

УДК 621.391.832.4:621.398.97:621.375.026

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-139-145

Предыскажающая компенсация продуктов интермодуляции в усилителях мощности сверхвысокочастотных сигналов

С.В. Петушков, Л.А. Белов, Е.Н. Вильдерман

Проанализированы разнообразные технические решения, направленные на коррекцию амплитудных и амплитудно-фазовых искажений модулированных сигналов, возникающих в вакуумных и твердотельных усилителях мощности диапазона сверхвысоких (СВЧ) частот из-за нелинейных изменений мгновенных значений токов в активных усилительных приборах.

Показано, что интермодуляционные искажения нечетного порядка в окрестности основной выделенной полосы частот входного сигнала снижают энергетическую эффективность усилителя, приводят к появлению дополнительных побочных спектральных составляющих, нарушающих жесткие требования электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств и требующих значительного недоиспользования паспортных характеристик усилительного прибора по мощности для снижения уровня искажений.

Отмечено, что в связи с возрастанием скорости передачи информации в диапазонах сверхвысоких частот при дополнительных требованиях к массогабаритным показателям и высокой надежности автоматической бортовой спутниковой аппаратуры после периода разработки структурных цифро-аналоговых и полностью цифровых технических решений наблюдается возвращение интереса разработчиков к аналоговым решениям, которые не требуют введения сложных цифро-аналоговых элементов СВЧ-тракта и обеспечивают расширение информационной полосы передаваемых сигналов.

Представлены результаты имитационного исследования микрополоскового линейризатора с нелинейными элементами на быстродействующих диодах Шоттки отечественного производства с развязывающими цепями на двух гибридных микрополосковых мостах. В качестве активного элемента использована модель типовой лампы бегущей волны диапазона 11 ГГц с учетом возникающих в ней АМ/АМ и АМ/ФМ искажений. Результаты измерений показали, что при оптимальном сочетании параметров линейризатора входная мощность модулированного сигнала в выделенной полосе частот может быть увеличена на 2 дБ по сравнению с ЛБВ без линейризатора, при одновременном уменьшении уровня побочных спектральных составляющих третьего порядка на 12 дБ, а пятого порядка на 21 дБ.

Результаты разработки микрополоскового предыскажающего диодного линейризатора могут быть использованы при создании бортовой спутниковой радиопередающей аппаратуры с улучшенными характеристиками.

Ключевые слова: микрополосковый предыскажающий компенсатор, АМ/АМ- и АМ/ФМ-преобразования, усилитель мощности, модулированный СВЧ-сигнал, электромагнитная совместимость, интермодуляционные искажения нечетного порядка, диод Шоттки, лампа бегущей волны.

Для цитирования: Петушков С.В., Белов Л.А., Вильдерман Е.Н. Предыскажающая компенсация продуктов интермодуляции в усилителях мощности сверхвысокочастотных сигналов // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 139—145. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-139-145.

Predistortion Compensation of the Intermodulation Products in Microwave Power Amplifiers

S.V. Petushkov, L.A. Belov, E.N. Vilderman

The article presents an analysis of various technical solutions focused on correction of amplitude and amplitude-phase distortions of modulated signals that occur in vacuum and solid-state microwave power amplifiers as a result of nonlinear changes of instantaneous current values in active amplifying devices.

It is shown that intermodulation distortions of odd orders in the vicinity of the input signal main frequency band degrade the amplifier's power efficiency and give rise to additional side spectrum components, which violate strict requirements for electromagnetic compatibility for radio electronic devices and lead to the necessity to operate the amplifier well below its power rating for reducing the distortion levels.

It is noted that there is a tendency toward increasing the information transmission rate in microwave bands along with growing requirements for the mass, dimensions, and reliability of automatic on-board satellite equipment. In view of these circumstances, after the period during which structural digital-and-analog and fully digital solutions were elaborated, some developers turn back to analog solutions that do not require introduction of complicated digital-and-analog components into the microwave signal flow path and open the possibility to widen the information frequency band of transmitted signals.

The article presents the results from studying a microstrip linearizer on its simulation model. The linearizer model contains nonlinear elements made using domestically produced high-speed Schottky diodes with decoupling circuits on the basis of two hybrid microstrip bridges. The model of a standard traveling-wave tube (TWT) with an 11 GHz central frequency that takes into account the АМ/АМ and АМ/PM distortions occurring in this TWT is used as the active component. The measurement results have shown that in case of using the optimal combination of linearizer parameters, the modulated signal input power in its main band can be increased by 2 dB in comparison with the TWT without the linearizer, with concurrently decreasing the level of side spectrum distortion by 12 and 21 dB for third- and fifth-order components, respectively.

The microstrip predistortion diode linearizer development results can be used in constructing a satellite on-board radio transmitting equipment with improved characteristics.

