УДК 621.375.026

В.Ю. Саяпин, В.И. Тисленко, В.В. Родионов

Обзор и сравнительный анализ способов построения компенсаторов нелинейных искажений в усилителях мощности

Обсуждаются различные варианты построения систем компенсации интермодуляционных искажений, возникающих при работе усилителей мощности в нелинейном режиме. Использованы материалы, представленные в зарубежных научных публикациях. Рассматриваются типовые структуры математических моделей нелинейных динамических звеньев, варианты архитектурного построения предистортера и алгоритмы адаптации его коэффициентов. Приводятся сравнительные характеристики систем.

Ключевые слова: нелинейные искажения, предистортер, усилитель мощности, модель нелинейной динамической системы, архитектура предистортера, алгоритм адаптации.

При работе усилителя мощности в нелинейном режиме возникают интермодуляционные искажения (ИМИ), которые проявляются в появлении комбинационных частотных составляющих, которые оказываются в полосе полезного сигнала и вблизи нее. При этом снижается отношение сигнал/шум в выходном сигнале усилителя, а в частотном спектре излученного сигнала появляются паразитные составляющие, кратные несущей частоте. В современных радиопередающих устройствах широкое применение находят цифровые системы компенсации нелинейных комбинационных искажений, в которых путем введения расчетных предыскажений полезного сигнала, обеспечивается линеаризация характеристик тракта и снижение уровня ИМИ. Система предыскажения полезного сигнала называется *предыскажателем*. Распространен и другой термин – предистортер, от английского слова *predistorter*.

Математическая модель радиопередающего тракта совместно с системой компенсации искажений включает модели формирователя тестового сигнала, усилителя мощности, предистортера, квадратурного модулятора и демодулятора, и фильтра нижних частот [1, 3]. Для подавления только интермодуляционных составляющих, образующихся в полосе полезного сигнала и вблизи нее, достаточно осуществить предыскажение только комплексной огибающей, без переноса сигнала на несущую частоту (рис. 1).

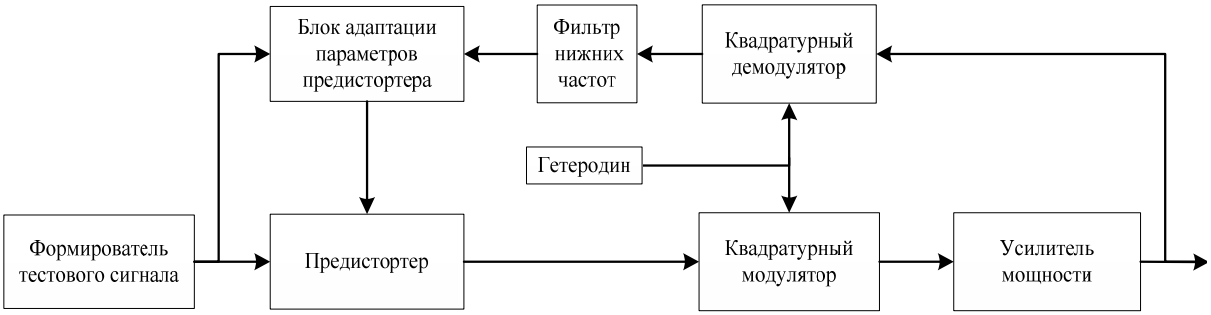

Рис. 1. Структурная схема радиопередающего тракта с компенсацией ИМИ

В общем случае, идея внесения предыскажений во входной сигнал для снижения интермодуляционных искажений выходного сигнала усилителя мощности (УМ) заключается во включении дополнительно блока перед усилителем мощности (предистортера), осуществляющего искажение сигнала обратное УМ. Иначе говоря, амплитудная и фазовая характеристики (АМ–АМ, АМ–РМ) блока «Предистортер» являются обратными к характристикам УМ (рис. 2).

Параметры реального усилителя могут изменяться под действием ряда факторов: температура и влажность окружающей среды, старение элементов и, что более важно, переключение усилителя мощности для работы в другом диапазоне. Очевидно, что эффективность компенсации нелинейных

комбинационных искажений, которую обеспечивает предистортер, может понизиться. В этой связи параметры предистортера должны измениться, т.е. режим его работы должен предусматривать адаптацию к возможным изменениям параметров усилителя мощности. Такая адаптация может быть выполнена путем сравнения входного сигнала с линеаризированным сигналом, полученным за счет ответвления части сигнала после УМ (рис. 2).

