



Ссылка на статью:

// Ученые записки УлГУ. Сер. Математика и информационные технологии. УлГУ. Электрон. журн. 2018, № 2, с. 28-34.

Поступила: 01.12.2018

Окончательный вариант: 25.12.2018

© УлГУ

УДК 621.391.832.4

## Линеаризация с предсказанием для исправления дефектов работы радиочастотного усилителя мощности в сетях 5G с массивным MIMO.

Кожмякин И.И.<sup>1,\*</sup>, Семушин И.В.<sup>1</sup>

[\\*kozhiya@gmail.ru](mailto:kozhiya@gmail.ru)

<sup>1</sup>УлГУ, Ульяновск, Россия

---

В данной работе исследуется метод моделирования усилителя мощности при помощи многочлена Вольтерра с эффектом памяти, который может моделировать основные искажения в работе модели. Это необходимо для дальнейшего исследования цифрового предсказания без необходимости использовать реальные элементы сети.

**Ключевые слова:** линеаризация, предсказание, усилители мощности.

---

### Введение

На текущий момент сети пятого поколения 5G только разрабатываются, хотя основы для его развития уже заложены. Однако внедрение этих сетей в современных реалиях затруднено. Помимо нераспространённости устройств, работающих с данной технологией, заметной проблемой реализации является неэффективность усилителей мощности, количество которых в структурных элементах сетей 5G, за счёт использования технологии массивного MIMO, увеличилось в десятки и, в некоторых реализациях, в сотни раз. Так, например, в сетях предыдущего поколения, использовались 2-3 антенны в каждом элементе сети, тогда как в 5G используются антенные решётки с 128, 256 и более антенн в каждой [1].

В отличие от предыдущих поколений, в сетях 5G усилители мощности должны быть эффективными одновременно и по результату работы, и по энергопотреблению. К сожалению, на данный момент, эти две характеристики усилителей мощности взаимоисключающие, и использование тех же усилителей мощности, что и в предыдущих

поколениях, вызовет существенный рост энергопотребления, а вместе с ним и финансовые затраты на поддержку сети. Использование же энергоэффективных усилителей мощности чревато возникновением искажений сигнала, которые могут ухудшить не только качество передачи конкретных сигналов, но и качество работы всей сети в целом [2].

Одним из рассматриваемых способов решения проблемы компромисса между качеством работы и энергоэффективностью – намеренное программное искажение сигнала перед обработкой энергоэффективным усилителем мощности с целью компенсировать искажения усилителя мощности. Данный метод получил название *цифровое предыскажение*. Однако основная проблема данного метода – предыскажение, которое требуется для компенсации недостатков усилителя мощности, зависит от конкретного усилителя и, зачастую, характеристиками самого сигнала.

## 1. Моделирование усилителя мощности

### Эффекты нелинейности усилителя мощности

В современных системах радиочастотные передаточные элементы, которые используют усилители мощности, имеют довольно сложную архитектуру. Так, например, в некоторых реализациях сетей 5G, структура элемента имеет вид, изображённый на рисунке. Однако для данной работы использование полной структурной схемы избыточно, так что в данной работе будет использоваться упрощённая модель передатчика, изображённая на рис. 1.

Одним из самых критических искажений, порождаемых усилителями мощности, является эффект нелинейности, который возникает при передаче мощных сигналов. Чтобы сохранить линейность усилителя и избежать этой проблемы при передаче символов с наивысшей пиковой мощностью, средняя выходная мощность усилителя должна быть на несколько дБ ниже, чем точка сжатия.

Для высокой эффективности, усилитель мощности должен работать в режиме высокой мощности. Усилитель имеет постоянное усиление для входных сигналов низкой