Key words: analog microstrip predistortion compensator; AM/AM and AM/PM conversions, power amplifier, modulated microwave signal, electromagnetic compatibility, odd-order intermodulation distortions, Schottky diode, travelling-wave tube.

For citation: Petushkov S.V., Belov L.A., Vilderman E.N. Predistortion Compensation of the Intermodulation Products in Microwave Power Amplifiers. MPEI Vestnik. 2018;5:139—145. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-139-145.

Качественные показатели беспроводных (в том числе космических) систем радиосвязи, телевидения, радионавигации в значительной степени определяются противоречивыми требованиями по энергетической и спектральной эффективности, электромагнитной совместимости (ЭМС), быстродействию, пропускной способности, ослаблению уровня внеполосных СВЧ-излучений. Зависимость выходных амплитуды и фазового сдвига от мгновенной амплитуды широкополосного входного сигнала (AM/AM- и AM/ФМ-преобразования) приводит к невозможности использовать полностью паспортные характеристики усилительного прибора выходного каскада по выходной мощности прибора.

Для улучшения энергетических характеристик усилителя мощности (УМ) при ограничениях на уровень внеполосных излучений и интермодуляционных искажений (ИМИ) применяют различные методы линейризации характеристик усилительного тракта.

Использование структурных методов коррекции искажений со связью вперед или обратной связью затруднено в СВЧ-диапазоне при широкой полосе частот информационного сигнала и в расширенном интервале вариации параметров окружающей среды. Предпочтение при таком сочетании параметров отдается предыдущим линейризаторам, включающимся на маломощном входе выходного каскада радиопередающего устройства [1 — 6] или входящим в состав формирователя модулирующего сигнала [5, 7 — 15]. После периода разработки вариантов цифровой компенсации AM/AM- и AM/ФМ-преобразований выходного радиосигнала [5, 6, 8, 10 — 18] наблюдается тенденция возвращения к использованию аналоговых способов решения возникающих задач [1, 9, 19 — 22]. Подобные решения особенно актуальны при разработке СВЧ усилителей мощности для спутниковых бортовых радиопередающих устройств.

Цель настоящей работы состоит в сопоставлении характеристик различных линейризаторов для усилителей мощности СВЧ-сигналов и анализе сочетаний технико-экономических параметров, при которых использование аналоговых технических решений дает преимущества перед цифровыми.

Основные соотношения

При мощности потребления от источника электропитания P_0 средняя выходная мощность C в выделенной частотной полосе СВЧ-сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией вблизи несущей частоты f_0

оказывается меньше паспортной максимальной мощности насыщения $P_{\text{вых.нас}}$ немодулированного радиосигнала из-за возникновения высших гармоник несущей частоты, интермодуляционных, комбинационных и перекрестных составляющих спектра выходного сигнала с суммарной мощностью I .

Для достижения высокой энергетической эффективности радиопередающего устройства $\eta = P_{\text{вых.нас}}/P_0$ и необходимого превышения мощности основного излучения C над суммарной мощностью интермодуляционных продуктов нечетного порядка ИМ $= 10\lg(C/I) > 25$ дБ разработчики используют активный элемент усилителя мощности (УМ) с заметным недоиспользованием $D = 10\lg(P_{\text{вых.нас}}/C)$ выходной мощности C по сравнению с мощностью насыщения активного элемента $P_{\text{вых.нас}}$ (Output Power Backoff, OPBO или OBO), который обладает значениями от -10 до -2 дБ и приводит к снижению энергетической эффективности. Для бортовой аппаратуры с жесточайшими требованиями к массе и энергопотреблению это недопустимо.

В качестве активного элемента УМ СВЧ-сигналов с узкой по сравнению с f_0 шириной занимаемой полосы частот $\Pi \ll f_0$ используют лампы бегущей волны (ЛБВ), пролетные клистроны, твердотельные усилители (ТУМ). Для ТУМ характерным является монотонный вид AM/AM-характеристики амплитудной компрессии немодулированного сигнала с уровнем насыщения $P_{\text{вых.нас}}$ на $12...17$ дБ ниже условной мощности $P_{1\text{дБ}}$, при которой режим работы ТУМ считается линейным, а коэффициент усиления снижается на 1 дБ по сравнению со своим малосигнальным значением. Для вакуумных приборов СВЧ (ЛБВ, пролетного клистроны, амплитрона) характеристика $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$ имеет максимум $P_{\text{вых.нас}}$ для некоторого значения входной мощности $P_{\text{вх.нас}}$. При ее дальнейшем увеличении выходная мощность $P_{\text{вых}}$ снижается, а коэффициент энергетической эффективности η падает. Во всех типах УМ СВЧ проявляется эффект амплитудно-фазовой конверсии (AM/ФМ-преобразования), за счет которого при увеличении $P_{\text{вх}}$ происходит увеличение или уменьшение фазового сдвига по сравнению с его малосигнальным значением, которое достигает в режиме насыщения порядка 50 угловых градусов для УМ ЛБВ и порядка 10 угловых градусов для ТУМ. Именно нелинейные и инерционные AM/AM- и AM/ФМ-эффекты в совокупности с увеличением скорости передачи информации сопровождаются ростом уровня интермодуляционных искажений (ИМИ), снижают энергетическую эффективность УМ и заставляют разработчиков значительно недоисполь-

зовать активные элементы УМ по мощности или применять разнообразные и сложные схемы линейаризации.

