



ИНФОКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFOCOMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 004.716

DOI

ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЙ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ НА СИГНАЛЫ С ОРТОГОНАЛЬНОЙ СУБПОЛОСНОЙ БАЗОЙ

INFLUENCE DISTORTION OF POWER AMPLIFIER ON SIGNALS WITH ORTHOGONAL SUBBAND BASE

Д.В. Урсол

D.V. Ursol

ООО «РВ-СИСТЕМС»

Россия, 143026, г. Москва, Сколково, Большой бул., 42 с1

RV-SYSTEMS LLC

42 s1 Bolshoy Blv., Skolkovo, Moscow, 143026, Russia

E-mail: ursol@rv-systems.ru

Аннотация

В статье рассматривается ортогональный субполосный базис и влияние нелинейности усилителя мощности на уровень внеполосного излучения и искажения символов на приемной стороне после декодирования. Описан метод формирования и обработки канального сигнала с использованием ортогональной субполосной базы. Вычислительные эксперименты проведены с параметрами стандарта беспроводной связи Wi-Fi и различным уровнем нелинейных искажений усилителя мощности, включая сравнение с ортогональным базисом OFDM. Результаты вычислений показывают необходимость разработки цифрового предискажения субполосного ортогонального базиса для компенсации нелинейности усилителей.

Abstract

The article discusses the orthogonal subband basis and the effect of nonlinearity of the power amplifier on the out-of-band emission level and character distortion at the receiving side after decoding. Described a method for generating and processing a channel signal using an orthogonal subband base. Computational experiments were performed with the parameters of the WiFi wireless standard and various levels of non-linear distortion of the power amplifier, including comparison with the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM). The calculation results show the need to develop a digital predistortion of a subband orthogonal basis to compensate for the nonlinearity of amplifiers. Digital predistortion can be calculated for orthogonal basis previously and saved in memory before modulation with give less complexity and additional noise immunity on receiver side. The results show the same mean error vector magnitude between orthogonal subband basis and OFDM because they have same peak to average power ratio (PAPR) values about 10 dB.

Ключевые слова: усилитель мощности, нелинейность, насыщение усилителя, искажения усилителя, ортогональное частотное уплотнение, ортогональный субполосный базис, квадратурная манипуляция, вектор ошибки.

Keywords: power amplifier, nonlinearity, amplifier saturation, amplifier distortion, orthogonal frequency division multiplexing, orthogonal subband basis, quadrature modulation, error vector magnitude.

Во всех системах радиосвязи и Интернет вещей используются усилители мощности различного класса, где одним из самых критических искажений, порождаемых усилителями мощности, является эффект нелинейности, который возникает при передаче сигналов различной мощности. Значительная часть эффектов нелинейности усилителей мощности связана с амплитудными (АМ/АМ) и фазовыми (АМ/ФМ) искажениями сигнала. Искажение АМ/АМ можно охарактеризовать как отклонение от постоянного усиления при увеличении входной мощности в направлении области сжатия. Усилитель имеет постоянное усиление для входных сигналов низкой мощности, однако при высоких уровнях мощности входного сигнала усилитель переходит в насыщение и коэффициент усиления уменьшается [Кожемыкин, Семушин, 2018]. Работа усилителя в линейной области отрицательно сказывается на коэффициенте полезного действия усилителя, что негативно влияет на энергопотребление устройства. Однако наличие сигнала в области насыщения приводит к искажению выходного сигнала и снижению помехоустойчивости и вероятности верного декодирования передаваемой информации. Линейность большинства усилителей мощности достигается при работе на уровнях мощности входного сигнала ниже максимального – таким образом, усилитель мощности не переходит в режим компрессии. Для сохранения линейности усилителя при передаче символов с наивысшей пиковой мощностью, средняя выходная мощность усилителя должна быть на несколько дБ ниже, чем точка сжатия. С другой стороны, коэффициент полезного действия усилителей максимален при работе именно в режиме компрессии, а именно в точке, где режим работы усилителя мощности считается насыщенным и его выходная мощность максимальна, поскольку дальнейшее увеличение входного сигнала не приведёт к существенному увеличению выходной мощности. Когда усилитель находится в области сжатия, пиковые точки выходного сигнала начинают отсекаются, что приводит к существенным искажениям передаваемых сигналов. Линейность – это ключевой параметр усилителя мощности систем 5-го поколения, т. к. для достижения высокой скорости передачи данных используются сложные схемы модуляции. Для корректной работы данных схем необходимы сигналы с минимальными искажениями. Линейность усилителей обычно достигается в ущерб энергоэффективности, что критично для систем передачи с автономными источниками энергии.

