

УДК 621.391.08

А. М. Зыков, магистрант
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

РАЗРАБОТКА, РЕАЛИЗАЦИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ВЫЯВЛЕНИЕ ОШИБОК АЛГОРИТМОВ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ В СИСТЕМАХ АКТИВНОГО ШУМОВОГО КОНТРОЛЯ

Рассмотрены основные вопросы проектирования алгоритмов цифровой обработки сигнала в системах активного шумоподавления, представлены полученные в ходе экспериментальных исследований основные результаты по разработке, реализации и анализу эффективности работы и выявлению ошибок разработанных цифровых фильтров для систем активного шумового контроля в режиме реального времени. Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 14-07-31100\14 (вид конкурса: мол_а).

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, алгоритмы адаптивной фильтрации сигнала, активное шумоподавление.

Одним из решений алгоритмов адаптивной обработки сигналов активного шумового контроля является алгоритм минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией сигнала, подробно описанный в [1].

Принцип его работы заключается в следующем:

- 1) осуществляется ввод исходного сигнала $x(n)$ и сигнала ошибки $e(n)$;
- 2) вычисляется значение противошума $y(n)$;
- 3) осуществляется подача гасящей волны $y(n)$ на громкоговоритель гасящей волны;
- 4) вычисляется фильтрованная версия сигнала;
- 5) обновляются коэффициенты адаптивного фильтра $W(z)$;
- 6) повторяются процедуры для следующей итерации.

Ниже приведены математические модели представления данного алгоритма:

выходной сигнал за время n :

$$y(n) = \underline{w}^T(n) \underline{x}(n) = \sum_{i=0}^{N-1} w_i x(n-i), \quad (1)$$

где вектор коэффициентов $W(z)$ за время n :

$$\underline{w}^T = [w_0(n) w_1 \dots w_{N-1}(n)]^T; \quad (2)$$

исходный вектор сигнала за время n :

$$\underline{x}(n) = [x(n) x(n+1) \dots x(n-N+1)]^T. \quad (3)$$

Представим предложенные математические методы реализации на цифровом сигнальном процессоре TMS 320 (4)–(7):

$$w_i(n+1) = w_i(n) - \mu e(n) x'(n-i); \quad (4)$$

$$x'(n) = \underline{c}^T \underline{x}'(n) = \sum_i^{M-1} c_i(n-i); \quad (5)$$

$$\underline{x}'(n) = [x'(n) x'(n-1) \dots x'(n-N+1)]^T; \quad (6)$$

$$\underline{c} = [c_0 c_1 \dots c_{M-1}]^T. \quad (7)$$

Следующим решением программной реализации активного управления акустическим полем является

алгоритм минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией сигнала и подавлением акустической обратной связи, представленный в [2].

Математические методы представления аналогичны, за исключением того, что ввод сигнала – без помех обратной связи и выражается уравнением:

$$x(n) = u(n) - \sum_{i=1}^l d_i y(n-i), \quad (8)$$

где $u(n)$ является сигналом от входного микрофона, d_i – коэффициентом $D(z)$ и l – порядком $D(z)$.

В качестве третьего варианта решения был предложен рекурсивный алгоритм минимальной среднеквадратичной ошибки, математические модели представления которого показаны в (9)–(12) [3, 4]:

$$\begin{aligned} y(n) &= \underline{a}^T(n) \underline{x}(n) + \underline{b}^T(n) \underline{y}(n-1) = \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} a_i(n) x(n-i) + \sum_{j=1}^M b_j(n) y(n-j), \end{aligned} \quad (9)$$

где весовой вектор $A(z)$ за время:

$$\underline{a}(n) = [a_0(n) a_1(n) \dots a_{N-1}(n)]^T, \quad (10)$$

весовой вектор $B(z)$ за время:

$$\underline{b}(n) = [b_0(n) b_1(n) \dots b_M(n)]^T, \quad (11)$$

вектор сигнала, представляющий обратную связь с единичной задержкой:

$$\underline{y}(n-1) = [y_{n-1}(n) y_{n-2} \dots y_{n-M}]^T, \quad (12)$$

N – порядок $A(z)$; M – порядок $B(z)$.

