

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ  
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И  
ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 621.391.26

В. В. КОБЕРСКИЙ

Херсонский национальный технический университет

С. А. РОЖКОВ

Херсонская государственная морская академия

**АДАПТИВНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В СУДОВЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ  
СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ**

*Выполнен анализ применения адаптивных алгоритмов при фильтрации зашумленного речевого сигнала в интеллектуальных судовых системах управления. Обоснована целесообразность применения алгоритмов адаптивной фильтрации в системах распознавания речи для минимизации воздействия помех, имеющих спектр, перекрывающийся со спектром полезного сигнала. Результаты проделанной работы указывают на целесообразность применения адаптивного алгоритма Калмана для подавления влияния посторонних факторов при высоких значений коэффициента корреляции между шумовой составляющей сигнала и образцом шума.*

*Ключевые слова: Адаптивная фильтрация. Интеллектуальные системы. Распознавание речи.*

В. В. КОБЕРСКИЙ

Херсонський національний технічний університет

С. О. РОЖКОВ

Херсонська державна морська академія

**АДАПТИВНА ФІЛЬТРАЦІЯ У СУДНОВИХ ІНТЕЛЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ**

*Виконаний аналіз застосування адаптивних алгоритмів при фільтрації зашумленого мовного сигналу в інтелектуальних судових системах управління. Обґрунтована доцільність застосування алгоритмів адаптивної фільтрації в системах розпізнавання мови для мінімізації дії перешкод, що мають спектр, що перекривається із спектром корисного сигналу. Результати виконаної роботи вказують на доцільність застосування адаптивного алгоритму Кальмана для придушення впливу сторонніх чинників при високих значень коефіцієнта кореляції між шумовою складовою сигналу і зразком шуму.*

*Ключові слова: Адаптивна фільтрація. Інтелектуальні системи. Розпізнавання мови.*

V. V. KOBERESKY

Kherson National Technical University

S. A. ROZHKOVA

Kherson State Maritime Academy

**ADAPTIVE FILTERING IN THE SHIP'S INTELLIGENT CONTROL SYSTEMS**

*The use of adaptive algorithms for filtering a noisy speech signal in the smart ship control systems is analyzed. Expediency of adaptive filtering algorithms in speech recognition systems to minimize the impact of noise with spectrum overlapping with the spectrum of the useful signal. The results of this work suggest the feasibility of adaptive Kalman algorithm to suppress the influence of extraneous factors in the high values of the correlation coefficient between the noise component of the signal and noise model.*

*Keywords: Adaptive filtering. Intelligent systems. Speech recognition.*

**Постановка проблеми**

Для ефективного управління технічними комплексами різного призначення широко використовують інтелектуальні системи управління [1, 2].

На сьогоднішній день речеві системи управління в технічних системах розпространені недостатньо широко, що викликане особливостями їх застосування. Розпізнавання і класифікація

голосовых команд, анализ сложных языковых образов, неопределенность языковых параметров в условиях высокого уровня зашумленности на промышленных производствах приводят к неоднозначной идентификации и распознаванию акустического сигнала. Однако, не смотря на все сложности применения, речевые системы управления являются перспективной технологией, позволяющей использовать естественный для человека языковой интерфейс для взаимодействия с интеллектуальными системами управления.

Основными заданиями при создании интеллектуальной системы с языковым интерфейсом, предназначенной для работы в условиях повышенных производственных шумов, является [4, 5]:

- исследование и разработка новых технологий анализа и распознавания акустического сигнала;
- изучение влияния технологических шумов на характеристики акустических сигналов;
- разработка комплекса программного обеспечения, ориентированного на оптимальную фильтрацию акустических сигналов;
- разработка современных технологий голосового введения информации с использованием цифрового сигнального процессора.

Для решения данных задач необходим комплекс исследований в области интеллектуальных систем управления с языковым интерфейсом:

- анализ и усовершенствование методов и средств языкового управления технологическими системами.
- построение оптимальной математической модели интеллектуального речевого интерфейса с выделением существенных признаков, несущих смысловую нагрузку.
- повышения помехо- и ошибкоустойчивости, стабильности работы интеллектуальной системы управления в условиях производственных шумов и других дестабилизирующих факторов.
- изучение влияния производственных шумов на акустические характеристики сигнала и выбор соответствующих типов фильтров, которые обеспечивают фильтрацию входных сигналов.