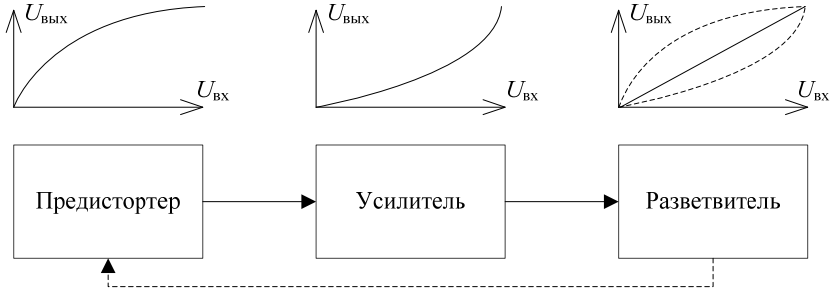

Рис. 2. Концепция линеаризации УМ

Разработка системы с компенсацией искажений предполагает выбор и обоснование варианта построения системы. При этом должны учитываться не только технические требования к системе в плане параметров, определяющих ее функциональное назначение (уровень подавления НКИ и паразитных гармоник, степень улучшения отношения сигнал/шум при усилении полосового сигнала, время установления процесса адаптивной подстройки параметров предистортера), но и ограничения, которые обусловлены факторами доступности и универсальности используемой элементной базы и технологичности используемых моделей и алгоритмов [1, 2].

Модели нелинейных динамических систем. Вопрос выбора математических моделей нелинейных динамических систем при моделировании нелинейных систем с компенсацией ИМИ широко обсуждается в научной литературе [2–6, 8, 12]. Подавляющее количество работ опубликовано в зарубежных источниках. При этом основное внимание уделяется математическим моделям четырех типов: модель Винера, Гаммерштайна, Вольтерра и полиномиальная модель с памятью.

Классически используемыми моделями являются математические модели Винера, Гаммерштайна, Вольтерра, полиномиальная модель с памятью.

Основная идея моделей Винера и Гаммерштайна состоит в представлении реальной нелинейно динамической системы в виде последовательного соединения нелинейного блока «без памяти» и линейной системы с памятью [2, 3, 8]. Математическая модель Винера представляет собой последовательное соединение линейной системы с памятью и следующего за ней нелинейного безынерционного блока (рис. 3, *а*).

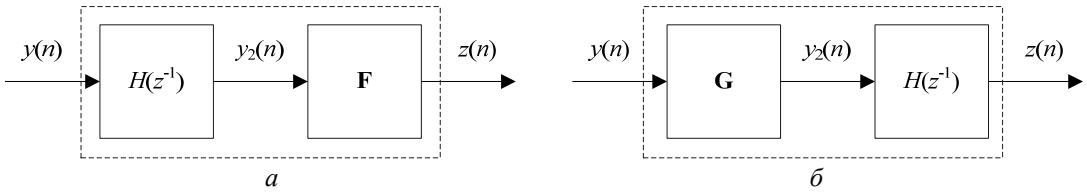

Рис. 3. Блок-схема математической модели Винера (*а*) и Гаммерштайна (*б*)

Таким образом, в модели Винера дискретные сигналы связаны следующими соотношениями [8]:

$$y_2(n)=H(z^{-1})y(n)=\frac{B(z^{-1})}{1-A(z^{-1})}y(n)=\sum_{m=0}^{m_b} b_m y(n-m)+\sum_{m=1}^{m_a} a_m y_2(n-m) \quad (1)$$

$$z(n)=f_1 y_2(n)+f_2 y_2^2(n)+\cdots+f_{mf} y_2^{mf}(n)=\mathbf{F}^T\mathbf{Y}_2(n), \quad (2)$$

где $\mathbf{F}=(f_1 \quad f_2 \quad \ldots \quad f_{mf})^T$; $\mathbf{Y}_2(n)=(y_2(n) \quad y_2^2(n) \quad \ldots \quad y_2^{mf}(n))$, где $H(z^{-1})$ – передаточная функция дискретного линейного фильтра. Модель Гаммерштайна так же, как и модель Винера, представляет собой последовательное соединение двух звеньев. Различие состоит в порядке их следования (рис. 3, *б*).

