

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

УДК 004.934, 654.927

Ю. С. Квитка, А. К. Алимуратов, П. П. Чураков, А. В. Грачев

ПОДАВЛЕНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ЭХОСИГНАЛОВ МЕТОДОМ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕМЕНТАРНОЙ МНОЖЕСТВЕННОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ НА ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЫ

Yu. S. Kvitka, A. K. Alimuradov, P. P. Churakov, A. V. Grachev

SUPPRESSION ACOUSTIC ECHO METHOD OF ADAPTIVE FILTERING BASED ON COMPLEMENTARY MULTIPLE DECOMPOSITION ON EMPIRICAL FASHION

А н н о т а ц и я. Актуальность и цели. В условиях шумной обстановки на территории проведения спасательных работ при использовании акустических приборов поиска достаточно актуальным является вопрос фильтрации и подавления эхосигнала, ухудшающего разборчивость полезной информации и способствующего неправильному обнаружению. Целью работы является реализация субполосной фильтрации акустических сигналов на основе адаптивных методов обработки для использования в акустических приборах ведения поисковых работ. *Материалы и методы.* Для реализации субполосной адаптивной фильтрации использовался метод адаптивного разложения нестационарных сигналов – декомпозиция на эмпирические моды (ДЭМ) и ее модификация – комплементарная множественная ДЭМ (КМДЭМ). *Результаты.* На основе обзора способов адаптивной фильтрации и методов декомпозиции разработан алгоритм субполосной адаптивной фильтрации. Представлена блок-схема алгоритма с подробным математическим описанием этапов фильтрации. Проведено исследование алгоритма, реализованного на методах ДЭМ и КМДЭМ, представлен сравнительный анализ полученных результатов. *Выводы.* Алгоритм субполосной адаптивной фильтрации на основе КМДЭМ обеспечивает большее подавление эхосигналов и рекомендуется для практического использования в акустических приборах ведения поисковых работ.

A b s t r a c t. *Background.* Filtering and echo cancellation, deteriorating the intelligibility of useful information and promoting the wrong detection, remain quite relevant for acoustic search devices in a noisy environment. The aim is the realization of sub-band filtering of acoustic signals on the basis of adaptive processing techniques for the use in acoustic devices conducting search operations. *Materials and methods.* To implement sub-band adaptive filtering, a method for adaptive decomposition of non-stationary signals has been used, namely, the Empirical Mode Decomposition (EMD) and its modification – the Complementary Ensemble EMD (CEEMD). *Results.* A sub-band adaptive filtering algorithm has been developed on the basis of a review of adaptive filtering techniques and decomposition methods. A block diagram of the algorithm with a detailed mathematical description of the filtering stages is presented. An

analysis of the algorithm based on the EMD and the CEEMD methods is given, and a comparative analysis of the results is presented. *Conclusions.* The sub-band adaptive filtering algorithm based on the CEEMD provides a greater echo cancellation and is recommended for practical use in acoustic search devices.

К л ю ч е в ы е с л о в а: акустический эхосигнал, субполосная адаптивная фильтрация, декомпозиция на эмпирические моды, комплементарная множественная декомпозиция на эмпирические моды.

К е у w o r d s: acoustic echo, sub-band adaptive filtering, Empirical Mode Decomposition, Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition.

Введение

В настоящее время на оснащении поисково-спасательных формирований МЧС России находятся поисковые приборы четырех классов: акустические [1–3], оптические [2–3], тепловизионные [2–4] и радиолокационные [2, 3, 5, 6]. Рациональным решением задачи поиска в неоднородных средах является комплексное использование существующих средств, однако наиболее эффективными в первый час проведения поисковых работ являются акустические приборы, которые позволяют обнаружить под завалами находящегося в сознании человека [7].

Существующие приборы поиска мало приспособлены к работе в условиях интенсивных помех. Наиболее характерными помехами, оказывающими негативное воздействие на работоспособность акустических приборов, являются эхосигналы. Акустические эхосигналы ухудшают разборчивость полезного сигнала и могут привести к неправильному обнаружению. По этой причине важным является вопрос фильтрации и подавления эхосигнала в шумной обстановке на территории проведения поисковых работ.

Эффективная фильтрация возможна за счет разделения входного сигнала на несколько частотных полос – субполосной адаптивной фильтрации [8–14]. На сегодняшний день широкое применение на практике получили следующие виды адаптивных фильтров: полнополосная, оригинальная субполосная [8–11] и вейвлет-субполосная [12]. Однако справедливо отметить, что представленные способы не решают проблему подавления эхосигнала полностью. Фильтрация на основе вейвлет-преобразования удовлетворяет требованию подавления эхосигнала, но при этом необходима априорная информация о полезном и эхосигнале окружающей среды для подбора оптимальной функции материнского вейвлета. При полнополосной и оригинальной субполосной адаптивных фильтрациях из-за особенностей импульсной характеристики неизвестной неоднородной среды необходимо использовать фильтры с конечной импульсной характеристикой высокого порядка, что приводит к увеличению вычислительной сложности.