В сетях 5G усилители должны работать с высоким КПД, чтобы минимизировать потребление энергии базовой станции. Аналогично усилители в мобильных устройствах, работающих от батарей, должны работать в линейном режиме без ущерба значению КПД по добавленной мощности, что также особенно актуально в системах Интернет вещей, в силу высоких требований к автономности работы устройства и большой зоны радио покрытия. Таким образом, исследование влияния нелинейности усилителя мощности на сигналы с ортогональной субполосной базой является актуальной задачей. Результаты позволят оценить уровень внеполосного излучения сигнала на выходе реальных систем и усилителей мощности, оценить необходимость разработки цифровой компенсации нелинейности усилителей мощности для оптимальных ортогональных сигналов. Это в дальнейшем позволит создать приемно-передающую систему для Интернет вещей с эффективным использованием энергетических ресурсов и минимумом искажений.

В данной статье рассматриваются математические основы формирования оптимального ортогонального базиса для систем с OFDM. Данный базис и метод расчета адаптированы для возможности реализации в реальных системах стандарта IEEE 802.11. Проведение вычислительного эксперимента искажений амплитуды (АМ/АМ) может служить эквивалентом общего вида оператора нелинейных искажений сигнала в усилителе мощности. Уровень сжатия усилителя мощности задается соотношением средней энергии сигнала к уровню наступления насыщения усилителя, который рассчитывается по формуле:

$$P(x) = \frac{x}{\sqrt{1 + \left(x / \frac{St}{N} \sum_{i=1}^N x_i\right)^2}}, \quad (1)$$

где, x – входное напряжение сигнала, St – уровень насыщения усилителя, $P(x)$ – выходное напряжение усилителя, N – общее количество передаваемых отсчетов. На рис. 1

представлен пример нелинейности усилителя мощности с различным уровнем сжатия (насыщения) по отношению к среднему уровню передаваемого сигнала.