Способы линейаризации характеристик сверхвысокочастотных усилителей мощности

Варианты аналоговых линейаризаторов УМ с петлей радиочастотной обратной связи, каналами связи вперед, подавлением и восстановлением несущей, динамическим изменением параметров активного прибора [6, 7, 11] затруднительно использовать в СВЧ-диапазоне для увеличенной скорости передачи информации из-за опасности паразитного самовозбуждения усилительного устройства и запаздывания регулирующего воздействия по отношению к возникающим дестабилизирующим факторам.

Функционирование цифрового устройства предсказывающей системы линейаризации [13] основано на измерениях мгновенных значений амплитуды и фазы выходного сигнала УМ из квадратурных сигналов формирователя и вычисления поправок к отсчетам комплексной амплитуды огибающей выходного сигнала по сравнению с их значениями для огибающей входного сигнала с помощью корректирующих таблиц АМ/АМ- и АМ/ФМ-преобразований. С помощью включенного на входе УМ дополнительного векторного модулятора вводятся корректирующие изменения в каждый отсчет с целью компенсации АМ/АМ- и АМ/ФМ-искажений радиосигнала на выходе УМ. Однако, такая система сложна в настройке цифровых блоков коррекции, в них значительно ограничена ширина информационной полосы частот передаваемых сигналов. Система цифровой предсказывающей линейаризации может быть интегрирована в цифровой блок формирования передаваемого информационного сигнала без усложнения схемы радиопередающего устройства. Однако, с ее помощью удастся снизить уровень ИМИ выходного сигнала лишь третьего порядка.

Вариант полностью цифрового линейаризатора четными гармониками входного сигнала [17] предусматривает вычисление отсчетов частотных составляющих

входного информационного потока, относительный уровень которых близок по амплитуде и противоположен по фазе спектральным продуктам искажений третьего и пятого порядков, возникающих на выходе УМ. Он обеспечивает снижение уровня ИМИ высокого нечетного порядка и улучшение энергетической эффективности УМ за счет приближения выходной мощности к точке насыщения. Однако, быстродействие линейаризатора и наибольшая скорость передаваемой информации ограничены необходимостью выполнения сложной цифровой обработки потока отсчетов входных данных с удвоением тактовой частоты.

При дополнительных ограничениях массогабаритных показателей линейаризированного УМ для бортовой спутниковой аппаратуры возрастает интерес к предсказывающим микрополосковым линейаризаторам на входе УМ [20, 21], использование которых не требует введения сложных цифро-аналоговых элементов СВЧ-тракта и допускает высокую скорость передачи информации при ограниченном уровне ИМИ. Такой линейаризатор может быть выполнен, например, на основе цепи с нелинейными элементами в виде быстродействующих диодов Шоттки с управляемым смещением и разделением цепей линейаризации и усиления мощности основного сигнала при помощи невзаимного циркулятора или гибридного моста.

Микрополосковый диодный линейаризатор для сверхвысокочастотного усилителя мощности

Для исследования характеристик предсказывающего микрополоскового диодного линейаризатора (МДЛ) использовано имитационное моделирование системы в вычислительной среде NI AWR Design Environment. На рис. 1 показана схема модели МДЛ с развязывающими квадратурными (гибридными) мостами КМ1, КМ2 и нелинейными элементами в виде СВЧ-диодов Шоттки VD1, VD2. На рис. 2 представлен фрагмент структуры микрополосковых трансформаторов импеданса.

