

УДК 519.7

АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВЫХ ПРЕДЫСКАЖЕНИЙ В СОВРЕМЕННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ

Р. А. ЖЕРНОСЕКОВ, аспирант БГУИР
Д. Г. ГАРЕЛИК, ведущий инженер ОАО «БЕЛЛИС»

Статья посвящена обзору актуальных алгоритмов предискажения в цифровых усилителях мощности, их особенностям и недостаткам. В контексте увеличивающихся требований к качеству работы выходного каскада усилителя особое внимание уделяется высокой линейности и энергоэффективности. Авторы указывают на взаимоисключающие характеристики и предлагают компромисс между ними. В статье рассматриваются различные современные подходы и технологии, основанные на цифровой обработке сигнала, включая алгоритмы цифрового предискажения и адаптивные техники. Авторы отмечают сложности, с которыми сталкиваются разработчики, но подчеркивают их стремление найти оптимальное решение для обеспечения баланса между энергоэффективностью и линейностью усилителей мощности.

Ключевые слова: 5G, 6G, DPD, LMS, RLS.

ВВЕДЕНИЕ

Поэтапное внедрение технологий цифровой связи 5G и перспективной технологии 6G еще больше ужесточают требования к усилителям мощности передающих устройств, используемых в данных системах связи. Это происходит несмотря на то, что в системах цифровой связи актуальных поколений (например, 4G) требования к качеству работы выходного каскада достаточно высокие. Ключевые требования, которые должны выполнять выходные каскады усилителей мощности систем цифровой связи – высокая линейность и энергоэффективность. Эти два, по своей сути, взаимоисключающих требования предполагают использование в цифровых системах связи энергоэффективных, линейных в широкой полосе частот усилителей мощности передающих устройств. Таким образом, при создании и разворачивании систем 5G и 6G для достижения требуемых качественных показателей каналов связи возникает вопрос компромисса между энергоэффективностью и высокой линейностью усилителя мощности в широкой полосе частот.

Для решения данных проблем и достижения желаемых характеристик выходных каскадов усилителей могут применяться различные современные подходы и технологии. В подавляющем числе устройств используют цифровую обработку сигнала – алгоритмы цифрового предискажения и адаптивные техники, которые позволяют усилителю мощности работать в более линейном режиме. Однако, несмотря на все технические сложности, разработчики и инженеры

стремятся найти оптимальное решение, которое позволит балансировать между энергоэффективностью и линейностью. Это важный аспект работы над новыми системами связи, так как они обеспечивают более высокую скорость передачи данных, большую емкость сети и новые возможности для пользователей.

Наиболее энергоэффективными усилителями мощности считаются те, которые используют нелинейный режим работы активного элемента усилителя (микросхемной сборки, транзисторного каскада и т. д.). Но с использованием специальных алгоритмов удастся добиться линейной работы выходного каскада, при сохранении высоких показателей энергоэффективности. Несмотря на относительное разнообразие способов линеаризации выходных каскадов передающих устройств наибольшее распространение в системах связи, использующих технологию 5G и 6G, получил способ предискажения входного сигнала (DPD), поступающего на вход усилителя мощности.

АЛГОРИТМЫ ПРЕДЫСКАЖЕНИЙ

Модель цифрового предискажения, основанная на математических алгоритмах и методах обработки сигнала, используется для определения оптимальных значений амплитуды и фазы входного сигнала, соотношение которых, в дальнейшем, будут минимизировать искажения и обеспечивать линейность. Это достигается путем анализа и математического предсказания нелинейных искажений, которые возникают в усилителе мощности при работе с различными

амплитудами и фазами сигнала. В упрощенном виде введение предсказания в исходный сигнал – способ исказить сигнал перед подачей на вход усилителя мощности таким образом, чтобы в результате обработки этого сигнала усилителем мощности получался максимально линейный сигнал на выходе. Однако необходимо отметить, что введение предсказания в исходный сигнал также требует дополнительных вычислительных ресурсов и вызывает задержку в обработке, что может быть ограничивающим фактором в реальных системах.

Современные усилители мощности, как правило, используют цифровые методы предсказания входного сигнала. Для этого используются соответствующие алгоритмы. Наиболее востребованными оказались алгоритмы LMS и RLS.