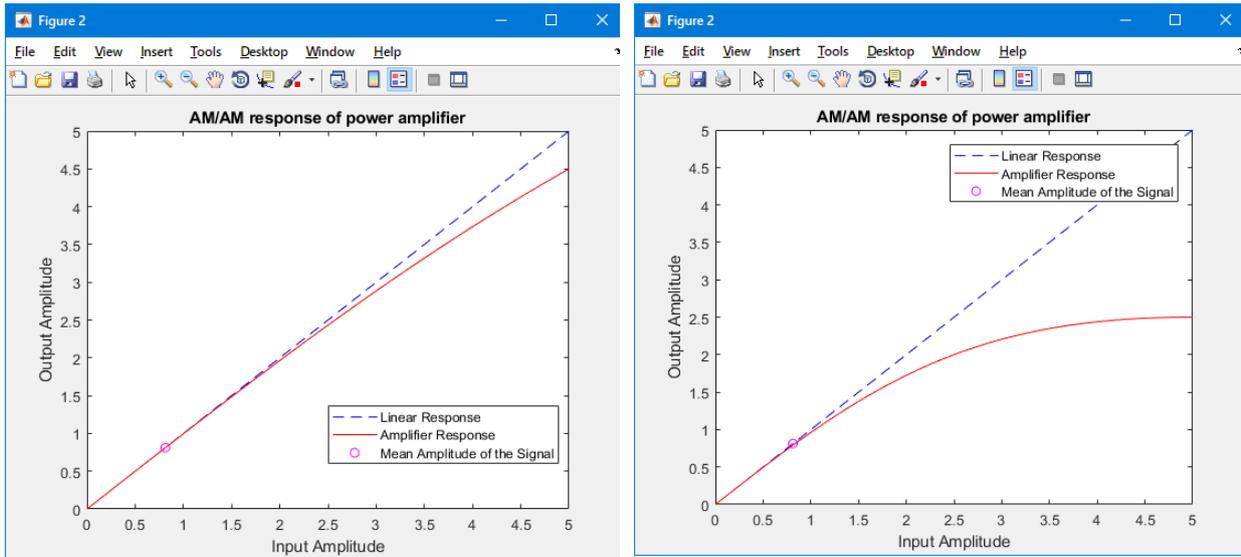


Рис. 1. Искажение усилителя мощности с различным уровнем сжатия
 Fig. 1. Distortion of power amplifier with various compression levels

Пусть информационный вектор $\vec{e} = (e_1, \dots, e_J)$, состоящий из символов QAM манипуляции, представляющий отдельный канал связи, который необходимо передать за ограниченный интервал времени T и в заданной полосе круговых частот $\Omega = [-\nu/2, \nu/2]$. Для передачи используется канальный сигнал $x(\vec{e}, t), t \in [0, T]$ в виде физически реализуемой функции времени, в параметрах которой эти символы закодированы. Предполагается, что энергия сигнала фиксирована

$$\|x(\vec{e})\|^2 = \int_0^T x^2(\vec{e}, t) dt = E, \tag{2}$$

а также должен существовать восстанавливающий оператор, который при отсутствии искажений канального сигнала позволяет однозначно декодировать передаваемые символы [Жилияков, Урсол, Магергут, 2012].

Положим,

$$X(\vec{e}, \omega) = \int_0^T x(\vec{e}, t) e^{-j\omega t} dt, \tag{3}$$

тогда в виду равенства Парсеваля имеет место

$$\|x(\vec{e})\|^2 = \int_{\omega \in \Omega} |X(\vec{e}, \omega)|^2 d\omega / 2\pi + \int_{\omega \notin \Omega} |X(\vec{e}, \omega)|^2 d\omega / 2\pi. \tag{4}$$

Второй интеграл в правой части соотношения (4) определяет часть энергии канального сигнала, которая попадает за пределы выделенной для передачи частотной полосы. Поэтому её величина может служить мерой межканальной интерференции при субполосной передаче информации. В соответствии с этим можно сформулировать вариационный принцип

$$S^2(\vec{e}) = \int_0^T x^2(\vec{e}, t) dt - \int_{\omega \in \Omega} |X(\vec{e}, \omega)|^2 d\omega / 2\pi = \min, \tag{5}$$

которому вместе с условиями (2) должен удовлетворять канальный сигнал. Его естественно называть оптимальным в смысле минимума меры межканальной интерференции. Решение поставленной задачи осуществляется подстановкой в соотношение

$$P = \int_{\omega \in \Omega} |X(\vec{e}, \omega)|^2 d\omega / 2\pi \quad (6)$$

определения (3), что дает

$$P = \int_0^T \int_0^T f(t)f(\tau)A_0(t-\tau)dt d\tau, \quad (7)$$

где A_0 – субполосное ядро

$$A_0(t-\tau) = \int_{\omega \in \Omega} \exp(-j\omega(t-\tau))d\omega / 2\pi. \quad (8)$$

После интегрирования (8) получаем:

$$A_0(t-\tau) = \frac{\sin\left(\frac{v}{2}(t-\tau)\right)}{\pi(t-\tau)} \quad (9)$$

при $t = \tau$ имеет место:

$$A_0(0) = \frac{v}{2\pi}, \quad (10)$$

где v – ширина выделенной полосы частот.