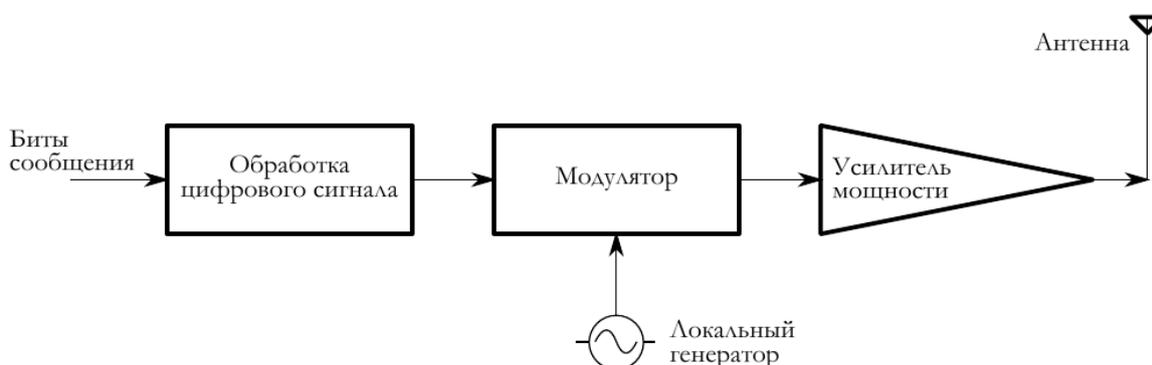
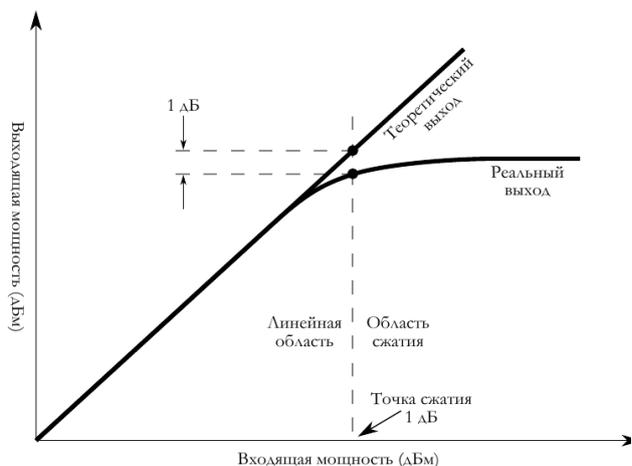


Рис. 1. Упрощённая блок-схема архитектуры современного передатчика

мощности, однако при высоких уровнях мощности входного сигнала усилитель переходит в насыщение и коэффициент усиления уменьшается. Область, где происходит подобное явление, называется *областью сжатия*.



**Рис. 2.** Входящая и выходящая мощность для точки сжатия 1 дБ

Точка, где коэффициент усиления уменьшается на 1 дБ от постоянного значения, называется *точкой сжатия 1 дБ*; её можно увидеть на рис. 2. Когда усилитель находится в области сжатия, пиковые точки выходного сигнала начинают отсекаться.

Значительная часть эффектов нелинейности усилителей мощности связана с амплитудными (АМ/АМ) и фазовыми (АМ/РМ) искажениями сигнала.

Искажение АМ/АМ можно охарактеризовать как отклонение от

постоянного усиления при увеличении входной мощности в направлении области сжатия.

Искажение АМ/РМ можно описать как изменение фазы сигнала, вызванного усилителем мощности, когда входная мощность увеличивается в области сжатия. Причём это изменение фазы начинает увеличиваться со временем и увеличением мощности. Это искажение также известно как *фазовый эффект*. Алгоритмы цифрового предискажения так же позволяют существенно уменьшить это искажение.

Ещё одним искажением сигнала являются *эффекты памяти*. Они, так же как и рассмотренные выше искажения, являются проявлениями нелинейности усилителя мощности, однако если АМ/АМ и АМ/РМ искажения статичны и проявляются лишь когда мощность текущего входящего сигнала высока, то проявление эффектов памяти зависит так же от предыдущих входящих сигналов.

Эффекты памяти, в основном, возникают в системах, в которых используются конденсаторы и индукторы (компоненты, хранящие заряд и магнитный поток): они по своей природе порождают подобные искажения. В усилителях мощности конденсаторы и катушки индуктивности используются в сетях согласования и смещения. Помимо этого, факторами возникновения эффекта памяти могут служить и другие причины, например, самонагрев системы. Из-за обширного перечня факторов возникновения эффектов памяти, аналитическая оценка эффектов памяти затруднительна, однако её можно наблюдать на графиках передаточной функции амплитуды, которые строятся при анализе АМ/АМ искажений.

