

Адаптивное цифровое устройство компенсации нелинейности амплитудной характеристики усилителя мощности

Наталья Гудкова (Ростовская обл.)

В статье рассматривается задача линеаризации амплитудной характеристики усилителя мощности (УМ) на основе адаптивного обратного моделирования объектов типа «чёрный ящик». Выполнен анализ цифрового метода предискажения сигналов в тракте усиления, основанного на табличном представлении алгоритмической модели УМ. Предложен алгоритм цифровой адаптивной линеаризации коэффициента передачи усилителя, который не требует предварительного составления таблиц. Приведены результаты компьютерного моделирования системы, подтверждающие эффективность предложенных решений.

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 всё большие объёмы информации, что приводит к увеличению числа каналов в ограниченном частотном диапазоне. Взаимодействие сигналов в нелинейных элементах, в первую очередь, усилителях мощности (УМ), приводит к возникновению интермодуляционных искажений, единственным способом борьбы с которыми является обеспечение линейности применяемых усилителей.

Однако линейные усилители, имеющие низкий уровень искажений, характеризуются низким КПД. Таким образом, обеспечение качества передачи, определяющее высокие требования к линейности применяемых усилителей, вступает в противоречие с необходимостью снижения потребляемой усилителем мощности. Решением этого противоречия является использование систем линеаризации, позволяющих создавать линейные усилительные устройства, имеющие высокий КПД, характерный для нелинейных усилителей мощности.

К настоящему времени разработано большое число методов линеаризации усилителей мощности средствами ана-

логовой техники. Среди них: введение цепи обратной связи, отдельное усиление радиочастотного сигнала и огибающей с последующей модуляцией радиосигнала, предварительное искажение (предискажение) входного сигнала перед непосредственным усилением и ряд других. Все эти методы не свободны от недостатков, поэтому сохраняется потребность в создании новых подходов к решению задачи линеаризации. Об актуальности проблемы свидетельствуют многочисленные публикации на эту тему, а также гранты, выделяемые компаниями связи на проведение работ в этой области.

Постановка задачи

Наряду с аналоговыми способами линеаризации, в настоящее время весьма перспективным считается направление, связанное с разработкой цифровых методов предискажения входного сигнала усилителя. Общей чертой этих методов является компенсация нелинейности передаточной характеристики усилителя в полосе частот модуляции с помощью цифрового устройства, называемого «предистортером» (pre-distorter). В алгоритме предистортера 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 иска-

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

Сложности, которые встречаются на пути создания предистортера, обусловлены необходимостью мониторинга режимов конкретного усилителя для получения его модели в виде LUT и поиска компромисса между требуемым объёмом памяти для её хранения, быстродействием алгоритма расчёта и скоростью адаптации модели. Тем не менее, предполагается, что использование предистортеров имеет перспективы, поскольку позволяет увеличить КПД усилителя при сохранении его габаритов и незначительном увеличении стоимости. В частности, значение КПД современных УМ базовых станций беспроводной связи в среднем составляет около 10%. При использовании недавно выпущенной фирмой Texas Instrument микросхемы предистортера GC5322 КПД усилителей возрастает до 15...40%.

В данной статье предпринята попытка получить новое решение задачи компенсации нелинейности УМ, которое может стать альтернативой или дополнением к общепринятым подходам.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Проведённый автором анализ показал, что для управления амплитудной характеристикой УМ может служить система, использующая принцип адаптивного обратного моделирования объекта типа «чёрный ящик» [1]. Смысл этого вида моделирования состоит в том, что обратная модель 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 рисунке 1.

Наблюдение неизвестного объекта осуществляется по временным отсчётам его выходного сигнала x_k ($k = 0, 1, 2, \dots$). В качестве адаптивной обратной модели (АОМ) здесь используется схе-

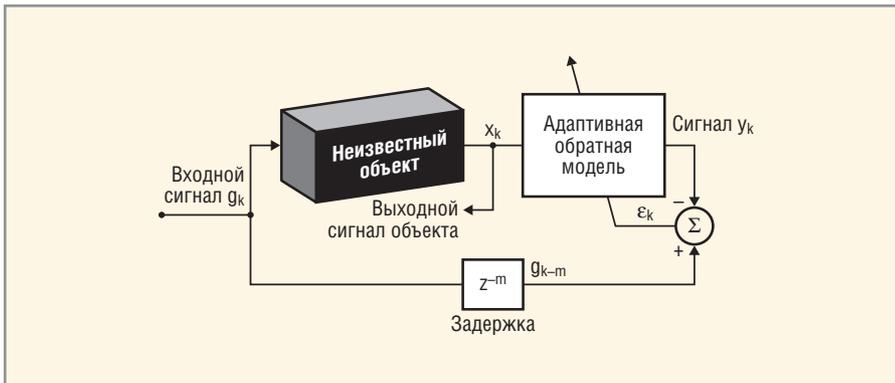


Рис. 1. Структурная схема системы адаптивного обратного моделирования неизвестного объекта

