

АЛГОРИТМЫ АКТИВНОГО ШУМОПОДАВЛЕНИЯ. FXLMS АЛГОРИТМ И МОДИФИЦИРОВАННЫЙ EE-FXLMS АЛГОРИТМ

Янгулов И.П.¹, Елистратов К.В.²

¹Янгулов Игорь Петрович - студент, ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный университет»

²Елистратов Кирилл Владиславович - студент, ФГБОУ ВО «Пензенский
государственный университет»
г. Пенза Российская Федерация

Аннотация: в данной статье приведен сравнительный обзор двух адаптивных алгоритмов шумоподавления. Рассматривается принцип работы алгоритмов и их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: алгоритмы шумоподавления, активный контроль шума, контроль шума трансмиссии, подавление шумов в автомобиле.

ALGORITHMS FOR ACTIVE NOISE REDUCTION. FXLMS ALGORITHM AND MODIFIED EE-FXLMS ALGORITHM

Yangulov I.P.¹, Elistratov K.V.²

¹Yangulov Igor Petrovich - student, «Penza state University»

²Elistratov Kirill Vladislavovich - student, «Penza state University»
Penza, Russian Federation

Abstract: this article provides a comparative overview of two adaptive noise reduction algorithms. The principle of operation of algorithms and their advantages and disadvantages are considered.

Keywords: noise reduction algorithms, active noise control, transmission noise control, car noise suppression.

УДК 624

FXLMS Алгоритм

На сегодняшний день существует множество решений, позволяющих понизить шум от двигателя и трансмиссии в салоне автомобиля. Рассмотрим 2 системы активного шумоподавления (*active noise control (ACN)*).



На рисунке 1 показана конфигурация базового алгоритма *FXLMS*, который применяется для управления реакцией трансмиссии. Из рисунка 1 можно вывести, что остаточный шум $e(n)$ может быть выражен как,

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (1)$$

$$y(n) = S(n) * [W^T(n) * X(n)] \quad (2)$$

где n - индекс времени, $d(n)$ - основной нежелательный шум, который в данном случае является шумом трансмиссии, $S(n)$ - импульсная характеристика вторичного тракта $S(z)$, а $*$ обозначает линейную свертку[1,2].

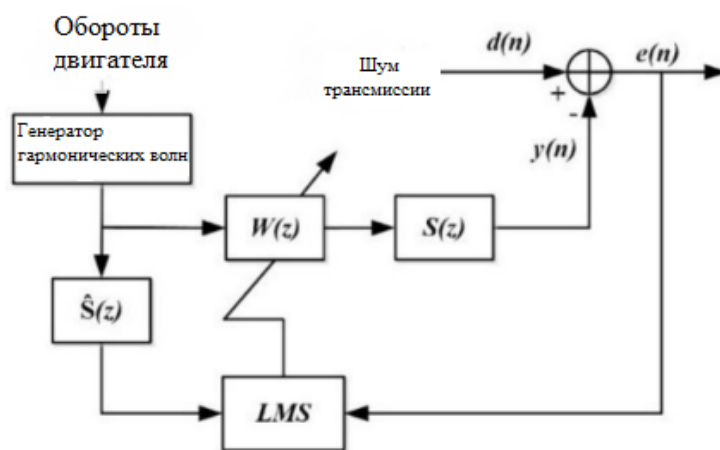


Рисунок 1. Структурная схема системы ANC трансмиссии транспортного средства с использованием алгоритма *FXLMS*

Вес адаптивного фильтра и опорный сигнал являются

$$W(n) = [w_0(n)w_1(n) \cdots w_{L-1}(n)]^T \quad (3)$$

$$X(n) = [x(n)x(n-1) \cdots x(n-L+1)]^T \quad (4)$$

Цель состоит в том, чтобы минимизировать среднеквадратичную ошибку, которую можно оценить следующим образом:

$$\xi(n) = E[e^2(n)] \quad (5)$$

где $E[\cdot]$ представляет математическое ожидание.