## Моделирование усилителя мощности при помощи ряда Вольтерра

Из-за эффектов нелинейности и памяти усилителей мощности необходимы методы моделирования, способные представлять эти эффекты. Одна из наиболее известных и простых моделей, обладающей эффектом памяти, – *ряд Вольтерра*, который в общем случае имеет следующий вид:

$$y(t) = h_0 + \sum_{n=1}^N \left[ \int_a^b \cdots \int_a^b h^{(n)}(\tau_1 \cdots \tau_n) \times \prod_{j=1}^n x(t - \tau_j) d\tau_j \right], \quad (1)$$

где  $x$  – функция входного сигнала,  $y$  – функция результирующего сигнала,  $h^{(n)}(\tau_1 \cdots \tau_n)$  – ядро моделируемой системы, определяемое коэффициентами ядра. Ядро системы приближённо вычисляется для реально существующего усилителя мощности, после чего может применяться для моделирования в ряде Вольтерра для любого входящего сигнала.

Путём некоторых преобразований, упрощений и допущений, ряд (1) можно представить в виде *многочлена Вольтерра с эффектом памяти*:

$$y_{MP}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M a_{km} x(n-m) |x(n-m)|^{k-1}, \quad (2)$$

где  $K$  – максимальный порядок мощности,  $M$  – максимальная глубина эффекта памяти,  $a_{km}$  – коэффициент ядра системы.

Для практического моделирования усилителя мощности, коэффициента многочлена (2) представляется в виде вектор-столбца  $A$ , а реальные результаты усилителя мощности заполняют большую матрицу  $X$  с  $M + 1$  столбцами и  $N + 1$  строками, в которой элемент записывается как

$$\begin{aligned} X_{i,j} &= x(j-m) |x(j-m)|^p, \\ m &= \text{mod}\{i-1, M+1\}, \\ p &= \left\lfloor \frac{i-1}{M+1} \right\rfloor. \end{aligned}$$

После этого, решается матричное уравнение  $Y = X A$ , для чего находится псевдообратная матрица Мура-Пенроуза  $X^+$ .

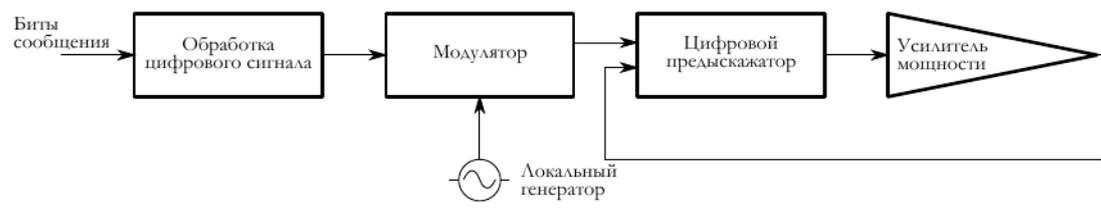
## 2. Предыскажение сигнала

Как было указано выше, одним из самых перспективных вариантов решения проблемы искажений в энергоэффективных усилителях мощности сейчас считается цифровое предыскажение. Идея, которая лежит в основе данного метода, довольно проста: исказить сигнал перед передачей его усилителю мощности таким образом, чтобы в результате обработки усилителем мощности получалось линейное решение.

Если брать за основу схему упрощённой модели передатчика из рис. 1 и добавить в него цифровой предыскажатор, по получится схема, изображённая на рис. 3.

Обратная связь от усилителя мощности к предыскажатору необходима для того, чтобы предыскажатор мог компенсировать эффекты памяти усилителя мощности.

Математически идея цифрового предыскажения довольно просто. Предположим, что на вход связке предыскажатор-усилитель подаётся сигнал  $X$ . Предположим также, что нам



