

УДК 681.513.6

АДАПТИВНАЯ ЦИФРОВАЯ ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Гудкова Н.В., к.т.н., доцент кафедры систем автоматического управления Таганрогского технологического института Южного Федерального Университета, e-mail: tala_gud@rambler.ru;

Гудков В.И., директор проектов Московского представительства ГК «Телрос», e-mail: v.gudkov62@gmail.com

Ключевые слова: усилитель мощности, амплитудная характеристика, линеаризация, динамический диапазон, адаптивная обработка.

Введение

Важнейшей интегральной характеристикой электронных устройств обработки информационных сигналов является динамический диапазон (ДД), который связан, с одной стороны, с чувствительностью устройства, определяемой его собственными шумами, а с другой стороны, с проявлением его нелинейных свойств.

На первых этапах развития техники приема и обработки информации требования к ДД были второстепенными, но в настоящее время их значение возрастает с каждым годом. Это объясняется в основном желанием использовать экономичные режимы работы выходных каскадов для повышения общего к.п.д. РЭА.

В результате относительное изменение уровней помех и полезного сигнала на входе устройства обработки в обычных условиях, т.е. ДД входных воздействий, может составлять 90...100 дБ. При работе радиосредств в условиях экстремальной электромагнитной обстановки он достигает 140...160 дБ и более, при этом помехи на входе радиоприемных устройств измеряются единицами и десятками вольт. В таких условиях прием сигналов с заданным качеством проблематичен.

Поэтому актуальной задачей проектирования устройств приема и обработки сигналов является повышение линейности передаточных характеристик блоков, составляющих данное устройство, и доведение диапазона линейной зависимости выходного отклика от входного воздействия до максимально возможной величины.

В частности, возрастает потребность в линейных усилителях мощности (УМ), сочетающих высокие энергетические характеристики с низким уровнем интермодуляционных искажений. Эта потребность определяется необходимостью передавать все большие объемы информации, что приводит к все более плотному размещению каналов в частотном диапазоне. Но линейные УМ, имеющие низкий уровень искажений, характеризуются низким КПД. Последнее оборачивается высоким уровнем потребляемой мощности, что нежелательно.

Таким образом, обеспечение качества передачи, определяющее высокие требования к линейности применяемого усилителя, вступает в противоречие с необходимостью снижения потребляемой усилителем мощности. Выходом из этого тупика является использование

Предлагается один из возможных вариантов решения задачи линеаризации нелинейных статических характеристик электронных устройств, базирующийся на принципах адаптивного обратного моделирования объектов типа «черный ящик». В качестве примера рассмотрен алгоритм адаптивной компенсации нелинейности усилителя мощности (УМ), который может служить альтернативой или дополнением к традиционному цифровому предистортеру, реализованному на основе LUT-таблиц. Приведены результаты компьютерного моделирования системы компенсации нелинейности амплитудной характеристики УМ, подтверждающие эффективность предложенных решений. Отмечается простота цифровой реализации адаптивного алгоритма средствами микросхемотехники.

подходов, позволяющих создавать линейные усилительные устройства, имеющие высокий КПД, характерный для нелинейных УМ. В настоящее время существует значительное количество способов линеаризации усилителей мощности средствами аналоговой техники. Среди них такие методы, как введение цепи обратной связи, отдельное усиление радиочастотного сигнала и огибающей с последующей модуляцией радиосигнала, предварительное искажение входного сигнала перед непосредственным усилением и ряд других.

Наряду с аналоговыми методами весьма успешно развивается направление, связанное с разработкой численных методов линеаризации. Особенно это касается задачи компенсации нестабильности характеристик усилительных устройств, работающих в условиях неопределенности. Такого рода компенсация должна обеспечивать адаптацию устройств к случайным изменениям мощности входного сигнала УМ, температурным изменениям, колебаниям напряжения источника питания, старению транзисторов и т.п.