Субполосное ядро является симметричным и положительно определенным. Представим в виде разложения по собственным функциям

$$A_0(t-\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} \lambda_n q_n(t)q_n(\tau), \quad (11)$$

которые определяются из уравнения

$$\lambda_n q_n(t) = \int_0^T A_0(t-\tau)q_n(\tau)d\tau, \quad 0 \leq t \leq T, \quad (12)$$

где собственные числа упорядочены по убыванию

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n \dots > 0. \quad (13)$$

Эти условия позволяют сформировать ортогональный базис для ортогонального частотного уплотнения на основе собственных функций субполосного ядра, отобранных по заданному критерию.

$$\lambda_n = \int_{\omega \in \Omega} |Q_n(\omega)|^2 d\omega / 2\pi \leq 1. \quad (14)$$

Собственное число равно доле энергии соответствующего собственного вектора в заданной полосе. Базис из собственных функций субполосного ядра является полным в пространстве функций с ограниченной евклидовой нормой [Урсол, 2012].

Для цифровых систем связи количество слагаемых в представлении (12) ограничивается частотой дискретизации и, следовательно, количеством ортонормированных базисных функций. Таким образом синтез элементов субполосного ядра представляется в виде

$$a_{i,k} = \begin{cases} \sin\left(\frac{v}{2}(i-k)\right) / \pi(i-k), & i \neq k \\ \frac{v}{2\pi}, & i = k \end{cases}, \quad (15)$$

где $i, k = 1, 2, \dots, N$ – количество отсчетов на интервале одного символа, которая определяется целочисленным значением и рассчитывается согласно выражению

$$N = Fs \cdot T_b, \quad (16)$$

где Fs – частота дискретизации в системе связи, T_b – длительность OFDM символа. При этом

$$v = 2 \cdot \pi \left(\frac{W}{Fs} \right), \quad (17)$$

W – ширина выделенной полосы для передачи в Гц.

Формирование оптимального базиса для ортогонального частотного уплотнения в виде матрицы $Q = (\vec{q}_1, \vec{q}_2, \dots, \vec{q}_j)$ формируется из собственных векторов $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_N)^T$ субполосной матрицы (24), соответствующие собственные числа которых близки или равны единице, где Т – знак транспонирования.

Тогда для передачи исходных символов информационных каналов и применяется способ кодирования согласно выражению:

$$x(\vec{e}) = \vec{e} \cdot Q^T, \tag{18}$$

тогда их восстановление информации при том, что $Q^T \cdot Q = E$:

$$\vec{e} = x(\vec{e}) \cdot Q, \tag{19}$$

где E – единичная матрица, Т – знак транспонирования.

В качестве основных параметров формируемых сигналов был взят стандарт IEEE 802.11 (Wi-Fi) для ортогонального субполосного базиса и базиса OFDM: количество отсчетов сигнала $N = 64$; ширина выделенной полосы частот $BW = 20$ МГц; QAM манипуляция; количество частотных защитных интервалов для OFDM Guard = 13; количество выбранных собственных векторов ортогонального базиса $SC = 52$; количество передаваемых символов 10^6 . Предполагается, что искажение фазы усилителя остается постоянным, белый шум к передаваемым сигналам не добавлялся.

В качестве оценки искажений была выбрана мера среднеквадратического отклонения величины вектора ошибки (EVM RMS), что позволяет провести количественную оценку уровня искажений, вызванного нелинейностью усилителя мощности:

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e_k}{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (I_k^2 + Q_k^2)}} * 100, \tag{20}$$

где $e_k = (I_k - \tilde{I}_k)^2 + (Q_k - \tilde{Q}_k)^2$, N – общее количество передаваемых символов, I – синфазная составляющая, Q – квадратурная составляющая. На рис. 2 представлен энергетический спектр оптимального ортогонального сигнала до и после усилителя мощности с различной нелинейной характеристикой.