В данном случае уравнениями (10)–(12) представлены весовые векторы сигналов, уравнением (9) – значение выходного сигнала.

Аналогично были предложены уравнения для реализации на цифровом процессоре TMS 320 (13)–(17):

$$\underline{a}(n+1) = \underline{a}(n) - \mu e(n) \underline{x}'(n), \quad (13)$$

$$\underline{b}(n+1) = \underline{b}(n) - \mu e(n) \underline{y}'(n), \quad (14)$$

$$\underline{y}'(n-1) = [y'(n-1) y'(n-2) \dots y'(n_M)]^T, \quad (15)$$

$$y'(n) = \sum_{j=1}^M c_j y(n-j), \quad (16)$$

$$W(z) = \frac{A(z)}{1-B(z)} = \frac{-P(z)}{H(z)-P(z)F(z)}. \quad (17)$$

На рис. 1–4 приведены предложенные методы программной реализации разработанных математических моделей алгоритмов на сигнальном процессоре TMS 320.

Полученные результаты по анализу эффективности работы для синусоидальных сигналов, а именно спектры ошибок реализованных алгоритмов, представлены на рис. 5–7.

```
uen = u*e[n];
for (i=0; i<N; i++)
    {wn[i] += uen * xn[i]; }
```

Рис. 1. Метод реализации на языке С МСО-алгоритма

```
y[n] = 0;
for (i=0; i<N; i++)
    {y[n] += wn[i]*xn[i]; },
```

Рис. 2. Метод генерирования выходного сигнала МСО-алгоритма

```
LRLK  AR2,COEFFD      ; point to Equation
LRLK  AR3,LASTAP+1   ; point to x(n-N+1)
LT    ERRF           ; T = ERRF = u*e(n)
MPY   *-,AR2
ADAPT ZALR *,AR3
      MPYA *-,AR2
      SUB *,LEAKY    ; LEAKY=16-M
      SACH *+,0,ARI
      BANZ ADAPT,*-,AR2
```

Рис. 3. Метод реализации алгоритма МСО с фильтрацией сигнала

```
LARP
LRLK ARn, LASTAP      ; point to the x(n-N+1)
RPTK N-1              ; repeat next instruction N times
MACD COEFFFP, *-      ; multiply/accumulate
APAC
```

Рис. 4. Метод реализации алгоритма МСО с фильтрацией сигнала и подавлением акустической обратной связи

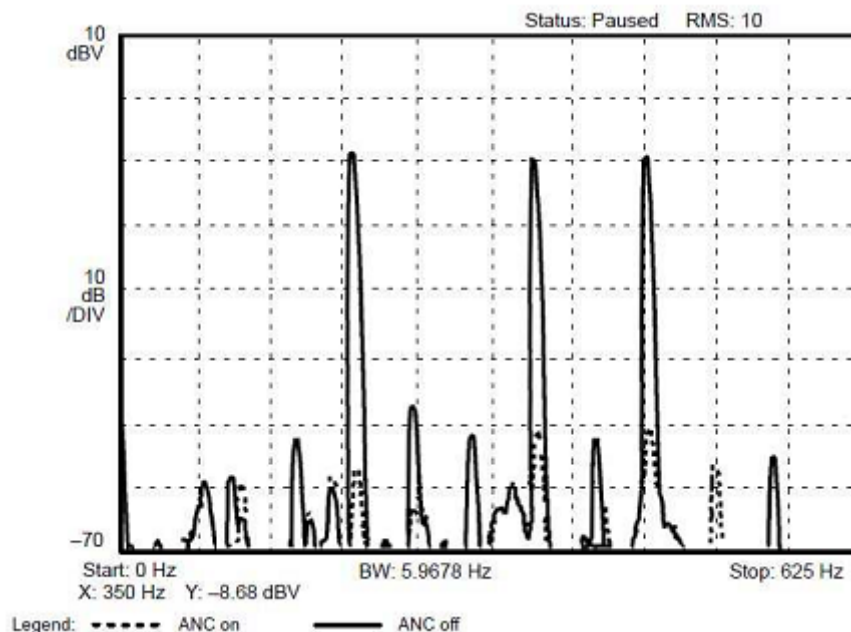


Рис. 5. Спектр ошибки алгоритма минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией сигнала, 3-тоновая синусоида, порядок $W(z) = 64$, порядок $C(z) = 64$