Об актуальности проблемы свидетельствуют многочисленные посвященные ей публикации, а также гранты, выделяемые компаниями связи на проведение работ в этой области. Причем, особое внимание уделяется разработкам цифровых устройств предискажения, так называемым, «предистортерам» (predistorter) [1, 2, 3].

Считается, что применение предистортеров сулит большие перспективы, поскольку позволяет увеличить КПД усилителя при сохранении его габаритов и почти без увеличения цены. Например, значение КПД современных УМ базовых станций беспроводной связи в среднем составляет приблизительно 10%, тогда как при использовании недавно выпущенной фирмой Texas Instruments микросхемы GC5322 оно возрастает до 15%-40%. В большинстве случаев в основу алгорит-

мов предыстортера заложено представление модели нелинейного усилителя в виде LUT (Look Up Table)-таблицы добавлений, которая представляет собой набор коэффициентов многомерного ряда Вольтерра, описывающего УМ во временной области. Работа алгоритмов линеаризации заключается в анализе входного сигнала и последующем внесении в него «предыскажений» с тем, чтобы этим компенсировать последующие нелинейные искажения, вносимые усилителем.

Основной трудностью при построении табличной модели нелинейного усилителя является необходимость его предварительного тестирования, что обычно требует применения специального дорогостоящего оборудования, специальных методик и хорошо подготовленных для этой работы специалистов. Кроме того, существуют определенные сложности, связанные с поиском компромисса между требуемой памятью процессора для ее хранения, скоростью адаптации модели и быстродействием алгоритма расчёта в режиме реального времени. С учетом сказанного можно констатировать, что традиционные способы линейной коррекции характеристик УМ не свободны от недостатков. Ниже предлагается метод цифровой адаптивной линеаризации передаточной характеристикой усилителя мощности, который, по мнению авторов, может служить альтернативой или дополнением к общепринятым подходам.

Метод адаптивной линеаризации

Метод базируется на принципах управления, использующих адаптивное обратное моделирование неопределенных динамических объектов типа «черный ящик» [4, 5, 6]. Смысл этого вида моделирования состоит в создании цифровой адаптивной обратной модели (АОМ) некоторого объекта с неизвестными параметрами, которая должна служить наилучшим приближением дискретной передаточной функции, обратной передаточной функции этого объекта в процессе его функционирования. На рис. 1 показана одна из возможных структур системы управления «черным ящиком», который в рассматриваемом случае представляет собой усилитель мощности с неизвестной, в общем случае изменяющейся во времени, нелинейной амплитудной характеристикой $x = f(u)$.

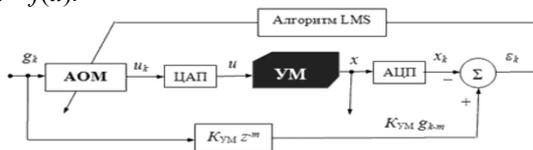


Рис. 1. Структурная схема системы управления амплитудной характеристикой УМ с АОМ

При этом предполагается, что с течением времени может также случайным образом изменяться мощность входного сигнала и положение «рабочей точки» усилителя. Роль управляющего устройства (адаптивного регулятора) в данной системе играет обратная модель УМ, реализованная в виде адаптивного трансверсального фильтра [4], дискретное уравнение которого имеет вид

$$u_k = \sum_{l=0}^L w_{lk} g_{k-l} \quad (1)$$

где, g_k – дискретные отсчеты входного сигнала системы, u_k – отсчеты управляющего сигнала на выходе АОМ,

L – длина фильтра, а w_{lk} – его весовые коэффициенты, которые в процессе адаптации перестраиваются по методу LMS в соответствии с рекуррентным соотношением $w_{l(k+1)} = w_{lk} + 2\mu g_{k-l} \varepsilon_k$.

В выражении (2) ошибка адаптации $\varepsilon_k = K_{УМ} \cdot g_{k-m} - x$, где $K_{УМ}$ – желаемое значение коэффициента усиления УМ; μ – параметр сходимости адаптивного алгоритма; m – число тактов задержки входного сигнала, которая вводится для учета инерционности усилителя.