**Рис. 3.** Упрощённая блок-схема архитектуры современного передатчика с цифровым предсказателем.

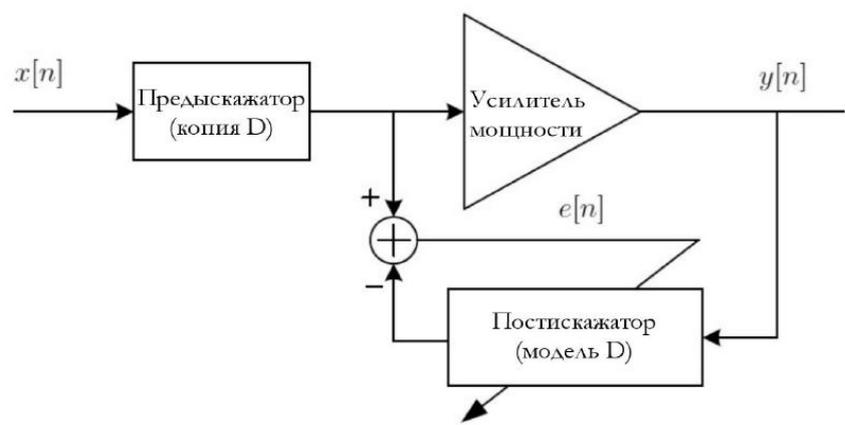
известен оператор  $\mathcal{P}$ , который характеризует преобразует входящего сигнала  $X$  энергоэффективным усилителем мощности в результирующий сигнал  $Y_n = \mathcal{P} X$ .

В этих обозначениях, линейное предсказание будет характеризоваться оператором  $\mathcal{D}$ , который будет удовлетворять условию  $\mathcal{P} \mathcal{D} = \mathcal{L} = \alpha \mathcal{I}$ , где  $\mathcal{L}$  – оператор линейного усиления сигнала,  $\alpha$  – коэффициент усиления системы,  $\mathcal{I}$  – единичный оператор. Тогда оператор предсказания  $\mathcal{D}$  будет пропорционален правому обращению оператора усиления сигнала  $\mathcal{P}^{-1}$ . Если предположить, что оператор  $\mathcal{P}$  характеризуется многочленом Вольтерра, рассмотренном ранее, то оператор  $\mathcal{D}$  так же будет характеризоваться многочленом.

Если рассматривать этот подход в схеме, предложенной на рис. 4, инвертирующий оператор  $\mathcal{D}$  можно установить для обращения действия усилителя мощности (то есть как *постискажатор*), а затем использовать в качестве оператора предсказания сигнала [4]. Этот метод называется *косвенно обучающейся архитектурой*, блок-схема этого метода, предложенная в [5], показана на рис. 4.

Таким образом, алгоритм настройки предсказани имеют следующий вид:

1. Сигнал  $x$  подаётся на вход усилителю мощности без какого-либо предсказания.



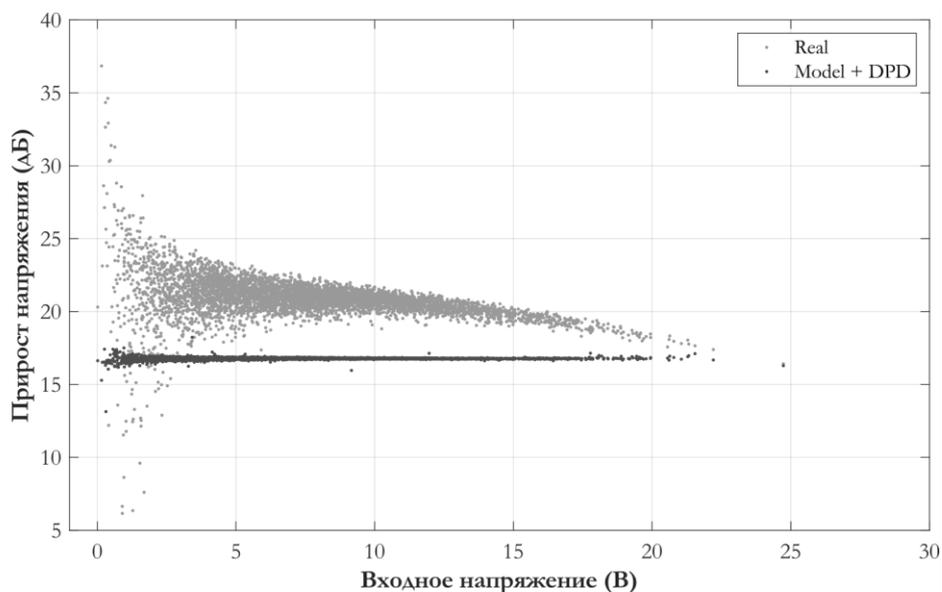
**Рис. 4.** Косвенно обучающаяся архитектура цифрового предсказателя

2. Полученный результат работы усилителя мощности – сигнал  $u$ .
3. Сигнал  $u$  нормализуется с усилением и выравнивается с результатом входного сигнала – получаем нормализованный сигнал  $u$ .
4. Оцениваем коэффициенты модели постискажения  $A$  – модели, обратной усилителю мощности -- при помощи многочлена Вольтерра; в качестве входного сигнала используем сигнал  $u$ , выходного –  $x$ .
5. Полученные коэффициенты модели постискажения передаются в блок предискажения.
6. Применяем предискажение к сигналу  $x$  – получаем сигнал  $\hat{x}$ .
7. Сигнал  $\hat{x}$  подаётся на вход усилителю мощности. Его результат  $\hat{y}$  – результат работы модели.

