

УДК 621.395

Е.П. Кузнецов

МНОГОСКОРОСТНОЙ АДАПТИВНЫЙ ЭХО-КОМПЕНСАТОР С КОМБИНИРОВАННЫМ АЛГОРИТМОМ АДАПТАЦИИ

Рассмотрены особенности использования банков фильтров (БФ) с не-максимальной децимацией (БФ_{НМ}) и неравномерным разбиением на каналы в схеме многоскоростного адаптивного эхо-компенсатора (МАЭК). Предложен новый метод реализации МАЭК с применением комбинированного алгоритма адаптации, позволяющего снизить вычислительные затраты без потери эффективности функционирования.

Введение. Решение задачи идентификации динамической системы, имеющей протяженную импульсную характеристику (ИХ), в классе КИХ-цепей сопряжено с построением адаптивного цифрового фильтра (АЦФ) довольно большого порядка. Практическим примером подобной задачи является задача акустической эхо-компенсации, возникающая в таких технических приложениях, как проводная и беспроводная телефония, высокоскоростная передача данных и системы телеконференций. В этом случае ИХ идентифицируемой системы (эхо-тракта) имеет длительность 50÷200 мс, и для качественной работы адаптивного эхо-компенсатора (ЭК) требуется реализация АЦФ, имеющего порядок 400÷1600 (при условии, что система работает на частоте дискретизации 8 кГц). Очевидно, что это не приемлемо для применения на практике и требует поиска альтернативных решений.

Эффективным подходом к решению задачи адаптивной эхо-компенсации при протяженной ИХ эхо-тракта является совместное использование двух подходов: многоскоростной обработки сигналов и субполосной адаптивной фильтрации, что позволяет добиться снижения вычислительных затрат. Работа МАЭК предусматривает в своей структуре следующие операции: разбиение спектров входного и обучающего сигналов на субполосы и децимацию исходной частоты дискретизации (ЧД) с помощью двух БФ анализа, адаптивную фильтрацию в каждой субполосе на пониженной ЧД с использованием определенного алгоритма адаптации, интерполяцию ЧД и, наконец, восстановление субполосных составляющих с помощью БФ синтеза с последующим объединением субполосных каналов. При этом возникает вопрос о выборе БФ, наи-

лучшим образом подходящего для решения рассматриваемой задачи.

Поскольку вопросы использования БФ с максимальной децимацией (БФ_М) в задаче акустической эхо-компенсации подробно рассмотрены в работе [3], в данной статье рассматриваются БФ_{НМ} с неравномерным разбиением на каналы. Такие БФ, реализуемые на основе метода, изложенного в [4], хорошо подходят для использования в данной задаче, поскольку характеризуются малым перекрытием соседних субполосных каналов (элайзингом), сравнительной простотой расчета и гибкостью реализации различных форм субполосного разбиения. Целью настоящей работы является исследование особенностей БФ_{НМ} с неравномерным разбиением на субполосы для построения МАЭК, а также демонстрация эффективности использования нового подхода на базе комбинированного алгоритма адаптации.

Экспериментальные исследования. При использовании БФ_{НМ} с неравномерным разбиением на каналы возникает вопрос о выборе конкретного способа разбиения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) анализируемого эхо-тракта на субполосы, дающего наилучший эффект по качеству подавления. При рассмотрении задачи акустической эхо-компенсации предполагают, что входным для МАЭК является речевой сигнал. Особенностью этого сигнала является то, что его основная энергия сосредоточена в области низких частот, а остальная, меньшая ее часть – в некоторых областях частот, называемых формантными.

Таким образом, для достижения высокого уровня подавления эхо-сигнала нужно, чтобы первый канал МАЭК охватывал область до 0,3 – 0,4 по шкале нормализованных частот $f_H = 2f / f_{KB}$, где f_{KB} – частота дискретизации. Требования к остальным каналам являются

варьируемыми, но следует понимать, что выбор коэффициента децимации i -го субполосного канала M_i будет влиять на вычислительные затраты и, как следствие, на эффективность работы МАЭК в целом.

Проверим высказанные предположения на практике. Для экспериментов возьмем шестиканальные БФ_{НМ}, которые различным образом осуществляют субполосное разбиение: 6-БФ_{НМ}^{НЧ} детализирует область низких частот, 6-БФ_{НМ}^{СЧ} – область средних и 6-БФ_{НМ}^{ВЧ} детализирует область высоких частот. При этом вычислительные затраты на реализацию каждого из анализируемых БФ_{НМ} одинаковы. В качестве акустического эхо-тракта используем типовую модель с ИХ протяженностью $N = 512$ отсчетов, рассчитывающуюся по методике, изложенной в [5]. В качестве алгоритма адаптации канальных АЦФ будем использовать рекурсивный метод наименьших квадратов с преобразованием Хаусхолдера (Х-РНК), описанный в таблице 1.