LMS (Least Mean Squares) – это алгоритм наименьшего среднего квадрата, тип цифрового фильтра, который используется при машинном обучении, применяет стохастический градиентный спуск сложным образом, представляет собой адаптивный фильтр, с помощью которого удается обрабатывать сигналы различными способами. Целевая функция данного алгоритма выглядит следующим образом:

$$F = f\{e(k)\} = |e(k)|^2$$

Адаптивная фильтрация является одним из широко применяемых в современной цифровой обработке сигналов. Ее появление и становление связаны

с достижениями в таких областях, как математика, радиотехника и беспроводная связь. На практике адаптивная фильтрация сигналов начала применяться с момента появления самого простого адаптивного фильтра по критерию наименьшего квадрата (LMS). Такой метод был предложен в конце 1950-х годов, профессором Стэнфордского университета (США) Бернардом Уидроу (Bernard Widrow). Базовый принцип построения адаптивных фильтров приведен на рисунке 1.

Для обозначения LMS-алгоритма в русскоязычных источниках наиболее часто используется аббревиатура МНК, что и означает метод наименьших квадратов. Несмотря на не самую высокую эффективность по сравнению с более сложными рекурсивными алгоритмами по критерию наименьших квадратов (RLS) LMS-алгоритм вычисления весовых коэффициентов (ВК) адаптивных фильтров и сейчас наиболее широко используется на практике. Причинами распространенного применения LMS-алгоритма являются его низкая вычислительная сложность (наименьшая среди всех алгоритмов адаптивной фильтрации), простота в понимании и реализации, а также устойчивость при правильном выборе единственного параметра, который называется «шаг сходимости». Вычислительная сложность LMS алгоритма равна $2N$ арифметическим операциям (сложений и умножений) на одну итерацию, совпадающую по длительности с периодом дискретизации обрабатываемых сигналов, где N – число ВК адаптивного фильтра.

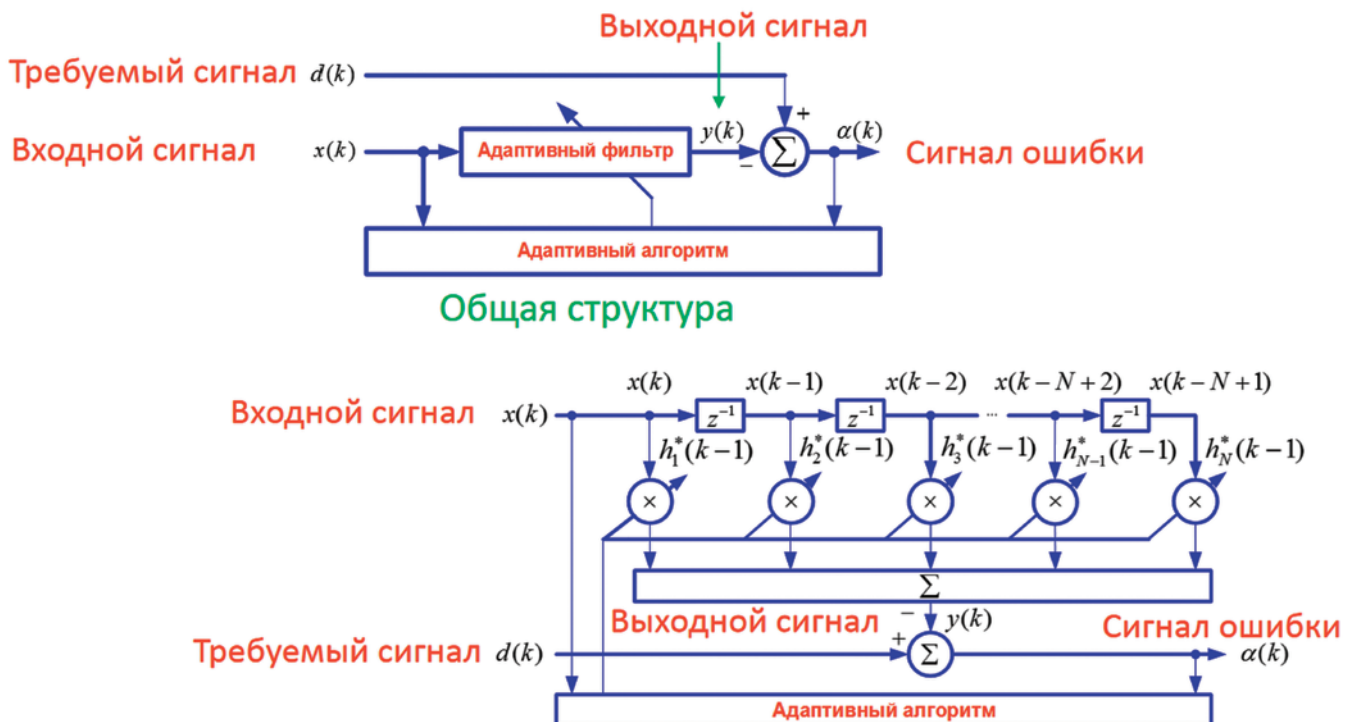


Рисунок 1 – Архитектура адаптивных фильтров

LMS-алгоритм относится к классу так называемых алгоритмов стохастического градиентного поиска координат минимума целевой функции. Термин «стохастический» употребляется для того, чтобы отличать LMS-алгоритм, использующий упрощенный градиент, от алгоритма наискорейшего спуска, использующего точное значение градиента целевой функции среднеквадратической ошибки (MSE), минимизируемой в процессе работы адаптивного фильтра. Упрощенный градиент является неточным, в результате чего движение вектора весового коэффициента к минимуму этой функции носит в некотором смысле случайный характер, отчего и используется термин «стохастический».