$$y_2(n) = g_1 y(n) + g_2 y^2(n) + \ldots + g_{mg} y^{mg}(n) = \mathbf{G}^T \mathbf{Y}(n), \quad (3)$$

$$z(n) = H(z^{-1}) y_2(n) = \frac{B(z^{-1})}{1 - A(z^{-1})} y_2(n) = \sum_{m=0}^{m_b} b_m y_2(n-m) + \sum_{m=1}^{m_a} a_m z(n-m), \quad (4)$$

где $\mathbf{G} = (g_1 \quad g_2 \quad \ldots \quad g_{mg})^T$; $\mathbf{Y}(n) = (y\ (n) \quad y^2(n) \quad \ldots \quad y^{mf}(n))$.

Особенность применения данных моделей при моделировании усилителя мощности и предыскажающего элемента состоит в том, что модели блоков усилителя и предистортера должны быть различными. Это означает, что если усилитель мощности представлен математической моделью Винера, то предистортер должен быть представлен в виде модели Гаммерштайна и наоборот [8].

Представление нелинейной динамической системы на основе рядов Вольтерра q-го порядка определено [2, 8] соотношением, связывающим вход $y(n)$ и выход $z(n)$ системы:

$$z(n) = \mathbf{H}^T y(n) = \sum_{k=1}^{q} \mathbf{H}_k^T y_k(n) = \sum_{k=1}^{q} \Big(\sum_{i_1-1}^{M_k-1} \ldots \sum_{i_k-1}^{M_k-1} \mathbf{H}_k(i_1,\ldots,i_k) y(n-i_1) \ldots y(n-i_k) \Big), \quad (5)$$

где $\mathbf{H} = (\mathbf{H}_1^T \ \mathbf{H}_2^T \ldots \mathbf{H}_q^T)^T$, а $\mathbf{H}_k = (h_k(0,\ldots,0) \ldots h_k(i_1,\ldots,i_k) \ldots h_k(M_k-1,\ldots,M_k-1))^T$ – вектор-столбец импульсных реакций для различных ядер.

Система предистортер–усилитель в данном случае представляется в виде двух последовательно соединенных звеньев, математические модели которых представлены рядами Вольтерра. Применение предистортера порядка q позволяет устранить нелинейность системы вплоть до порядка q. Задание ядер, определяющих модель усилителя, предполагает предварительное обучение. При этом ядра, определяющие модель предистортера, могут быть рассчитаны с использованием соответствующих алгоритмов адаптации.

Несмотря на высокое качество линеаризации, обеспечиваемое применением данного алгоритма, требуется высокая вычислительная мощность устройства, работающего в режиме реального времени [8]. Причем с ростом количества ядер требуемая вычислительная мощность растет экспоненциально. По этой причине практическое применение данного алгоритма ограничено.

Полиномиальная модель с памятью – наиболее популярная и широко используемая модель для разработки различных вариантов реализации устройств предыскажения. Фактически она представляет простую форму модели в виде рядов Вольтерра или «усеченный» ряд Вольтерра, поскольку коэффициенты, используемые в полиномиальной модели с памятью, являются диагональными коэффициентами из рядов Вольтерра аналогичного порядка [8].

Полиномиальная модель (рис. 4) может быть представлена в виде соотношения [5]

$$z(n) = \sum_{j=0}^{m-1} \sum_{i=1}^{q} h_{ij} y(n-j) \left| y(n-j) \right|^{i-1}, \quad (6)$$

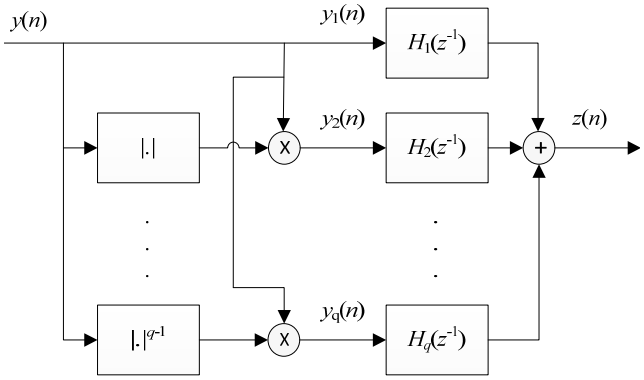

Рис. 4. Схема математической модели нелинейной динамической системы, представленной в виде полиномиальной модели с памятью