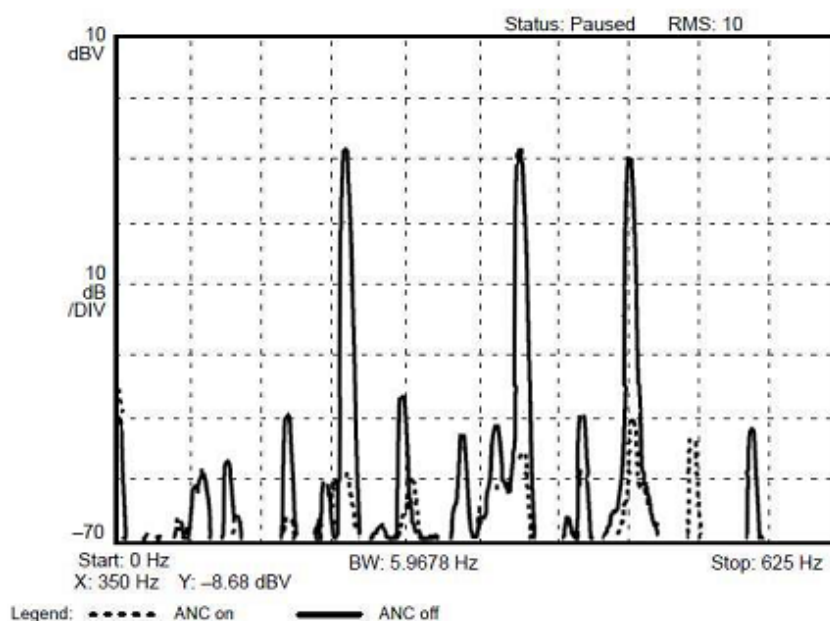


Рис. 6. Спектр ошибки алгоритма минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией сигнала и подавлением обратной связи, 3-тоновая синусоида, порядок $W(z) = 64$, порядок $C(z) = 64$

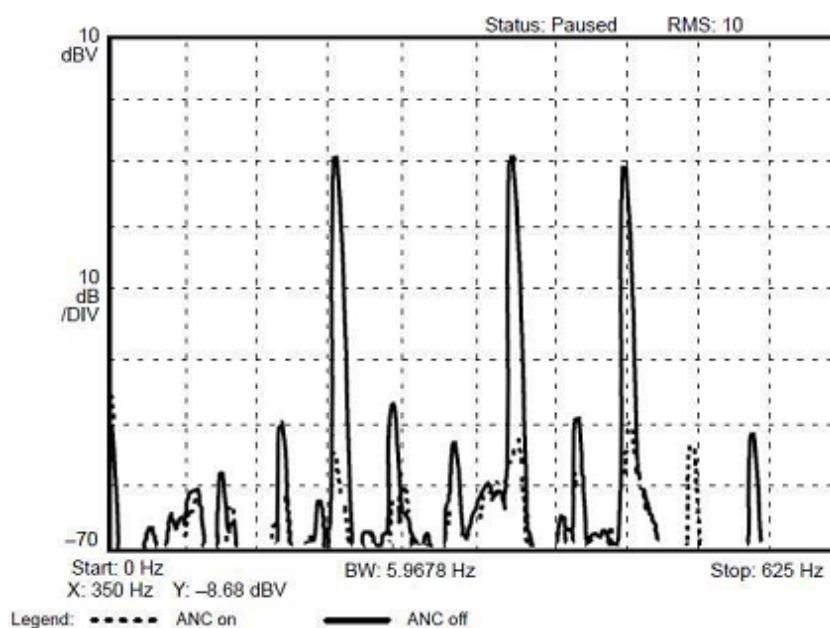


Рис. 7. Спектр ошибки рекурсивного алгоритма, 3-тоновая синусоида, порядок $W(z) = 64$, порядок $C(z) = 64$, порядок $D(z) = 64$

