

УДК 681.513.6

Н.В. Гудкова, К.В. Бесклубова

**АЛГОРИТМЫ АДАПТИВНОЙ ЛИНЕАРИЗАЦИИ ПЕРЕДАТОЧНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ**

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.

Адаптивный алгоритм; линеаризация; усилитель мощности; обратная модель; «черный ящик».

N.V. Gudkova, K.V. Besklubova

**ALGORITHM FOR ADAPTIVE LINEARIZATION TRANSFER
CHARACTERISTICS OF THE ELECTRONIC AMPLIFYING DEVICES**

We suggest one of the possible solutions the problem linearization nonlinear static characteristics of electronic devices, which based at the principle adaptive inverse modeling of objects such as «black box». As an example are considered the algorithm of adaptive compensation nonlinear characteristic power amplifier. This algorithm can be an alternative to traditional digital predistorter at the basis of LUT-tables. The results of computer simulation confirm the effectiveness of proposed solutions. There is ease of digital implementation of adaptive algorithms by means of microcircuitry.

Adaptive algorithm; linearization; power amplifier; the inverse model; the "black box".

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 актуальнейшей задачей проектирования устройств приема и обработки сигналов является задача повышения 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 усилительных устройствах, 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. При этом взаимодействие разночас-

тотных сигналов на нелинейных элементах, в первую очередь, на усилителях мощности (УМ), приводит к возникновению интермодуляционных искажений, единственным способом борьбы с которыми является обеспечение линейности амплитудных характеристик применяемых усилителей. Но линейные усилители, 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 систем линеаризации, позволяющих создавать линейные усилительные устройства, имеющие высокий КПД, характерный для нелинейных УМ.

К настоящему времени разработано значительное количество методов линеаризации усилителей мощности средствами аналоговой техники. Среди них такие способы, 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 способами линеаризации в настоящее время весьма перспективным считается направление, связанное с разработкой цифровых методов предискажения входного сигнала УМ. Общим свойством этих методов является компенсация нелинейности передаточной характеристики усилителя в полосе частот модуляции с помощью цифрового устройства, так называемого «предыстортера» (predistorter).

В алгоритме предыстортера модель усилителя сохраняется в виде LUT (Look Up Table)-таблицы добавлений, которая представляет собой набор коэффициентов многомерного ряда Вольтерра, описывающего усилитель мощности во временной области. Работа алгоритма линеаризации заключается в анализе входного сигнала и последующем внесении в него искажений с тем, чтобы усилившись в нелинейном усилителе, эти искажения компенсировались.

Сложности, которые встречаются на пути создания предыстортера, обусловлены необходимостью мониторинга режимов конкретного усилителя для получения его табличной модели, поиска компромисса между требуемой памятью процессора для ее хранения, быстродействием алгоритма расчёта и скоростью адаптации модели. Тем не менее считается, что использование предыстортеров такого типа 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 %. При использовании недавно выпущенной фирмой Texas Instrument микросхемы предыстортера GC5322 КПД усилителей возрастает до 15–40 %.

Несмотря на обилие способов линеаризации характеристик УМ, все они не свободны от недостатков. Особенно это касается вопросов, связанных с компенсацией нестабильности характеристик усилительных устройств, работающих в условиях неопределенности, в силу чего сохраняется потребность в создании новых подходов к решению задач линеаризации. Об актуальности проблемы свидетельствуют многочисленные посвященные ей публикации, а также гранты, выделяемые компаниями связи на проведение работ в этой области.

В [1] предложен метод адаптивного управления передаточной характеристикой усилителя мощности, который, по мнению авторов, может служить альтернативой или дополнением к общепринятым подходам. Метод базируется на принципах адаптивного обратного моделирования динамических объектов типа «черный ящик», т.е. объектов с неопределенностью [2]. Смысл этого вида моделирования состоит в том, что цифровая адаптивная обратная модель (АОМ) некоторого объекта с неизвестными параметрами является наилучшим приближением дискретной передаточной функции, обратной передаточной функции этого объекта.

В [1] рассматривается одна из возможных структур системы управления «черным ящиком», в роли которого выступает усилитель с неизвестной (и/или изменяющейся со временем) нелинейной амплитудной характеристикой $x = f(u)$, а роль устройства компенсации играет копия АОМ усилителя, реализованная в виде адаптивного трансверсального фильтра.