Среднеквадратичную ошибку $\xi(n)$ можно минимизировать с помощью метода самого крутого спуска, который обновляет вектор адаптивного веса в направлении отрицательного градиента:

$$W(n+1) = W(n) + \mu X'(n)e(n) \quad (6)$$

где $X'(n) = S(n) * X(n)$.



Видно, что вес адаптивного фильтра обновляется фильтрованным опорным сигналом $X'(n)$. Поэтому он называется алгоритмом *filtered LMS* [3, 4].

Поведение сходимости, зависящее от частоты

В 1993 году Файнтух разработал алгоритм FXLMS в частотной области, для которого поведение сходимости может быть проанализировано более интуитивно [5]. Сообщается, что размер шага адаптации (μ) должен соответствовать следующему условию стабильности:

$$\mu P_x(\omega) < \frac{2}{|S(\omega)|^2} \quad (7)$$

где $P_x(\omega) < \frac{2}{|S(\omega)|^2}$ - мощность исходного опорного сигнала на частоте ω .

$|S(\omega)|$ - амплитуда вторичного тракта на частоте ω .

В общем случае верхняя граница μ обратно пропорциональна мощности отфильтрованного опорного сигнала. Поэтому, даже если мощность исходного опорного сигнала будет одинаковой на разных частотах, модель вторичного тракта все равно будет влиять на верхнюю границу размера шага, вызывая определенные расхождения на разных частотах. Если используется фиксированный размер шага, компоненты на разных частотах будут проявляют различное поведение сходимости.

$$\tau_{mse} \leq \frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}} T \leq \frac{\omega_{max} |X(e^{j\omega})|^2}{\omega_{min} |X(e^{j\omega})|^2} T \quad (8)$$

Аналогичные результаты можно получить, проведя анализ временной области. Сообщается, что общая скорость сходимости определяется динамическим диапазоном матрицы автокорреляции отфильтрованного опорного сигнала. Уравнение 8 показывает зависимость между временем сходимости и динамическим диапазоном собственного значения. λ_{max} и λ_{min} - это максимальное и минимальное собственные значения матрицы автокорреляции. T - период дискретизации, а τ - постоянная времени, которая является временем, необходимым для затухания любого сигнала до $1/e$ ($\approx 37\%$) от его первоначального значения. Из-за того, что среднеквадратическая ошибка является квадратом, τ_{mse} - это время, необходимое для уменьшения



среднеквадратической ошибки в 2 раза. Поэтому, чем больше динамический диапазон, тем больше времени требуется для сближения системы активного шумоподавления.

Как анализ временной области, так и анализ частотной области приходят к одному и тому же выводу, что общая сходимость ограничена частотной составляющей, которая обладает меньшей амплитудой вторичного пути. Если алгоритм *FXLMS* непосредственно применяется для управления реакцией трансмиссии, двигатель заказывает большой вторичный путь амплитуды могут быть уменьшены более эффективным способом. Однако система будет оказывать минимальное влияние на заказы с меньшими амплитудами вторичного пути. В результате ожидается несбалансированная производительность. В последнее время многие исследователи и инженеры разработали модифицированные алгоритмы для повышения производительности системы *ANC* [5, 6, 7].

***EE-FXLMS* алгоритм**

Томас и др. разработали алгоритм *EE-FXLMS* в 2008 году [17, 18]. Базовая конфигурация алгоритма *EE-FXLMS* для реакции трансмиссии транспортного средства показана на рисунке 2. По сравнению с другими модифицированными алгоритмами основным преимуществом алгоритма *EE-FXLMS* является простота структуры. Этот алгоритм, по сути, является алгоритмом *FXLMS* с незначительными изменениями. Эффективность алгоритма *EE-FXLMS* достигается за счет уменьшения динамического диапазона собственного значения матрицы автокорреляции. Время сходимости пропорционально динамическому диапазону разброс собственных значений, как указано в уравнении 8. Таким образом, уменьшение динамического диапазона может эффективно сократить время сходимости. Процесс выравнивания собственных значений, который показан на рисунке 2, может быть использован для уменьшения динамического диапазона [8,9].

