

Цифровая линейаризация амплитудной характеристики усилителя мощности методом адаптивного обратного моделирования

Н.В. Гудкова

Технологический институт Южного Федерального Университета в г. Таганроге,
tala_gud@rambler.ru

Аннотация — Предлагается один из вариантов решения задачи линейаризации амплитудной характеристики усилителя мощности (УМ), базирующийся на принципах адаптивного обратного моделирования объектов типа «черный ящик». Выполнен анализ цифрового метода предсказания сигналов в тракте усиления с помощью LUT-таблиц, представляющих собой алгоритмические модели УМ. Предложен алгоритм цифровой адаптивной линейаризации коэффициента передачи усилителя, который не требует предварительного составления LUT-таблиц и может служить альтернативой цифровому преддистортеру. Приведены результаты компьютерного моделирования системы, подтверждающие эффективность предложенных решений.

Ключевые слова — адаптивная система управления; адаптивный алгоритм; адаптивная линейаризация; усилитель мощности; коэффициент усиления; амплитудная характеристика; преддистортер.

I. ВВЕДЕНИЕ

При разработке современных электронных устройств в системах управления и связи существует значительная 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. Однако, взаимодействие разночастотных сигналов на нелинейных элементах, в первую очередь на усилителях мощности (УМ), приводит к возникновению интермодуляционных искажений, единственным способом борьбы с которыми является обеспечение линейности применяемых усилителей. Но линейные усилители, имеющие низкий уровень искажений, характеризуются низким КПД.

Последнее оборачивается высоким уровнем потребляемой мощности, что нежелательно для работающих от батареек и аккумуляторов подвижных средств связи (примером области, для которой эта проблема стоит особенно остро, может служить мобильная телефонная связь). Таким образом, обеспечение качества

передачи, определяющее высокие требования к линейности применяемых усилителей, вступает в противоречие с необходимостью снижения потребляемой усилителем мощности. Выходом из этого тупика является использование систем линейаризации, позволяющих создавать линейные усилительные устройства, имеющие высокий КПД, характерный для нелинейных усилителей мощности.

К настоящему времени разработано значительное количество методов линейаризации усилителей мощности средствами аналоговой техники. Среди них: введение цепи обратной связи, отдельное усиление радиочастотного сигнала и огибающей с последующей модуляцией радиосигнала, предварительное искажение (предскажение) входного сигнала перед непосредственным усилением и ряд других. Все они не свободны от недостатков. В силу этого сохраняется потребность в создании новых подходов к решению задачи линейаризации. Об актуальности проблемы свидетельствуют многочисленные, посвященные ей публикации, а также гранты, выделяемые компаниями связи на проведение работ в этой области.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Наряду с аналоговыми способами линейаризации в настоящее время весьма перспективным считается направление, связанное с разработкой цифровых методов предскажения входного сигнала усилителя.

Общим свойством этих методов является компенсация нелинейности передаточной характеристики усилителя в полосе частот модуляции с помощью цифрового устройства – так называемого «преддистортера» (predistorter).

В алгоритме преддистортера 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 линейаризации заключается в анализе входного сигнала и последующем внесении в него иска-

жений с тем, чтобы усилившись в нелинейном усилителе, эти искажения компенсировались.

Сложности, которые встречаются на пути создания преемника, обусловлены необходимостью мониторинга режимов конкретного усилителя для получения его модели в LUT-таблице и поиска компромисса между требуемой памятью процессора для ее хранения, быстродействием алгоритма расчёта и скоростью адаптации модели.

Тем не менее, предполагается, что использование преемников такого типа сулит большие перспективы, поскольку позволяет увеличить КПД усилителя при сохранении его габаритов и почти без увеличения цены. В частности, значение КПД современных УМ базовых станций беспроводной связи, в среднем, составляет 10%. При использовании недавно выпущенной фирмой Texas Instrument микросхемы преемника GC5322 КПД усилителей возрастает до 15% – 40%.

Несмотря на сложившиеся традиции, автором предпринята попытка получить новое решение задачи линеаризации, которое может стать альтернативой или дополнением к общепринятым подходам.

III. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Анализ показал, что для управления амплитудной характеристикой УМ может служить цифровая система, использующая принцип адаптивного обратного моделирования объекта типа «черный ящик» [2]. Смысл этого вида моделирования состоит в том, что адаптивная обратная модель (АОМ) некоторого объекта с неизвестными структурой и параметрами является наилучшим приближением дискретной передаточной функции, обратной передаточной функции объекта.

Структурная схема системы обратного адаптивного моделирования динамического объекта показана на рис. 1. Наблюдение неизвестного объекта осуществляется по временным отсчетам его выходного сигнала x_k ($k=0, 1, 2, \dots$).

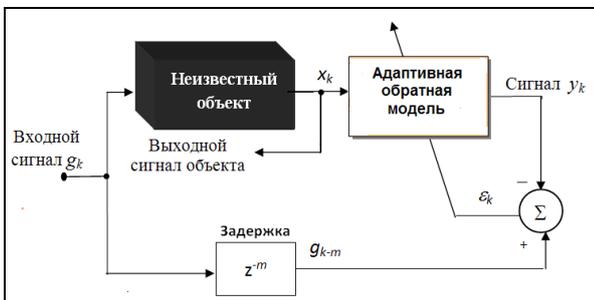


Рис. 1. Структурная схема системы адаптивного обратного моделирования объекта

В качестве адаптивной обратной модели здесь используется цифровой адаптивный трансверсальный

фильтр, весовые коэффициенты которого перестраиваются по методу наименьших квадратов.

Дискретная передаточная функция АОМ имеет вид

$$W_{\text{АОМ}}(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \sum_{l=0}^L w_{lk} z^{-l}, \quad (1)$$

где L – длина трансверсального фильтра, а w_{lk} – текущие значения весовых коэффициентов. Ей соответствует дискретное уравнение

$$y_k = \sum_{l=0}^L w_{lk} x_{k-l}, \quad (2)$$

Весовые коэффициенты фильтра на k -ом отсчете определяются из рекуррентного соотношения

$$w_{l(k+1)} = w_{lk} + 2\mu x_{k-l} \varepsilon_k, \quad (3)$$

где μ – параметр сходимости алгоритма адаптации. Сигнал ошибки ε_k вычисляется по формуле

$$\varepsilon_k = g_{k-m} - y_k, \quad (4)$$

где g_{k-m} – входной сигнал объекта, задержанный на m временных тактов. Эта задержка обусловлена необходимостью учета инерционности объекта.

При правильной настройке с АТФ сигнал y_k на выходе системы после адаптации приблизительно равен входному сигналу g_k , задержанному на m тактов, при этом величина СКО $= \xi = E[\varepsilon_k^2]$ минимизируется.

При сравнительно медленных адаптивных процессах, т.е. при достаточно малом параметре μ , становится справедливым соотношение

$$W_{\text{но}}(z)W_{\text{АОМ}}(z) \cong 1, \quad (5)$$

где $W_{\text{но}}(z)$ – неизвестная дискретная передаточная функция объекта.

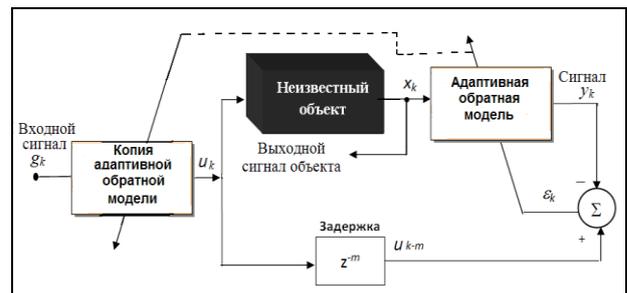


Рис. 2. Структурная схема системы управления с копией адаптивной обратной модели объекта

Как видно из рис. 1, непосредственное использование системы адаптивного обратного моделирования для управления неизвестным объектом невозможно, т.к. в ней под входной сигнал g_k подстраивается выходной сигнал АОМ y_k , в то время как сам объект не управляется. Для управления объектом необходимо,

чтобы под входное воздействие подстраивался его выходной сигнал x_k . Эту задачу решает система, показанная на рис. 2. К входу неизвестного объекта подключается устройство, представляющее собой копию его адаптивной обратной модели, в результате чего сигнал x_k на выходе управляемого объекта изменяется в соответствии с сигналом g_k , который подается на вход копии АОМ. Т.к. выходной сигнал копии АОМ u_k является управляющим воздействием для объекта, сигнал на выходе объекта после адаптации приблизительно равен входному сигналу системы g_k , но с задержкой на m временных тактов, т. е. выполняется равенство

$$x_k \cong g_{k-m}. \quad (6)$$

Приведем соотношения, реализующие алгоритм функционирования системы управления с копией АОМ объекта.