В данной статье предлагается модифицированный вариант этой системы, в которой роль компенсирующего устройства (адаптивного регулятора) играет непосредственно обратная модель УМ. Структурная схема модифицированной системы показана на рис. 1.

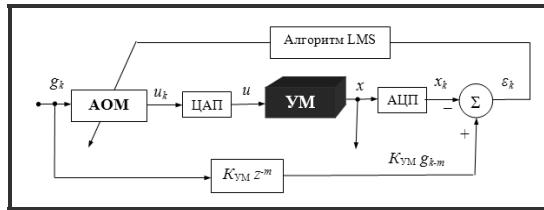


Рис. 1. Структурная схема модифицированной системы управления амплитудной характеристикой УМ с АОМ

Дискретное уравнение адаптивной модели УМ имеет вид

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

где g_k – временные отсчеты входного сигнала системы, а u_k – отсчеты управляющего сигнала на выходе АОМ.

В процессе адаптации весовые коэффициенты фильтра w_{lk} перестраиваются по методу LMS в соответствии с рекуррентным соотношением

$$w_{l(k+1)} = w_{lk} + 2\mu g_{k-l} \varepsilon_k, \quad (2)$$

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

После завершения адаптивного процесса регулирования среднеквадратическая ошибка $CKO = E[\varepsilon_k^2]$ становится приблизительно равной своему минимальному значению, при котором сигнал $x_k \approx K_{УМ} \cdot g_{k-m}$, что означает цифровую компенсацию нелинейности $x = f(u)$.

Желаемая величина коэффициента усиления должна быть задана из условия

$$K_{УМ} \leq \frac{x_{\max}}{g_{\max}},$$

где значения x_{\max} и g_{\max} определяются предельно допустимыми уровнями этих сигналов в системе. Параметрами настройки АОМ являются коэффициент μ , длина фильтра L и задержка m .

Методика их расчета приведена в [3]. В тех случаях, когда инерционными свойствами УМ можно пренебречь, адаптивная процедура упрощается, так как для линеаризации амплитудной характеристики такого усилителя достаточно одного единственного весового коэффициента w_0 и нулевой временной задержки ($m = 0$).

Принцип действия представленных алгоритмов иллюстрируют результаты имитационного моделирования на ПК адаптивной системы линейаризации безынерционного усилителя мощности. На рис. 2 показаны нормированная нелинейная и компенсированная амплитудные характеристики УМ. На рис. 3 приведены адаптивные процессы компенсации нелинейности усилителя при двух уровнях входного сигнала в пределах динамического диапазона $g_{\max} = 1$ компенсированной характеристики. В системе с некомпенсированной амплитудной характеристикой (АХ) сигнал управления $u = g$. В случае компенсации характеристики с помощью адаптивного регулятора $u = w_0 g$. Временные процессы на графиках наглядно отражают адаптивные свойства системы.