К основным особенностям данного алгоритма можно отнести простоту реализации и повышенное время по сходимости. Следует отметить, что адаптивная способность основана на градиентном подходе, который обновляет веса фильтра, чтобы получить оптимальные значения этих весов. При использовании данного алгоритма следует иметь в виду, что в относительно неизвестной системе он имеет большую установившуюся ошибку, не обладает эффектом памяти, и применяется для минимизации текущей среднеквадратичной погрешности между желаемым сигналом и выходным сигналом.

LMS-алгоритмы привлекательны своей низкой вычислительной сложностью (числом арифметических операций, необходимых для выполнения одной итерации алгоритма в течение одного периода дискретизации обрабатываемых сигналов) и способностью адаптироваться к динамически изменяющемуся сигналу, что делает их подходящими для использования в выходных каскадах усилителей мощности. К основным недостаткам можно отнести медленную сходимость, которая проявляется при обработке нестационарных сигналов, а также зависимость длительности переходного процесса и остаточной ошибки на выходе адаптивного фильтра от шага сходимости.

От подобных недостатков свободны алгоритмы, в основе которых лежат рекурсивные алгоритмы по критерию наименьших квадратов (Recursive Least Squares, RLS). Однако вычислительная сложность RLS-алгоритмов очень высока и превышает в значительной степени вычислительную сложность простых алгоритмов, используемых в адаптивной фильтрации, что на протяжении многих лет служило сдерживающим фактором в области применения сложных алгоритмов в различных приложениях.

RLS (Recursive Least Squares) – алгоритм представляет собой адаптивный фильтр, который рекурсивно находит коэффициенты цифрового фильтра, делая минимальной взвешенную функцию стоимости линейного метода наименьших квадратов, относящуюся к входным сигналам. Подобные фильтры адапти-

руются на основе полной погрешности, которая вычисляется сначала.

Основными особенностями можно назвать увеличенную вычислительную сложность и быструю сходимость. Адаптивная способность данного алгоритма основана на рекурсивном подходе, который позволяет находить коэффициенты фильтра, минимизируя значение взвешенной функции линейного метода наименьших квадратов, относящихся к входным сигналам. Следует также отметить, что алгоритм обладает меньшей установившейся ошибкой по отношению к неизвестной системе, а также эффектом памяти, т. е. сохраняет прошлые данные по отношению к текущей точке данных. Все ошибочные данные рассматриваются в полной погрешности. Используя фактор упущения, удается уменьшить роль старых данных по сравнению с новыми.

Помимо вышеперечисленного, RLS-алгоритм является более чувствительным к изменениям входных данных, что позволяет ему быстрее адаптироваться к изменяющимся условиям. Это делает его особенно эффективным в случаях, требующих быстрой реакции на изменения в системе. Таким образом, благодаря своим уникальным особенностям, RLS является мощным инструментом в областях обработки сигналов и управления сложными системами, такими как выходные каскады усилителей мощности.

Известные RLS-алгоритмы в основном предназначены для адаптивной фильтрации стационарных сигналов. Это связано тем, что присутствующая в алгоритмах корреляционная матрица входных сигналов адаптивного фильтра или промежуточные переменные, зависящие от этой матрицы, оцениваются на возрастающем окне отсчетов. При обработке нестационарных сигналов такие алгоритмы обладают низкой эффективностью, поскольку корреляционная матрица становится плохо обусловленной. Способами, позволяющими повысить эффективность адаптивных RLS-алгоритмов, являются оценка их корреляционной матрицы на скользящем окне отсчетов и динамическая регуляризация этой матрицы. Данные методы увеличивают вычислительную сложность RLS-алгоритмов примерно в два или четыре раза по сравнению с алгоритмами с возрастающим окном без регуляризации, что в итоге является возможностью обработки нестационарных сигналов.