где совокупность $[q \times m]$ параметров модели образует q векторов размерностью m вида $\mathbf{H}_i = (h_{i0} \ h_{i1} \ldots h_{i(m-1)})^T$, $i = 1,2,\ldots,q$, m – глубина памяти; q – степень полинома; h_{ij} – коэффициенты полинома.

В [5] отмечается, что применение техники предыскажений на основе полиномиальной модели с памятью обеспечивает более простой способ учета инерционных свойств усилителя (памяти) и получение при этом приемлемой степени линеаризации. Полиномиальная модель с памятью более других ориентирована на практическое применение, поскольку в сравнении с другими вариантами имеет меньшее количество коэффициентов, описывающих систему.

Архитектура построения систем с предистортером. Способ адаптации параметров зависит от архитектуры построения систем с предыскажениями. Существуют два основных типа архитектур

таких систем: архитектура с прямых обучением (direct learning architecture – DLA) и архитектура с непрямым обучением (indirect learning architecture – ILA) [7–11].

Архитектура с прямым обучением представлена на рис. 5. В этом варианте адаптация параметров предистортера осуществляется по сигналу ошибки, который формируется в виде разности между реальным выходным сигналом усилителя и опорным (желаемым) сигналом. Под желаемым выходным сигналом $d(n)$ понимается идеально усиленный входной сигнал $g{\cdot}x(n)$, где $x(n)$ – входной сигнал; g – коэффициент усиления усилителя мощности [8].

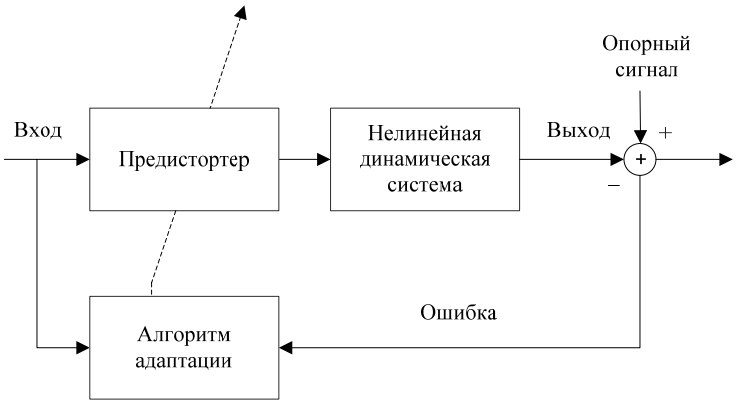

Рис. 5. Архитектура с прямым обучением предистортера

Архитектура с непрямым обучением представлена на рис. 6. В этом случае адаптация параметров предистортера осуществляется по сигналу ошибки, который образуется в виде разности между сигналом на выходе предистортера в прямом канале и сигнала на выходе обучающегося предистортера, включенного в обратном канале. При этом предистортеры в прямом и обратном каналах идентичны [8, 11]. Преимущество архитектуры ILA состоит в том, что она обеспечивает меньшую длительность переходного процесса в плане достижения требуемого уровня компенсации ИМИ.