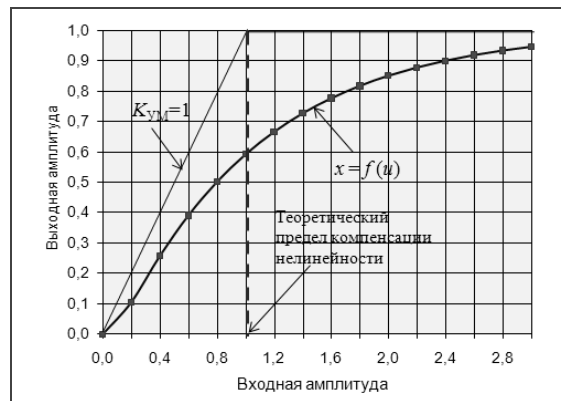


Рис. 2. Нормированные нелинейная и компенсированная АХ усилителя

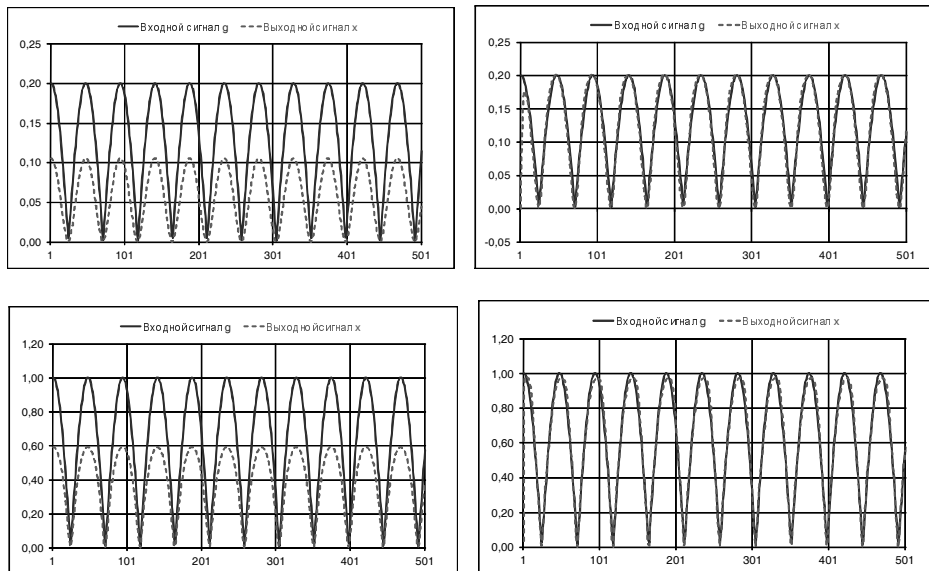


Рис. 3. Сигналы в системе с некомпенсированной АХ усилителя

Выполненные в работе исследования позволяют сделать вывод о том, что использование предлагаемых решений может служить эффективным и экономичным способом цифровой линейаризации неизвестных амплитудных характеристик безы-

нерционных УМ в динамическом диапазоне, определяемом теоретическим пределом компенсации нелинейности, который в свою очередь зависит от выбранной величины K_{VM} .

Как показала практика, при правильной настройке АОМ предложенный алгоритм обеспечивает также и линеаризацию характеристик УМ с инерционным запаздыванием. Анализ показал, что данный вариант системы компенсации нелинейности УМ обладает некоторыми преимуществами по сравнению с вариантом, рассмотренным в работе [1]. Это касается, в первую очередь, простоты цифровой реализации и более высокой скорости адаптивных процессов в системе.

Следует подчеркнуть, что алгоритмы метода достаточно легко реализуются средствами микросхемотехники и могут найти широкое применение в задачах адаптивной линеаризации характеристик разнообразных технических устройств, например, интеллектуальных датчиков физических величин технологических объектов, работающих в режимах неопределенности, и пр.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гудкова Н.В. Цифровая линеаризация амплитудной характеристики усилителя мощности методом адаптивного обратного моделирования // IV Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем». Сборник трудов, 2010. – М.: ИППМ РАН (МЭС-2010).
2. Widrow B., Walach E. Adaptive Inverse Control- A Signal Processing Approach, Wiley, Hoboken, NJ, 2008.
3. Гудкова Н.В. Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования // Автоматизация и современные технологии. – М.: Машиностроение, 2006. – № 4.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.Н. Прокопенко.

Гудкова Наталья Васильевна – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: tala_gud@rambler.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371689; кафедра систем автоматического управления; к.т.н.; доцент.

Бесклубова Ксения Валерьевна – e-mail: besklubova@rambler.ru; кафедра систем автоматического управления; студентка.

Gudkova Natalya Vasilyevna – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: tala_gud@rambler.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371689; the department of automatic control systems; cand. of eng. sc.; associate professor.

Besklubova Ksenia Valeryevna – e-mail: besklubova@rambler.ru; the department of automatic control systems; student.

УДК 621.03.01

В.И. Джиган

МНОГОЛУЧЕВАЯ АДАПТИВНАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА

Рассматривается многолучевая адаптивная антенная решетка, весовые коэффициенты которой вычисляются с помощью линейно ограниченного рекурсивного алгоритма адаптивной фильтрации по критерию наименьших квадратов. Антенная решетка предназначена для решения задач приема полезного сигнала с постоянной огибающей информации.