Для решения упомянутых выше проблем предлагается использовать субполосную адаптивную фильтрацию на основе декомпозиции на эмпирические моды [15]. Фильтрация на основе декомпозиции на эмпирические моды (ДЭМ) и ее модификаций получила широкое распространение в области подавления шума в ультразвуковом методе неразрушающего контроля [16], при определении источников аудиосигналов в одноканальных записях [17, 18], а также при улучшении распознавания речи при различных шумах окружающей среды [19–21].

В данной статье рассматривается вопрос реализации субполосной адаптивной фильтрации акустических сигналов на основе ДЭМ и ее модификации – комплементарной множественной ДЭМ (КМДЭМ) [22] для использования в акустических приборах ведения поисковых работ. Статья является развитием ранее опубликованных трудов авторов [23].

Понятие субполосной адаптивной фильтрации

На рис. 1 представлена структурная схема нормализованной субполосной адаптивной фильтрации (*Normalized Sub-band Adaptive Filter, NSAF*). В данной схеме опорный сигнал $x(n)$ и сигнал, прошедший через неизвестную среду $d(n)$, разделены на определенное количество субполос посредством банка фильтра анализа $H(z) = [H_0(z), H_1(z), \dots, H_{N-1}(z)]$. Из-за сво-

ей простоты в качестве алгоритма адаптивной фильтрации в субполосах используется нормализованный метод наименьших квадратов (*Normalised least meansquares filter, NLMS*). Весовые функции набора адаптивных фильтров каждой субполосы определяются по формулам [24]:

$$\omega(n+1) = \omega(k) + \mu \sum_{i=0}^{N-1} \frac{x_{i,D}(n)}{\varepsilon + x_{i,D}(m)^2} e_{i,D}(n), \quad (1)$$

$$e_{i,D}(n) = d_{i,D}(n) - y_{i,D}(n), \quad i = 0, 1, \dots, N-1, \quad (2)$$

где $x_{i,D}$ и $d_{i,D}(n)$ – опорные и входные сигналы субполосного адаптивного фильтра; $y_{i,D}$ – выходные сигналы субполосного адаптивного фильтра; μ – размер шага; N – число субполос; ε – параметр регуляризации, который близок к нулю; $e_{i,d}(n)$ – ошибка прореженной субполосы; n – индекс последовательностей дискретных отсчетов времени.

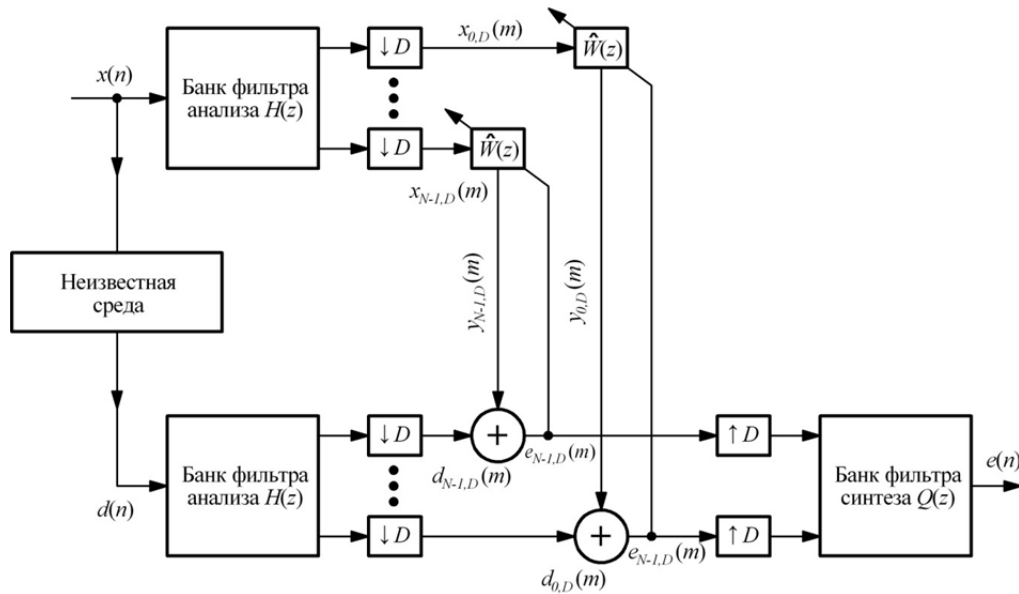


Рис. 1. Применение структуры нормализованного субполосного адаптивного фильтра

По завершении выходные сигналы после адаптивных фильтров объединяются с помощью набора фильтров синтеза $Q(z) = [Q_0(z), Q(z), \dots, Q_{N-1}(z)]$.

Декомпозиции на эмпирические моды

Использование ДЭМ предоставляет возможность без какой-либо априорной информации разложить сигнал на конечное число внутренних функций – эмпирические моды (ЭМ) [15]. Метод ДЭМ позволяет анализировать кратковременные локальные изменения в сигнале и поэтому получил широкое применение при обработке нестационарных сигналов, в том числе при фильтрации акустических сигналов. Особенностью ДЭМ является высокая адаптивность, проявляющаяся в том, что базисные функции, используемые при разложении, извлекаются непосредственно из исходного сигнала, что позволяет учитывать только ему свойственные особенности.

