

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА В ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ РАДИОСИСТЕМЕ (SDR)

*Тихонов В.Ю., аспирант Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ),
e-mail: sl-tx@yandex.ru;*

Шинаков Ю.С., д.т.н., профессор Московского технического университета связи и информатики (МТУСИ);

*Тимошенко А.С., к.т.н., доцент Московского института электронной техники (МИЭТ),
e-mail: timoshenko@edu.miet.ru;*

Бахтин А.А., к.т.н., доцент Московского института электронной техники (МИЭТ), e-mail: bah@miet.ru.

DIGITAL PROCESSING OF NON-LINEAR SIGNAL DISTORTION IN A SOFTWARE-DEFINED RADIO (SDR)

Tikhonov V.Y., Shinakov Y.S., Tymoshenko A.S., Bakhtin A.A.

The model of digital predistortion device for compensation of nonlinear signal distortions arising in the power amplifier of the transmission system with the use of OFDM technology is considered. The model is implemented in the form of a software and hardware module and is interfaced with laboratory equipment NI USRP 2943R, containing the receiving and transmitting parts of the transmission system. The results of experimental measurements of nonlinear distortions of OFDM signals in a power amplifier without and using the proposed digital pre-distortion device are presented, confirming a significant expansion of the linear part of the dynamic range of the power amplifier.

Key words: nonlinear inertial device, nonlinear signal distortion, digital predistortion, OFDM technology.

Ключевые слова: нелинейное инерционное устройство, нелинейные искажения сигнала, цифровые предискажения, технология OFDM.

Введение

Искажения сигналов, возникающие в усилителях мощности (УМ) беспроводных систем передачи, являются препятствием для увеличения качества, скорости передачи данных и мобильности. Широко используемым способом борьбы с такими искажениями является их компенсация, осуществляемая путем введения предискажений сигналов. Принцип предискажений заключается в том, что специально вводится искажение входного сигнала исследуемого УМ дополнительным устройством, называемым устройством предискажений (УПРИ), характеристики которого в некотором смысле являются обратными характеристикам усилителя. Это УПРИ вводится перед УМ. Получающаяся цепочка из двух последовательно включенных элементов может обеспечить снижение нежелательных искажений полезного сигнала. Способы предискажений сигналов представляются важными и во многих других приложениях, например, в телевидении, радиовещании и других радиотехнических системах. Для краткости будем их называть способами или методами линеаризации. Среди них наиболее эффективными являются цифровые методы линеаризации [1].

В течение последних 15 лет проводятся интенсивные исследования различных способов введения предискажений сигнала для разных моделей УМ без памяти. Нелинейность УМ в этом случае представляется функцией, связывающей мгновенные значения вещественных огибающих радиосигналов на входе и на выходе; это так называемая нелинейность АМ-АМ. В

Рассматривается модель цифрового устройства предискажения для компенсации нелинейных искажений сигнала, возникающих в усилителе мощности системы передачи с технологией OFDM. Модель реализована в виде программно-аппаратного модуля и сопряжена с лабораторным оборудованием NI USRP 2943R, содержащим приемную и передающую части системы передачи. Приведены результаты экспериментальных измерений нелинейных искажений сигналов OFDM в усилителе мощности без и с применением предлагаемого цифрового устройства предискажения, подтверждающие значительное расширение линейной части динамического диапазона усилителя мощности.

более сложном случае приходится рассматривать взаимосвязь и текущего значения фазы радиосигнала на выходе УМ с мгновенным значением огибающей сигнала на входе; обычно в этом случае говорят о нелинейности АМ-ФМ.

Для УМ без памяти функция предискажения может быть реализована также как нелинейная функция с последующей полиномиальной аппроксимацией при построении компенсатора [2, 3].

В последнее время были предложены различные решения для устройств, которые являются как нелинейными, так и инерционными, т.е. обладают памятью. В таких устройствах искажения сигнала имеют более сложный характер [4, 5]. Большинство предлагаемых в этих случаях моделей для УПРИ основаны на полиномиальных моделях с памятью [6], моделях Вольтерра [7] или Винера-Гаммерштейна [8]. Например, последнюю можно представить следующим образом:

$$y_{MWHM}(n) = \sum_{m_1=0}^{P_3-1} \sum_{k=0}^{P_3-1} c_{m_1} b_k \sum_{m_2=0}^{P_2-1} a_{m_2} x(n-m_1-m_2) \left| \sum_{m_2=0}^{P_2-1} a_{m_2} x(n-m_1-m_2) \right|^k. \quad (1)$$

Здесь $x(n)$ – отсчет мгновенного значения комплексной огибающей узкополосного сигнала на входе УМ, $y(n)$ – значение комплексной огибающей сигнала на выходе УМ; все остальные величины являются параметрами модели, значения которых должны быть определены на этапе идентификации модели на основе выборочных значений отсчетов сигналов на входе и выходе УМ. Такая постановка задачи возможна в том случае, когда есть реальное устройство и доступны измерениям необходимые значения сигналов на входе и выходе.