После завершения процесса регулирования амплитудной характеристики $x = f(u)$ среднеквадратическая ошибка СКО = $E[\varepsilon_k^2]$ становится равной своему минимальному значению, которое зависит от заданной относительной средней СКО адаптации M ($0 < M < 1$). При этом скорость сходимости адаптивного процесса можно приближенно оценить по числу итераций [5]

$$T_{СКО} \cong \left[\frac{L+1}{M} \right] \quad (3)$$

В тех случаях, когда инерционные свойства УМ выражены слабо, адаптивная процедура упрощается, так как для линеаризации амплитудной характеристики такого усилителя достаточно одного единственного весового коэффициента w_0 ($L = 0$) и нулевой временной задержки ($m = 0$). Анализ показал, что для устойчивой работы алгоритма компенсации нелинейности безынерционного усилителя должно выполняться условие

$$\mu \leq \frac{M}{E[g_k^2]} \quad (4)$$

где $E[g_k^2]$ – средняя мощность сигнала g_k .

Поскольку в общем случае величина $E[g_k^2]$ носит случайный характер, можно использовать для расчета параметра μ максимально допустимую мощность входного сигнала системы. Оптимальную настройку обеспечит автоматический расчет текущего значения μ в режиме реального времени. Желаемая величина коэффициента усиления должна быть задана из условия

$$K_{УМ} \leq \frac{x_{\max}}{g_{\max}}, \text{ где значения } x_{\max} \text{ и } g_{\max} \text{ определяются}$$

предельно допустимыми уровнями этих сигналов в системе.

Компьютерное моделирование

Принцип действия предлагаемых алгоритмов иллюстрируют результаты имитационного моделирования на ПК адаптивной системы линеаризации безынерционного УМ при подаче на ее вход случайной последовательности отсчетов белого шума со средней мощностью $E[g_k^2] \approx 0,33$. На рис. 2 показаны нормированные нелинейная и скомпенсированная амплитудные характеристики усилителя. Рис. 3 отражает процессы, происходящие в системе с некомпенсированной амплитудной характеристикой УМ ($u = g$), а рис. 4, 5 – процессы в адаптивной системе с компенсированной амплитудной характеристикой УМ ($u = w_0 g$) при двух относительных средних значениях СКО $M = 0,5$ и $M = 0,1$.

Из рисунков видно, что СКО в системе с компенсированной амплитудной характеристикой УМ при обоих значениях параметра M как минимум на порядок меньше СКО в системе с некомпенсированной характеристи-

кой. При этом число итераций адаптивных процессов T_{CKO} приблизительно соответствует теоретическим значениям.

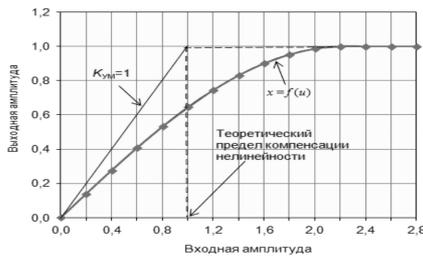


Рис. 2. Нормированные нелинейная и компенсированная амплитудные характеристики УМ

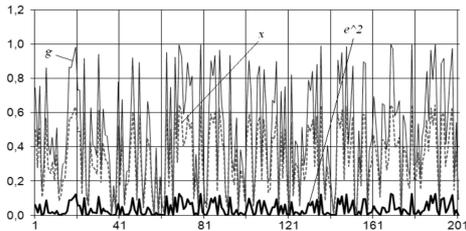


Рис. 3. Процессы в УМ с некомпенсированной амплитудной характеристикой ($u = g$; $CKO \approx 0,004$)

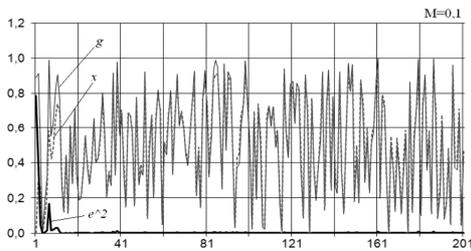


Рис. 4а. Процессы в системе с компенсированной амплитудной характеристикой УМ ($T_{CKO} \approx 10$; $CKO \approx 0,002$)