Аналитическое выражение ДЭМ имеет следующий вид:

$$x(t) = \sum_{i=1}^I IMF_i(t) + r_I(t), \quad (3)$$

где $x(t)$ – исходный сигнал; $IMF_i(t)$ – конечное число извлекаемых эмпирических мод (ЭМ); $r_I(t)$ – результирующий остаток; i – номер ЭМ; I – количество ЭМ.

Классическая ДЭМ имеет существенный для практического применения недостаток – смешивание ЭМ – возникающий вследствие нестационарности акустических сигналов.

Эффект смешивания ЭМ практически полностью исключен при использовании метода КМДЭМ. Особенность метода КМДЭМ заключается в многократном добавлении к исходному акустическому сигналу белого шума с прямыми и инверсными значениями амплитуды и вычислении среднего значения полученных мод как конечного истинного результата независимо от того, сколько сигналов белого шума использовалось:

$$\begin{bmatrix} x_j(t) \\ x_j(t)^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_j(t) \\ \omega_j(t) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$IMF_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^J IMF_{ij}(t)}{J}, \quad (5)$$

$$r_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^J r_{ji}(t)}{J}, \quad (6)$$

где $x_j(t)$ – зашумленный белым шумом акустический сигнал; $x_j(t)^*$ – зашумленный инверсным по знаку белым шумом акустический сигнал; $\omega(t)$ – белый шум, $IMF_{ji}(t)$; $r_{ji}(t)$ – ЭМ и результирующий остаток, полученные при различных декомпозициях; $j = 1, 2, \dots, J$ – количество циклов декомпозиций (добавлений к сигналу белого шума).

КМДЭМ в полной мере использует преимущество статистических характеристик белого шума, для обнаружения слабых периодических участков акустических сигналов с минимальным значением остаточного шума.

Субполосная адаптивная фильтрация на основе методов декомпозиции

На рис. 2 представлена блок-схема предложенного алгоритма субполосной адаптивной фильтрации на основе методов ДЭМ.

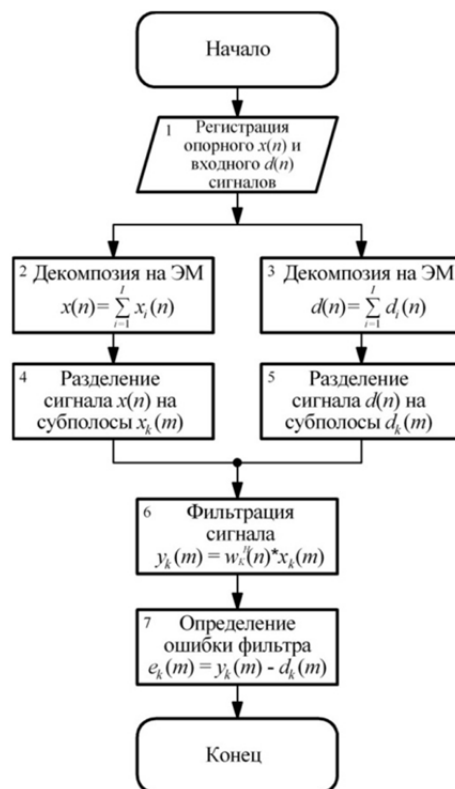


Рис. 2. Блок-схема алгоритма субполосной адаптивной фильтрации на основе методов ДЭМ

Исследуемые сигналы регистрируются со следующими параметрами: длительность записи – не более 300 мс, частота дискретизации 8000 Гц, разрядность квантования 16 бит. В предложенном алгоритме реализация адаптивной субполосной фильтрации осуществляется двумя методами декомпозиции: ДЭМ и КМДЭМ. Результатом декомпозиции опорного и входного сигналов является конечное число ЭМ $x_i(n)$ и $d_i(n)$ соответственно, где n – индекс дискретного отсчета времени, N – количество дискретных отсчетов в сигнале, $0 < n \leq N$.

Разделение сигналов на субполосы осуществляется с использованием спектральной плотности мощности (*The power spectral density, PSD*) – функции, описывающей мощность сигнала в частотной области:

$$PSD(x_i(n)) = \lim_{t \rightarrow \infty} E \left[|Ft(x_i(n))|^2 \right], \quad (7)$$

$$PSD(d_i(n)) = \lim_{t \rightarrow \infty} E \left[|Ft(d_i(n))|^2 \right], \quad (8)$$

где $Ft(x_i(n))$ и $Ft(d_i(n))$ – преобразование сигналов Фурье; $\lim_{t \rightarrow \infty} E[*]$ – операция усреднения

по ансамблю реализаций, $t = nT_s = \frac{n}{F_s}$ (T_s – период дискретизации, F_s – частота дискретизации).