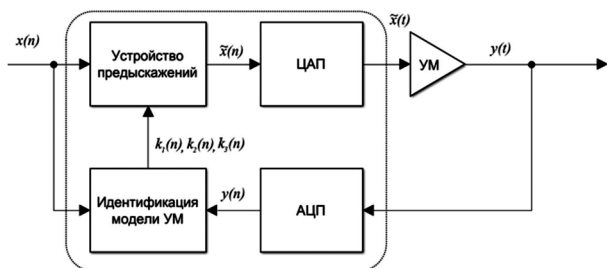


Рис. 1. Структурная схема цифровой системы предсказаний

На рис. 1 представлена предлагаемая структурная схема внедрения в реальное оборудование передатчика системы предсказаний, к которой здесь следует отнести все блоки, охваченные пунктирной кривой. Блок «Устройство предсказаний» обеспечивает коррекцию как нелинейных, так и линейных (частотно зависимых, инерционных) искажений. Блок «Идентификация модели УМ» представляет собой параметрическую нелинейную инерционную модель (1) УМ, значения параметров которой определяются адаптивно в процессе нормального функционирования системы передачи.

Основную задачу системы предсказаний можно сформулировать следующим образом. Устройство предсказаний должно выполнять операции над отсчетами $x(n)$ комплексной огибающей сигнала на входе системы, которые можно рассматривать в некотором смысле как обратные операциям, выполняемым в УМ. Чтобы конкретизировать эти операции в блоке «Идентификация модели УМ» осуществляется контроль ошибки $e^2(n) = |k \cdot x(n) - y(n)|^2$, значение которой в процессе идентификации сводится к минимально возможному значению путем подбора значений коэффициента k и некоторых параметров модели (1), которые на рис. 1 представлены обозначениями $k_1(n)$, $k_2(n)$, $k_3(n)$. Поскольку $k \cdot x(n)$ представляет собой усиленный неискаженный сигнал, то минимизация значения этой ошибки свидетельствует о такой подстройке «Устройства предсказаний», при которой преобразования сигнала в этом устройстве действительно обратны преобразованиям в УМ. При этом структуры модели УМ и устройства предсказаний могут выбираться на основе разных априорных сведений об УМ.

В данной работе в качестве модели УМ выбрана модификация модели Винера-Гаммерштейна: типовое радиотехническое звено, содержащее последовательное соединение фильтра 1, нелинейного безынерционного преобразователя и фильтра 2. Оба фильтра имеют

выбранные структуры с конечным числом параметров, а нелинейный преобразователь описывается степенным полиномом. Идентификация такой модели сводится к оценке значений всех параметров на основе наблюдаемых реализаций процессов $y(n)$ на выходе УМ и $x(n)$ на входе «Устройства предсказаний». Более детальное описание алгоритмов функционирования этих устройств можно найти в [9].

Программно-определяемая радиосистема (англ. Software-defined radio, SDR) – радиотелекоммуникационная система, которая может быть настроена на произвольную полосу частот и принимать различные виды модулированного сигнала, состоящая из программируемого оборудования с программным управлением.

В настоящее время система SDR представляет большой интерес как в теоретической, так и в практической сфере: SDR выполняет значительную часть цифровой обработки сигналов на обычном персональном компьютере или на ПЛИС. цель такой схемы – радиоприемник и/или радиопередатчик произвольных радиосистем, изменяемый путем программной переконфигурации.

Программное радио применяется в военной сфере и сфере беспроводных услуг, так как позволяет обслуживать большое количество абонентов одновременно. В SDR-оборудовании форма модулированного радиосигнала задается в программном обеспечении (ПО). Формируется цифровой сигнал, который затем с помощью широкополосного ЦАП преобразуется в аналоговый на промежуточной частоте (ПЧ).