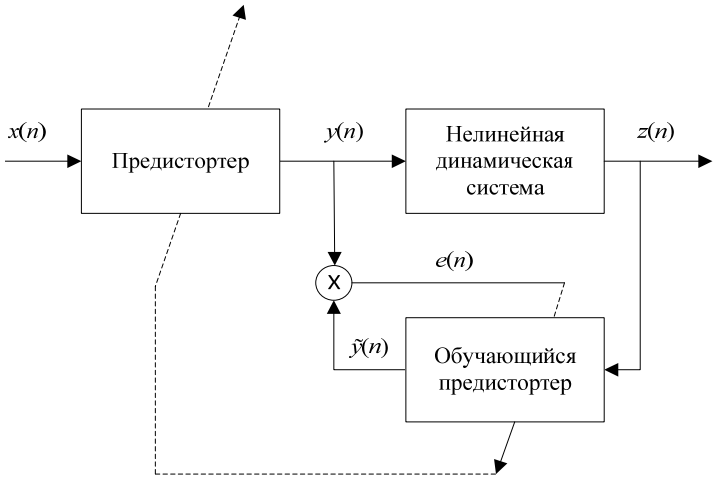

Рис. 6. Архитектура с непрямым обучением предистортера

При использовании архитектуры непрямого обучения коэффициенты предистортера подстраиваются рекурсивно. По сигналу ошибки $e(n)$, полученному путем сравнения двух сигналов $\tilde{y}(n)$ и $y(n)$ с выходов предистортеров в прямом и обратном каналах, рассчитываются подстраиваемые значения для коэффициентов предистортера. По мере приближения сигнала ошибки $e(n)$ к нулю сигнал с выхода усилителя мощности $z(n)$ приближается к входному сигналу $x(n)$. При этом процесс подстройки коэффициентов предистортера стремится к установившемуся состоянию.

Сравнение архитектур построения предистортеров и алгоритмов адаптации. Оценка вычислительной сложности алгоритма, скорости сходимости и уровня подавления ИМИ. Анализ результатов в [8–10] показывает, что непрямая архитектура имеет меньшее время сходимости и меньшую вычислительную сложность (таблица).

Вычислительная сложность различных алгоритмов адаптации предистортера

Архитектура системы	Алгоритм адаптации	Кол-во операций «+» на 1 отсчет	Кол-во операций «×» на 1 отсчет	Сходимость отсчетов	Вычислит. сложность	Подавление ИМИ
Прямая	LMS	180	384	> 20000	$> 1{,}13\times10^7$	–7
	PRS	2200	2324	800	$3{,}62\times10^6$	–22
	PEM	2200	2724	800	$3{,}94\times10^6$	–32
Непрямая	RLS	1700	2132	300	$1{,}15\times10^6$	–20
	KF	2100	2132	300	$1{,}39\times10^6$	–27
	RPEM	2100	2532	300	$1{,}84\times10^6$	–31

Для архитектуры непрямого обучения выделяют 3 основных алгоритма адаптации [8, 11]: рекурсивный метод наименьших квадратов – МНК (RLS), фильтр Калмана (KF), рекурсивный метод прогноза ошибки (RPEM).

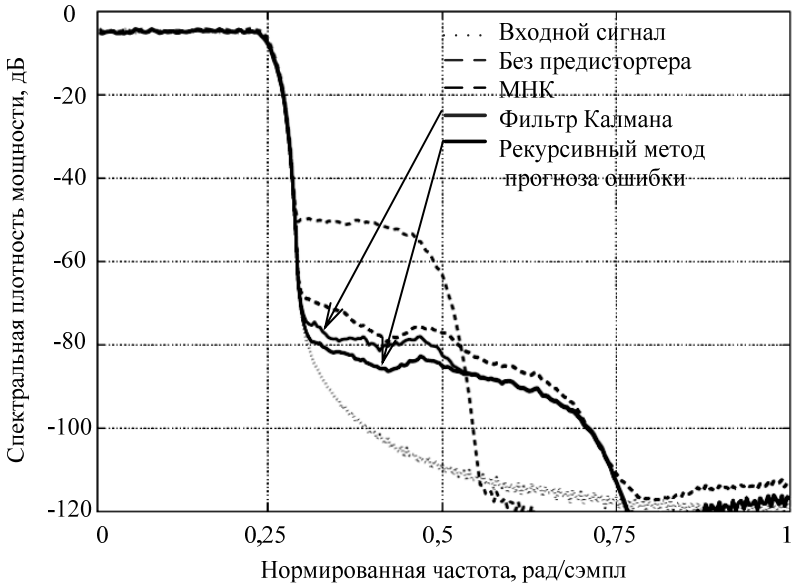

Рис. 7. Сравнение архитектур построения предистортеров

Как видно из таблицы и рис. 7, степень снижения уровня ИМИ при использовании RPEM выше по сравнению с другими алгоритмами непрямого обучения. При этом данный алгоритм имеет несколько большую вычислительную сложность по сравнению с другими алгоритмами этой группы. Однако в сравнении с алгоритмами прямого обучения алгоритм RPEM имеет существенные преимущества по вычислительной сложности.