Он реализуется в следующих шагах:



1. Получите ответ во временной области $S(n)$ вторичного пути через идентификацию системы.
2. Выполните быстрое преобразование Фурье (FFT) на $S(n)$, чтобы получить частотную характеристику.
3. Разделите каждое значение частотной характеристики на его величину.
4. Выполните обратное быстрое преобразование Фурье ($IFFT$), чтобы получить новое $S(n)$ и используйте его как обычно.

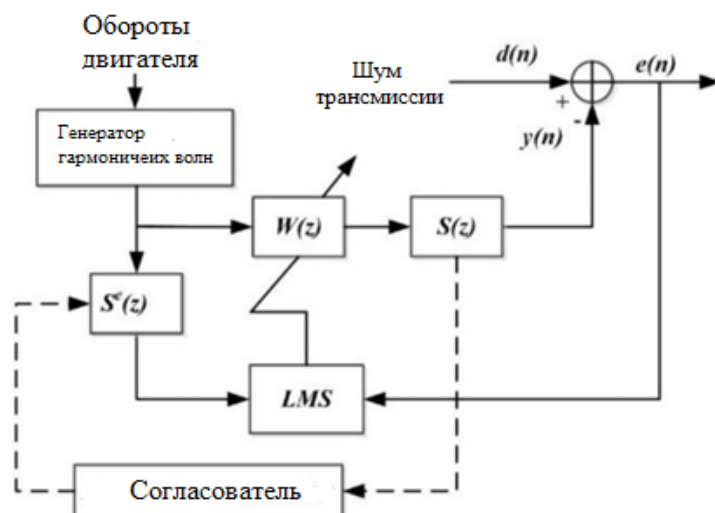


Рисунок 2. Структурная схема системы ANC трансмиссии транспортного средства с использованием алгоритма $EE\ FXLMS$

Этот процесс успешно сглаживает отклик на величину оцененных моделей вторичных путей (z), которые используются в системе. Однако отклик на величину фактического вторичного пути $S(z)$ все еще существует, что приводит к расхождениям в скоростях сходимости на различных частотах. По существу, алгоритм $EE\ FXLMS$ уменьшает верхнюю связь постоянной времени t_{mse} со второго порядка отношения, умноженного на период выборки $\frac{\omega_{max}|X(e^{j\omega})|^2}{\omega_{min}|X(e^{j\omega})|^2}$, до первого порядка. Этот процесс может эффективно сократить время конвергенции. Однако, этот процесс не полностью устраняет поведение сходимости, зависящее от частоты [10].

Список литературы

1. Kuo, S.M. and Morgan, D., Active noise control systems: algorithms and DSP implementations. 1995: John Wiley & Sons, Inc. ISBN:0471134244.



2. Elliott, S.J. and Nelson, P.A., “Active noise control”. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 1993. 10(4): p. 12-35.
3. Lago, T., “Overview on ANVC Systems and the Future with Smart Embedded Solutions,” *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 8(3):855- 861, 2015, doi:10.4271/2015-01-2215.
4. Paul, L., “Process of silencing sound oscillations”. U.S. Patent US 2,043,416, June 9, 1936.
5. Shoureshi, R. and Knurek, T., “Automotive applications of a hybrid active noise and vibration control”. *Control Systems, IEEE*, 1996. 16(6): p. 72-78.
6. Kinoshite, A. and Aoki, H., “Active noise control system for automotive vehicle”. U.S. Patent US 5,245,664, Sep. 14, 1993.
7. Elliott, S., Stothers, I., Nelson, P., et al. “The active control of engine noise inside cars”. in *INTER-NOISE Congress and Conference Proceedings*. 1988. Institute of Noise Control Engineering.
8. Duan, J., Li, M., and Lim, T.C., “A computational-efficient active sound tuning system for steady-state and transient vehicle powertrain response”. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*, 2014. 10(1): p. 77-92.
9. Widrow, B. and Walach, E., “Adaptive Inverse Control, Reissue Edition: A Signal Processing Approach”. 2008: John Wiley & Sons ISBN:0470231602.
10. Narayan, S.S., Peterson, A.M., and Narasimha, M.J., “Transform domain LMS algorithm”. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 1983. 31(3): p. 609-615.