В данном алгоритме пункты 2–5 можно повторять несколько раз, чтобы увеличить точность работы системы. В этом случае, итоговый предсказатель будет суперпозицией нескольких операторов постискажений. Однако многократное повторение этого алгоритма влечёт за собой пропорциональное увеличение продолжительности вычислений, что может быть критично для применения в реальных условиях.

После построения соответствующей модели (в данной работе модели строились на языке MATLAB), была произведена проверка работы системы на точной модели работы реального усилителя мощности, поставляемого в пакете Simulink.

Проведённая первичная проверка работы системы предискажения показывает



**Рис. 5.** График AM/AM характеристики сигнала без предискажения (серый) и с предискажением (тёмно-серый) после работы усилителя мощности.

неплохие результаты. Изменения сигнала хорошо заметны на графике AM/AM характеристики сигнала, представленном на рис. 5. Непредискажённый сигнал, обозначенный светло-серыми точками, характеризуется рассмотренными ранее

искажениями: во-первых, усиливается неравномерно: так, для сигнала в 5 В усиление, в среднем, составляет 21 дБ, тогда как для 20 В – всего 17 дБ; во-вторых, даже для двух равных по напряжению сигналов усиление может быть разным – одно из проявлений эффектов памяти. Как видно на графике, тёмно-серые точки, относящиеся к предискажённому сигналу, расположены вдоль прямой, параллельной оси абсцисс, то есть усиление на всём промежутке постоянно, хоть и меньше, чем среднее усиление непредискажённому сигналу. Кроме того, точки, соответствующие слабым сигналам, на разбросаны так сильно вдоль оси ординат.

Таким образом, можно говорить о том, что рассмотренный алгоритм предискажения позволяет существенно снизить – но не полностью убрать – основные искажения сигнала от работы усилителя мощности.

## Заключение

В данной работе рассмотрены основные искажения, возникающие в усилителях мощности, что используются в современных системах беспроводных сетей пятого поколения 5G и, в частности, методе MIMO. Также построена базовая модель усилителя мощности, основанной на многочлене Вольтерра с эффектом памяти и общие исследования его работы. В заключение, была разработана и протестирована схема цифрового линейного предискажения сигнала для компенсации дефектов работы усилителей мощности.

## Список литературы

1. *5G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality*. National Instruments. Режим доступа: <http://www.ni.com/white-paper/52382/en> (дата обращения 1.12.2018).
2. Панов И. *Технология 5G: как оценивают качество каналов связи MIMO?* NetworkGuru. Режим доступа: <https://networkguru.ru/tekhnologija-5g-kak-ocenivaiut-kachestvo-kanalov-sviasi-mimo/> (дата обращения 1.12.2018).
3. D. R. Morgan, Z. Ma, J. Kim, M. G. Zierdt, J. Pastalan. *A Generalized Memory Polynomial Model for Digital Predistortion of RF Power Amplifiers*. IEEE Trans. Signal Process., Vol. 54, No. 10, 3852--3860, 2006.
4. A. S. Tehrani. *Behavioral modeling of wireless transmitters for distortion mitigation* 978-91-7385-767-3, Chalmers University, 2012
5. Changsoo Eun, E. J. Powers. *A new volterra predistorter based on the indirect learning architecture*. Signal Processing, IEEE Transactions on, vol. 45, no. 1, pp. 223 227, Jan 1997.
6. T. E. Bogale, L. B. Le. *Pilot Optimization and Channel Estimation for Multiuser Massive MIMO Systems*. ArXiv e-prints, 2014.
7. I. C. Sezgin. *Different Digital Predistortion Techniques for Power Amplifier Linearization*. Department of Electrical and Information Technology, Faculty of Engineering, LTH, Lund University, 2016.