УДК 534.86

***МЕТОДЫ АДАПТИВНОЙ РЕЖЕКЦИИ   
СИГНАЛЬНЫХ АУДИОПОМЕХ***

**К.А. Гайдуков**1**, Г.В. Коняшкин**2

1–2 МИРЭА - Российский технологический университет (Москва, Россия)  
1 gajdukov@mirea.ru, 2 konyashkin@mirea.ru

**Аннотация**

**Постановка проблемы.** В современном мире вопрос повышения эффективности канальной приемопередачи информации актуален как никогда, особенно с точки зрения обротки в режиме реального времени. Кодировки аудиосигналов применяются повсеместно, однако немногие из используемых кодеков имеют встроенные алгоритмы цифровой обработки сигналов, позволяющие выполнять адаптивную фильтрацию для повышения качества принимаемого сигнала.

**Цель.** Оценить эффективность и возможность применения алгоритмов адаптивной фильтрации по методу наименьших квадратов при подавлении помех, воздействующих на аудиосигнальную дорожку, в режиме реального времени.

**Результаты.** Проведена оценка эффективности алгоритма адаптивной фильтрации аудиосигналов, предложен алгоритм для оценки эффективности адаптивной фильтрации, получены численные значения корреляции сигнала до и после фильтрации и соответствующие графики.

**Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют оценить применимость алгоритма адаптивной фильтрации при работе с аудиосигналами.

**Ключевые слова**

Фильтрация по методу наименьших квадратов, шаг адаптации, адаптивная фильтрация, помехи, радиоакустика.

*A brief version in English is given at the end of the article*

**Введение**

Анализ и обработка аудиоинформации являются одними из важнейших факторов в сфере радиоакустики. При этом зачастую возникает необходимость программной обработки аудиосигнала с целью снижения влияния помех внутреннего и внешнего воздействия. Задача адаптивной фильтрации с целью восстановления первоначального вида транслированного сигнала крайне актуальна.

Задача устранения или снижения уровня аддитивных акустических помех осложняется вариативностью их характеристик, частотных параметров, а также спецификой организации тракта передачи. Таким образом, одним из способов повышения эффективности приемного интерпретатора является имплементация системы адаптивной фильтрации, корректирующую свою импульсную характеристику в соответствии основными параметрами помех.

Цель работы – оценить эффективность и возможность применения алгоритмов адаптивной фильтрации по методу наименьших квадратов при подавлении помех, воздействующих на аудиосигнальную дорожку, в режиме реального времени.

**Адаптивная фильтрация**

Ключевой особенностью метода адаптивного шумоподавления является его способность к динамической адаптации к разнообразным условиям внешней среды, что обеспечивает эффективное подавление шумовых воздействий. Методы адаптивного шумоподавления направлены на подавление нежелательного фонового шума путем адаптации параметров фильтра на основе характеристик входного сигнала и окружающей среды. Функциональная схема работы адаптивного фильтра представлена на рисунке 1 [1, 2, 4].

Изображение выглядит как диаграмма, текст, линия, Шрифт

Автоматически созданное описание

**Рис. 1.** Схема работы адаптивного фильтра

**Fig. 1.** The scheme of the adaptive filter

В ходе выполнения исследования принято решение использовать систему адаптивной фильтрации помех по алгоритму наименьших средних квадратов (LMS – Least Mean Squares) [3]. Преимущество алгоритма наименьших квадратов заключается в его простоте, низкой вычислительной сложности и лёгкости реализации. Это делает LMS идеальным выбором для систем, требующих быстрой адаптации к изменяющимся условиям и минимизации вычислительных затрат, что критически важно в приложениях, работающих в режиме реального времени

Принцип работы алгоритма LMS заключается в том, что фильтр адаптируется к изменениям во входном сигнале путем настройки своих коэффициентов таким образом, чтобы минимизировать ошибку между выходом фильтра и желаемым сигналом. Это достигается путем коррекции коэффициентов фильтра на каждом шаге обработки сигнала на основе текущего значения ошибки.

Алгоритм LMS представляет собой линейный FIR-фильтр, выходной сигнал которого  на каждом шаге  определяется как скалярное произведение вектора входных значений  и вектора коэффициентов фильтра :

|  |  |
| --- | --- |
| , | (1) |

где – это количество коэффициентов фильтра.

Ошибка  на каждом шаге определяется как разница между желаемым сигналом и выходом фильтра :

|  |  |
| --- | --- |
| . | (2) |

Основные шаги алгоритма наименьших средних квадратов:

1. Инициализация коэффициентов фильтра случайными значениями, так как это позволяет избежать попадания в локальные минимумы и способствует более эффективному подбору весовых коэффициентов фильтра.