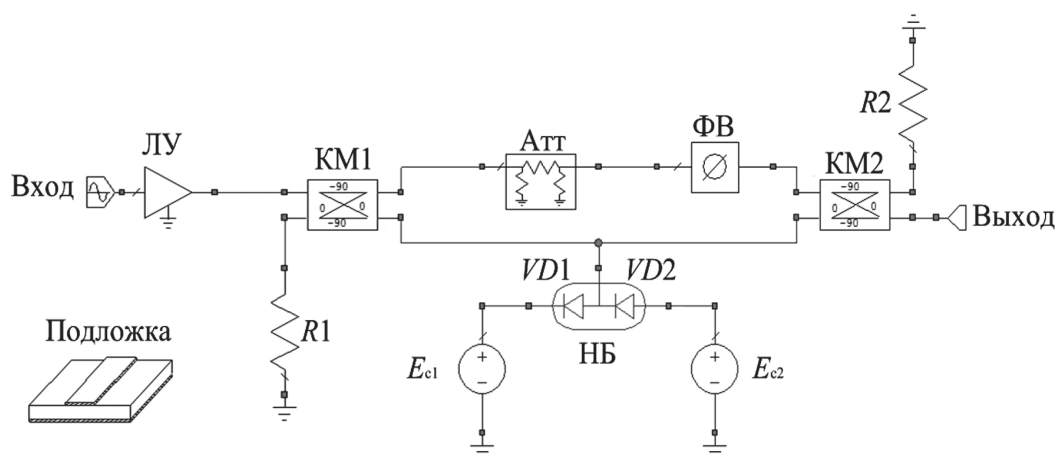


Рис. 1. Схема имитационной модели микрополоскового диодного линейаризатора

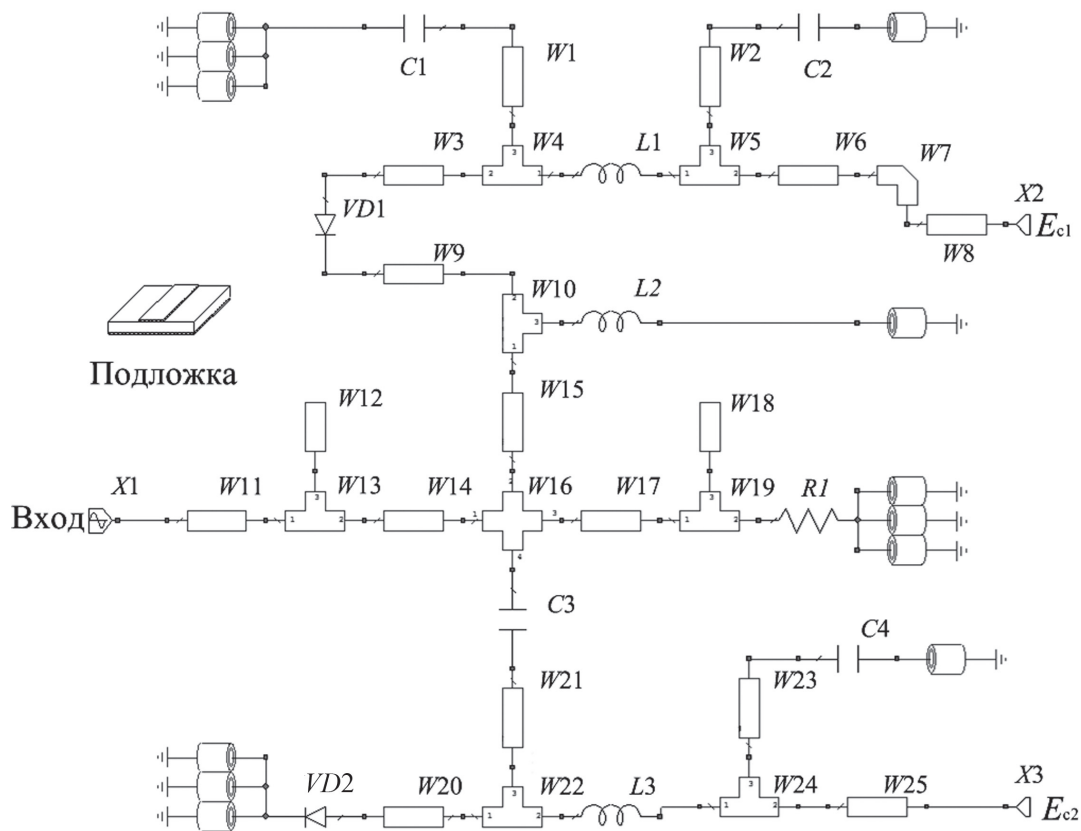


Рис. 2. Топология трансформаторов импеданса нелинейных элементов ДШ1, ДШ2 в модели МДЛ

Нелинейные вольтамперные $i(e)$ и импедансные характеристики диодов Шоттки в СВЧ-цепях в связи с иной технологией изготовления отличаются от подобных характеристик точечных СВЧ-диодов. Они характеризуются значительно увеличенной локальной крутизной прямого тока для малой амплитуды СВЧ-сигнала при положительном смещении и малым изменением полного сопротивления диода в составе СВЧ-цепи по сравнению с волновым сопротивлением микрополосковой линии в рабочей полосе частот сигнала. Благодаря этому диод Шоттки в составе линейризатора для УМ способен сохранять исходные нелинейные свойства в более широкой полосе рабочих частот.