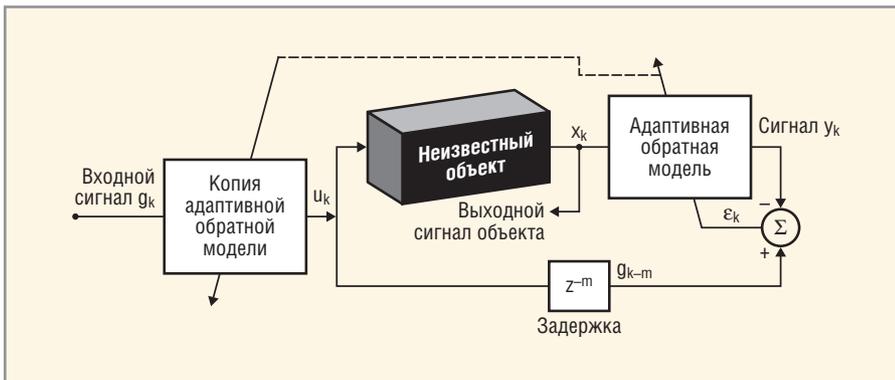


Рис. 2. Структурная схема системы управления с копией адаптивной обратной модели неизвестного объекта

ма цифрового адаптивного трансверсального фильтра (АТФ) с весовыми коэффициентами, перестраиваемыми 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, w_{lk} – текущие значения весовых коэффициентов. Функции соответствует дискретное уравнение:

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

Весовые коэффициенты фильтра на k -м отсчёте определяются по формуле наименьших квадратов:

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

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 учёта инерционности объекта.

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

При относительно медленных адаптивных процессах, т.е. 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.

Как видно из рисунка 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 рисунке 2 [2]. Ко входу неизвестного объекта подключается устройство, представляющее собой копию его адаптивной обратной мо-

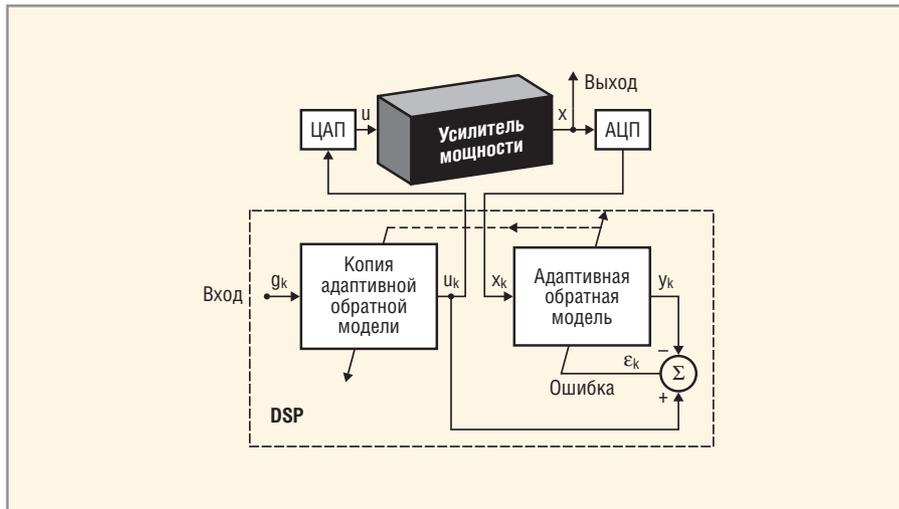


Рис. 3. Структурная схема адаптивного устройства линейризации амплитудной характеристики усилителя мощности

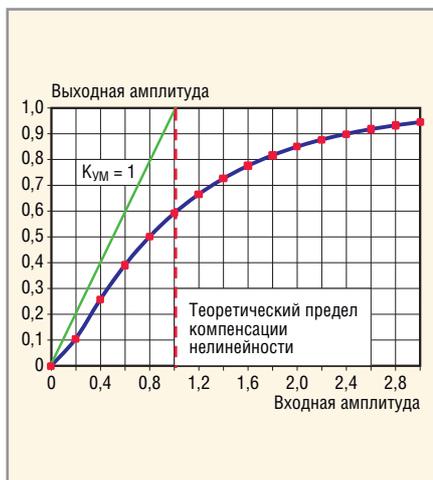


Рис. 4. Амплитудные нелинейная и компенсированная характеристики усилителя мощности