Исходя из полученных результатов можно сделать следующий вывод: система активного шумового контроля показывает лучшую эффективность в режиме реального времени в результате реализации алгоритма минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией опорного сигнала и подавлением обратной связи – его абсолютная величина фильтрации составляет 42 Дб и рекурсивного адаптивного алгоритма, абсолютная величина которого 45 Дб относительно работы фильтра минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией опорного сигнала (абсолютная величина фильтрации – 27 Дб).

Таким образом, в ходе научного эксперимента были получены следующие результаты:

1. На основе анализа методов представления целевой функции, метода скорейшего спуска, алгоритма наименьших средних квадратов, модифицированного алгоритма наименьших средних квадратов были разработаны:

- алгоритм минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией сигнала;
- алгоритм минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией опорного сигнала и подавлением акустической обратной связи;
- рекурсивный алгоритм минимальной среднеквадратичной ошибки.

Предложены схемы данных алгоритмов и математические модели их представления для реализации в реальном времени.

2. Разработаны методы программной реализации для предложенных моделей фильтров активного шумоподавления с использованием сигнального процессора TMS 320, позволяющие вести активное шумоподавление в режиме реального времени на реальных промышленных приложениях.

3. Получены спектры ошибок разработанных фильтров; установлено, что высокую эффективность показывают фильтр минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией опорного сигнала и подавлением обратной связи (абсолютная величина фильтрации – 42 Дб) и адаптивный рекурсивный фильтр минимальной среднеквадратичной ошибки (абсолютная величина фильтрации – 45 Дб), относительно работы фильтра минимальной среднеквадратичной ошибки с фильтрацией опорного сигнала (абсолютная величина фильтрации – 27 Дб).

Библиографические ссылки

1. Akhtar M. T., Abe M., Kawamata M. (2004). Modified-filtered-x LMS algorithm based active noise control systems with improved online secondary-path modeling. Circuits and Systems. MWSCAS '04. The 2004 47th Midwest Symposium, 13–16. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/MWSCAS.2004.1353885> (дата обращения: 04.05.2015).
2. Alex Jos'e Veloso A. J. and Nascimento V. H. (2005). Proceedings of the Congress and Exposition on Noise Control Engineering: Environmental Noise Control. URL: www.lps.usp.br/vitor/artigos/internoise05.pdf (дата обращения: 04.05.2015).
3. Elamin F., Gu F., Ball A., (2010). Diesel Engine Injector Faults Detection Using Acoustic Emissions Technique. Modern Applied Science, 4(9). URL: <http://dx.doi.org/10.5539/mas.v4n9p3> (дата обращения: 04.05.2015).
4. Gaikwad P., Jain M., Yevle P. and Bhandari S. U., (2013). Active Noise Control Using Field Programmable Gate Arrays. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 2(2): 793–799. URL: www.ijareeie.com/upload/february/7-Active%20Noise%20Control.pdf (дата обращения: 07.05.2015). NE5532 Datasheet: Dual low-noise operational amplifiers, (2009). URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne5532.pdf> (дата обращения: 04.05.2015).

Zykov A. M., Master's degree student, Kalashnikov ISTU

Development, implementation and experimental detection of errors for algorithms of adaptive filtration in real time mode within systems of active noise control

The main issues of designing the algorithms for digital signal processing in systems of active noise cancellation are considered. The paper presents the main results of the design, implementation and analysis of performance and detection of errors of the developed digital filters for active noise control systems in real time mode. The work was performed as part of the grant RFBR No № 14-07-31100\14 (mol_a).

Keywords: digital signal processing, algorithms for adaptive signal filtering, active noise reduction.

Получено: 23.07.15