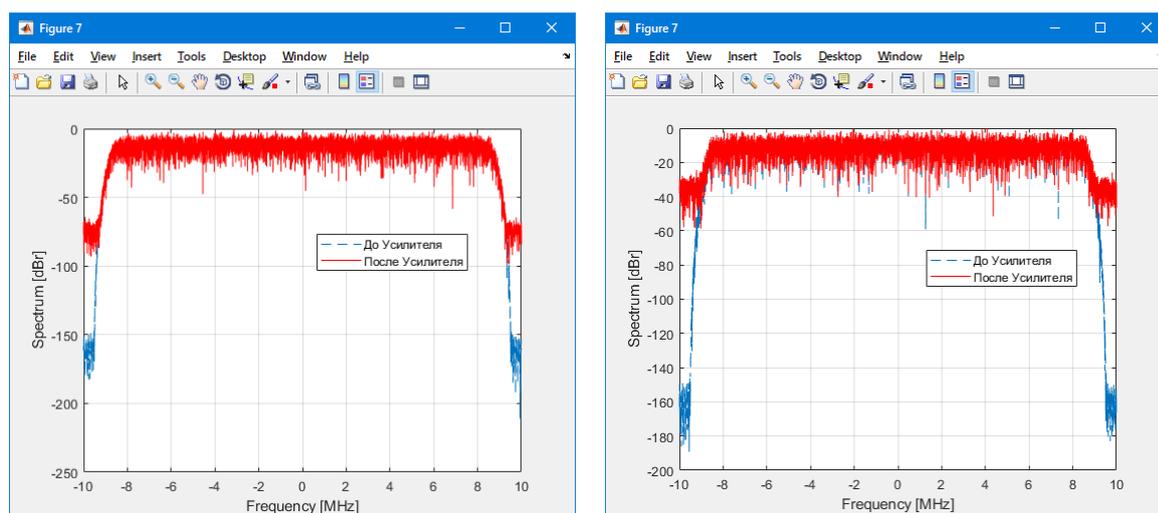


Рис. 2. Влияние нелинейности усилителя мощности на уровень внеполосной энергии передаваемого ортогонального сигнала

Fig. 2. The effect of nonlinearity of a power amplifier on the out-of-band energy level of a transmitted orthogonal signal

Нелинейность искажений усилителя мощности приводит к увеличению энергии за пределами заданной полосы, что негативно влияет на соседние каналы. Чем ниже уровень

сжатия, тем выше уровень внеполосного излучения у оптимального ортогонального базиса. На рис. 3 представлен результат вычислительного эксперимента оценки принятого и переданного информационного символа до этапа формирования и после декодирования.