- Сигнал y_k на выходе адаптивной обратной модели вычисляется по формуле (2).
- Весовые коэффициенты w_{lk} АОМ перестраиваются на каждой итерации по формуле, аналогичной (3), где сигнал ошибки равен разности задержанного на m тактов управляющего сигнала u_k и выходного сигнала обратной модели y_k , т. е.

$$\varepsilon_k = u_{k-m} - y_k. \quad (7)$$

- Весовые коэффициенты копии адаптивной обратной модели равны весовым коэффициентам АОМ, поэтому сигнал управления u_k вычисляется по формуле

$$u_k = \sum_{l=0}^L w_{lk} g_{k-l}. \quad (8)$$

Следует подчеркнуть, что система управления с копией АОМ объекта является разомкнутой. Однако, в системе имеется функциональная (информационная) обратная связь, действующая таким образом, что адаптивное управляющее устройство (адаптивный регулятор) перестраивается в соответствии с изменяющимися характеристиками управляемого объекта и внешних воздействий с целью минимизации величины СКО.

Для решения задачи адаптивного управления амплитудной характеристикой УМ автором предложен модифицированный алгоритм работы системы с копией АОМ, в которой роль неизвестного объекта играет усилитель. Структурная схема этой системы показана на рис. 3. Алгоритм обладает свойством поддерживать постоянное значение коэффициента передачи $K_{УМ}$ между выходным сигналом УМ x_k и входным сигналом системы g_k . При условии, что УМ является безынерционным элементом, модифициро-

ванный алгоритм значительно упрощается по сравнению с описанным выше прототипом: АТФ состоит из одного единственного весового коэффициента, а задержка $m=0$.

Покажем принцип функционирования модифицированного алгоритма.

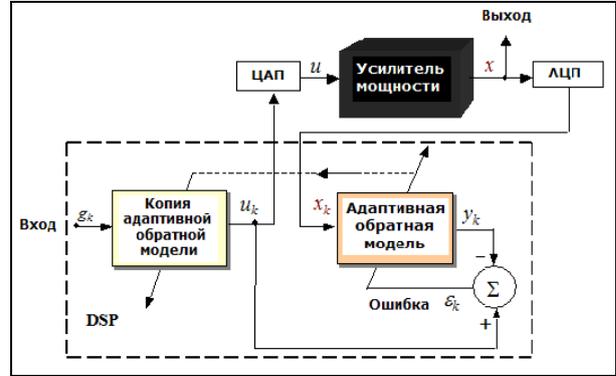


Рис. 3. Структурная схема адаптивной системы линеаризации амплитудной характеристики усилителя мощности

Пусть амплитудная характеристика УМ представляет собой некую неизвестную нелинейную зависимость $x = f(u)$. Выходной сигнал копии АОМ u_k является управляющим воздействием для усилителя и вычисляется по формуле

$$u_k = w_{0k} \cdot g_k. \quad (9)$$

Дискретное уравнение АОМ усилителя имеет вид

$$y_k = w_{0k} \cdot x_k / K_{УМ}, \quad (10)$$

где $K_{УМ} = const$ – желаемое значение коэффициента усиления системы.

Сигнал ошибки ε_k вычисляется по формуле

$$\varepsilon_k = u_k - y_k. \quad (11)$$

Весовой коэффициент на k -ом отсчете определяется по формуле наименьших квадратов

$$w_{0(k+1)} = w_{0k} + 2\mu x_k \varepsilon_k. \quad (12)$$

После адаптации АОМ величина среднеквадратической ошибки $\xi = E[\varepsilon_k^2] \approx 0$. При этом сигнал x_k на выходе усилителя мощности становится равным

$$x_k \cong K_{УМ} \cdot g_k. \quad (13)$$

Таким образом, обеспечивается адаптивная линеаризация амплитудной характеристики нелинейного усилителя.