В приемнике все происходит в обратном порядке. Широкополосный АЦП преобразует в цифровой вид множество узкополосных сигналов, попадающих во входной тракт приемника. В соответствии с встроенным ПО приемник извлекает, преобразует вниз и демодулирует сигналы каждого канала, т.е. технология SDR позволяет изменять эксплуатационные параметры радиооборудования на уровне ПО.

Технология SDR включает в себя комбинацию методов, затрагивающих аппаратную и программную части. Аппаратная часть включает многодиапазонные антенны и радиочастотные преобразователи; широкополосные ЦАП и АЦП; а обработка сигналов ПЧ демодулированных сигналов и результирующего цифрового потока происходит с помощью программируемых процессоров общего назначения.

Достоинства SDR-приемника:

- не требует настройки;
- низкая чувствительность к температуре и разбросу параметров компонентов;
- простота реализации перестраиваемых фильтров с подавлением более 80 дБ;
- высокая точность и широкий диапазон перестройки фазы и частоты гетеродина.

«РЧ-секция, ПЧ-секция и секция базовой станции. РЧ-секция включает только аналоговые аппаратные модули (в то время как две другие целиком содержат цифровую аппаратуру) и отвечает за передачу/прием радиосигнала. ПЧ-секция отвечает за цифро-аналоговое преобразование и модуляцию/демодуляцию сигнала».

Функция программной части SDR сводится к распре-

делению ресурсов аппаратных средств для их использования различными приложениями связи и трансляции протокола второго уровня вышестоящим протоколам (WAP, TCP/IP).

Экспериментальная установка

В процессе проведения эксперимента¹ измерялись AM-AM характеристика УМ, входящего в оборудование USRP-2943R, на частотах в диапазоне 3400-3600 МГц [10, 11]. Структурная схема эксперимента представлена на рис. 2. Схема состоит из имитатора комплексной огибающей сигнала OFDM, представляющего собой программную часть передатчика, блока передатчика USRP (аппаратная часть эксперимента), который формирует высокочастотный радиосигнал, аттенюатора, приемника USRP (аппаратная часть эксперимента) и приемника сигнала OFDM (программная часть приемника). Передатчик USRP обеспечивает возможность установки значений частоты несущего колебания, выбора режима работы и значения коэффициента усиления УМ. Выход передатчика механически соединен со входом приемника через аттенюатор на 30 дБ. Приемник USRP работает в линейном режиме, не вносит искажений и обеспечивает необходимый уровень радиосигнала на частоте 3,6 ГГц на входе программного модуля приемника.

Имитатор сигнала OFDM формирует данные для 172-х поднесущих и блок из 28 OFDM символов данных. Каждый OFDM символ на интервале циклического префикса имеет $N_{cp} = 32$ отсчета комплексной огибающей радиосигнала и $N_{fft} = 256$ отсчетов огибающей на интервале быстрого дискретного преобразования Фурье.

На рис. 3 приведены результаты измерения характеристик AM-AM исследуемого передатчика USRP, по-

лученные при разных коэффициентах усиления УМ передатчика и постоянном среднем значении огибающей сигнала на его входе. Каждая точка на этих рисунках представляет собой графическое представление результата одновременных измерений мгновенных значений мощности сигнала на входе УМ (ось абсцисс) и на его выходе (ось ординат). Для этого входом УМ является выход имитатора сигнала OFDM, а выходом – вход программного модуля приемника на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема исследуемой системы

Анализ этих рисунков позволяет сформулировать следующие выводы: 1) при коэффициенте усиления, не превышающем 24 дБ, усилитель можно считать линейным и безынерционным по отношению к огибающей сигнала на входе, поскольку все одновременные отсчеты мгновенных значений огибающих сигналов на входе и выходе практически располагаются на прямой линии; 2) с увеличением коэффициента усиления (увеличение крутизны характеристики AM-AM) до значений 26-28 дБ теряется взаимно однозначное соответствие между мгновенными значениями огибающих сигнала на входе и выходе усилителя – одному и тому значению огибающей на входе могут соответствовать разные значения огибающей на выходе усилителя (точки отсчетов рассеиваются вдоль оси ординат); этот эффект свидетельствует о проявлении инерционных свойств усилителя даже относительно огибающей сигнала на входе; 3) при коэффициенте усиления 30 дБ характеристика AM-AM свидетельствует о появлении эффекта насыщения, что сопро-

¹ Экспериментальные исследования выполнялись в лаборатории кафедры «Телекоммуникационные системы» университета МИЭТ.