Таблица 1 – Алгоритм Х-РНК

Инициализация:	
$\mathbf{w}(-1) = \mathbf{0}$,	$A^{-T}(-1) = \frac{1}{\delta \cdot \lambda^N} \cdot \text{diag}[1, \lambda, \dots, \lambda^{N-1}]$
$\delta > 0$	
Вычисления:	
$\mathbf{k}(n) = \lambda^{-1/2} \cdot \mathbf{A}^{-T}(n-1) \cdot \mathbf{x}(n)$	
$\alpha(n) = \sqrt{1 + \mathbf{k}^T(n) \cdot \mathbf{k}(n)}$	
$\beta(n) = \frac{1}{\alpha(n) \cdot (1 + \alpha(n))}$	
$\tilde{\mathbf{h}}(n) = \mathbf{A}^{-1}(n-1) \cdot \mathbf{k}(n)$	
$\hat{\mathbf{h}}(n) = \lambda^{-1/2} \cdot \beta(n) \cdot \tilde{\mathbf{h}}(n)$	
$\mathbf{A}^{-T}(n) = \lambda^{-1/2} \cdot \mathbf{A}^{-T}(n-1) - \mathbf{k}(n) \cdot \hat{\mathbf{h}}^T(n)$	
$e(n) = y(n) - \mathbf{x}^T(n) \cdot \mathbf{w}(n-1)$	
$\mathbf{w}(n) = \mathbf{w}(n-1) + \frac{e(n)}{\lambda^{1/2} \cdot \alpha^2(n)} \cdot \tilde{\mathbf{h}}(n)$	
$\mathbf{x}(n)$ – вектор отсчетов входного сигнала	
$y(n)$ – обучающий сигнал	
$e(n)$ – ошибка обучения	
$\mathbf{w}(n)$ – вектор коэффициентов АЦФ порядка N	
λ – коэффициент забывания	

Порядок канального АЦФ выбирается с учетом значения M_i , т.е. $N_{SB_i} = N/M_i$. При этом исследуется зависимость относительного уровня подавления эхо-сигнала ERLE (Echo Return Loss Enhancement) = $10 \cdot \lg[\varepsilon(y^2(n))/\varepsilon(e^2(n))]$ от способа разбиения на субполосы (типа используе-

мого БФ_{НМ}). В данном выражении $\varepsilon(*)$ означает оператор математического ожидания.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что наибольшее подавление получается при использовании 6-БФ_{НМ}^{ВЧ}, логарифмическая АЧХ (ЛАЧХ) которого изображена на рисунке 1, а средний уровень ERLE приведен в таблице 2. Это доказывает выдвинутое выше предположение о способе субполосного разбиения при построении МАЭК на основе БФ_{НМ} с неравномерным разбиением на K_i :

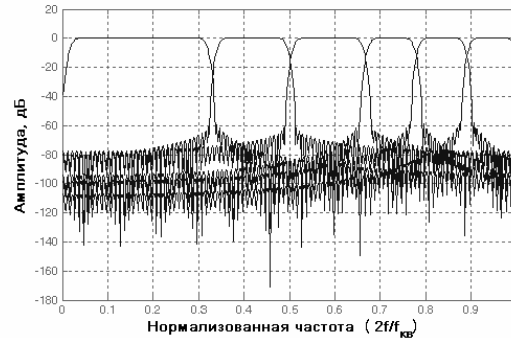


Рисунок 1 – ЛАЧХ 6-БФ_{НМ}^{ВЧ}

Таблица 2 – Результаты экспериментов

Тип БФ _{НМ}	Средний уровень ERLE, дБ
6-БФ _{НМ} ^{НЧ}	31,13
6-БФ _{НМ} ^{СЧ}	26,33
6-БФ _{НМ} ^{ВЧ}	47,54

Рассмотрим, каким образом можно добиться эффективной реализации МАЭК на основе БФ_{НМ} с предложенным выше способом разбиения на субполосы.

Применение алгоритмов адаптации с вычислительной сложностью $O(N^2)$ дает высокие показатели по скорости и точности настройки, однако требует значительного объема производимых вычислений. Использование аппарата БФ предоставляет возможность снизить вычислительные затраты без значительных потерь в качестве работы МАЭ. Новый подход основывается на работе [6], где были рассмотрены преимущества использования комбинированного алгоритма адаптации для решения проблемы декорреляции левого и правого каналов в задаче стереофонической эхо-компенсации. При этом в работе [6] не анализировалась возможность применения БФ_{НМ} с неравномерным разбиением на субполосы и не проводились исследования, касающиеся выбора конкретного способа субполосного разбиения, позволяющего достичь высокого уровня подавления эхо-сигнала для БФ_{НМ} с одинаковой сложностью.

Предлагаемый подход состоит в том, чтобы использовать быстрый и точный алгоритм (как, например, X-РНК) в рамках первого субполосного канала, что обеспечит качественное подавление составляющих эхо-сигнала, имеющих наибольшую энергию, а в остальных каналах использовать более «легкий» в вычислительном плане алгоритм, например, метод наименьших квадратов с нормализацией по мощности (НМ-МНК), обрабатывающий подавление компонент в остальных субполосных каналах. Эффект от применения комбинированного алгоритма адаптации в

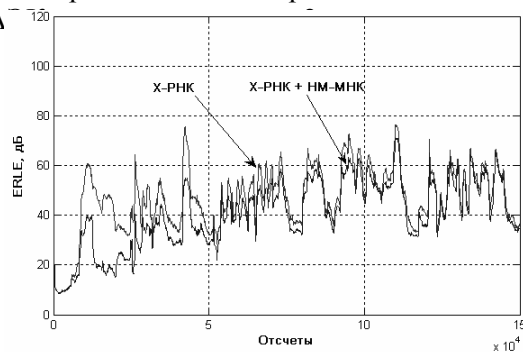


Рисунок 2 – Результаты работы МАЭК на базе 6-БФ_{НМ}^{ВЧ} и комбинированного алгоритма адаптации X-РНК + НМ-МНК

Из анализа рисунка 2 следует, что предложенный подход почти не уступает в достигаемой точности настройке случаю, когда во всех субполосных каналах используется алгоритм X-РНК. Для случая X-РНК средний уровень ERLE составляет 47,54 дБ (см. таблицу 2), а для X-РНК + НМ-МНК – 40,37 дБ. То есть разница в уровне подавления составляет примерно 7 дБ, и при этом достигается уровень подавления 40 дБ, важным показателем эффективности работы МАЭК являются вычислительные затраты. Вычислительные затраты на реализацию МАЭК на основе алгоритма X-РНК рассчитываются по формуле [1]:

$$3 \cdot N_{\pi} \cdot k + \sum_{i=0}^{L-1} 7 \cdot \left(N_{SB_i} / M_i \right)^2 + 3 \cdot \left(N_{SB_i} / M_i \right),$$

где N_{π} и k – порядок и число фильтров-прототипов, на базе которых строится БФ_{НМ}, а L – число субполосных каналов. Для используемого 6-БФ_{НМ}^{ВЧ} они составляют $1,0692 \times 10^6$ операций умножений с накоплением. Затраты на реализацию МАЭК на основе НМ-МНК вычисляются по следующей формуле [1]:

$3 \cdot N_{\pi} \cdot k + \sum_{i=0}^{L-1} 2 \cdot \left(N_{SB_i} / M_i \right) + 2$. С учетом этого расчетное значение вычислительных затрат для

комбинированного алгоритма X-РНК + НМ-МНК равно $6,3489 \times 10^5$ операций умножений с накоплением. Таким образом, достигается экономия вычислительных затрат, равная приблизительно 40 %. Разработанный метод с использованием комбинированного алгоритма адаптации также может быть экстраполирован и на другие сочетания различных алгоритмов адаптации.

Заключение. Применение БФ_{НМ} с неравномерным разбиением на субполосы для реализации МАЭК открывает новые возможности для достижения высоких показателей эффективности. Эксперименты показали, что для получения высокого уровня подавления акустического эхо-сигнала нужно, чтобы первый канал МАЭК на основе БФ_{НМ} охватывал область до 0,3 – 0,4 в нормализованной частоте. На основе данного способа разбиения на субполосы был предложен комбинированный алгоритм адаптации X-РНК + НМ-МНК, который позволяет снизить вычислительные затраты на реализацию МАЭК без существенного снижения качества его работы. Предложенный метод с использованием комбинированного алгоритма адаптации также может быть экстраполирован и на другие сочетания алгоритмов адаптации.

Библиографический список

1. Кузнецов Е.П. Эффективность использования многоскоростной обработки сигналов в задаче акустической эхо-компенсации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. № 1. С. 27 - 34.
2. Кузнецов Е.П., Витязев В.В. Цифровая обработка сигналов в задачах эхо-компенсации: тематический обзор (часть 2) // Цифровая обработка сигналов. 2006. № 4. С. 20 - 28.
3. A. Gilloire, M. Vetterli. Adaptive filtering in subbands with critical sampling: Analysis, experiments and application to acoustic echo cancellation // *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 40, PP. 1862 - 1875, Aug. 1992.
4. Bregovic R., Dumitrescu B., Saramaki T., Niemisto R. A Kaiser Window Approach for Designing Nonuniform Oversampled M-Channel Filterbanks // Proc. of 2006 International TICSP Workshop on Spectral Methods and Multirate Signal Processing, SMMSP2006, Tampere, Sept. 2006. pp. 15 - 21.
5. Allen J., Berkley D. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 65(4):943-950, April 1979.
6. Eneroth P., Gay S., Gänslar T., Benesty J. A Hybrid FRLS/NLMS Stereo Acoustic Echo Cancellation // Proc. of IWAENC, Pocono Manor, USA, 1999.