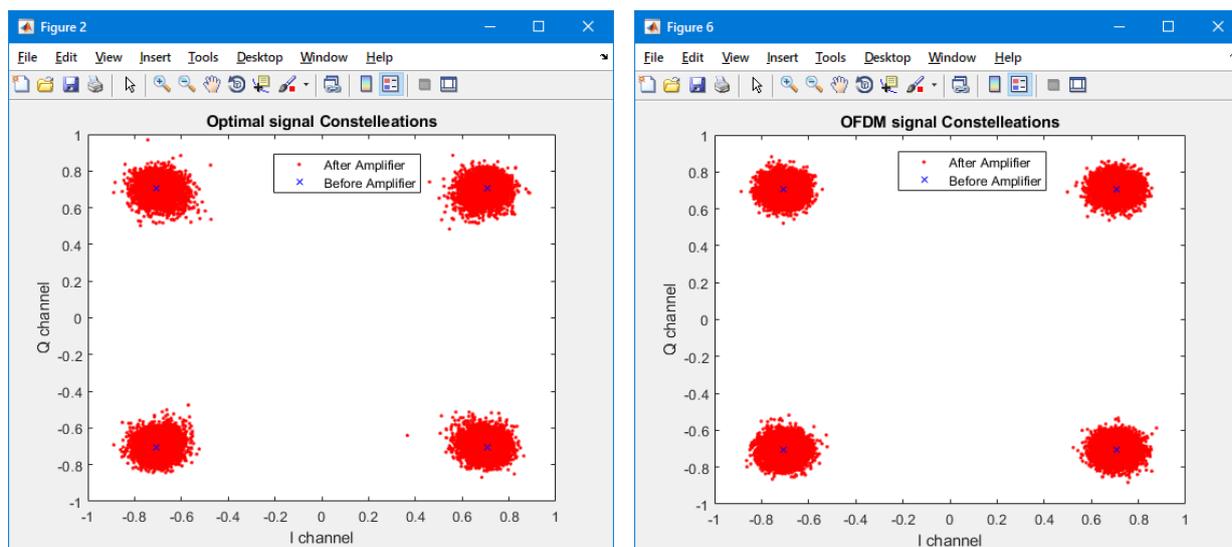


Рис. 3. Переданные и принятые символы ортогонального субполосного базиса и OFDM при нелинейном искажении усилителя

Fig. 3. Transmitted and received symbols of the orthogonal subband basis and OFDM with amplifier non-linear distortion

Результаты вычислительного эксперимента по оценке корня среднеквадратической ошибки вектора отклонений, при различном уровне нелинейности усилителя мощности, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Table 1

Влияние уровня сжатия усилителя мощности на ортогональный базис
Effect of the compression level of a power amplifier on an orthogonal basis

Уровень насыщения усилителя мощности (S_t)	QAM			
	EVM RMS (%)		Пиковое значение EVM RMS (%)	
	Оптимальный сигнал	OFDM	Оптимальный сигнал	OFDM
1	73.9256	73.7484	188.3577	151.1787
2	26.7092	26.7167	104.3925	66.2986
4	8.2035	8.2345	46.5783	23.6777
5	5.4379	5.4684	38.0525	18.8965
6	3.8574	3.8574	26.1092	13.0247
7	2.8737	2.8737	20.3086	10.6112
8	2.2202	2.2374	18.4938	9.1892
12	1.0042	1.0122	11.2291	4.2136
16	0.5685	0.5735	5.5102	2.4409

Из таблицы видно, что средние значения вектора ошибки у оптимального ортогонального базиса и ортогонального частотного уплотнения (OFDM) схожи, поскольку соотношение пиковой и средней мощности сигналов находится на равном уровне (10 дБ).

Таким образом, нелинейность усилителя приводит к увеличению внеполосного излучения, что снижает эффективность ортогонального субполосного базиса и его применение в реальных системах. Уровень нелинейности усилителя мощности приводит к аналогичным OFDM искажениям в силу равенства пик-фактора. Поскольку усилитель

обладает наибольшим КПД в области точки насыщения, цифровая коррекция позволяет изменять форму модулированных сигналов таким образом, чтобы работа была с высоким КПД, но без искажений или высоким уровнем нелинейности, что особенно актуально для систем с автономной системой питания и большой зоной радио покрытия. Разработка метода цифровой коррекции предискажений является актуальной задачей, и дальнейшая работа будет направлена на разработку функции компенсации нелинейного искажения усилителя мощности с использованием субполосного ортогонального базиса. Внесение цифровых компенсаций нелинейности искажений в ортогональный базис заранее, который может храниться в памяти приемно-передающего устройства, позволит уменьшить сложность и стоимость оборудования, при этом усилитель мощности будет возможно использовать с максимальным коэффициентом полезного действия.