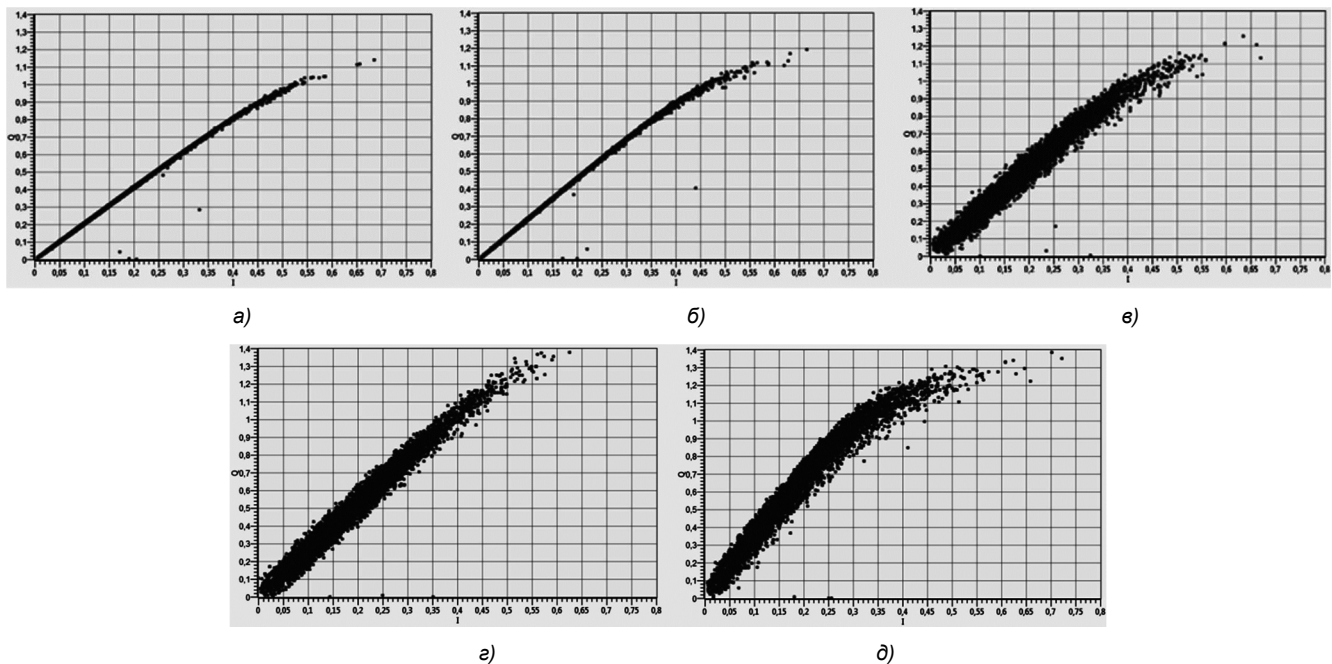


Рис. 3. Характеристики AM-AM усилителя NI USRP-2943R при коэффициентах усиления: а) 22 дб; б) 24 дб; в) 26дб; г) 28 дб; д) 30 дб

вождается нелинейными искажениями огибающей сигнала; рассеивание точек отсчетов вдоль оси ординат при появлении эффекта насыщения увеличивается.

Оба указанных эффекта – нелинейность характеристики АМ-АМ и рассеивание точек отсчетов вдоль оси ординат – свидетельствуют о том, что усилитель следует рассматривать как нелинейное инерционное устройство. Для сигналов OFDM эти эффекты приводят к повороту сигнального созвездия и рассеиванию точек сигнального созвездия относительно их номинальных положений. Оба этих следствия являются нежелательными и являются причинами, которые ограничивают либо динамический диапазон входного сигнала усилителя, либо его коэффициент усиления. В обоих случаях ограничивается энергетическая эффективность системы передачи.

Эффективным средством ослабления указанных эффектов представляется введение предсказаний сигнала на входе усилителя. При этом термином «предсказания» здесь следует понимать устранение как нелинейности характеристики АМ-АМ усилителя мощности, так и рассеивание точек отсчетов вдоль оси ординат на рис. 3. Это означает, что система предсказаний должна вносить как нелинейные, так и инерционные эффекты, обратные аналогичным эффектам УМ. В данной работе предлагается система предсказаний, состоящая из двух блоков (рис. 1). В блоке «Идентификация модели УМ» оцениваются значения необходимых параметров и характеристик выбранной модели реального УМ NI USRP-2943R, которые затем используются в «Устройстве предсказаний» для формирования нужных характеристик этого устройства. В качестве модели УМ используется типовое радиотехническое звено, состоящее из последовательно соединенных фильтра 1, нелинейного безынерционного устройства и фильтра 2. Основная задача идентификации при этом сводится к выбору характеристик и оцениванию значений параметров каждого из элементов этого типового звена, которые затем используются для настройки устройства предсказаний.