#### **Анализ последних достижений и публикаций**

Необходимость обработки больших потоков информации расширяет спектр возможностей применения систем голосового управления в современных системах управления, в том числе и на судах. Внедрение таких систем позволяет создать дополнительные контуры управления различными подсистемами судна, как при обычных условиях эксплуатации, так и в условиях чрезвычайных ситуаций. Однако применения таких систем вызвано недостаточной точностью распознавания речи в условиях повышенных шумов [3].

На данный момент существуют несколько способов повышения качества распознавания речи в условиях повышенных шумов:

- использование адаптивных механизмов обработки данных как инструмента шумоподавления.
- использование систем безмолвного доступа (Silent Speech Interface, SSI).

Перспективным методом оптимальной обработки сильно зашумленных сигналов является применением систем цифровой адаптивной фильтрации, параметры которых могут в реальном времени подстраиваться под спектральные, корреляционные и статистические характеристики входного сигнала [1, 3, 8].

Другим важным преимуществом такого подхода является возможность обучения, а также способность адаптации, к обусловленным внутренним дефектам алгоритма обработки. Адаптивные алгоритмы, построенные на этой основе, успешно обнаруживают полезный сигнал в присутствии сильных помех или нестационарных шумов разной природы и априорно неизвестными свойствами при соотношении сигнал / шум меньше единицы.

#### **Формирование цели исследования**

Цель работы состоит в анализировании основных алгоритмов адаптивной фильтрации и проверке целесообразности их использования в интеллектуальных судовых системах управления.

#### **Изложение основного материала исследования**

Способы использования адаптивных фильтров сводятся к решению задачи идентификации, где возможны два варианта идентификации – прямой и обратный. На рис.1 а показан вариант прямой идентификации, а на рис.1 б – обратная идентификация.

В первом случае (рис. 1 а) адаптивный фильтр включается параллельно с исследуемой системой. Входной сигнал является общим для исследуемой системы и адаптивного фильтра, а исходный сигнал системы служит для адаптивного фильтра образцовым сигналом. В процессе адаптации временные и частотные характеристики фильтра будут стремиться к соответствующим характеристикам исследуемой системы.

При обратной идентификации адаптивный фильтр включается последовательно с исследуемой системой (рис. 1, б). Исходный сигнал системы поступает на вход адаптивного фильтра, а входной сигнал системы является образцом для адаптивного фильтра. Таким образом, фильтр стремится

компенсировать влияние системы и возобновить исходный сигнал, устранив внесение системой искажения [8].

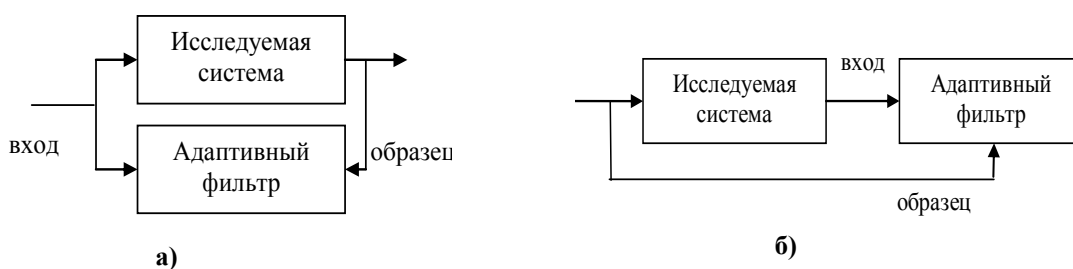


Рис.1. – Идентификация систем с помощью адаптивного фильтра:  
а – прямая, б – обратная

Структурная схема адаптивного фильтра показана на рис.2.

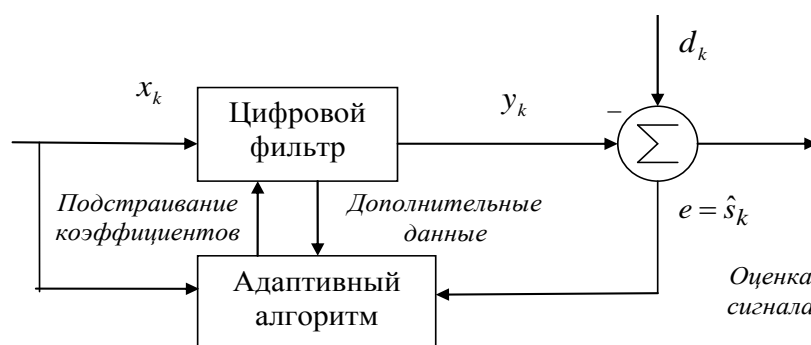


Рис.2. Общая структурная схема адаптивного фильтра

Входной дискретный сигнал  $x_k$  обрабатывается дискретным фильтром, далее сигнал  $y_k$  сравнивается с образцовым сигналом  $d_k$  и разница между ними образует сигнал ошибки  $e_k$ . Основная задача адаптивного фильтра – минимизировать ошибку при восстановлении образцового сигнала. С этой целью после обработки каждого отсчета блок адаптации анализирует сигнал ошибки и дополнительные данные, которые поступают из фильтра. После чего, используя результаты этого анализа, адаптивный алгоритм производит подстройку коэффициентов фильтра.

Обычно используют простой алгоритм адаптивной фильтрации по критерию наименьшего среднеквадратичного отклонения (Least Mean Square, LMS), как один из наиболее распространенных адаптивных алгоритмов [6]. При использовании данного способа оптимизации вектор коэффициентов фильтра  $w(k)$  должен рекурсивно обновляться следующим образом:

$$w(k+1) = w(k) - \frac{\mu}{2} \text{grad}J(w(k)) = w(k) + \mu - \mu R w(k), \quad (1)$$

где  $\mu$  – размер шага;

$\text{grad}J(w(k))$  – вектор градиента;

$p$  – вектор импульсной характеристики канала.

Подробный анализ сходимости данного процесса приведен в [1]. Показано, что алгоритм сходится, если  $0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{max}}$ , где  $\lambda_{max}$  – максимальное собственное число корреляционной матрицы  $R$ .

Скорость сходимости при этом зависит от разброса собственных чисел корреляционной матрицы  $R$  – чем меньше отношение  $\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}$ , тем быстрее сходится итерационный процесс.

Анализ сходимости алгоритма LMS показывает, что верхний предел для размера шага  $\mu$  в данном случае является меньше, чем при использовании истинных значений градиента. Этот предел  $\mu_{\max}$  приблизительно равный:

$$\mu_{\max} \approx \frac{2}{\sum_k \lambda_k} = \frac{2}{\text{trace}(R)} = \frac{2}{(N+1)\sigma_x^2}, \quad (2)$$

где  $\lambda_k$  собственные числа корреляционной матрицы  $R$ ;  
 $\text{trace}(R)$  - сумма диагональных элементов корреляционной матрицы  $R$ ;  
 $\sigma_x^2$  - средний квадрат входного сигнала фильтра [10].

Основным достоинством алгоритма LMS является предельная вычислительная простота, где для настройки коэффициентов фильтра на каждом шагу нужно выполнить  $N+1$  операции умножения и сложения. Однако такое решение приводит к медленной сходимости процедуры и повышенной дисперсии ошибки при постоянном режиме, при этом коэффициенты фильтра всегда флуктуируют вокруг оптимальных значений, что увеличивает уровень исходного шума.

Главным достоинством алгоритма RLS (Recursive Least Square), в отличие от алгоритма LMS, является быстрая сходимость, которая достигается за счет значительного усложнения вычислительной процедуры. При оптимальной организации вычислений для обновления коэффициентов фильтра на каждом такте нужно  $2,5N^2 + 4N$  пар операций "умножения – сложения" [1].

Применяя фильтр Калмана, можно минимизировать дисперсию оценки векторного случайного процесса  $x(k)$ , который изменяется во времени, следующим образом:

$$x(k+1) = \Psi(k)x(k) + v(k), \quad (3)$$

где  $\Psi(k)$  – матрица перехода;  
 $v(k)$  – случайный вектор (шум процесса) с нормальным распределением с корреляционной матрицей  $Q_p(k)$ .

Для наблюдения доступен линейно преобразованный процесс  $y(k)$ , к которому добавляется шум наблюдения:

$$y(k) = H(k)x(k) + w(k), \quad (4)$$

где  $H(k)$  – матрица наблюдений;  
 $w_k$  – шум наблюдения, представляющий собой случайный вектор, который имеет нормальное распределение с корреляционной матрицей  $Q_M(k)$ .

Разработка алгоритма для рекурсивного обновления оценки процесса  $\hat{x}(k)$  базируется на следующей последовательности формул:

$\hat{y}(k) = \tilde{N}(k)\Psi(k)x(k-1)$  – прогнозируемое значение наблюдаемого сигнала, где  $\tilde{N}(k)$  – квадратичная невырожденная матрица;

$e(k) = y(k) - \hat{y}(k)$  – ошибка между прогнозируемым и реально наблюдаемыми значениями;

$K(k) = P(k-1)C^T(k) \cdot [C(k)P(k-1)C^T(k) + Q_M(k)]^{-1}$  – калмановский коэффициент усиления;

$x(k) = \Psi(k)x(k-1) + K(k)e(k)$  – обновление оценки процесса;

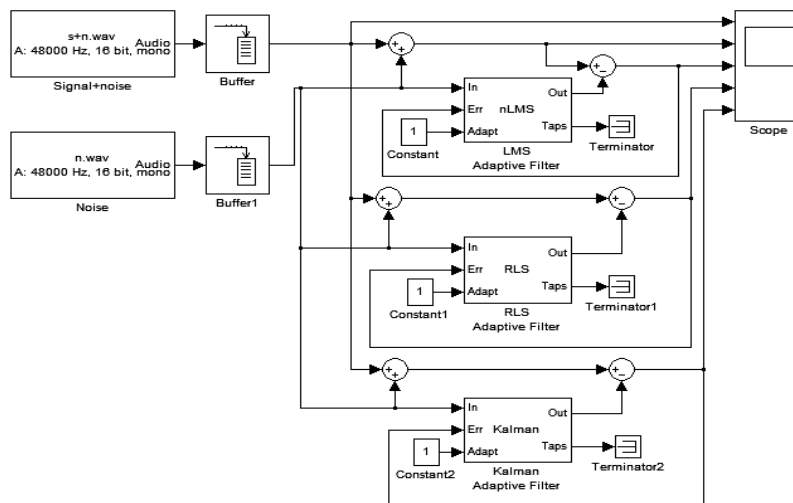
$P(k) = \Psi(k)[P(k-1) - K(k)C(k)P(k-1)]\Psi^T(k) + Q_M(k)$  – обновление оценки корреляционной матрицы ошибок фильтрации.

Для решения задания адаптивной фильтрации с использованием фильтра Калмана отслеживаемым параметром является вектор коэффициентов оптимального фильтра  $w$ .

Начальное значение вектора  $w$  обычно принимается нулевым, а для исходной оценки матрицы  $P$  используется диагональная матрица вида  $CI$ . Сравнивая выражения, которые описывают алгоритмы RLS и Калмана, легко отметить их сходство. Вычислительная сложность и качественные параметры этих алгоритмов также оказываются весьма близкими. Разница заключается лишь в начальных ссылках,

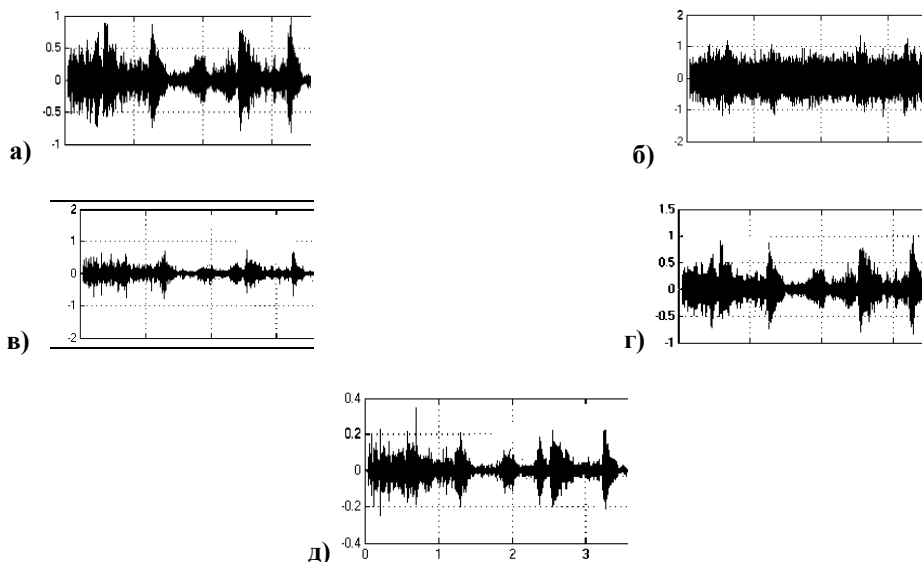
которые использовались при выведении формул, и в трактовке параметров алгоритмов. В некоторых источниках алгоритмы RLS и Калмана относительно адаптивной фильтрации отождествляются [2].

Для проверки работы адаптивных алгоритмов удобно использовать блоки адаптивных фильтров из раздела DSP Blockset в среде моделирования Simulink системы MATLAB [7, 9]. На рис. 3 показана модель, которая иллюстрирует работу алгоритмов на примере аддитивной смеси сигналов: сигнал + шум (s+n.wav), шум (n.wav)



**Рис.3. Модель решения задачи шумоподавления методами адаптивной фильтрации в среде Simulink.**

К информативному сигналу добавлен случайный шум (рис. 4 б), а полученный результат (рис. 4 а) отфильтрован при помощи алгоритмов адаптивной фильтрации LMS (рис. 4 в), RLS (рис. 4 г), и алгоритма Калмана (рис. 4 д).



**Рис.4. Результат работы адаптивных алгоритмов LMS, RLS и Калмана при очистке информационного сигнала от шума**

Из полученных после адаптивной фильтрации исходных характеристик и wav-файлов возможно определить, что алгоритм Калмана демонстрирует более качественный результат компенсации помех с меньшим уровнем остаточных шумов фильтрации. Применение адаптивного фильтра в значительной

степени очищает полезный сигнал от помех – сигнал принимает форму, похожую с формой незашумленного (эталонного) сигнала.

#### **Выводы**

При разработке интеллектуальных систем управления с распознаванием речи, для минимизации действия помех, имеющих спектр, который перекрывается со спектром полезного сигнала, целесообразно применять алгоритмы адаптивной фильтрации.

В случае высоких значений коэффициента корреляции между шумовой составляющей сигнала и образцовой помехой (шумом) для эффективного подавления влияния посторонних факторов следует применять адаптивный алгоритм фильтрации Калмана.

С точки зрения вычислительной сложности и требований к оперативной памяти наиболее эффективен алгоритм наименьших квадратов (LMS), однако при проектировании систем распознавания речи следует учитывать, что этот метод имеет медленную сходимость и при постоянном режиме дает повышенную дисперсию ошибки.

Из всего вышесказанного следует, что наиболее перспективным алгоритмом адаптивной фильтрации для судовых интеллектуальных систем является алгоритм Калмана, демонстрирующий наиболее качественный результат компенсации помех.

#### **Список использованной литературы:**

1. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К.Ф.Н. Коуэна и П.М. Гранта. – М.:Мир, 1988.- 392с
2. Проксис Дж. Цифровая связь: Пер. с англ./ Под ред. Д.Д. Кловского. – М.:Радио и связь, 2000. – 800 с.
3. Frasier R.E. , etc. Enhancement of Speech by Adaptive Filtering. Proc.1976 IEEE Int. Conf. ASSP, ICASSP-76, pp.251-253.
4. Juang-B-H. Speech Recognition in Adverse Environments. Computer Speech and Language. vol. 5, pp. 275-294.
5. Drucker H. Speech Processing in a High Ambient Noise Environment. IEEE Trans. On ASSP, ICASSP-76, pp.251-253.
6. Diniz, P.S.R. Adaptive Filtering: Algorithms and Practical Implementation /P.S.R. Diniz. – Springer, 2013. – 673 p.
7. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SPI / 7 + Simulink 5 / 6. Основы применения / В.П.Дьяконов. –М.: СОЛОНПресс, 2005. – 800 с.
8. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов: учебник для вузов. – 2–е изд. – СПб.:Питер, 2006.
9. Schilling R.J. Fundamentals of Digital Signal Processing Using MATLAB/ R.J.Schilling, S.L.Harris. – Cengage Learning: Florence, KY, 2005. –624 p.
10. Шильман, С.В. Адаптивная фильтрация временных рядов/ С.В. Шильман. –Н. Новгород : Изд-во Нижегород. ун-та. – 1995. – 189 с.