Параметром настройки АОМ является коэффициент μ , который отвечает за точность и устойчивость процесса адаптации и определяется соотношением

$$\mu \cong \frac{M}{E[x_k^2]}, \quad (14)$$

где величина M ($0 < M < 1$) – есть относительное среднее значение СКО, а выражение $E[x_k^2]$ представляет собой среднюю мощность выходного сигнала усилителя.

Желаемый коэффициент $K_{УМ}$ может быть задан из условия

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

где значения x_{\max} и g_{\max} определяются предельно допустимыми уровнями этих сигналов.

IV. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для иллюстрации предлагаемого алгоритма приводятся результаты компьютерного моделирования процессов адаптации в системе управления усилителем мощности с нормированной амплитудной характеристикой, показанной на рис. 4.

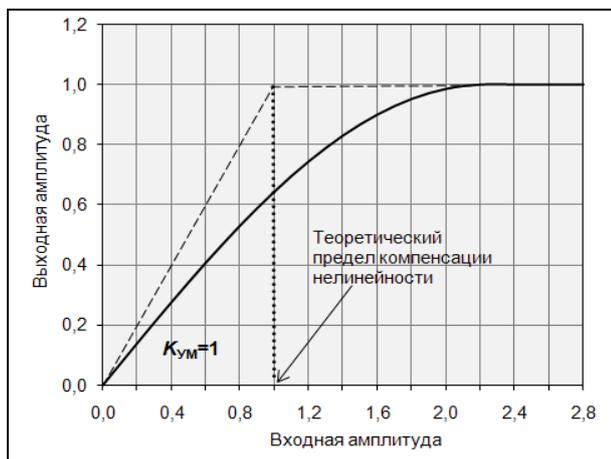


Рис. 4. Амплитудные нелинейная и линеаризованная характеристики усилителя мощности



Рис. 5. Сигналы в УМ с нелинеаризованной амплитудной характеристикой ($u = g$)

Как видно из графиков, амплитуда входного сигнала близка к уровню ограничения сигналов в усилителе, что соответствует максимальному отклонению нели-

нейной характеристики УМ от линейной зависимости (13). На рис. 5 показаны временные характеристики входного и выходного сигналов в неадаптивной системе. На рис. 6 и 7 показаны сигналы в адаптивной системе. Сравнение характеристик наглядно отражает свойства предложенного алгоритма.



Рис. 6. Сигналы в адаптивной системе с линеаризованной амплитудной характеристикой ($u = w_0 \cdot g$)

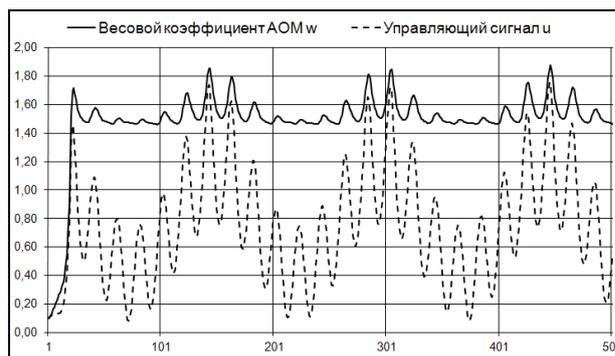


Рис. 7. Управляющий сигнал и весовой коэффициент АОМ в адаптивной системе с линеаризованной амплитудной характеристикой

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволяют полагать, что предлагаемый алгоритм является эффективным и экономичным способом цифровой линеаризации амплитудных характеристик УМ и может быть достаточно легко реализован средствами микросхемотехники.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Адаптивная обработка сигналов / Уидроу Б., Стирнз С. – М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
- [2] Гудкова Н.В. Цифровое управление техническими объектами с применением адаптивного обратного моделирования // Автоматизация и современные технологии. М.: – Машиностроение, 2006. №4.