Система цифровых предсказаний

На рис. 1 представлена структурная схема исследуемой системы, в которой основным исследуемым элементом является усилитель УМ, а остальные блоки представляют собой устройство цифровых предска-

жений (УПРИ), к которой отнесены блок идентификации модели усилителя и блок формирования характеристик устройства предсказания. Алгоритмы идентификации и формирования, представленные в этом разделе, построены на основе работы [9] и адаптированы для работы с оборудованием USRP. При реализации этих алгоритмов оказалось более удобным два функциональных блока УПРИ объединить и представить их в виде последовательного соединения 3-х блоков, изображенных на рис. 4. Рис. 1 удобен для описания режима функционирования УПРИ, а рис. 4 – для описания вычислительных алгоритмов этой системы.

Структура УПРИ на рис. 4 состоит из блока компенсации эффектов памяти после нелинейного преобразования, блока компенсации нелинейных преобразований и блока компенсации эффектов памяти до нелинейного преобразования.

Для описания алгоритмов функционирования этой УПРИ введем следующие обозначения:

$\vec{k}_i(n)$ – векторный параметр размерности p_i соответствующего блока, $i = 1, 2, 3$;

g_i – множитель шага сходимости алгоритма соответствующего блока, $i = 1, 2, 3$;

$$\vec{f}_1(x(n), p_1) = (x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-p_1)), \quad (2)$$

$$\vec{f}_2(x(n), p_2) = (x^1(n) \ x^2(n) \ \dots \ x^{p_2}(n)), \quad (3)$$

$$\vec{f}_3(x(n), p_3) = (x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-p_3)). \quad (4)$$

До начала вычислений выполняется инициализация, в результате которой переменным величинам каждого блока присваиваются начальные значения:

$$\vec{k}_1(0) = \vec{k}_2(0) = \vec{k}_3(0) = (1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0)^T.$$

Далее рекурсивно для $n = 0, 1, 2, \dots$ выполняются следующие вычисления:

$$x_2(n) = \vec{f}_1(x(n), p_1) \cdot \vec{k}_1(n), \quad y_2(n) = \vec{f}_1(y(n), p_1) \cdot \vec{k}_1(n), \quad (5)$$

– значений на выходе блока компенсации эффектов памяти после нелинейного преобразования;

$$x_3(n) = \vec{f}_2(x_2(n), p_2) \cdot \vec{k}_2(n), \quad y_3(n) = \vec{f}_2(y_2(n), p_2) \cdot \vec{k}_2(n). \quad (6)$$

– значений на выходе блока компенсации нелинейных преобразований;

$$\tilde{x}(n) = \vec{f}_3(x_3(n), p_3) \cdot \vec{k}_3(n) \quad (7)$$

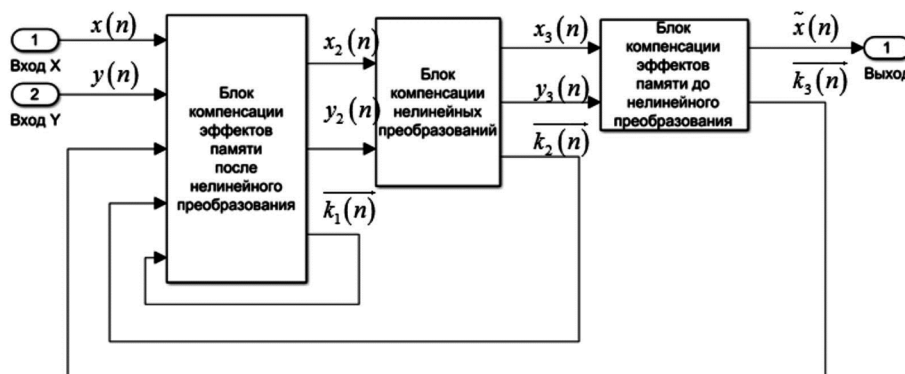


Рис. 4. Структура устройства предсказаний

– значений на выходе УПРИ.