Выделяются максимумы $PSD(x_i(n))$ и $PSD(d_i(n))$, обозначенные как $P_{x\max} = [p_{x1}, p_{x2}, \dots, p_{xI}]$ и $P_{d\max} = [p_{d1}, p_{d2}, \dots, p_{dI}]$. Частоты, соответствующие $P_{x\max}$ и $P_{d\max}$, переупорядочиваются в порядке убывания и группируются в субполосы $F(m) = [f_1(m), f_2(m), \dots, f_K(m)]$, при этом $k = 0 \dots K$ – порядковый номер субполосы, m – индекс дискретного отсчета времени, переупорядоченного в порядке убывания.

Субполосы опорного сигнала определены матрицей $X(m) = [x_1(m), x_2(m), \dots, x_K(m)]^T$, где верхний индекс T используется для обозначения транспонирования – процесса замены строк матрицы на столбцы. Каждый вектор матрицы представляет собой сигнал в соответствующей субполосе.

Сигнал апостериорной ошибки определяется по следующей формуле:

$$e(m) = d(m) - y(m) = d(m) - \omega_K^H(m) X(m), \quad (9)$$

где $\omega_K = [\omega_1(m), \omega_2(m), \dots, \omega_K(m)]$, а верхний индекс H используется для обозначения транспонирования и комплексного сопряжения.

Исследование алгоритма и анализ результатов

С целью определения эффективности проведено исследование алгоритма субполосной фильтрации, реализованного на основе методов ДЭМ и КМДЭМ. Исходные данные для исследования: речевой сигнал гласного звука [А] и акустический сигнал (стук по металлической перегородке) зарегистрированные в помещении (длина – 10 м, ширина – 10 м, высота – 3 м). Моделирование опорных и зарегистрированных акустических сигналов проведено в прикладном программном обеспечении MatLab 7.0.1.

На рис. 3–4 представлены осциллограммы зарегистрированных акустических сигналов.

В результате декомпозиции речевого сигнала методом классической ДЭМ получено семь ЭМ, методом КМДЭМ – восемь ЭМ. Аналогично при декомпозиции акустического сигнала стука по металлической перегородке получено шесть ЭМ и восемь ЭМ соответственно. Как известно, пропорционально количеству субполос увеличивается производительность алгоритма – количество выполняемых операций в секунду [25]. Отсюда следует, что субполосная адаптивная фильтрация на основе КМДЭМ имеет лучшую производительность.

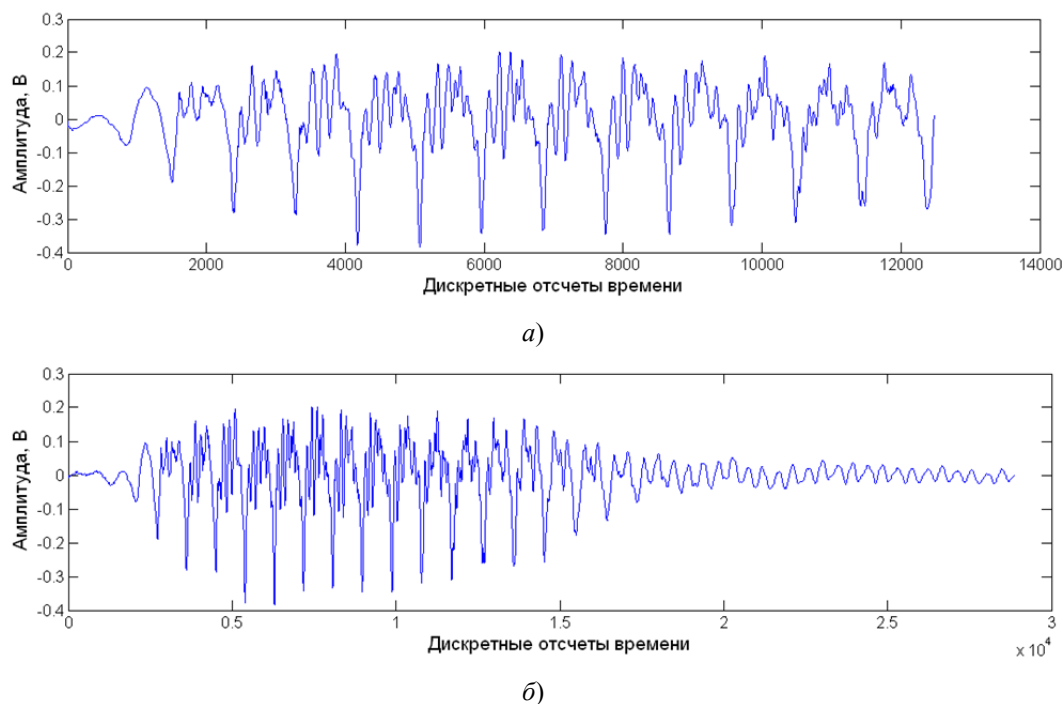


Рис. 3. Осциллограммы зарегистрированного речевого сигнала гласного звука [А]:
 а – речевой сигнал [А] без эхосоставляющей; б – речевой сигнал [А] с эхосоставляющей