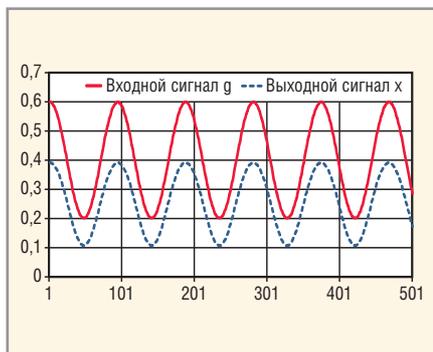


Рис. 5. Сигналы в УМ с нелинеаризованной амплитудной характеристикой ($u = g$)

дели, в результате чего сигнал x_k на выходе управляемого объекта изменяется в соответствии с сигналом g_k , который подаётся на вход копии АОМ. Поскольку 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

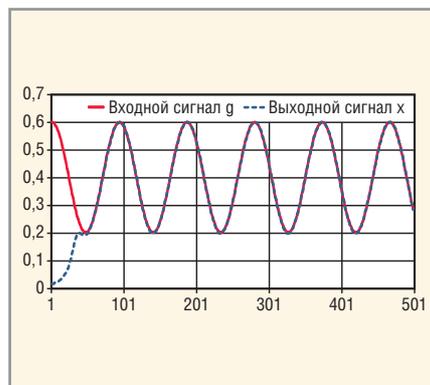


Рис. 6. Сигналы в адаптивной системе с линейризованной амплитудной характеристикой ($u = w_0 g$)

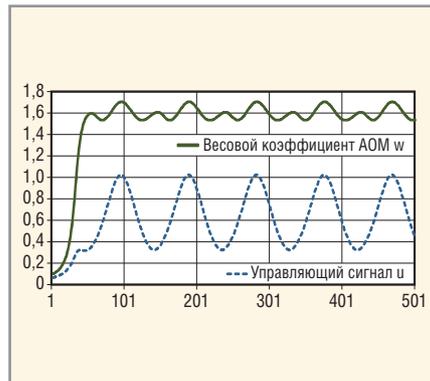


Рис. 7. Управляющий сигнал и весовой коэффициент АОМ в адаптивной системе с линейризованной амплитудной характеристикой ($u = w_0 g$)

задержкой на m временных тактов, т.е. выполняется равенство:

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

Приведём соотношения, реализующие алгоритм функционирования системы управления с копией АОМ объекта. Сигнал y_k на выходе адаптивной обратной модели вычисля-

ется 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.

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

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 отметить, что система управления с копией АОМ объекта является разомкнутой. Однако в ней 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 рисунке 3.

Предложенный алгоритм обладает свойством поддерживать постоянное значение коэффициента передачи $K_{УМ}$ между выходным сигналом УМ x_k и входным сигналом системы g_k . Поскольку УМ можно считать безынерционным элементом, модифицированный алгоритм значительно упрощается по сравнению с описанным выше прототипом, поскольку АТФ состоит из единственного весового коэффициента, а задержка $m = 0$.

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

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

Дискретное уравнение АОМ усилителя имеет вид:

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

где $K_{yM} = \text{const}$ – желаемое значение коэффициента усиления системы.

Сигнал ошибки ε_k вычисляется по формуле:

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

Весовой коэффициент на k -м отсчёте 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:

$$x_k = K_{yM}g_k. \quad (13)$$

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 ($0 < M < 1$) – относительное среднее значение СКО, а $E[x_k^2]$ – средняя мощность выходного сигнала усилителя. Желаемый коэффициент K_{yM} может быть задан условием:

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

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

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АДАПТАЦИИ

Для иллюстрации эффективности предлагаемого алгоритма ниже приводятся результаты компьютерного моделирования процессов адаптации в системе управления усилителем

мощности с нормированными амплитудными характеристиками, показанными на рисунке 4.

На рисунке 5 показаны временные характеристики входного и выходного сигналов в неадаптивной системе. На рисунках 6 и 7 показаны сигналы в адаптивной системе. Сравнение характеристик наглядно отражает свойства предложенного алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый адаптивный алгоритм является эффективным и экономичным способом компенсации нелинейности амплитудной характеристики усилителя мощности и может быть достаточно легко реализован средствами микросхемотехники.

ЛИТЕРАТУРА

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