В каждом блоке УПРИ значения векторов параметров в (2), (3) и (4) вычисляются рекуррентно в соответствии со следующими алгоритмами:

а) для блока компенсации эффектов памяти после нелинейного преобразования:

$$err_1(n) = f_1(f_2(f_3(xy_2(n), p_2, p_3) \times \overline{k_3(n-1)}, p_2) \overline{k_2(n-1)}, p_1) \overline{k_1(n-1)} - f_1(f_2(f_3(yy_2(n), p_2, p_3) \overline{k_3(n-1)}, p_2) \times \overline{k_2(n-1)}, p_1) \overline{k_1(n-1)}.$$

– поправка для n -го такта,

$$\overline{k_1(n)} = \overline{k_1(n-1)} + err_1(n) g_1 f_1(y(n), p_1) - \text{новое (текущее) значение вектора весовых коэффициентов;}$$

б) для блока компенсации нелинейных преобразований:

$$err_2(n) = f_2(x(n), p_2) \overline{k_2(n-1)} - f_2(y(n), p_2) \overline{k_2(n-1)} - \text{поправка для } n\text{-го такта,}$$

$$\overline{k_2(n)} = \overline{k_2(n-1)} + err_2(n) g_2 f_2(y(n), p_2) - \text{новое (текущее) значение вектора весовых коэффициентов;}$$

в) для блока компенсации эффектов памяти до нелинейного преобразования:

$$err_3(n) = f_3(x(n), p_3) \overline{k_3(n-1)} - f_3(y(n), p_3) \overline{k_3(n-1)} - \text{поправка для } n\text{-го такта;}$$

$$\overline{k_3(n)} = \overline{k_3(n-1)} + err_3(n) g_3 f_3(y(n), p_3) - \text{новое (текущее) значение вектора весовых коэффициентов.}$$

Вышеперечисленные блоки для поиска новых значений векторов коэффициентов используют метод наименьших квадратов. Отличительной особенностью разработанного алгоритма является определение поправки к блоку компенсации эффектов памяти после нелинейного преобразования.

При реализации на лабораторном оборудовании использовалось программное обеспечение NI LabView Communications 2.0. На рис. 5, 6 и 7 изображена реализация блоков устройства предсказаний в программно-определяемой радиосистеме NI USRP 2943R.

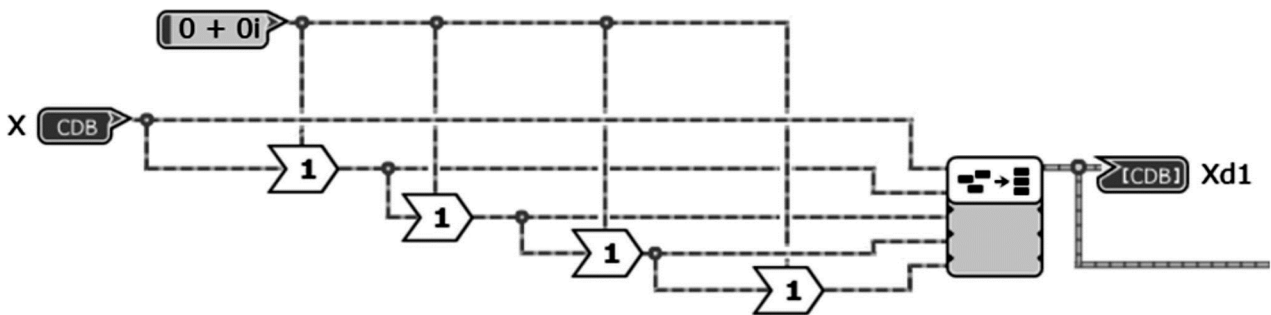


Рис. 5. Реализация блока компенсации эффектов памяти после нелинейного преобразования