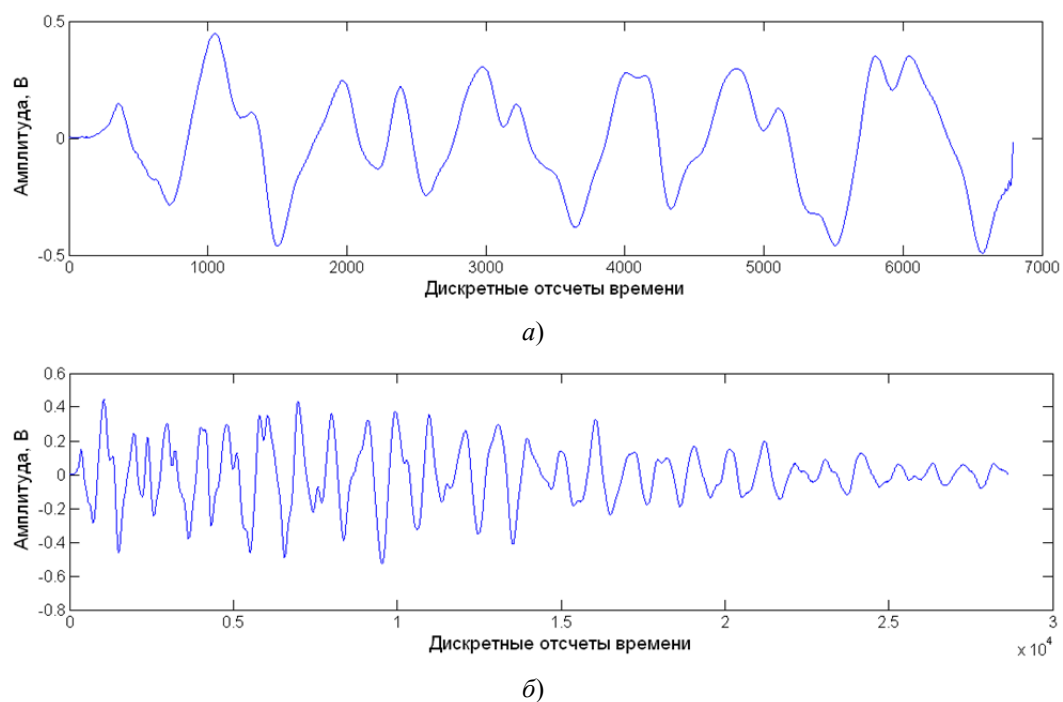


Рис. 4. Осциллограммы зарегистрированного акустического сигнала стука по металлической перегородке:
 а – акустический сигнал стука по металлической перегородке без эхосоставляющей;
 б) акустический сигнал стука по металлической перегородке с эхосоставляющей

В качестве критерия, определяющего глубину смешивания ЭМ, использовалось распределение спектральной плотности мощности по всем ЭМ. Для этого выделялись максимумы каждого значения $PSD(x_i(n))$ и $PSD(d_i(n))$, распределялись в порядке убывания и обозначались как $P_{x\max} = [p_{x1}, p_{x2}, \dots, p_{xM}]$ и $P_{d\max} = [p_{d1}, p_{d2}, \dots, p_{dM}]$, при этом $m = 0 \dots M$ – поряд-

ковый номер перераспределенной серии $P_{\max} = [p_{d1}, p_{d2}, \dots, p_{dM}]$, M – количество ЭМ и соответствует значению I .

На рис. 5–6 в порядке убывания представлены максимумы спектральной плотности мощности $P_{\max}$ ЭМ исследуемых сигналов, полученных в результате ДЭМ и КМДЭМ.