Имитационная модель МДЛ по схеме рис. 1 с развязывающими гибридными квадратурными мостами КМ1, КМ2 и диодами $VD1$, $VD2$ модели 3А141А отечественного производства («АО НИИПП», Томск) была дополнена эквивалентной феноменологической структурой УМ с АМ/АМ- и АМ/ФМ-характеристиками, соответствующими ЛБВ модели ТН 4300 С (Thales, Франция) с $P_{\text{вых.нас}} \approx 40$ дБм·Вт, и формирователем входного сигнала с несущей частотой $f_0 \approx 11,4$ ГГц и четырехпозиционной фазовой манипуляцией ФМ4 по закону псевдослучайной последовательности (ПСП) с информационной полосой $\Pi \approx 100$ МГц, сглаживанием фронтов манипуляции в модуляторе с помощью фильтра Найквиста. При этом получен входной сигнал со

сплошным спектром мощности в окрестности рабочей полосы частот.

Оптимизируемыми параметрами МДЛ по схеме рис. 2 выступали конструктивные и технологические характеристики микрополосковых трансформаторов импеданса, характеристики моделей диодов $VD1$, $VD2$, значения их отдельных напряжений смещения E_{c1} , E_{c2} , а также уровень близости средней мощности выходного сигнала к ее значению при насыщении $D = 10 \lg(C/P_{\text{вых.нас}})$. В качестве критерия оптимизации использовалось требование максимума отношения C/I мощности полезного сигнала C к мощности I продуктов ИМИ.

Результаты исследований

На рисунке 3 изображено изменение спектра выходного сигнала УМ за счет использования МДЛ с оптимизированными параметрами при неизменном значении входной мощности. Мощность $P_{\text{вых}}$ в пределах основной полосы частот для УМ без МДЛ (линия 1) меньше паспортной мощности насыщения $P_{\text{вых.нас}}$ из-за структуры сигнала и возникновения продуктов ИМИ. Подключение МДЛ (линия 2) сопровождается уменьшением выходной мощности на 3 дБ, которое вызвано снижением малосигнального усиления K_y за счет расширения динамического диапазона значений входной мощности, в котором уровень ИМ = $10 \lg(C/I)$ имеет значения не более 15 дБ. Из анализа данных рис. 2 сле-

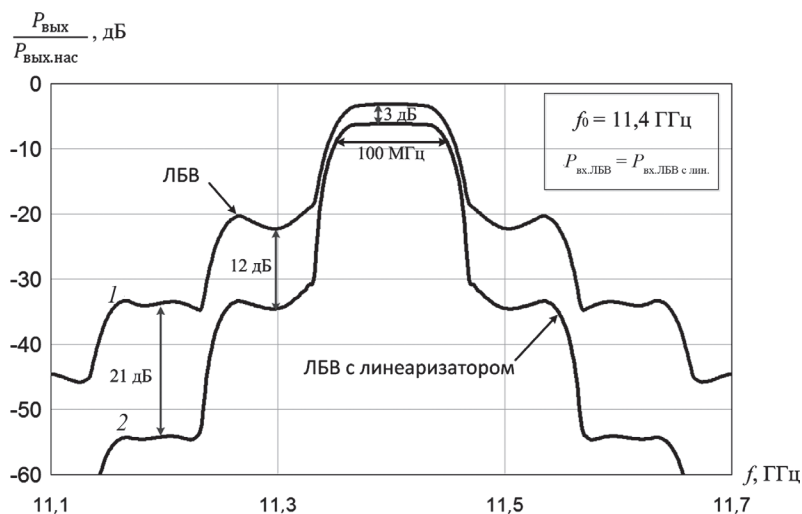


Рис. 3. Спектр выходного сигнала ЛБВ без (1) и с использованием линейризатора с оптимизированными параметрами (2) при одинаковых значениях входной мощности в рабочей полосе частот при $D = -2$ дБ

дует, что после включения МДЛ уровень продуктов интермодуляции 3-го порядка уменьшился на 12 дБ, а продуктов 5-го порядка упал на 21 дБ.

Результаты экспериментов показали, что для получения одинаковой мощности выходного сигнала в пределах основной полосы частот для линейризованного УМ можно дополнительно увеличить параметр $D = 10 \lg(C/P_{\text{вых.нас}})$, характеризующий близость выходной мощности к ее значению при насыщении. В таком случае использование МДЛ даст снижение уровня продуктов интермодуляции третьего порядка на 2 дБ, а пятого порядка на 5 дБ.

Представленные на рис. 4 графики зависимости $K_y(P_{\text{вх}})$ коэффициента усиления немодулированного сигнала K_y от входной мощности $P_{\text{вх}}$ демонстрируют, что использование МДЛ для снижения уровня ИМИ сопровождается уменьшением коэффициента усиления УМ.