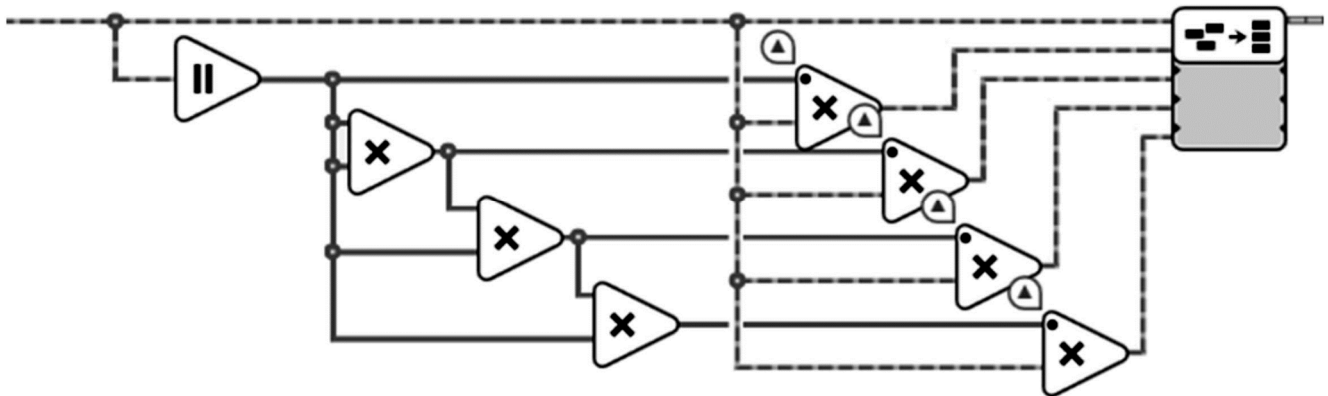


Рис. 6. Реализация блока компенсации нелинейных преобразований

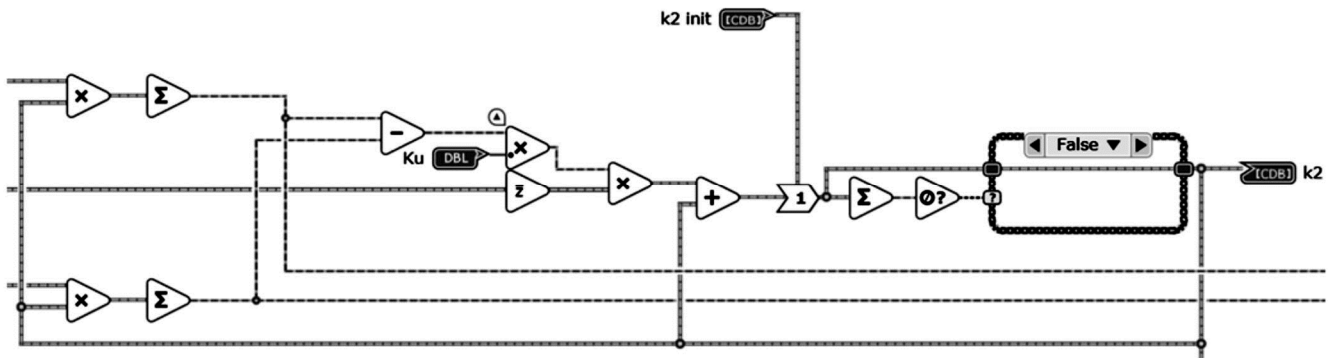
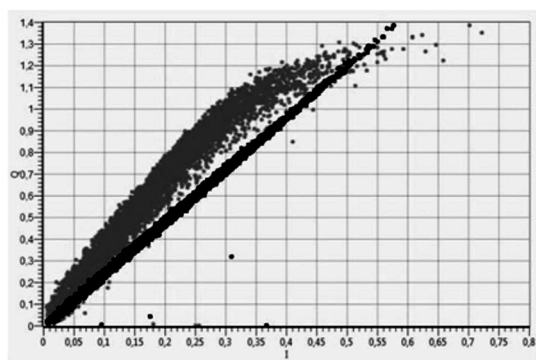


Рис. 7. Реализация блока компенсации эффектов памяти до нелинейного преобразования

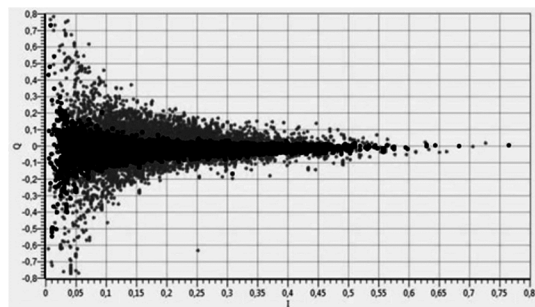
Результаты моделирования

Все вычисления в этом эксперименте (регистрация отсчетов комплексных огибающих, формирование начальных значений, матричные вычисления) выполнялись в ПЛИС оборудования USRP-2943R. Аппаратно решена задача синхронизации системы передачи и устройства предсказаний, так как при моделировании УПРИ для реального УМ задача моделирования системы синхронизации не ставилась. При синхронизации сигнала приходилось учитывать время, затрачиваемое на обновление коэффициентов устройства предсказаний.