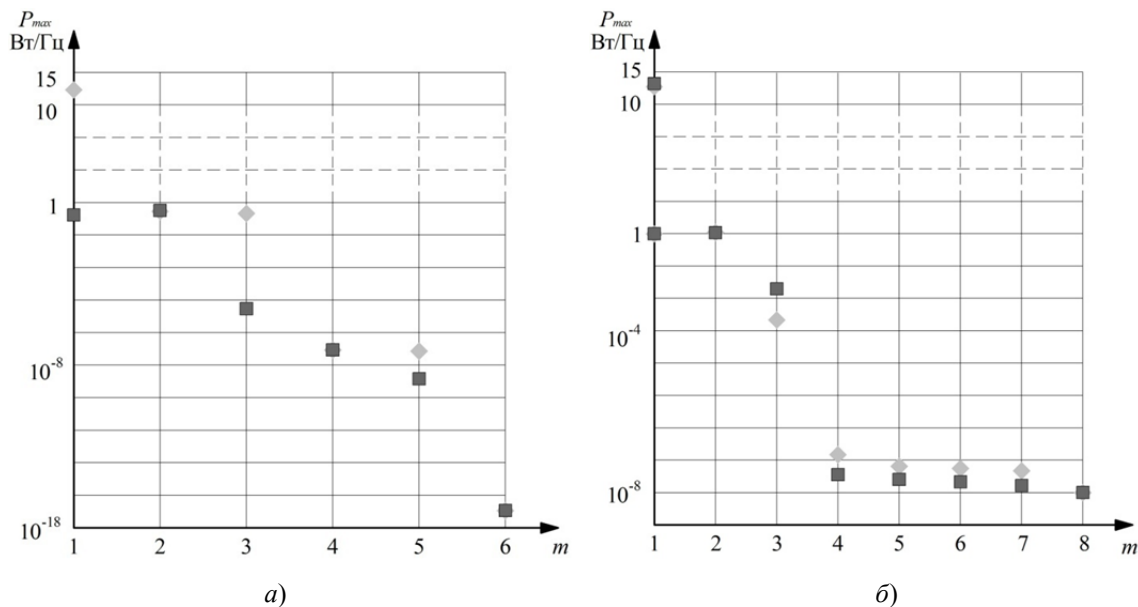


Рис. 5. Максимумы спектральной плотности мощности $P_{\max}$ ЭМ акустического стука: a – при фильтрации на основе ДЭМ; b – при фильтрации на основе КМДЭМ

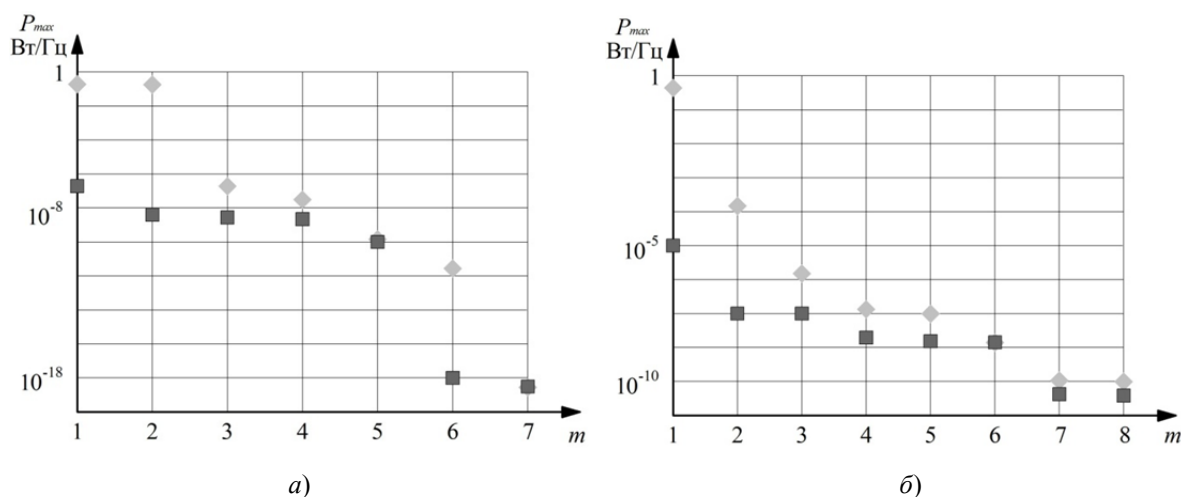


Рис. 6. Максимумы спектральной плотности мощности $P_{\max}$ ЭМ речевого сигнала: a – при фильтрации на основе ДЭМ; b – при фильтрации на основе КМДЭМ

На рис. 5, 6 ромбами ($\diamond$) отмечены значения опорного сигнала, квадратами ($\square$) – сигнала с экзосоставляющей.

Более равномерное распределение спектральной плотности мощности по всем ЭМ демонстрирует, что при субполосной адаптивной фильтрации на основе КМДЭМ смешивание ЭМ существенно меньше.

Набор изменяемых параметров адаптивного фильтра во многом зависит от критериев оценки эффективности его работы. Одним из таких критериев являются значения целевой функции фильтра. Достижение минимального значения целевой функции означает, что вы-

ходной сигнал адаптивного фильтра близок к требуемому сигналу, иными словами, повторяет его по форме [26]. На рис. 7 представлены значения целевой функции (ошибок фильтрации) $P_{e\max} = [P_{e1}, P_{e2}, \dots, P_{eM'}]$ для каждой остаточной ЭМ эхосигнала. Значения представлены в порядке возрастания, при этом $m' = 0 \dots M'$ – порядковый номер перераспределенной серии $P_{e\max}$; M' – количество ЭМ, которое соответствует значению I .