Результаты измерений, приведенные на рис. 5, говорят об эффекте снижения уровня ИМИ третьего

порядка за счет применения МДЛ при вариации нормированной входной мощности $P_{\text{вх}}/P_{\text{вых.нас}}$. В данном случае использование линейризатора МДЛ позволяет при установленных ограничениях на относительные уровни ИМИ третьего порядка на 2 дБ приблизить режим работы УМ по выходной мощности к паспортному значению в точке насыщения.

Таким образом, использование аналогового предыскажающего линейризатора для УМ СВЧ дает преимущества перед цифровыми решениями в высокотехнологичных приложениях полностью автоматизированной бортовой спутниковой аппаратуры с широкой полосой рабочих частот. Микрополосковый диодный линейризатор МДЛ с двумя гибридными мостами и диодами Шоттки по схеме рис. 1, 2 характеризуется возможностью реализации в виде монолитной интегральной схемы, высоким быстродействием и широкой полосой усищаемого в УМ сигнала. Он понижает уровень побочных интермодуляционных излучений третьего порядка на 12 дБ, а пятого порядка на 21 дБ, что значительно об-

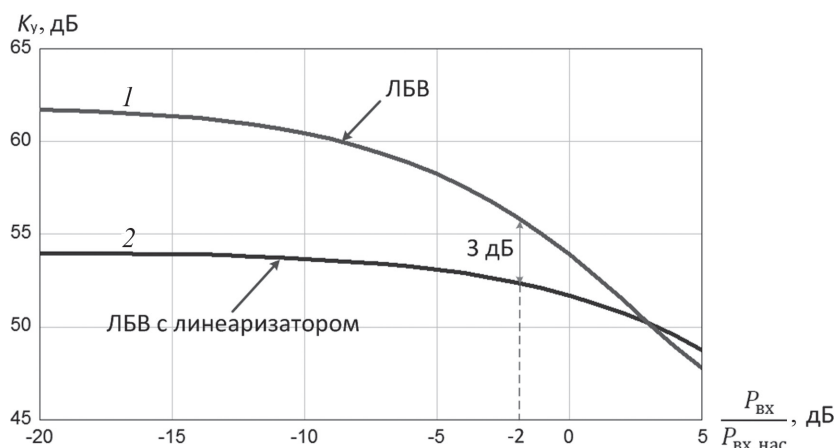


Рис. 4. Зависимость компрессии усиления от уровня входной мощности $P_{\text{вх}}$ для УМ без линейризатора (1) при использовании МДЛ с оптимизированными параметрами (2)

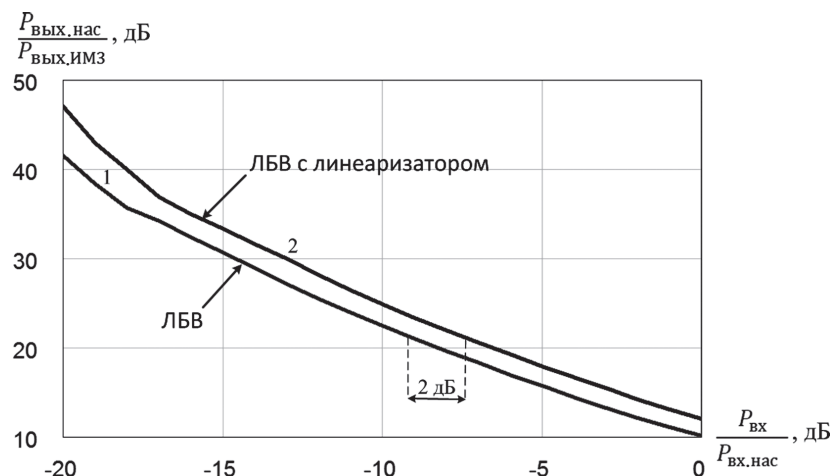


Рис. 5. Зависимость значения ИМИ = $10\lg(C/I)$ от уровня входной мощности $P_{вх}$ для УМ без линейризатора (1) при использовании МДЦЛ с оптимизированными параметрами (2)

легчает выполнение жестких требований по электромагнитной совместимости, предъявляемых к бортовым спутниковым радиопередающим устройствам.