По своей природе, RLS-алгоритмы обладают наиболее универсальными свойствами при использовании. В контексте современных усилителей мощности, критическая задача заключается в поиске оптимального алгоритма предсказания сигнала, который обеспечивает эффективную работу усилителя. Современная вычислительная техника позволяет реализовывать RLS-алгоритмы и контролировать их выполнение, что делает возможным их использование в практических

приложениях. Однако следует отметить, что выбор алгоритма предсказания должен быть основан на конкретных требованиях и характеристиках усилителя мощности. Комбинация соответствующих алгоритмов и правильная настройка параметров позволят достичь оптимальных результатов работы усилителя и осуществлять контроль их выполнения. Пример реализации адаптивного RLS-алгоритма приведен на рисунке 2.

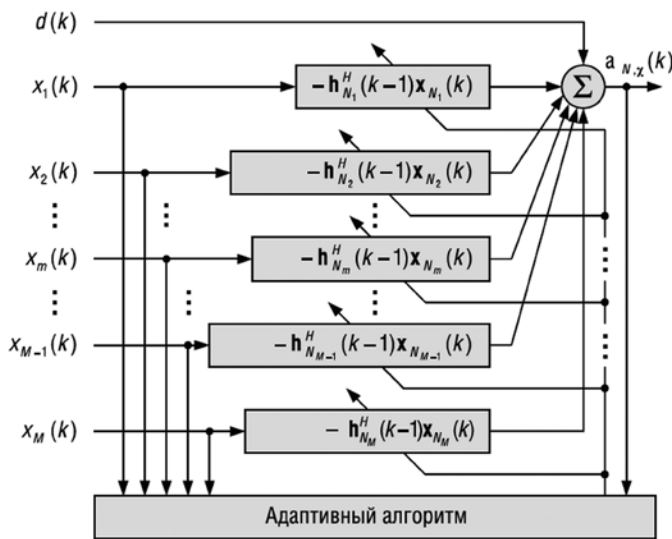


Рисунок 2 – Реализация адаптивного RLS-алгоритма

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении использования этих алгоритмов в системе предсказания входного сигнала действительно наблюдаются определенные закономерности, которые могут вызывать проблемы в работе усилителя, особенно при обработке сложных сигналов. Одной из проблем является плохо обусловленная ковариационная матрица выходного сигнала. Однако, чтобы решить эту проблему, можно создать маску для ковариационной матрицы или осуществлять постоянный контроль состояния матрицы. Синхронизация работы упомянутых адаптивных фильтров может быть достигнута с помощью моделей кросс-корреляции.

Это позволяет связывать входной и выходной сигналы, что позволяет осуществлять более эффективную обработку.

Еще одной проблемой в работе со сложными сигналами являются возникающие дробные задержки. Однако с помощью эффективных All-pass фильтров-корректоров эти задержки возможно успешно устранить. Кроме того, обработка сложных сигналов может привести к изменениям в мощности самого усилителя. Чтобы преодолеть эту проблему, можно использовать системы автоматического регулирования усиления (APУ). Это позволяет поддерживать стабильное усиление при изменении мощности входных сигналов. Таким образом, применение адаптивных фильтров LMS в системе предсказания входного сигнала может быть успешным при условии учета и решения вышеупомянутых проблем, что в итоге позволит получить желаемую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джиган, В. И. Многоканальные RLS и быстрые RLS-алгоритмы адаптивной фильтрации / В. И. Джиган // Успехи современной радиоэлектроники. – 2004. – № 11. – С. 48–77.
2. Джиган, В. И. LMS-алгоритм адаптивной фильтрации: первый или единственный для использования на практике? [Электронный ресурс] / В. И. Джиган. – Режим доступа: <http://www.mes-conference.ru/data/year2014/analyt/D119.pdf>. – Дата доступа: 05.10.2023.
3. Сергиенко, А. Б. Алгоритмы адаптивной фильтрации: особенности реализации в MATLAB / А. Б. Сергиенко // Математика в приложениях 2003. – № 1. – С. 18–27.
4. Pablo, P. C. Digital Predistortion for 5G Small Cell: GPU Implementation and RF Measurements [Electronic resource] / P. C. Pablo. – Mode of access: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11265-019-01502-4>. – Date of access: 03.10.2023.
5. Ле, В. К. Алгоритмические методы компенсации нелинейности усилителя мощности / В. К. Ле // Цифровая обработка сигналов. – 2018. – № 1. – С. 71–75.

The article is devoted to a review of current predistortion algorithms in digital power amplifiers, their features and disadvantages. In the context of increasing demands on the quality of the amplifier output stage, special attention is paid to high linearity and energy efficiency. The authors point out mutually exclusive characteristics and propose a compromise between them. The article discusses various modern approaches and technologies based on digital signal processing, including digital pre-emphasis algorithms and adaptive techniques. The authors note the challenges faced by designers, but emphasize their desire to find the optimal solution to balance power amplifiers with energy efficiency and linearity.

Keywords: 5G, 6G, DPD, LMS, RLS.