

УДК 621.396.26

**ОПТИМАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ФІЛЬТРАЦІЇ МОВНИХ ПОВІДОМЛЕНЬ ПРИ НАЯВНОСТІ ОПОРНОГО СИГНАЛУ ЗАВАДИ***Павлюченкова А.М., магістрант**Жук С.Я., д.т.н., професор**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м.Київ***Вступ. Постановка задачі**

На сьогодні широкого поширення набула задача фільтрації мовних сигналів на фоні завад [1]. Важливе практичне значення має ситуація, коли окрім зашумленого сигналу, який потрібно очистити, також спостерігається один або декілька опорних сигналів, що корельовані з шумовим сигналом і некорельовані (або слабо корельовані) з корисним сигналом, що підлягає виділенню. Використання опорних сигналів дозволяє значно підвищити якість компенсації завад.

В роботі розглядається двоканальна вимірювальна система, в якій окрім зашумленого мовного повідомлення також спостерігається опорний шумовий сигнал  $v(k)$ , який вимірюється допоміжним каналом. Завада на вході основного вимірювального каналу визначається по формулі:

$$z(k) = \sum_{i=0}^m a_i v(k-i), \quad (1)$$

де  $a_i, i = \overline{1, m}$  – вагові коефіцієнти формуючого фільтру завади на вході основного вимірювального каналу. На практиці, вагові коефіцієнти  $a_i, i = \overline{1, m}$  є невідомими.

Для опису мовного сигналу  $s(k)$  використовується марківська гаусівська модель у вигляді:

$$s(k+1) = F(k, k-1)s(k) + G(k)w(k), \quad (2)$$

де  $s(k)$  – вектор стану, що містить відліки мовного сигналу;  $F(k, k-1), G(k)$  – відомі матриці;  $w(k)$  – некорельована послідовність гаусівських векторів  $N(0, 1)$ .

Рівняння спостереження основного каналу має вигляд:

$$y(k) = H_s s(k) + z(k) + n(k), \quad (3)$$

де  $H_s$  – матриця спостереження систем;  $n(k)$  – некорельована послідовність гаусівських величин з нульовим математичним очікуванням і дис-

персією  $R(k)$ , що характеризує внутрішні шуми системи. Шуми  $w(k)$ ,  $n(k)$  та  $v(k)$  припускаються некорельованими.

Необхідно знайти оцінки мовного сигналу  $\hat{s}(k)$  при наявності спостереження основного каналу  $y(k)$  і опорного шумового сигналу  $v(k)$ , що задовольняють критерію мінімуму середнього квадрата помилки.

### Теоретичне обґрунтування

Сформульована задача фільтрації відноситься до класу адаптивних, оскільки параметри формуючого фільтру  $a_i, i=1, m$  є невідомими. Для її вирішення введемо розширений вектор стану  $x^T(k) = [x_s(k), x_a(k)]$ , що включає вектор мовного сигналу  $x_s(k)$  та вектор коефіцієнтів  $x_a(k)$ .

При цьому модель процесу, що фільтрується має вид:

$$\begin{bmatrix} x_s(k) \\ x_a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s(k, k-1) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s(k-1) \\ x_a(k-1) \end{bmatrix} + G_s(k)w(k); \quad (4)$$

$$y(k) = [H_s \ H_a] \cdot \begin{bmatrix} x_s(k) \\ x_a(k) \end{bmatrix} + n(k), \quad (5)$$

де  $H_a = (v(k), \dots, v(k-m+1))$  - матриця-рядок, що складається з відліків опорного шумового сигналу.

Оптимальним рішенням задачі фільтрації процесу  $x(k)$  по спостереженням  $y(k)$  є алгоритм калманівської фільтрації [2], який для розглянутої моделі (4), (5) можна представити у вигляді:

$$\begin{bmatrix} x_s^*(k) \\ x_a^*(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(k, k-1) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}_s(k-1) \\ \hat{x}_a(k-1) \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_s(k) \\ \hat{x}_a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_s^*(k) \\ x_a^*(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s(k) \\ K_a(k) \end{bmatrix} (y(k) - H \begin{bmatrix} x_s^*(k) \\ x_a^*(k) \end{bmatrix}); \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} P_s^*(k) & \Lambda^*(k) \\ \Lambda^{*T}(k) & P_a^*(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(k, k-1) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{P}_s(k-1) & \hat{\Lambda}(k-1) \\ \hat{\Lambda}^T(k-1) & \hat{P}_a(k-1) \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} F_s^T(k, k-1) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_s(k)G_s^T(k) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} K_s(k) \\ K_a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s^*(k) & \Lambda^*(k) \\ \Lambda^{*T}(k) & P_a^*(k) \end{bmatrix} \left[ \begin{bmatrix} H_s^T \\ H_a^T \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} H_s \\ H_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s^*(k) & \Lambda^*(k) \\ \Lambda^{*T}(k) & P_a^*(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_s^T \\ H_a^T \end{bmatrix} + R(k) \right) \right]^{-1}; \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{P}_s(k) & \hat{\Lambda}(k) \\ \hat{\Lambda}^T(k) & \hat{P}_a(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s^*(k) & \Lambda^*(k) \\ \Lambda^{*T}(k) & P_a^*(k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_s(k) \\ K_a(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_s \\ H_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s^*(k) & \Lambda^*(k) \\ \Lambda^{*T}(k) & P_a^*(k) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де для векторів мовного сигналу та невідомих коефіцієнтів розраховуються:  $\hat{x}_s(k), \hat{x}_a(k)$  - вектори оцінки;  $P_s^*(k), P_a^*(k)$  - кореляційні матриці помилок прогнозу;  $K_s(k), K_a(k)$  - матричні коефіцієнти підсилення каналів фільтрації оптимального пристрою;  $\hat{P}_s(k), \hat{P}_a(k)$  - кореляційні матриці помилок оцінки;  $\Lambda^*(k)$  - матриця взаємної кореляції помилок прогнозу;  $\hat{\Lambda}(k)$  - матриця взаємної кореляції помилок оцінки.

Початкові умови мають вид:

$$\hat{s}(0) = \bar{s}(0), \hat{P}_s(0) = P_s(0), \hat{P}_a(0) = P_a(0), \hat{\Lambda}(0) = 0.$$

Структурна схема оптимального фільтру показана на рис.1. Вона включає два взаємопов'язаних канали фільтрації мовного сигналу та коефіцієнтів формуючого фільтру. На вхід фільтру поступає спостереження основного каналу  $y(k)$ . Спостереження опорного шумового сигналу  $v(k)$  використовуються при формуванні матриці  $H_a$ .

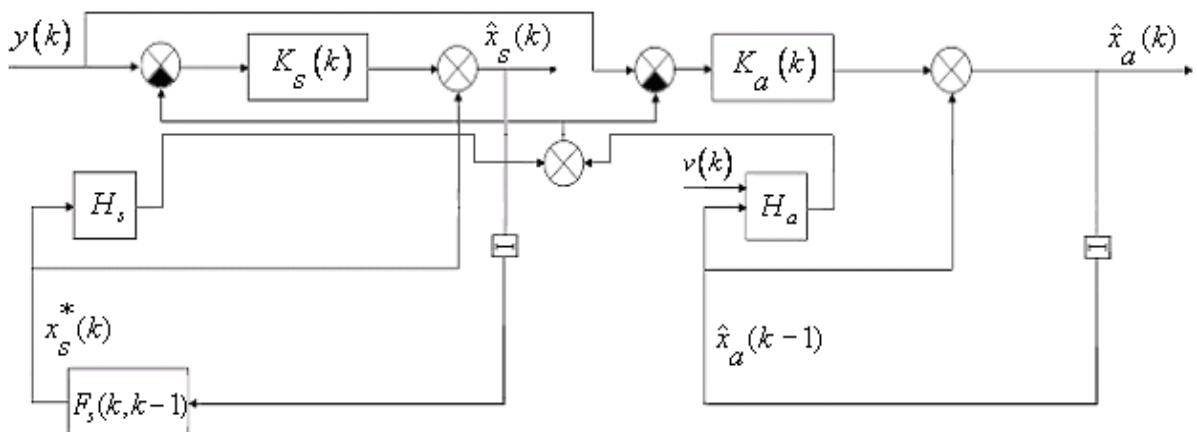


Рис. 1

### Результати експериментальних досліджень

Для опису мовного сигналу використовувалася авторегресійна модель 3-го порядку вигляду

$$s(k) = \sum_{i=1}^3 d_i s(k-i) + qn(k). \quad (11)$$

Значення параметрів  $d_i, i = 1, 3, q$  розраховувались на основі отриманих оцінок кореляційної функції реалізації мовного сигналу, шляхом рішення рівнянь Юла-Уокера [3].

Для опису завади використовувалась гаусівська марківська модель

$$v(k) = a_0 v(k) + a_1 v(k-1) + b_1 v(k-1) + b_2 v(k-2), \quad (12)$$

що формує випадкову послідовність з кореляційною функцією:

$$R_v(\tau) = \sigma_v^2 \exp(-\alpha|\tau|) \cos(\omega_0 \tau). \quad (13)$$

Аналіз оптимального алгоритму проводився шляхом визначення відношення сигнал/шум до (h1) і після (h2) фільтрації для двох тестових реалізацій при різних потужностях завади. Результати досліджень приведені в табл.1. Виграш  $\Delta$  з підвищенням відношення сигнал/шум після фільтрації досягає для сигналу дискретизованого з частотою 8 кГц – 36.7 дБ, а для дискретизованого з частотою 32 кГц – 40.3 дБ. Зі збільшенням відношення сигнал/шум на вході виграш  $\Delta$  зменшується.

Таблиця 1

Частота дискретизації, $f_d$ , кГц	СКВ завади	Відношення сигнал/шум, дБ		
		h1	h2	$\Delta = h2 - h1$
8	$\sigma_v = 0.2$	-2.2	19.6	<b>21.8</b>
	$\sigma_v = 0.5$	-10.8	24.5	<b>35.3</b>
	$\sigma_v = 0.7$	-14.8	21.9	<b>36.7</b>
32	$\sigma_v = 0.2$	-3.4	22.5	<b>25.9</b>
	$\sigma_v = 0.5$	-16.2	23.6	<b>39.8</b>
	$\sigma_v = 0.7$	-17.1	23.2	<b>40.3</b>

Для подавлення завад при наявності опорних шумових сигналів широко використовуються градієнтні адаптивні методи [4]. Адаптивний градієнтний алгоритм компенсації завад в двоканальній вимірювальній системі за критерієм найменших квадратів має вид:

$$\hat{x}_a(k+1) = \hat{x}_a(k) - \mu(y(k) - \hat{x}_a^T(k)u(k))u(k+1), \quad (15)$$

де  $u^T(k) = (v(k), \dots, v(k-m+1))$  - вектор відліків опорного шумового сигналу;  $\mu$  - параметр, що визначає швидкість і стійкість процесу адаптації.

На рис. 2. суцільною лінією показано СКВ помилки фільтрації для алгоритму (15), а штриховою лінією для розробленого алгоритму (6) – (10), отримане методом Монте-Карло по реальному мовному сигналу. Параметри корельованої завади: центральна частота  $\omega_0 = 400$  Гц ; час кореляції  $\tau_v = 0.5$  мс, СКВ корельованої завади  $\sigma_v = 0.7$ ; частота дискретизації мовного сигналу 8 кГц.

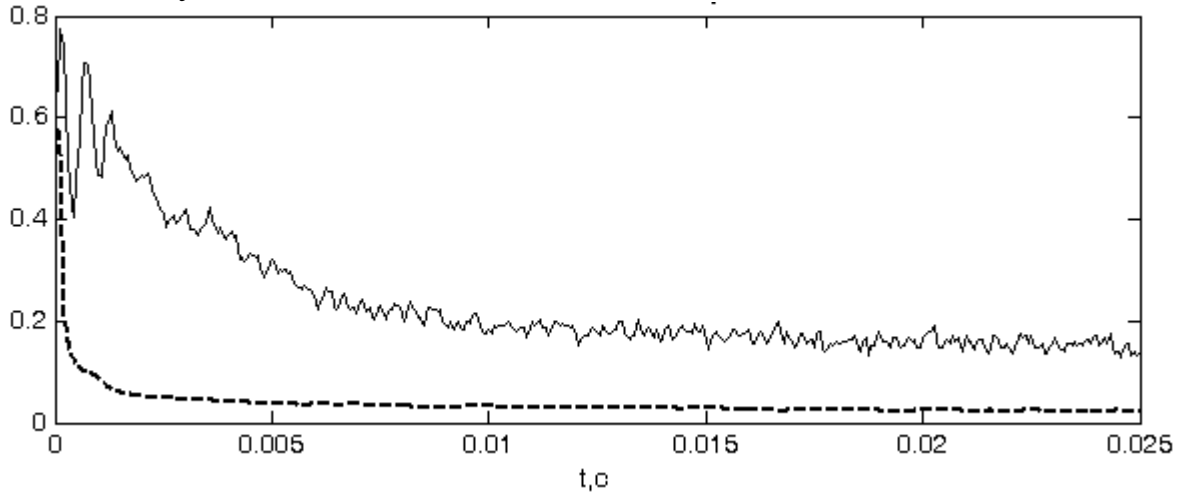


Рис.2.

Як випливає з результатів моделювання, довжина перехідного режиму, що характеризує час адаптації коефіцієнтів формуючого фільтру, при використанні відомого алгоритму (15) збільшується на порядок. При цьому СКВ помилок фільтрації в стаціонарному режимі також збільшується в п'ять разів.

### **Висновки**

В синтезованому оптимальному алгоритмі виконується спільна фільтрація мовного сигналу та оцінювання коефіцієнтів формуючого фільтру завади, а оптимальний пристрій фільтрації має два взаємопов'язані канали.

Для розглянутих прикладів синтезований алгоритм дозволяє отримати приріст виграшу у відношенні сигнал/шум після фільтрації на 21...40 децибелів. Крім того, у порівнянні з адаптивним компенсатором завад, довжина перехідного режиму, що характеризує час адаптації коефіцієнтів формуючого фільтру, зменшується на порядок, а СКВ помилок фільтрації в п'ять разів. Це обумовлено врахуванням в моделі апріорної інформації про кореляційні властивості мовних сигналів і оптимальними властивостями фільтру Калмана.

### **Література**

1. Шелухин О.И., Лукьянцев Н.Ф. Цифровая обработка и передача речи. М.: Радио и связь, 2000, -276 с.
2. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. -608 с..
3. Жук С.Я. Методы оптимизации дискретных динамических систем со случайной структурой / Монография. К.: НТУУ «КПИ», 2008. -232с.

4. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов. –М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.

*Павлюченкова А.М, Жук С.Я. Оптимальний алгоритм фільтрації мовних повідомлень при наявності опорного сигналу завади. В роботі розглядається двоканальна вимірювальна система, в якій окрім зашумленого мовного повідомлення також спостерігається опорний шумовий сигнал. На основі математичного апарату калманівської фільтрації синтезовано оптимальний алгоритм спільної фільтрації мовного сигналу та параметрів формуючого фільтру завади. Оптимальний пристрій відповідно включає два канали, які взаємопов'язані між собою. Дослідження отриманого оптимального алгоритму було проведене в середовищі моделювання MathLab на реальному мовному сигналі. Аналіз розробленого алгоритму та його порівняння з адаптивним градієнтним алгоритмом компенсації завад за критерієм найменших квадратів проведено шляхом статистичного моделювання на ЕОМ. Синтезований алгоритм забезпечує у підвищенні відношення сигнал/шум після фільтрації 21-40 дБ.*

**Ключові слова:** мовний сигнал, опорний шумовий сигнал, калманівська фільтрація, критерій мінімуму середнього квадрату помилки

*Павлюченкова А.Н, Жук С.Я. Оптимальний алгоритм фільтрації речевих сообщений при наявності опорного сигналу помехи. В работе рассматривается двухканальная измерительная система, в которой кроме зашумленного речевого сигнала также наблюдается опорный шумовой сигнал. На основе математического аппарата калмановской фильтрации синтезировано оптимальный алгоритм общей фильтрации речевого сигнала та параметров формирующего фильтра помехи. Оптимальное устройство соответственно включает два канала, которые взаимосвязаны между собой. Исследование полученного алгоритма проводилось в среде моделирования MathLab на реальном речевом сигнале. Анализ разработанного алгоритма та его сравнение с адаптивным градиентным алгоритмом компенсации помех за критерием наименьших квадратов проведено путем статистического моделирования на ЕВМ. Синтезированный алгоритм обеспечивает увеличения соотношения сигнал/шум после фильтрации 20-40 дБ.*

**Ключевые слова:** речевой сигнал, опорный шумовой сигнал, калмановская фильтрация, критерий минимума среднего квадрата ошибки.

*Pavlyuchenkova A.N. Zhuk S.Y. Optimal algorithm filtration speech message with bearing noise signal. In this work we examine two-channel measuring system, in which we have a bearing noise signal besides a noisy speech signal. Basing on the mathematic apparatus of Kalman's filtration, an optimal algorithm of speech signal and obstacle forming filter parameters common filtration was synthesized. An optimal device includes two channels associated with each other. The received optimal algorithm investigation there was carried out in the modeling environment Math Lab on the real speech signal. Analysis of developed algorithm and it's comparison with an adaptive gradient algorithm of obstacle compensation, assessed with lesser squares criteria, performed with a statistic modeling on ECM. A relation signal-noise increasing benefit after filtration reaches 20-40 dB.*

**Key words:** A speech signal, a bearing noise signal, a Calman filtering, a minimum mean square error criterion