2. На каждом шаге алгоритма вычисляется ошибка (2) между желаемым выходным сигналом (1) и текущим выходным сигналом фильтра. Затем коэффициенты фильтра обновляются таким образом, чтобы минимизировать сумму квадратов этих ошибок.

3. Обновление коэффициентов происходит путём умножения текущей ошибки (разница между желаемым выходным сигналом и текущим выходным сигналом фильтра) на входной сигнал и последующего добавления результата к текущему значению коэффициента. Весовые коэффициенты обновляются пропорционально ошибке, умноженной на входной сигнал, что позволяет фильтру адаптироваться к изменениям во входном сигнале.

4. Коррекция коэффициентов фильтра с учетом ошибки по МНК и шага адаптации. Шаг адаптации определяет, насколько сильно будут обновлены коэффициенты фильтра на основе текущей ошибки.

5. Повторение шагов 2-4 для каждого нового входного сигнала.

**Оценка эффективности адаптивной фильтрации**

Для выполнения задачи оценки эффективности и возможности применения алгоритмов адаптивной фильтрации по методу наименьших квадратов при подавлении помех [6, 9, 10], воздействующих на аудиосигнальную дорожку, в live режиме, был реализован алгоритм, блок-схема которого представлена на рисунке 2.

Изображение выглядит как текст, диаграмма, снимок экрана, линия

Автоматически созданное описание

**Рис. 2.** Блок-схема оценки эффективности применения алгоритма адаптивной   
фильтрации методом наименьших квадратов

**Fig. 2.** Flowchart for evaluating the effectiveness of the adaptive least squares filtering algorithm

1. Загрузка файла аудиосигнала, помехи, настройка ФНЧ (фильтра нижних частот). В блоке кода выполняется считывание аудиофайлов (аудиосигнала, помехи) с помощью функций audioread. Массив данных с информационной составляющей расширяется до размера массива с шумом, чтобы их можно было комбинировать. Происходит настройка фильтра нижних частот, после чего ФНЧ применяется к аудиосигналу шумовой составляющей, и результат фильтрации добавляется к информационному аудиосигналу, создавая смесь полезного сигнала и помехи. Полученный аудиосигнал воспроизводится с заданной частотой дискретизации.

2. Спектральный анализ промежуточных сигналов. Проанализировав аплитудно-частотные характеристики (АЧХ) аудиосигнала после применения фильтра нижних частот можно сделать вывод, что использование фильтра нижних частот не дает удовлетворительных результатов [5]. Шум перекрывает полезный сигнал по уровню на определенных частотах, что представлено на рисунке 3.

Изображение выглядит как линия, График, диаграмма, снимок экрана

Автоматически созданное описание

**Рис. 3.** АЧХ аудиосигнала, помехи и их аддитивной смеси

**Fig. 3.** Frequency response of the audio signal, interference and their additive mixture

3. Инициализация системных объектов адаптивного фильтра. В данном блоке кода создаются объекты для работы с аудиоданными и обработки сигналов. Также создаётся переменные адаптивного LMS-фильтра с количеством подбираемых коэффициентов (в рассматриваемом случае 64) и размером шага адаптации. Далее, создаётся переменная для сохранения значений коэффициентов фильтра на каждом шаге адаптации.

|  |  |
| --- | --- |
| https://sun1-16.userapi.com/impg/g0HLnRVSAXrTIgYW0QHD-KGBlqbBXWJAdpbT7w/ZffTnEJHlNE.jpg?size=625x445&quality=96&sign=30681cd299b3e85753c5455d57590526&type=album  **Рис. 4.** Импульсная характеристика фильтра с длиной 64 коэффициента с размером шага подстройки  **Fig. 4.** Pulse characteristic of a filter with a length of 64 coefficients with a tuning step size | https://sun9-79.userapi.com/impg/vLTvl9r70mVzfcV8VGnL-lALecFPlnP9uIEPAg/YDbxe_t-La4.jpg?size=543x416&quality=96&sign=739e21755f02f885a7decdcfed975509&type=album  **Рис. 5.** Импульсная характеристика фильтра с длиной 64 коэффициента с размером шага подстройки  **Fig. 5.** Pulse characteristic of a filter with a length of 64 coefficients with a tuning step size |
| https://sun9-20.userapi.com/impg/mEwYdvFTo2rCg87dATbIvU9U9V4C6ADeJYtouQ/rzSoq9COZb8.jpg?size=539x423&quality=96&sign=7190b9831f7705f83d54159716079959&type=album  **Рис. 6.** Импульсная характеристика фильтра с длиной 64 коэффициента с размером шага подстройки  **Fig. 6.** Pulse characteristic of a filter with a length of 64 coefficients with a tuning step size | https://sun9-24.userapi.com/impg/_HZZ0GwvOACLg8NNVBIWHL8NYtQSWaZBXhiCmw/DfIgPUHaSQY.jpg?size=546x420&quality=96&sign=a5b6f01c0f030df446b92f8d9a50e891&type=album  **Рис. 7.** Импульсная характеристика фильтра с длиной 64 коэффициента с размером шага подстройки  **Fig. 7.** Pulse characteristic of a filter with a length of 64 coefficients with a tuning step size |

