components via the use of software and hardware simulator" // Synchroinfo Journal, vol. 1, no. 6, pp. 3-8, 2015.
14. Cox D. "Linear amplification with nonlinear components" // Communications IEEE Transactions on, vol. 22, no. 12, pp. 1942-1945, Dec 1974.
15. Варламов О.В., Громорушкин В.Н., Козырев В.Б., Меланьин А.В. Сложение мощностей двухтактных ключевых генераторов ПН с резистивной нагрузкой // Известия высших учебных заведений Министерства высшего и среднего специального образования СССР. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 7. С. 31-36.
16. Варламов О.В., Гончаров И.А., Лаврушенков В.Г. Мощный ВЧ цифроаналоговый преобразователь для усилителя мощности ОМ сигналов // Электросвязь. 1989. № 8. С. 54-57.
17. Varlamov O. V., Chugunov I. V. "Modeling of efficiency UHF class-D power amplifier with bandpass sigma-delta modulation" // 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), Kazan, 2017, pp. 1-3. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997508
18. Varlamov O. Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters // T-Comm, 2014. Т. 8, № 2, с. 59-60.
19. Chireix H. "High power outphasing modulation" // Proc. IRE, vol. 23, pp. 1370-1392, Nov. 1935.
20. Варламов О.В. Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Московский технический университет связи и информатики. Москва, 2017.
21. Florian C., Cappello T., Paganelli R. P., Niessen D., Filicori F. "Envelope Tracking of an RF High Power Amplifier With an 8-Level Digitally Controlled GaN-on-Si Supply Modulator" // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, no. 8, pp. 2589-2602, Aug. 2015, doi: 10.1109/TMTT.2015.2447552.
22. Litchfield M., Popović Z. "X-band outphasing GaN MMIC PA with power recycling" // 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Phoenix, AZ, USA, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/MWSYM.2015.7166759.
23. Losev A. A. "LINC Efficiency Improvement for Multichannel Signal Amplification," // 2017 IVth International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT), Moscow, 2017, pp. 64-66, doi: 10.1109/ICEnT.2017.20.
24. Bolotov A. O., Kholyukov R. G., Varlamov O. V., "EER power amplifier modulator efficiency improvement using PWM with additional sigma-delta modulation" // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456955

COMBINATION OF SYNTHETIC HIGH-PERFORMANCE RF AMPLIFICATION TECHNIQUES

Oleg V. Varlamov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, vov@mtuci.ru

Dang C. Nguyen, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, nguyendangcanh131995@gmail.com

Sergey E. Grychkin, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, sg@radiotest-mtuci.ru

Abstract

To amplify modern high crest factor telecommunication radio signals with high efficiency, switching operation modes of transistors and synthetic amplification methods are used. The most common of these are the Kahn method (EER – envelope elimination and restoration) and the outphasing method. However, application of these methods has a number of technological (in terms of element base capabilities) limitations on the bandwidth and dynamic range of amplified signal. To expand high-efficiency RF power amplifiers field of application, the possibilities of combination several different synthetic amplification techniques are being considered. Expressions are obtained for the theoretically achievable efficiency when combining the outphasing method with a bridge power combiner and pulse-step modulation of supply voltage. The dependence of average efficiency on the number of supply voltage levels is determined. RF amplified signal bandwidth and its dynamic range determine the minimum required pulse width of the PWM modulator for the EER amplifier. Variants of these characteristics dependence on the number of supply voltage levels are discussed with combined use of PWM and pulse-step modulation of the supply voltage. Directions for further research are formulated.

Keywords: power amplifiers; high efficiency, outphasing, power combining, discrete supply modulation, envelope elimination and restoration (EER), pulse width modulation (PWM), broadband communication.