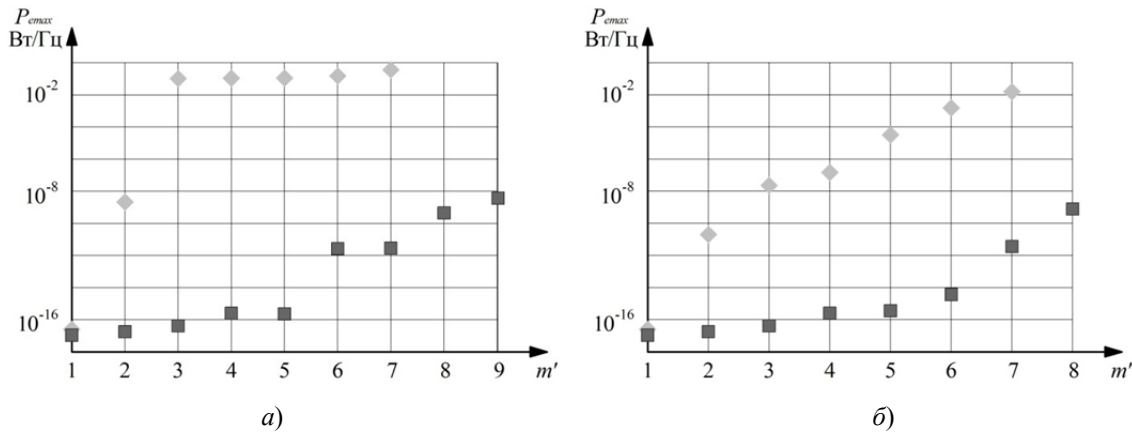


Рис. 7. Значения целевых функций $P_{e\max}$ ЭМ остаточного эхосигнала:

а – речевой сигнал; б – акустический стук

На рис. 7 ромбами ($\diamond$) и квадратами ($\square$) отмечены значения спектральной плотности мощности $P_{e\max}$, полученные при фильтрации на основе ДЭМ и КМДЭМ соответственно. Как видно из рис. 7, большее подавление эхосигнала достигается при фильтрации на основе КМДЭМ.

На рис. 8 представлена зависимость значения целевой функции $P_{e\max}$ ЭМ эхосигнала от количества итераций N процедуры отсеивания, в результате которой сигнал раскладывается на ЭМ, при фильтрации на основе КМДЭМ.

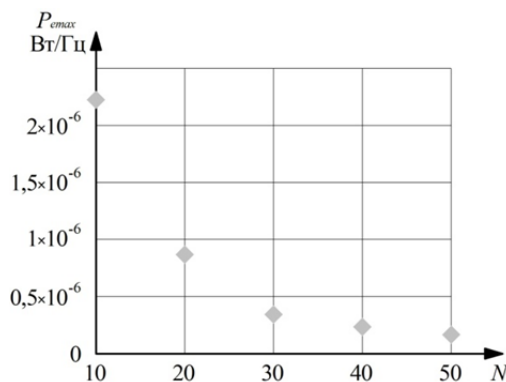


Рис. 8. Значения целевой функции $P_{e\max}$ ЭМ эхосигнала при разных значениях итераций N

Как видно из рис. 8, большее подавление эхосигнала достигается при количестве итераций ≥ 40 . Однако на практике стоит учитывать рост вычислительных и временных затрат при увеличении количества итераций.

Заключение

В статье рассмотрена проблема повышения эффективности фильтрации эхосигналов, оказывающих негативное воздействие на работоспособность акустических приборов в шумной обстановке на территории проведения поисковых работ. На основе метода адаптивного

разложения – декомпозиции на эмпирические моды – разработан алгоритм субполосной адаптивной фильтрации, позволяющий существенно повысить порог работоспособности акустических приборов в условиях интенсивных помех. Результаты исследования показали, что алгоритм на основе КМДЭМ обеспечивает большее подавление экосигналов и может найти практическое применение в акустических приборах ведения поисковых работ.

Список литературы

1. Антонов, А. В. Нелинейная радиочастотная идентификация: решения и перспективы / А. В. Антонов // The Way of Science. International scientific journal. – 2014. – № 9 (9) – С. 21–22.
2. Каторин, Ю. Ф. Защита информации техническими средствами : учеб. пособие / Ю. Ф. Каторин, А. В. Разумовский, А. И. Спивак. – СПб. : НИУ ИТМО, 2012 – 416 с.
3. Волков, В. Г. Тепловизионные приборы для спецтехники / В. Г. Волков // Спецтехника и связь. – 2011. – № 1. – С. 2–10.
4. Бугаев, А. С. Обнаружение и дистанционная диагностика состояния людей за препятствиями с помощью РЛС / А. С. Бугаев, И. А. Васильев, С. И. Ивашев // Радиотехника. – 2003. – № 7. – С. 42–47.
5. Техника и оборудование // Сайт Дальневосточного регионального центра МЧС России, 2015. – URL: <http://fareast.mchs.ru/folder/158743>
6. Гречушкин, Н. Н. Приоритеты оснащения сил МЧС России / Н. Н. Гречушкин // Сайт международного форума Технологии Безопасности, 2007. – URL: <http://www.secuteck.ru/articles2/firesec/priority-osnasheniya-sil-mchs-rossii>
7. Шойгу, С. К. Учебник спасателя / С. К. Шойгу, М. И. Фалеев, Г. Н. Кириллов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Краснодар : Советская Кубань, 2002. – 528 с.
8. Azpicueta-Ruiz, L. A. Novel schemes for nonlinear acoustic echo cancellation based on filter combinations / L. A. Azpicueta-Ruiz, M. Zeller, J. Arenas-Garcia, W. Kellermann // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2009, Apr. – P. 193–196.
9. Asif, I. M. Novel variable step size NLMS algorithms for echo cancellation / I. M. Asif, S. L. Grant // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2008, March-Apr. – P. 241–244.
10. Ohta, S. Acoustic echo cancellation using sub-adaptive filter / S. Ohta, Y. Kajikawa, Y. Nomura // International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications. – 2006, Dec. – P. 841–844.
11. Sugiyama, A. A robust NLMS algorithm with a novel noise modeling based on stationary/nonstationary noise decomposition / A. Sugiyama // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 2009, Apr. – P. 201–204.
12. Jin, Q. Optimum filter banks for signal decomposition and its application in adaptive echo cancellation / Q. Jin, Z. Q. Luo, K. M. Wong // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1996, Jul. – Vol. 44, № 7. – P. 1669–1680.
13. Topa, M. D. Digital adaptive echo-canceller for room acoustics improvement / M. D. Topa, I. Muresan, B. S. Kirei, I. Homana // Advances in Electrical and Computer Engineering. – 2010. – Vol. 10, № 1. – P. 50–53.
14. Burton, T. G. Nonlinear system identification using a subband adaptive Volterra filter / T. G. Burton, R. A. Goubran, F. Beaupre // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2009, May. – Vol. 58, № 5. – P. 1389–1397.
15. Huang, N. E. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis / N. E. Huang, S. Shen, Z. R. L. Steven // Proc. Roy. Soc. London A. – 1998. – Vol. 454. – P. 903–995.
16. Zhang, Q. Applying sub-band energy extraction to noise cancellation of ultrasonic NDT signal / Q. Zhang, P. W. Que, W. Liang // Journal of Zhejiang University. – 2008, Aug. – Vol. 9, № 8. – P. 1134–1140.
17. Taghia, J. One-channel audio source separation of convolutive mixture / J. Taghia // Advances in Computer and Information Science and Engineering. – 2008. – P. 202–206.
18. Mijovic, B. Source separation from single-channel recordings by combining empirical-mode decomposition and independent component analysis / B. Mijovic, M. D. Vos, I. Gligorijevic, J. Taelman, S. V. Huffel // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2010, Sep. – Vol. 57, № 9. – P. 2188–2196.
19. Chatlani, N. EMD-based filtering (EMDF) of low-frequency noise for speech enhancement / N. Chatlani, J. J. Soraghan // IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – 2012, May. – Vol. 20, № 4. – P. 1158–1166.
20. Алимуратов, А. К. Применение методов декомпозиции на эмпирические моды в задаче фильтрации речевых сигналов в условиях интенсивных помех / А. К. Алимуратов, П. П. Чураков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 1 (15). – С. 4–15.

21. Alimuradov, A. K. Noise-robust speech signals processing for the voice control system based on the complementary ensemble empirical mode decomposition / A. K. Alimuradov, P. P. Churakov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2015). – Omsk, Russia, 2015. – 6 p.
22. Yeh, J.-R. Complementary ensemble empirical mode decomposition: A novel noise enhanced data analysis method / J.-R. Yeh, J.-S. Shieh, N. E. Huang // Advances in Adaptive Data Analysis. – 2010, Apr. – Vol. 2, № 2. – P. 135–156.
23. Алимуратов А. К. Применение комплементарной множественной декомпозиции на эмпирические моды для анализа речевых сигналов / А. К. Алимуратов, Ю. С. Квитка // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2014. – № 4 (10). – С. 69–75.
24. Джиган, В. И. LMS-алгоритм адаптивной фильтрации сигналов: первый или единственный для использования на практике? / В. И. Джиган // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем / под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. – М. : Изд-во ИППМ РАН, 2014. – Ч. IV. – С. 159–166.
25. Gilloire, A. Experiments with sub-band acoustic echo cancellers for teleconferencing / A. Gilloire // Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP '87. – 1987, Apr. – Vol. 12. – P. 2141–2144.
26. Джиган, В. И. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В. И. Джиган – М. : Техносфера. – 2013. – 528 с.

Квитка Юрий Сергеевич

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alansapfir@yandex.ru

Kvitka Yury Sergeyevich

postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Алимуратов Алан Казанферович

кандидат технических наук, инженер-исследователь,
научно-исследовательский отдел,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alansapfir@yandex.ru

Alimuradov Alan Kazanferovich

candidate of technical sciences, engineer-researcher,
scientific research department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Чураков Петр Павлович

доктор технических наук, профессор,
кафедра информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: iit@pnzgu.ru

Churakov Petr Pavlovich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Грачев Андрей Владимирович

соискатель,
начальник отдела технических средств обучения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: andean@mail.ru

Grachev Andrey Vladimirovich

applicant,
head of technical means education department,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.934, 654.927

Квитка, Ю. С.

Подавление акустических эхосигналов методом адаптивной фильтрации на основе комплементарной множественной декомпозиции на эмпирические моды / Ю. С. Квитка, А. К. Алимуратов, П. П. Чураков, А. В. Грачев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2016. – № 3 (17). – С. 30–39.