Заключение. Анализ результатов, опубликованных в литературе, показывает, что система с компенсацией ИМИ на базе полиномиальной модели с памятью при непрямой архитектуре построения предистортера и адаптации на базе рекурсивного метода прогноза ошибки имеет ряд преимуществ, которые состоят в следующем:

- высокий уровень подавления интермодуляционных искажений;
- меньшя длительность переходного процесса в плане достижения требуемого уровня компенсации ИМИ при настройке системы;
- адаптивная подстройка системы к возможным изменениям параметров усилителя мощности;
- простота реализации системы на практике.

Литература

1. Katz G. Linearization: reducing distortion in power amplifiers // IEEE Microwave Magazine. – 2001. – Vol. 2. – P. 37–49.

2. Schetzen M. The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems. Revised edition. – Krieger Publishing Company, 2006. – 618 p.

3. Kang H.W. Adaptive precompensation ofWiener systems/ H.W. Kang, Y.S. Cho, D.H. Youn // IEEE Trans. on Signal Processing. – 1998. – Vol. 46, № 10. – P. 2825–2829.

4. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials / L. Ding, G.T. Zhou, D.R. Morgan et al. // IEEE Transactions on Communications. – 2004. – Vol. 52. – P. 159–165.

5. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers / D.R. Morgan, Z. Ma, J. Kim et al. // IEEE Trans. on Signal processing. – 2006. – Vol. 54, № 10. – P. 3852–3860.

6. Soderstrom T. System Identification. Hemel Hempstead / T. Soderstrom, P. Stoica // United Kingdom: Prentice-Hall International, 1989. – 612 p.

7. Paaso H. Comparison of Direct Learning and Indirect Learning Predistortion Architectures / H. Paaso, A. Mämmela // Wireless Communication Systems. – 2008. – P. 309–313.

8. Gan L. Adaptive digital predistortion of nonlinear systems // Faculty of Electrical and Information Engineering: Ph.D thesis. – Graz, Austria: Graz University of Technology, 2009. – 120 p.

9. Gan L. Linearization of weakly nonlinear systems using FIR filters and Recursive Prediction Error method [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/224352766_Linearization_of_weakly_nonlinear_Volterra_systems_using_FIR_filters_and_recursive_prediction_error_method, свободный (дата обращения: 01.11.2015).

10. Gan L. Digital predistortion of memory polynomial systems using direct and indirect learning architectures [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/

255651307_Digital_Predistortion_of_memory_polynomial_systems_using_direct_and_indirect_learning_architectures, свободный (дата обращения: 24.05.2012).

11. Memory polynomial predistorter based on the indirect learning architecture / L. Ding, G.T. Zhou, D.R. Morgan et al. // Proc. of GLOBECOM (Taipei, Taiwan). – 2002. – Vol. 1. – P. 967–971.

12. Саяпин В.Ю. Описание нелинейных цепей на основе Х-параметров и методика их измерения // Доклады Том. гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – № 2 (26), ч. 1. – С. 83–86.

Саяпин Вячеслав Юрьевич
Мл. науч. сотрудник НИИ радиотехнических систем (РТС) ТУСУРа
Тел.: +7-906-956-70-35
Эл. почта: nasl@bk.ru

Тисленко Владимир Ильич
Д-р техн. наук, профессор каф. РТС
Тел.: +7-913-802-61-41
Эл. почта: wolar1491@yandex.ru

Родионов Владимир Валериевич
Ст. преподаватель каф. РТС
Тел.: +7-913-851-83-52
Эл. почта: brig01@bk.ru

Sayapin V.Y., Tislenko V.I., Rodioniv V.V.

Review and comparative analysis of nonlinear distortion compensators design in power amplifier

Various option for design of intermodulatuion distortion compensation system are discussed. The review considers the publications appeared in international scientific journals. The article highlights a typical structure of nonlinear dynamic block mathematic model, variation of pridistorter architecture and algorithms of predistorter adaptation. Comparative of predistortion system is presented.

Keywords: nonlinear distortion, predistorter, power amplifier, nonlinear system model, predistortion architecture, adaptation algorithm.