Литература

1. Kim Y. e. a. An analog Lineariser Based on Amplitude Modulation with Even Harmonic Signals // *Microwave J.* 2009. V. 52. No. 2. Pp. 80—88.
2. Tuo W. e. a. Theoretical Analysis and an Improvement Method of the Bias Effect on the Linearity of RF Linear Power Amplifiers // *J. Semiconductors.* 2009. V. 30. No. 5. Pp. 1—7.
3. Ahmad I. e. a. Spectral Broadening Effects of High Power Amplifiers in MIMO OFDM Relaying Channels // *EURASIP J. Wireless Communications and Networking.* 2013. V. 32. Pp. 240—245.
4. O'Droma M., Yiming L. A New Bessel-Fourier Memoryless Nonlinear Power Amplifier Behavioral Model // *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.* 2013. V. 23 (1). Pp. 25—27.
5. Liu Y.J. e. a. A Robust Augmented Complexity-Reduced Generalized Memory Polynomial for Wideband RF Power Amplifiers // *IEEE Trans. Indus. Elect.* 2014. V. 61. Iss. 5. Pp. 2389—2401.
6. Landin P.N. e. a. Two Novel Memory Polynomial Models for Modeling of RF Power Amplifiers // *Intern. J. Microwave and Wireless Techn.* 2015. V. 7. Pp. 19—29.
7. Аверина Л.И., Бобрешов А.М., Шутов В.Д. Повышение линейности передающего тракта методом цифровых предискажений // *Нелинейный мир.* 2013. № 10. С. 720—727.
8. Renzo M. e. a. Spatial Modulation for Generalized MIMO: Challenges, Opportunities and Implementation // *Proc. IEEE.* 2014. V. 102. No. 1. Pp. 56—103.
9. Uthirajoo E. e. a. Wideband LTE Power Amplifier with Integrated Novel Analog Pre-distorter Linearizer for Mobile Wireless Communications // *PLoS ONE.* 2014. V. 9. No. 7. Pp. 1—16.
10. Vasconcellos V. e. a. Performance of 5G Candidate Waveforms with Non-linear Power Amplifiers // *Proc. IEEE 9th Latin-american Conf. Communications.* 2017. Pp. 1—5.
11. Wang Z. e. a. Deep Neural Nets Based Power Amplifier Non-linear Pre-distortion // *J. Physics: Conf. Series.* 2017. V. 887. Pp. 1—6.
12. Yousif S.M. e. a. Efficient Low-complexity Digital Predistortion for Power Amplifier Linearization // *Intern. J. Electrical and Computer Eng.* 2016. V. 6 (3). Pp. 1096—1105.
13. Пат. № 2538306 РФ. Формирователь радиосигналов с цифровым предискажением четными гармониками / А.С. Кондрашов // *Бюл. изобрет.* 2015. № 1.
14. Jebali C. e. a. Selective Orthogonal Predistortion for Power Amplifiers // *IEEE 28th Canadian Conf. Electrical and Computer Eng.* 2015. Pp. 1600—1604.
15. Essaadali R. e. a. Optimization of Multi-standard Transmitter Architecture Using Single-double Conversion Technique Used for Rescue Operations // *Advances in Sci., Techn. and Eng. Syst. J.* 2017. V. 2. No. 3. Pp. 73—81.
16. Bhat S., Chockalingam A. Compensation of Power Amplifier Nonlinear Distortion in Spatial Modulation Systems // *Proc. of IEEE 17th Intern. Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications.* 2016. Pp. 1—6.
17. Петушков С.В., Белов Л.А., Кондрашов А.С. Использование четных гармоник для цифрового предискажения входного сигнала при линейризации амплитудных характеристик СВЧ-усилителя мощности // *T-Comm — Телекоммуникации и транспорт.* 2016. Т. 10. № 6. С. 3—7.
18. Swaminathan J.N., Kumar P. Design of Efficient Adaptive Predistorter for Nonlinear High Power Amplifier // *Wireless Personal Comm.* 2015. V. 82 (2). Pp. 1085—1093.
19. Jie L., Hua-Dong Z. A Novel Two-branch Predistortion Linearizer of Ku-band TWTA in Communication Application // *Proc. Intern. Radar Conf.* 2015. P. 3.
20. Li D. e. a. Tunable Diode-based Predistortion Linearizer for Power Amplifier with Phase Expansion or Compression at Millimeter-wave Frequency // *IEEE*

Intern. Conf. Communication Problem-solving. 2014. Pp. 1610—1613.

21. **Deng H.-L., Zhang D.-W.** A Ka-band Analog Predistortion Linearizer for Travelling Wave Tube Amplifiers // Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. 2015. V. 1. Pp. 1—3.

22. **Bo Shi e. a.** A novel GHz Bandwidth RF Predistortion Linearizer for Ka-band Power Amplifier // Proc. IEEE Conf. TENCON. 2017. P. 1610—1613.

References

1. **Kim Y. e. a.** An analog Lineariser Based on Amplitude Modulation with Even Harmonic Signals. Microwave J. 2009;52;2:80—88.

2. **Tuo W. e. a.** Theoretical Analysis and an Improvement Method of the Bias Effect on the Linearity of RF Linear Power Amplifiers. J. Semiconductors. 2009;30;5. Pp. 1—7.

3. **Ahmad I. e. a.** Spectral Broadening Effects of High Power Amplifiers in MIMO OFDM Relaying Channels. EURASIP J. Wireless Communications and Networking. 2013;32:240—245.

4. **O'Droma M., Yiming L.** A New Bessel-Fourier Memoryless Nonlinear Power Amplifier Behavioral Model. IEEE Microwave and Wireless Components Lett. 2013;23 (1):25—27.