Список литературы

1. Жилияков Е.Г., Урсол Д.В., Магергут В.З. 2012. Разработка нового способа формирования сигналов для систем доступа к широкополосным мультимедийным услугам. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. Издательство: Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород.
2. Зиатдинов С. И. 2009. Оценка нелинейных искажений сигнала, вносимых электронным усилителем. Электронные и электромагнитные устройства. Изв. Вузов. Приборостроение. 52 (5).
3. Кожемякин И.И., Семущин И.В. 2018. Линеаризация с предискажением для исправления дефектов работы радиочастотного усилителя мощности в сетях 5G с массивным MIMO. Ученые записки УлГУ. Серия: Математика и информационные технологии., 2: 28–34.
4. Саяпин В.Ю., Тисленко В.И., Родионов В.В. 2015. Обзор и сравнительный анализ способов построения компенсаторов нелинейных искажений в усилителях мощности. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. Доклады ТУСУРа, 4 (38).
5. Урсол Д.В. 2012. Метод обеспечения помехоустойчивости информационных коммуникаций при субполосной передаче информации: дис. канд. техн. наук: 05.13.17 – Теоретические основы информатики. Белгород.
6. Carlos Alexandre Rolim Fernandes, João Mota, Gerard Favier, 2010. Cancellation of Nonlinear Inter-Carrier Interference in OFDM Systems with Nonlinear Power-Amplifiers. Conference: Latent Variable Analysis and Signal Separation - 9th International Conference, LVA/ICA 2010, St. Malo, France, September 27–30.
7. Digital Modulation Techniques in Mobile Communications. www.staff.neu.edu.tr/~fahri/mobile_L7.pdf.
8. Gayle Collins and David W. Runton, 2007. Nonlinear analysis of power amplifiers. microwave journal, Horizon House Publications, Inc.
9. IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access, 2002. www.grouper.ieee.org/groups/802/16/docs/02/C80216-02_05.pdf.
10. Long Term Evolution (LTE): Overview of LTE Air-Interface Technical White Paper http://www.motorola.com/mcne/TechDocs/LTE_Air_Interface_TWP.pdf.
11. Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation, 2006. www.wimaxforum.org/news/downloads/Mobile_WiMAX_Part1_Overview_and_Performance.pdf.
12. Nguyen Quoc Binh, Julius Berces, I. Frigyes, 1995. Estimation of the effect of nonlinear high power amplifier in M-QAM radio relay systems. PERIODICA POLYTECHNICA SER. EL. ENG. VOL. 39, NO. 2, PP. 1–15–166.
13. Peter Jantunen. 2004. Modeling of nonlinear power amplifiers for wireless communications. The theses of Master of Science in Espoo, Finland.
14. Rahul Gupta, Saad Ahmad, Reinhold Ludwig, John McNeill. 2006. Adaptive Digital Baseband Predistortion for RF Power Amplifier Linearization. High Frequency Electronics.
15. White paper EDGE Introduction of high-speed data in GSM/GPRS networks. www.satnac.org.za/proceedings/2003/plenary/EricssonEDGE.pdf.
16. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE Std 802.11g, 2003. www.pdos.csail.mit.edu/decouto/papers/802.11g.pdf.
17. Ziad El-Khatib, Leonard MacEachern, Samy A. Mahmoud. 2012. Distributed CMOS Bidirectional Amplifiers. Springer-Verlag New York. Series ISSN 1872-082X, P 134.