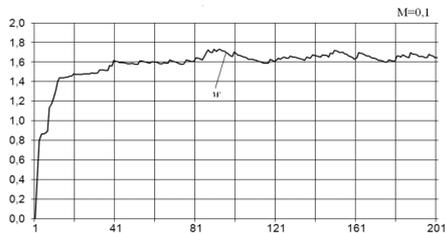


Рис. 4б. Весовой коэффициент в системе с компенсированной амплитудной характеристикой УМ ($u = w_0g$)

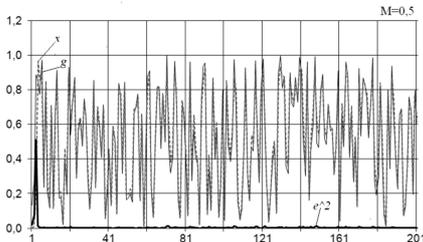


Рис. 5а. Процессы в системе с компенсированной амплитудной характеристикой УМ ($T_{CKO} \approx 2$; $CKO \approx 0,002$)

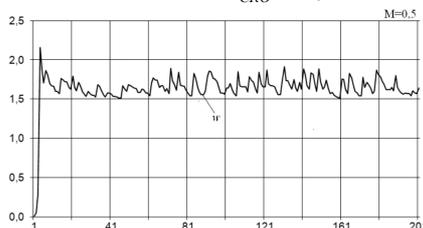


Рис. 5б. Весовой коэффициент в системе с компенсированной амплитудной характеристикой УМ ($u = w_0g$)

Заключение

Выполненные в работе исследования позволяют сделать вывод о том, что использование предлагаемых решений может служить эффективным и экономичным способом цифровой линейризации амплитудных характеристик безынерционных УМ в динамическом диапазоне, определяемом теоретическим пределом компенсации нелинейности, который в свою очередь зависит от выбранной величины K_{UM} .

Как показала практика, при правильной настройке АОМ предложенный метод также обеспечивает хорошие результаты в задачах линейризации характеристик УМ с инерционным запаздыванием.

Следует подчеркнуть, что алгоритмы метода достаточно легко реализуются средствами микросхемотехники и могут найти широкое применение в системах адаптивной линейризации характеристик разнообразных технических устройств, например, датчиков физических величин технологических объектов и др.

Литература

1. D.-S. Han and T. Hwang, «An adaptive predistorter for the compensation of HPA nonlinearity», IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 46, no. 2, 2000.
2. Chang, S. and Powers, E. J., «A simplified predistorter for compensation of nonlinear distortion in OFDM systems», in Proc. IEEE Global Telecommun. Conf., vol. 5, Nov. 2001.
3. P. L. Gilabert, G. Montoro and A. Cesari, «A recursive digital predistorter for linearizing RF power amplifiers with memory effects», in Proc. APMC'06, Pacifico Yokohama, Japan, Dec. 2006, vol. 2.
4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов / М.: Радио и связь, 1989.
5. Гудкова Н.В. Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования // Автоматизация и современные технологии. М.: Машиностроение, 2006. №4.
6. Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control. A Signal Processing Approach, Wiley, Hoboken, NJ, 2008.

ADAPTIVE DIGITAL LINEARIZATION TRANSFER CHARACTERISTICS OF ELECTRONIC AMPLIFYING DEVICES

Gudkova N., Gudkov V.

Suggests possible solution of the the problem of linearization nonlinear static characteristics of electronic devices, based at the principle adaptive inverse modeling of objects such as «black box». As an example are considered the algorithms of adaptive compensation of nonlinearity of power amplifier (PA), that may be an alternative or complementation to conventional digital predistorter implemented in terms of LUT-tables. The results of computer simulation of the system of compensation of the nonlinearity of the amplitude characteristics of the PA, are confirming the effectiveness of the proposed solutions. The digital adaptive algorithms may be realized by means of micro circuitry.