5. **Liu Y.J. e. a.** A Robust Augmented Complexity-Reduced Generalized Memory Polynomial for Wideband RF Power Amplifiers. IEEE Trans. Indus. Elect. 2014;61;5:2389—2401.

6. **Landin P.N. e. a.** Two Novel Memory Polynomial Models for Modeling of RF Power Amplifiers. Intern. J. Microwave and Wireless Techn. 2015;7:19—29.

7. **Averina L.L., Bobreshov A.M., Shutov V.D.** Povyshenie Lineinosti Peredayushchego Trakta Metodod Tsifrovyykh Predyskazhenii. Nelineinyi mir. 2013;10:720—727. (in Russian).

8. **Renzo M. e. a.** Spatial Modulation for Generalized MIMO: Challenges, Opportunities and Implementation. Proc. IEEE. 2014;102;1:56—103.

9. **Uthirajoo E. e. a.** Wideband LTE Power Amplifier with Integrated Novel Analog Pre-distorter Linearizer for Mobile Wireless Communications. PLoS ONE. 2014;9;7:1—16.

10. **Vasconcellos V. e. a.** Performance of 5G Candidate Waveforms with Non-linear Power Amplifiers. Proc. IEEE 9th Latin-american Conf. Communications. 2017:1—5.

11. **Wang Z. e. a.** Deep Neural Nets Based Power Amplifier Non-linear Pre-distortion. J. Physics: Conf. Series. 2017;887:1—6.

12. **Yousif S.M. e. a.** Efficient Low-complexity Digital Predistortion for Power Amplifier Linearization. Intern. J. Electrical and Computer Eng. 2016;6 (3):1096—1105.

13. **Pat. № 2538306 RF.** Formirovatel' Radiosignalov s Tsifrovym Predyskazheniem Chetnymi Garmonikami. A.S. Kondrashov. Byul. Izobret. 2015;1. (in Russian).

14. **Jebali C. e. a.** Selective Orthogonal Predistortion for Power Amplifiers. IEEE 28th Canadian Conf. Electrical and Computer Eng. 2015:1600—1604.

15. **Essaadali R. e. a.** Optimization of Multi-standard Transmitter Architecture Using Single-double Conversion Technique Used for Rescue Operations. Advances in Sci., Techn. and Eng. Syst. J. 2017;2;3:73—81.

16. **Bhat S., Chockalingam A.** Compensation of Power Amplifier Nonlinear Distortion in Spatial Modulation Systems. Proc. of IEEE 17th Intern. Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. 2016:1—6.

17. **Petushkov S.V., Belov L.A., Kondrashov A.S.** Ispol'zovanie Chetnykh Garmonik dlya Tsifrovogo Predyskazheniya Vkhodnogo Signala pri Linearizatsii Amplitudnykh Kharakteristik SVCH-Usilitelya Moshchnosti. T-Comm — Telekommunikatsii i Transport. 2016;10;6: 3—7. (in Russian).

18. **Swaminathan J.N., Kumar P.** Design of Efficient Adaptive Predistorter for Nonlinear High Power Amplifier. Wireless Personal Comm. 2015;82 (2):1085—1093.

19. **Jie L., Hua-Dong Z.** A Novel Two-branch Predistortion Linearizer of Ku-band TWTA in Communication Application. Proc. Intern. Radar Conf. 2015:3.

20. **Li D. e. a.** Tunable Diode-based Predistortion Linearizer for Power Amplifier with Phase Expansion or Compression at Millimeter-wave Frequency. IEEE Intern. Conf. Communication Problem-solving. 2014:1610—1613.

21. **Deng H.-L., Zhang D.-W.** A Ka-band Analog Predistortion Linearizer for Travelling Wave Tube Amplifiers. Proc. Asia-Pacific Microwave Conf. 2015;1:1—3.

22. **Bo Shi e. a.** A novel GHz Bandwidth RF Predistortion Linearizer for Ka-band Power Amplifier. Proc. IEEE Conf. TENCON. 2017:1610—1613.

Сведения об авторах

Петушков Сергей Владимирович — аспирант кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: sp-rks@ya.ru

Белов Леонид Алексеевич — кандидат технических наук, профессор кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: belovla@gmail.com

Вильдерман Егор Николаевич — магистрант кафедры формирования и обработки радиосигналов НИУ «МЭИ», e-mail: plazmos95@gmail.com

Information about authors

Petushkov Sergey V. — Ph.D-student of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: sp-rks@ya.ru

Belov Leonid A. — Ph.D. (Techn.), Professor of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: belovla@gmail.com

Vilderman Egor N. — Undergraduate of Formation and Processing of Radio Signals Dept., NRU MPEI, e-mail: plazmos95@gmail.com

Статья поступила в редакцию 14.03.2018