4. Цикл адаптивной обработки аудиосигнала. Блок кода реализует цикл, который выполняется до тех пор, пока не закончит чтение всех данных. Внутри цикла происходит считывание следующего фрагмента сигнала шумовой составляющей и добавление результата к фрагменту сигнала информационной составляющей. Адаптивный LMS-фильтр применяется к входным сигналам (шумовой и информационной составляющей). Выходной сигнал фильтра, ошибка фильтрации, текущие коэффициенты фильтра сохраняются в отдельных переменных для дальнейшего воспроизведения и визуализации изменения импульсной характеристики фильтра.

5. Визуализация изменения импульсной характеристики во времени [7, 8]. Было проведено моделирование воздействия LMS фильтра на смесь сигнала и помехи при различных его параметрах. Импульсные характеристики (ИХ), которых представлены на рисунках 4-7, анализируя которые можно сделать вывод, что уменьшение шага подстройки весовых коэффициентов фильтра позволяет получить большее количество дискретных значений отклика, позволяя зафиксировать эффективную разницу в зависимости от вносимых значений.

Анализируя полученную зависимость, можно сделать вывод, что наиболее эффективным шагом подстройки является , что соответствует рисунку 6. так как меньший шаг подстройки позволяет фильтру выполнить более эффективную режекцию помехи, особенно если характеристики шума и сигнала медленно меняются со временем. При большом шаге подстройки быстродействие алгоритма повышается, однако увеличивается вероятность пропустить наиболее эффективный коэффициент фильтра.

Рассчитан корреляционный коэффициент сигнала, отфильтрованного адаптивным фильтром и исходного сигнала без шумовой составляющей, для оценки эффективности режекции помех. Графики, отражающие корреляцию сигнала после фильтрации с эталонным сигналом представлены на рисунках 8-12. Значения коэффициента корреляции от шага адаптации приведены в таблице 1.

**Таблица 1**. *Зависимость значения коэффициента корреляции от шага адаптации*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Шаг подстройки |  |  |  |  |
| Коэффициент корреляции | 0,7918 | 0,9722 | 0,9972 | 0,9998 |

Изображение выглядит как линия, График, снимок экрана

Автоматически созданное описание

**Рис. 8.** АЧХ эталонного сигнала и сигнала после LMS фильтра с длинной в 64 коэффициента,   
шагом подстройки . Коэффициент корреляции сигналов 0,7918

**Fig. 8.** Frequency response of the reference signal and the signal after the LMS filter with   
a length of 64 coefficients, adjustment step . The signal correlation coefficient is 0,7918

Изображение выглядит как линия, График, снимок экрана

Автоматически созданное описание

**Рис. 9.** АЧХ эталонного сигнала и сигнала после LMS фильтра с длинной в 64 коэффициента,   
шагом подстройки . Коэффициент корреляции сигналов 0,9722

**Fig. 9.** Frequency response of the reference signal and the signal after the LMS filter with   
a length of 64 coefficients, adjustment step . The signal correlation coefficient is 0,9722

Изображение выглядит как линия, График, снимок экрана

Автоматически созданное описание

**Рис. 10.** АЧХ эталонного сигнала и сигнала после LMS фильтра с длинной в 64 коэффициента,   
шагом подстройки . Коэффициент корреляции сигналов 0,9972

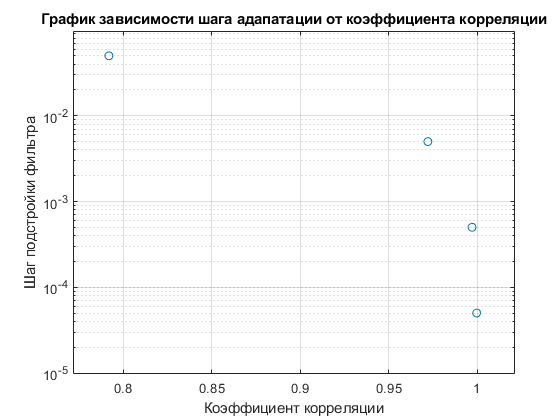
**Fig. 10.** Frequency response of the reference signal and the signal after the LMS filter with   
a length of 64 coefficients, adjustment step . The signal correlation coefficient is 0,9972