На рис. 8 приведены экспериментально полученные зависимости АМ-АМ и АМ-ФМ для оборудования USRP: синее изображение – характеристики без предсказаний; черное изображение – эти же характеристики при установленном режиме функционирования системы предсказаний.



а) АМ-АМ



б) АМ-ФМ

Рис. 8. Сравнение характеристик при введении УПРИ

Анализ этих и других аналогичных характеристик позволяет сделать следующие выводы: используемая модель нелинейного УМ с памятью в виде типового радиотехнического звена и предлагаемый адаптивный (рекуррентный) алгоритм ее идентификации обеспечивают возможность построения цифрового предсказывающего устройства, которое обеспечивает существенное уменьшение как линейных, так и нелинейных искажений узкополосного сигнала, сформированного на основе технологии OFDM. Что же касается численных показателей улучшения характеристик усилителя мощности, то здесь можно привести следующие оценки: предлагаемое устройство предсказаний для данного усилителя обеспечивает расширение динамического диапазона этого оборудования на 6 дБ, что в свою очередь повышает энергетическую эффективность системы передачи на 4 дБ.

Заключение

Модель Винера-Гамерштейна можно рекомендовать как относительно простую модель для описания нелинейных устройств с памятью. Для такого звена в данной работе предложены алгоритмы оценивания параметров этой модели по реальным значениям сигналов на входе и выходе усилителя мощности. Предложенные алгоритмы являются рекуррентными и обеспечивают решения задач идентификации в нормальном режиме функционирования линеаризуемого устройства. Предлагаемая система предсказаний может быть реализована на современных ПЛИС. Введение предсказывающего устройства для линеаризации характеристик усилителей мощности существенно расширяет динамический диапазон для мгновенным значениям огибающей сигнала OFDM; в представленном здесь эксперименте – примерно в 1,5 раза.

Литература

1. H. Alasady, R. Boutros and M. Ibnkahla. «Comparison between digital and analog predistortion for satellite communications», CCECE 2003 – Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toward a Caring and Humane Technology (Cat. No.03CH37436), Montreal, Quebec, Canada, 2003, pp. 183-186 vol.1.
2. R. Marsalek, P. Jardin, and G. Baudoin. «From post-distortion to predistortion for power amplifiers linearization», IEEE Commun. Lett., vol. 7, no. 7, pp. 308-310, Jul. 2003.
3. A.N. D'Andrea, V. Lottici, and R. Reggiannini. «RF power amplifier linearization through amplitude and phase predistortion», IEEE Trans. Commun., vol. 44, no. 11, pp. 1477-1484, Nov. 1996.
4. D. Lei, R. Raich, and G. T. Zhou. «A Hammerstein predistortion linearization design based on the indirect learning architecture», in Proc. Int. IEEE ICASSP, May 2002, vol. 3, pp. III-2689-III-2692.
5. G. Baudoin, P. Jardin, and R. Marsalek. «Power amplifier linearisation using predistortion with memory», in Proc. 13th Int. Czech-Slovak Scientific Conf. RADIOELEKTRONIKA, Brno, Czech Republic, May 6-7, 2003, pp. 193-196.
6. L. Ding, G.T. Zhou, D.R. Morgan, Z. Ma, J.S. Kenney, J. Kim, and C.R. Giardina. «A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials», IEEE Trans. Commun., vol. 52, no. 1, pp. 159-165, Jan. 2004.
7. A. Zhu and T.J. Brasil. «An adaptive Volterra predistorter for the linearization of RF high power amplifiers», in Proc. Conf. IEEE MTT, 2002, pp. 461-464.
8. Y. Ding, H. Ohmori, and A. Sano. «Adaptive predistortion for high power amplifier with linear dynamics» in Proc. IEEE Int. Midwest Symp. Circuits and Syst., Hiroshima, Japan, Jul. 2004, pp. 121-124.
9. V.Y. Tikhonov and Y.S. Shinakov. «COMPENSATION OF NONLINEAR DISTORTION IN INERTIAL DEVICES», 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-4.
10. A.G. Timoshenko, N.K. Osipenko, A.A. Bakhtin and E.A. Volkova, «5G Communication Systems Signal Processing PAPR Reduction Technique», 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-4.
11. NI USRP-2943 Software Defined Radio Reconfigurable Device, <https://www.ni.com/pdf/manuals/374193d.pdf>