References

1. N. O. Sokal, "RF power transistor storage time: theory and measurements," in *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 11, no. 2, pp. 344-346, April 1976.
2. A. Sheikhi, A. Abdipour, A. Grebennikov and H. Hemesi, "Effect of Shunt Capacitances on Performance of Current-Mode Class-DE Power Amplifier at Any Active Time," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 8, pp. 7038-7045, Aug. 2018.
3. V.B. Kozyrev, "Class-E amplifier with a parallel filtering circuit," *Synchroinfo Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 2-5, 2016.
4. O. V. Varlamov and V. N. Gromorushkin, "High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path," *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, DOI: [10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651](https://doi.org/10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651)
5. O. V. Varlamov and V. N. Gromorushkin, "Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch Conditions," *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: [10.1109/WAVECONF48837.2020.9131508](https://doi.org/10.1109/WAVECONF48837.2020.9131508).
6. V. Gromorushkin, "Design harmonic filter for shortwave switching transmitter", *T-Comm*, vol. 8, no. 10, pp. 20-23, 2014.
7. O. V. Varlamov, "Power Capacity of HF Automatic Antenna Tuner Switched by PIN Diodes under Load Mismatch Conditions," *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Svetlogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: [10.1109/SYNTROINFO49631.2020.9166046](https://doi.org/10.1109/SYNTROINFO49631.2020.9166046).
8. O. Varlamov, V. Varlamov and A. Dolgopyatova, "Digital Radio Broadcasting Network in the Arctic Region," *2019 24th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Moscow, Russia, 2019, pp. 457-462. DOI: [10.23919/FRUCT.2019.8711933](https://doi.org/10.23919/FRUCT.2019.8711933)
9. O.V. Varlamov, "Public digital broadcasting network organization in the range of long waves," *Synchroinfo Journal*, vol. 4, no. 6, pp. 2-5, 2018.
10. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G. Efficient modulation of RF signals. Patent EP 1450479 B1. Appl. EP20030003830, 20.02.2003.
11. L. R. Kahn, "Single-Sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration," in *Proceedings of the IRE*, vol. 40, no. 7, pp. 803-806, July 1952, doi: [10.1109/JRPROC.1952.273844](https://doi.org/10.1109/JRPROC.1952.273844).
12. V. N. Gromorushkin, O. V. Varlamov, A. V. Dolgopyatova and A. A. Voronkov, "Operation Problems of the EER Transmitter with Narrowband Antenna," *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: [10.1109/SOSG.2019.8706736](https://doi.org/10.1109/SOSG.2019.8706736)
13. O.V. Varlamov, A.V. Pestryakov, I.V. Chugunov, "Research of RF power amplifiers based on the method of separate amplification of modulated signal components via the use of software and hardware simulator," *Synchroinfo Journal*, vol. 1, no. 6, pp. 3-8, 2015.
14. D. Cox, "Linear amplification with nonlinear components", *Communications IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 12, pp. 1942-1945, Dec 1974.
15. O. V. Varlamov, V. N. Gromorushkin, V. B. Kozyrev, A. V. Melan'in, "Addition of the power outputs from push-pull voltage-switching oscillators having a resistive load", *Radioelectronics and Communications Systems* (English translation of *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Radioelektronika*), vol. 32, no. 7, pp. 30, 1989.
16. O. V. Varlamov, I. A. Goncharov, V.G Lavrushenkov, "High-power HF digital-analog converter for SSB signal power amplifiers", *Telecommunications and Radio Engineering* (English translation of *Elektrosvyaz and Radiotekhnika*), vol. 44, no. 8, pp. 49, 1989.
17. O. V. Varlamov and I. V. Chugunov, "Modeling of efficiency UHF class-D power amplifier with bandpass sigma-delta modulation," *2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*, Kazan, 2017, pp. 1-3. DOI: [10.1109/SINKHROINFO.2017.7997508](https://doi.org/10.1109/SINKHROINFO.2017.7997508)
18. O. Varlamov, "Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters," *T-Comm*, vol. 8, no. 2, pp. 59-60, 2014.
19. H. Chireix, "High power outphasing modulation," *Proc. IRE*, vol. 23, pp. 1370-1392, Nov. 1935.
20. O.V. Varlamov, "The technology of creating a digital broadcasting network of the DRM standard for the Russian Federation," D.Sc. Thesis ["Tekhnologiya sozdaniya seti cifrovogo radioveshchaniya standarta DRM dlya Rossijskoj Federacii," Dis. Dokt. Tehn. Nauk], MTUIC, Moscow, 2017. (In Russian).
21. C. Florian, T. Cappello, R. P. Paganelli, D. Niessen and F. Filicori, "Envelope Tracking of an RF High Power Amplifier With an 8-Level Digitally Controlled GaN-on-Si Supply Modulator," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 8, pp. 2589-2602, Aug. 2015, doi: [10.1109/TMTT.2015.2447552](https://doi.org/10.1109/TMTT.2015.2447552).
22. M. Litchfield and Z. Popovic, "X-band outphasing GaN MMIC PA with power recycling," *2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, Phoenix, AZ, USA, 2015, pp. 1-4, doi: [10.1109/MWPSYM.2015.7166759](https://doi.org/10.1109/MWPSYM.2015.7166759).
23. A. A. Losev, "LINC Efficiency Improvement for Multichannel Signal Amplification," *2017 IVth International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, Moscow, 2017, pp. 64-66, doi: [10.1109/ICEnt.2017.802020](https://doi.org/10.1109/ICEnt.2017.802020).
24. A. O. Bolotov, R. G. Kholukov and O. V. Varlamov, "EER power amplifier modulator efficiency improvement using PWM with additional sigma-delta modulation," *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Minsk, 2018, pp. 1-4. DOI: [10.1109/SYNTROINFO.2018.8456955](https://doi.org/10.1109/SYNTROINFO.2018.8456955)

Information about authors:

Oleg V. Varlamov, Doctor of Science (technical), professor of the Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Dang C. Nguyen, Post-graduate student of the Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Sergey E. Grychkin, Post-graduate student of the Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia