

УДК 681.324

## Адаптивный алгоритм компенсации эхо-сигналов в телекоммуникационных системах аудиообмена

Кропотов Ю. А., Ермолаев В. А., Белов А. А.

**Постановка задачи:** В работе рассматривается рекуррентная адаптивная компенсация эхо-сигналов по конечному числу выборок в пределах скользящего окна данных. Рассматривается адаптивный алгоритм, построенный на основе ввода блока адаптивных фильтров. Каждый фильтр обеспечивает компенсацию эха только в своем диапазоне задержек, локализованных в окрестности задержки максимального значения автокорреляционной функции эха. Это позволяет реализацию такого алгоритма с применением корреляционно-экстремального метода оценивания параметров эхо-сигналов. Таким образом, в рассматриваемом алгоритме эхо-компенсации может быть применены адаптивные фильтры с уменьшенным числом отводов, что повышает устойчивость и скорость сходимости таких фильтров. **Используемые методы:** обобщенные методы параметрической оптимизации, метод адаптивной компенсации эхо-сигналов, методы наименьших квадратов и теории матриц. **Результат:** в работе показано, что рассмотренный алгоритм обеспечивает высокую скорость сходимости и высокую степень подавления эха при настроенном адаптивном фильтре в окрестности локализованной задержки.

**Ключевые слова:** телекоммуникационные системы, аудиообмен, алгоритмы компенсации, эхо-сигналы, многоканальный алгоритм.

### Введение

Потребность в компенсации эхо-сигналов возникает при построении систем телекоммуникаций аудиообмена, систем громкоговорящей связи [1]. Сложность решения этой задачи во многом обусловливается большими задержками в каналах распространения эха, которые для указанных систем могут достигать величины порядка пятисот миллисекунд и более [2, 3, 4]. В этих условиях фильтр с конечной импульсной характеристикой, входящий в состав компенсатора, должен иметь порядок равный нескольким тысячам, что существенно снижает скорость настройки [2, 3]. Решить эту проблему можно, если ввести блок адаптивных фильтров, каждый из которых обеспечивает компенсацию только в своем диапазоне задержек, локализованных в окрестности некоторых значимых значений. В этом случае порядок фильтров заметно уменьшается, а если число каналов эха находится в пределах от трех до пяти, то и по суммарному числу настраиваемых коэффициентов имеет место заметный выигрыш.

Целью настоящей работы является рассмотрение характеристик алгоритма компенсации эха, основанного на временной селекции и методе наименьших квадратов. При этом параметры каналов эхо-сигналов, их значимые значения задержек и затуханий принимаются известными из результатов его корреляционного анализа. Известным принимается и опорный сигнал – сигнал источника эха.

## Структурная схема

### адаптивного алгоритма компенсации эхо-сигналов

Схема адаптивного фильтра компенсации в одном из каналов эха приведена на рис. 1. На этом рисунке переменная  $\hat{D}_k$  обозначает оценку задержки в  $k$ -канале эха,  $\hat{a}_k$  – нормирующий множитель (оценка затухания в указанном канале) и  $L$  – порядок фильтра. При этом сигнал на входе компенсатора помехи  $u(n)$  представляет собой задержанный на величину  $(\hat{D}_k - L/2)$  опорный сигнал  $u_g(n)$ , то есть  $u(n) = \hat{a}_k u_g(n - \hat{D}_k + L/2)$ .

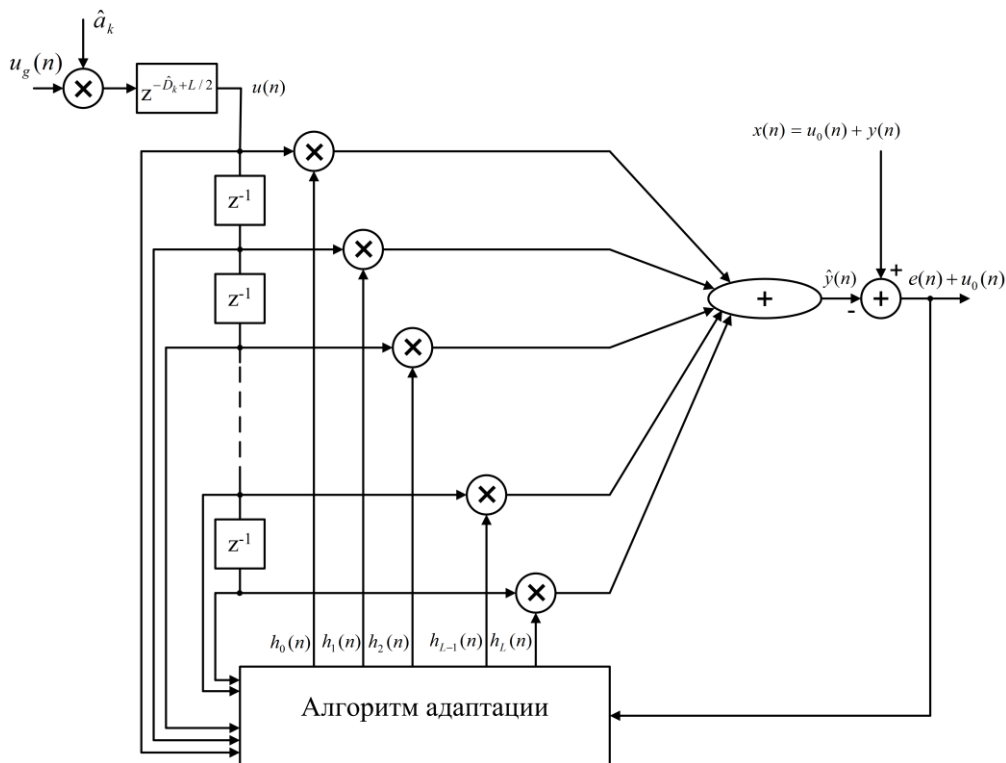


Рис. 1. Схема адаптивной компенсации в одном канале эха

Эхо-сигнал на микрофонном входе имеет при этом вид

$$x(n) = u_0(n) + y(n),$$

где, в целях упрощения, к полезному информационному сигналу  $u_0(n)$  отнесены составляющие эха из каналов с другими значениями задержки, а  $y(n)$  обозначает только компенсируемую составляющую, которую можно представить в виде [1]

$$y(n) = a_k u_g(n - D_k).$$

Здесь  $D_k$  и  $a_k$  – соответственно задержка и затухание в  $k$ -канале эха.

Оценка этой составляющей, формируемой устройством адаптации, представлена на рис. 1 символом  $\hat{y}(n)$ , где  $\hat{y}(n) = a_k u_g(n - D_k) * h_k(n)$ ,  $h_k(n)$  – импульсная функция канала.

Ошибка оценивания

$$e(n) = y(n) - \hat{y}(n).$$

Выходной сигнал схемы сравнения  $x(n) - \hat{y}(n)$ , усредненный по множеству реализацией, равняется

$$E(x(n) - \hat{y}(n))^2 = E(u_0(n) + y(n) - \hat{y}(n))^2. \quad (1)$$

Здесь  $E$  – символ математического ожидания.

Если учесть, что  $u_0(n)$  и  $y(n) - \hat{y}(n)$  являются некоррелированными, то выражение (1) можно представить в виде

$$E(u_0(n) + y(n) - \hat{y}(n))^2 = E(u_0^2) + E(y(n) - \hat{y}(n))^2,$$

откуда следует, что минимальное значения ошибки  $e(n)$  достигается при условии

$$y(n) \approx \hat{y}(n).$$

Сигнал на выходе адаптивного фильтра может быть представлен в виде

$$\hat{y}(n) = \sum_{l=0}^L u(n+l)h_l(n) = \mathbf{u}^T(n)\mathbf{h}(n),$$

где  $\mathbf{h}(n) = \begin{pmatrix} h_0(n) \\ h_1(n) \\ \vdots \\ h_L(n) \end{pmatrix}$  и  $\mathbf{u}(n) = \begin{pmatrix} u(n) \\ u(n-1) \\ \vdots \\ u(n-L) \end{pmatrix}$  – векторы коэффициентов адаптивного фильтра

и выборок опорного сигнала  $u(n)$ , соответственно.

Ошибку обучения можно записать в виде

$$e(n) = x(n) - \mathbf{h}^T(n)\mathbf{u}(n).$$

Следует отметить, что градиент этой ошибки по вектору коэффициентов равен

$$\nabla_{\mathbf{h}} e(n) = -\mathbf{u}(n).$$

В рамках метода наименьших квадратов настройка коэффициентов адаптивного фильтра осуществляется из условия минимума функции потерь

$$\begin{aligned} Q(n) &= \frac{1}{M+1} \sum_{l=0}^M \lambda^{2l} e^2(n-l) = \frac{1}{M+1} \sum_{l=0}^M (\lambda^l x(n-l) - \lambda^l \mathbf{h}^T(n)\mathbf{u}(n-l))^2 = \\ &= \frac{1}{M+1} (\mathbf{x}(n) - \mathbf{U}^T(n)\mathbf{h}(n))^T (\mathbf{x}(n) - \mathbf{U}^T(n)\mathbf{h}(n)), \end{aligned} \quad (2)$$

где параметр  $\lambda$  берется из интервала  $0 < \lambda \leq 1$ , вектор  $\mathbf{x}(n) = \begin{pmatrix} \lambda^0 x(n) \\ \lambda^1 x(n-1) \\ \vdots \\ \lambda^M x(n-M) \end{pmatrix}$ , а

матрица  $\mathbf{U}(n) = (\lambda^0 \mathbf{u}(n) \quad \lambda^1 \mathbf{u}(n-1) \quad \dots \quad \lambda^M \mathbf{u}(n-M))$ .

В этих обозначениях минимизация функции потерь (2) приводит к решению, имеющему вид

$$\hat{\mathbf{h}}(n) = (\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n))^{-1} \mathbf{U}(n)\mathbf{x}(n). \quad (3)$$

Уравнение (3) при значениях  $M=L$  и  $\lambda=1$  – это уравнение фильтра Винера, определяющее стационарное решение, которое используется при оценке эффективности адаптивных фильтров [1].

Алгоритм адаптации, основанный на функции потерь (2), можно получить, если воспользоваться методом Ньютона [3].

Учитывая, что градиент функции (2) равен  $\nabla_{\mathbf{h}} Q(n) = \frac{-2}{M+1} \mathbf{U}(n)(\mathbf{x}(n) - \mathbf{U}^T(n)\mathbf{h}(n))$ , а матрица Гессе –  $H_Q(n) = \frac{2}{M+1} \mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n)$ , то искомое уравнение можно записать в виде

$$\mathbf{h}(n+1) = \mathbf{h}(n) + \alpha (\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n))^{-1} \mathbf{U}(n)\mathbf{e}(n). \quad (4)$$

Здесь коэффициент  $\alpha$  выбирается из интервала (0,1], а вектор ошибок задается выражением

$$\mathbf{e}(n) = \mathbf{x}(n) - \mathbf{U}^T(n)\mathbf{h}(n).$$

Следует отметить, что матрица произведения  $\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n)$  размерности  $(L+1) \times (L+1)$  является матрицей Грама. Ее компонентами являются скалярные произведения строк матрицы  $\mathbf{U}(n)$ , размерностью  $M+1$ . Это означает, что при значении  $M < L$  матрица  $\mathbf{U}(n)\mathbf{U}^T(n)$  является вырожденной, что исключает возможность применения уравнения (4). В дальнейшем принимается, что  $M \geq L$ .

При моделировании эхо-сигнал был представлен суммой трех задержанных копий опорного речевого сигнала с задержками в каналах распространения 120, 240 и 360 мс и коэффициентами затухания 0,7, 0,5 и 0,3, соответственно.

Приведенные ниже результаты получены с применением трех адаптивных фильтров 128 порядка. При этом в качестве ошибки при их обучении использовалась суммарная ошибка, заданная выражением

$$e(n) = x(n) - \sum_{k=1}^r \mathbf{h}_k^T(n) \mathbf{u}_k(n),$$

где суммирование осуществляется по коэффициентам всех  $r$  адаптивных фильтров (в данном случае  $r = 3$ ).

### Результаты моделирования работы алгоритма адаптивной компенсации

Моделирование осуществлялось как по формуле (4), так и по ее модификации, полученной из функции потерь

$$Q(n) = \frac{1}{M+1} \sum_{l=0}^M \lambda^{2l} e^2(n-l).$$

Результаты настройки коэффициентов фильтров представлены обучающей кривой, приведенной на рис. 2 для размера вектора ошибок  $M = 200$ . На рис. 2 приведена зависимость отношения ошибки компенсации эха [5] к его максимальному значению на интервале обучения от номера итерации (номера выборки). На рис. 3 и 4 показаны исходный речевой сигнал на фоне эха и восстановленный речевой сигнал.

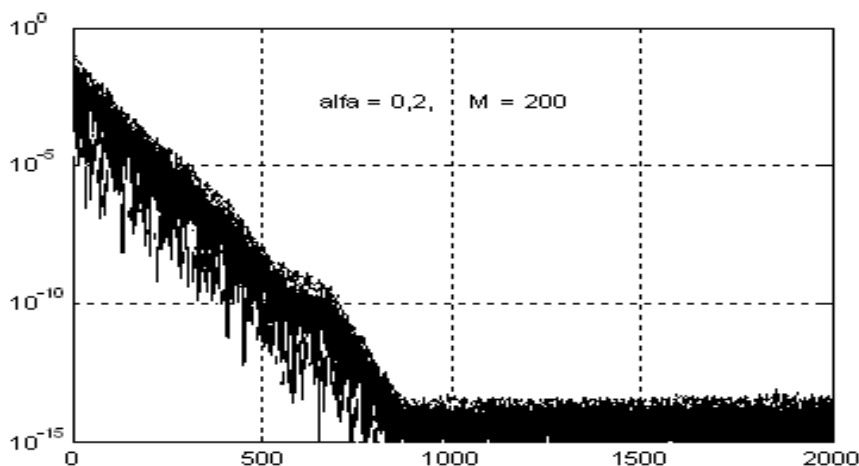


Рис. 2. Кривая настройки коэффициентов фильтров

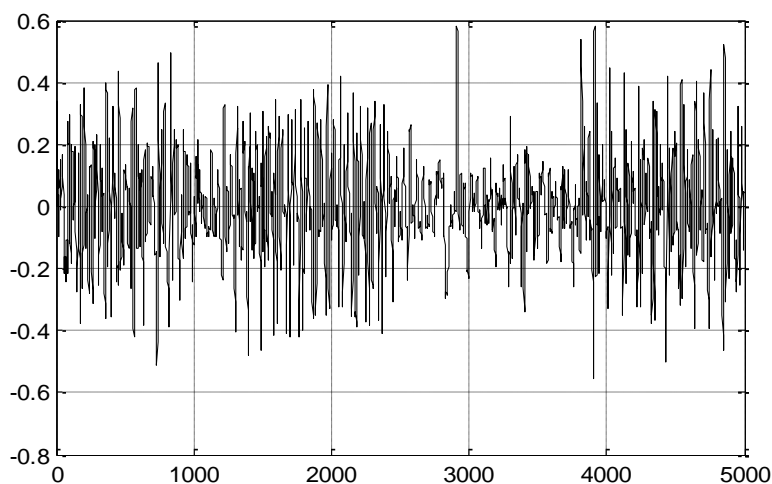


Рис. 3. Фрагмент исходного сигнала на фоне эха

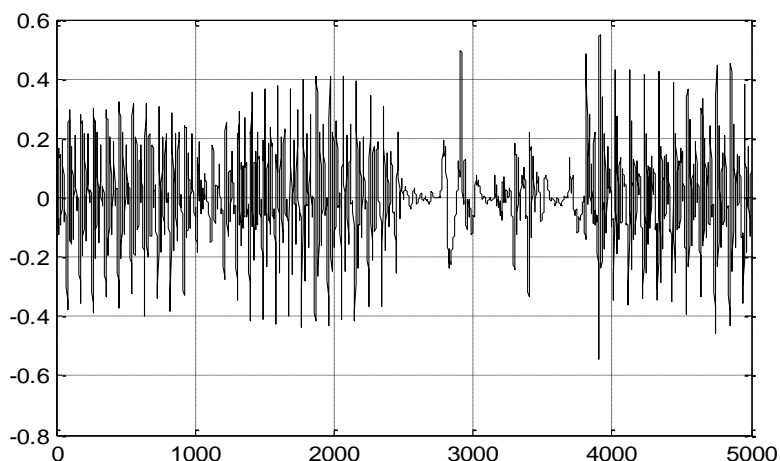


Рис. 4. Фрагмент восстановленного сигнала после компенсации эха

### Выводы

Моделирование адаптивного алгоритма компенсации эха с учетом значимых каналов задержки показало его высокую скорость сходимости. Также моделирование показало, что по уровню компенсации и скорости настройки

Этот алгоритм имеет лучшие характеристики, чем, например, градиентный алгоритм наискорейшего спуска [3, 6, 7].

### Литература

1. Ермолаев В. А., Кропотов Ю. А. О корреляционном оценивании параметров моделей акустических эхо-сигналов // Вопросы радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 46-50.
2. Widrow B. and Stearns S. D. *Adaptive Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1985. 440 p.
3. Breining C. and et al. Acoustic echo control: An application of very-high-order adaptive filters. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1999. No.7. pp. 42 – 69.
4. Cohen I., Benesty J., Cannon S. *Speech processing in modern communication*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. - 342 p.
5. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Алгоритм подавления акустических шумов и сосредоточенных помех с формантным распределением полос режекции // Вопросы радиоэлектроники. 2010. Т. 1. №1. С. 60-65.
6. Кропотов Ю. А., Быков А. А. Аппроксимация закона распределения вероятности отсчетов сигналов акустических помех // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2011. № 2. С. 61-63.
7. Кропотов Ю. А. Временной интервал определения закона распределения вероятности амплитуд речевого сигнала // Радиотехника. 2006. № 6. С. 97-98.

### References

1. Ermolaev V. A., Kropotov Y. A. On the correlation estimation of parameters of models of acoustic echo-signals. *Voprosy radiojelektroniki*, 2010, no. 1, pp. 46-50 (In Russian).
2. Widrow B. and Stearns S. D. *Adaptive Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1985. – 440 p.
3. Breining C. and et al. Acoustic echo control: An application of very-high-order adaptive filters. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1999, no. 7, pp. 42–69.
4. Cohen I., Benesty J., Cannon S. *Speech processing in modern communication*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. – 342 p.
5. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Algoritm podavleniya akusticheskikh shumov i sosredotochennyih pomех s formantnyim raspredeleniem polos rezhektsii [Algorithm of suppression of acoustic noise and the concentrated hindrances with formant band distribution rejection]. *Questions of radio-electronics*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 60-65 (In Russian).
6. Kropotov Y. A., Bykov A. A. Approksimatsiya zakona raspredeleniya veroyatnosti otschetov signalov akusticheskikh pomех [Approximation of the distribution law of probability of countings of signals of acoustic noise interferences].

*Radio and telecommunication systems*, 2011, no. 2, pp. 61-63 (In Russian).

7. Kropotov Y. A., Vremennoy interval opredeleniya zakona raspredeleniya veroyatnosti amplitud rechevogo signala [The time interval of a definition the regularity distribution probability amplitudes of speech signals]. *Radiotekhnika*, 2006, no. 6, pp. 97-98 (In Russian).

Статья поступила 5 ноября 2015 г.

### Информация об авторах

*Юрий Анатольевич Кропотов* – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Электроники и вычислительной техники» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные информационно-управляющие системы. Тел.: +7(49234)77272. E-mail:kaf-eivt@yandex.ru

*Валерий Андреевич Ермолаев* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». Область научных интересов: алгоритмы обработки и передачи акустических сигналов. Тел.: +7(49234)77272. E-mail:kaf-eivt@yandex.ru

*Алексей Анатольевич Белов* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электроники и вычислительной техники» Муромского института (филиала) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». Область научных интересов: телекоммуникационные системы мониторинга и прогнозирования, обработка информации. Тел.: +7(49234)77272. E-mail:kaf-eivt@yandex.ru

Адрес: Россия, 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

---

## Adaptive Algorithm for Echo Compensation in Telecommunications Audio Exchange Systems

Y. A. Kropotov, V. A. Ermolaev, A. A. Belov

**Purpose.** *The paper deals with a recurrent adaptive echo cancellation for a finite number of samples within a sliding window of data. We consider an adaptive algorithm, built on the basis of the input block adaptive filters. Each filter provides compensation for the echo only in the range of delays, localized in the neighborhood of the maximum delay of the autocorrelation function of the echo. This allows the implementation of such an algorithm with using correlation-extreme method of estimating the parameters of the echo signals. Thus, in this algorithm, echo cancellation can be adaptive filters are applied with a*

reduced number of taps that increases the stability and rate of convergence of such filters. **Methods.** Generalized parametric optimization methods, the method of adaptive echo cancellation, methods of least squares and matrix theory. **Results.** This work shown that the above algorithm provides high speed and a high degree of convergence of the echo canceller in the adaptive filter configured in the vicinity of a localized delay.

*Key words:* telecommunications systems, audio exchange algorithms compensation echoes multichannel algorithm.

### Information about Authors

*Yurij Anatolievich Kropotov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Head of Chair «Electronics and Computer Science». Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: telecommunication information and control systems. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

*Valery Andreevich Ermolaev* – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of «Electronics and Computer Science». Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: algorithms for processing and transmission of acoustic signals. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

*Alexey Anatolievich Belov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of «Electronics and Computer Science». Murom institute (branch) of the «Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs». Field of research: telecommunications monitoring and forecasting system, information processing. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Address: Russia, 602264, Murom, Orlovskaya st., 23.