Изображение выглядит как линия, График, снимок экрана

Автоматически созданное описание

**Рис. 11.** АЧХ эталонного сигнала и сигнала после LMS фильтра с длинной в 64 коэффициента, шагом подстройки . Коэффициент корреляции сигналов 0,9998

**Fig. 11.** Frequency response of the reference signal and the signal after the LMS filter with a length of 64 coefficients, adjustment step . The signal correlation coefficient is 0,9998



**Рис. 12.** Зависимость шага подстройки от коэффициента корреляции

**Fig. 12.** Dependence of the adjustment step on the correlation coefficient

Анализируя полученный график можно сделать вывод, что в случае расчета коэффициента корреляции для оценки эффективности работы фильтра присутствует зависимость, показывающая пороговое значение шага подстройки  при котором коэффициент корреляции максимален.

**Заключение**

В данной работе проведена оценка эффективности адаптивного фильтра, работающего по методу наименьших квадратов с использованием эталонной модели. По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что применение адаптивной фильтрации может значительно повысить разборчивость сигнала слышимого спектра. По результатам моделирования реализованный алгоритм показывает свою эффективность, повышая коэффициент корреляции до значений близких к единице. При достаточном количестве исходных данных существует возможность унифицировать данный алгоритм для фильтрации аудиосигнала в различных частотных диапазонах при влиянии различных шумовых составляющих, в том числе в режиме обработки в реальном времени.

**Список источников**

1. *Уидроу Б., Стирнз С.* Адаптивная обработка сигналов. Москва: Радио и связь, 1989. – 439 с.
2. *Джиган В.И*. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. Москва: Техносфера, 2013. – 527 с.
3. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов и основы математикостатистической теории обработки наблюдений. Москва: Физматгиз, 1962. – 349 с.
4. *Первачев С.В.* Адаптивная фильтрация сообщений. Москва: Радио и связь, 1991. – 160 с.
5. *Коптев Д.С.* Теория радиотехнических сигналов: учебное пособие. Курск: ЮЗГУ, 2019. 239 с.
6. *Савватеева Ю.И.* Оптимальный прием сигналов на фоне помех и шумов. Москва: Радиотехника, 2011.423 с.
7. *Куликов Г.В., Коняшкин Г.В.* Режекция узкополосной помехи при приеме сигналов с квадратурной амплитудной модуляцией. Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем ("Радиоинфоком-2023"): Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции, Москва, 2023. – Москва: МИРЭА-Российский технологический университет, 2023. – 343-346 с.
8. *Костин М.С., Шадинов С.С., Латышев К.В., Коняшкин Г.В., Корчагин А.С.* Векторное формирование сигнальных радиоизображений методом сканирующей спектрально-временной развертки. Оборонный комплекс - научно-техническому прогрессу России. – 2023. – № 2(158). – 56-63 с.
9. *Сагнаева С.К., Алазов А.К.* Моделирование и анализ производительности адаптивных алгоритмов в активном шумоподавлении. Наука и инновации - современные концепции: сборник научных статей по итогам работы Международного научного форума, Москва, 26 февраля 2021 года. – Москва: Инфинити, 2021. – 219-226 с.
10. *Кропотов Ю.А*. Моделирование адаптивной линейной фильтрации повышения отношения сигнал/внешний акустический шум в системе обмена речевой информацией. Известия вузов. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8-2. – 35-37

***METHODS OF ADAPTIVE REJECTION OF SIGNAL AUDIO INTERFERENCE***

**K.A. Gaidukov** 1**, G.V. Konyashkin** 2

1–2 MIREA - Russian University of Technology (Moscow, Russia)  
1 gajdukov@mirea.ru, 2 konyashkin@mirea.ru

**Abstract**

The article deals with the actual problem of increasing the efficiency of channel information transmission, especially in the context of real-time audio signal processing. Despite the widespread use of audio signal encodings, only a few of the codecs used include digital signal processing algorithms that provide adaptive filtering to improve the quality of received signals. The aim of the study is to evaluate the effectiveness and feasibility of using adaptive least squares filtering algorithms to suppress interference affecting audio signals in real time. In the course of the work, the effectiveness of the adaptive audio filtering algorithm was analyzed, a method for evaluating the effectiveness of adaptive filtering was developed, and numerical values of the correlation of the signal before and after filtering with the corresponding graphs were obtained. The results of the study allow us to evaluate the applicability of the adaptive filtering algorithm in working with audio signals, which is important for the development of audio processing technologies and improving the quality of audio data transmission.

**Keywords**

Least squares filtering, adaptation step, adaptive filtering, interference, radio acoustics.