References

1. Zhilyakov E.G., Ursol D.V., Magergut V.Z. 2012. Development of a new method for generating signals for access systems to broadband multimedia services. Scientific reports of Belgorod State University. Series: Economics. computer science. Publisher: Belgorod State National Research University, Belgorod. (in Russian).
2. Ziatdinov S.I. 2009. Ocenka nelinejnyh iskazhenij signala, vnosimyh jelektronnym usilitelem. Jelektronnye i jelektromagnitnye ustrojstva. [Assessment of nonlinear signal distortions introduced by an electronic amplifier. Electronic and electromagnetic devices.] Izv. Universities. Instrument making. 52 (5).
3. Kozhemyakin I.I., Semushin I.V. 2018. Linearizacija s predyskazheniem dlja ispravlenija defektov raboty radiochastotnogo usilitelja moshhnosti v setjah 5G s massivnym MIMO. [Linearization with predistortion to correct defects in the operation of the radio frequency power amplifier in 5G networks with massive MIMO.] Scientific notes UISU. Series: Mathematics and Information Technology. 2: 28–34.
4. Sayapin V.Y., Tislenko V.I., Rodionov V.V. 2015. Obzor i sravnitel'nyj analiz sposobov postroenija kompensatorov nelinejnyh iskazhenij v usiliteljah moshhnosti. [Review and comparative analysis of methods for constructing non-linear distortion compensators in power amplifiers.] Electronics, measuring equipment, radio engineering and communications. TUSUR Reports. 4 (38).
5. Ursol D.V. 2012. Metod obespechenija pomehoustojchivosti informacionnyh kommunikacij pri subpolosnoj peredache informacii [The method of ensuring noise immunity of information communications in the subband transmission of information]: dis. cand. tech. Sciences: 05.13.17 – Theoretical foundations of computer science. Belgorod.
6. Carlos Alexandre Rolim Fernandes, João Mota, Gerard Favier, 2010. Cancellation of Nonlinear Inter-Carrier Interference in OFDM Systems with Nonlinear Power-Amplifiers. Conference: Latent Variable Analysis and Signal Separation - 9th International Conference, LVA/ICA 2010, St. Malo, France, September, 27–30.
7. Digital Modulation Techniques in Mobile Communications. www.staff.neu.edu.tr/~fahri/mobile_L7.pdf.
8. Gayle Collins and David W. Runton, 2007. Nonlinear analysis of power amplifiers. microwave journal, Horizon House Publications, Inc.
9. IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access, 2002. www.grouper.ieee.org/groups/802/16/docs/02/C80216-02_05.pdf.
10. Long Term Evolution (LTE): Overview of LTE Air-Interface Technical White Paper http://www.motorola.com/mcne/TechDocs/LTE_Air_Interface_TWP.pdf.
11. Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation, 2006. www.wimaxforum.org/news/downloads/Mobile_WiMAX_Part1_Overview_and_Performance.pdf.
12. Nguyen Quoc Binh, Julius Berces, I. Frigyes, 1995. Estimation of the effect of nonlinear high power amplifier in M-QAM radio relay systems. PERIODICA POLYTECHNICA SER. EL. ENG. VOL. 39, NO. 2, PP. 1-15-166.
13. Peter Jantunen. 2004. Modeling of nonlinear power amplifiers for wireless communications. The theses of Master of Science in Espoo, Finland.
14. Rahul Gupta, Saad Ahmad, Reinhold Ludwig, John McNeill, 2006. Adaptive Digital Baseband Predistortion for RF Power Amplifier Linearization. High Frequency Electronics.
15. White paper EDGE Introduction of high-speed data in GSM/GPRS networks. www.satnac.org.za/proceedings/2003/plenary/EricssonEDGE.pdf.
16. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE Std 802.11g, 2003. www.pdos.csail.mit.edu/decouto/papers/802.11g.pdf.
17. Ziad El-Khatib, Leonard MacEachern, Samy A. Mahmoud. 2012. Distributed CMOS Bidirectional Amplifiers. Springer-Verlag New York. Series ISSN 1872-082X, P 134.

Ссылка для цитирования статьи

For citation

Урсол Д.В. 2020. Влияние искажений усилителя мощности на сигналы с ортогональной субполосной базой. Экономика. Информатика. 47 (1): 205–212. DOI:

Ursol D.V. 2020. Influence distortion of power amplifier on signals with orthogonal subband base. Economics. Information technologies. 47 (1): 205–212 (in Russian). DOI: