

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.391

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ С КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНЫМ  
УПРАВЛЕНИЕМ В СИСТЕМАХ СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Д.Л. ХОДЫКО, С.Б. САЛОМАТИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 5 октября 2006*

Рассмотрен алгоритм адаптивной фильтрации с применением кусочно-непрерывного управления для систем спутниковой навигации. Дан алгоритм управления при известном и неизвестном интервалах стационарности. Представлена структурная схема адаптивного фильтра и проведено моделирование работы фильтра. Показан количественный выигрыш адаптивного фильтра с управлением.

*Ключевые слова:* системы спутниковой навигации, адаптивный фильтр, кусочно-непрерывное управление, постоянная времени адаптации.

## Введение

Аппаратура потребителя системы спутниковой навигации использует сложные фазоманипулированные сигналы для обеспечения точности измерений параметров и защиты от помех. При действии преднамеренных помех [1, 2] используют адаптивные алгоритмы для защиты навигационных каналов. Однако при действии нестационарных помех такие алгоритмы могут иметь большое время адаптации.

Процесс адаптации может быть ускорен при заданной точности обработки, если применить на временном интервале сходимости кусочно-непрерывное управление [3].

**Модель сложного сигнала.** На вход адаптивного фильтра поступает аддитивная смесь сигнала и шума [4]:

$$x[n] = AF[n]g[n]\sin(\omega_0 T_d n + \Theta[n]) + \eta[n] + J[n], \quad g[n] = \sum_{k=1}^M d_i[k] \text{rect}[T_d n - (k-1)T_p],$$

где  $J[n]$  — нестационарная помеха с интервалом стационарности  $T_s$ ;  $A$  — амплитуда сигнала;  $F[n]$  — функция, учитывающая влияние канала связи;  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $f_0$  — промежуточная частота;  $\Theta[n]$  — фаза радиосигнала;  $g[n]$  — кодовые последовательности с длительностью одного дискрета  $T_p$ ;  $T_d$  — интервал дискретизации;  $d_i[k]$  — коэффициенты, принимающие значения  $\pm 1$  в соответствии с законом чередования элементов псевдослучайной последовательности (ПСП) максимальной длины сигнала;  $n$  — индекс дискретного отсчета времени;  $\eta[n]$  — шум с мощностью  $\sigma^2$  и нулевым средним.

**Алгоритм адаптивной фильтрации.** Коэффициенты адаптивного фильтра на основе метода наименьших квадратов вычисляются по формуле

$$\bar{\mathbf{w}}[n+1] = \bar{\mathbf{w}}[n] + 2\mu[n]\varepsilon[n]\hat{\mathbf{R}}^{-1}[n]\bar{\mathbf{X}}[n],$$

где  $\bar{\mathbf{w}}[n]$  — весовой вектор;  $\varepsilon[n]$  — ошибка между требуемым сигналом и сигналом на выходе адаптивного фильтра;  $\mu[n]$  — коэффициент сходимости;  $\bar{\mathbf{X}}[n]$  — вектор отсчетов шума;  $\mathbf{R}^{-1}[n]$  — обращенная корреляционная матрица шума и помехи.

**Алгоритм управления с переменным коэффициентом сходимости.** Коэффициент сходимости адаптивного алгоритма выбирается из компромисса двух важных параметров: времени адаптации и точности фильтрации. Согласно [5], постоянная времени адаптации  $T_{LMS}$  обратно пропорциональна коэффициенту сходимости, и для ее уменьшения необходимо выбирать большие значения  $\mu$ . При этом для уменьшения среднего значения среднеквадратической ошибки значения  $\mu$  должны быть минимальные.

Рассмотрим кусочно-непрерывное управление коэффициентом сходимости с одной точкой разрыва  $t^*$ :

$$\mu[nT_d] = \begin{cases} \mu_0, & 0 \leq nT_d < t^* \\ \mu_1, & t^* \leq nT_d < T_s, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\mu_0, \mu_1$  — коэффициенты сходимости.

Значения  $\mu_0$  и  $\mu_1$  можно принять из условия [5]:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= \alpha^{-1} \lambda_{\max}, \\ \mu_1 &= \alpha \lambda_{\min}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\lambda_{\max}$  и  $\lambda_{\min}$  — собственные значения корреляционной матрицы, которые могут быть получены из соотношения Релея, коэффициент  $\alpha$  выбирается из диапазона 1...10.

Время переключения определим из условия

$$t^* \Rightarrow \frac{d\xi[nT_d]}{dT_d} \geq h, \quad (5)$$

где  $\xi[nT_d]$  — среднеквадратическая ошибка (СКО),  $h$  — порог, величина отрицательная, выбирается экспериментально.

Выражение (5) вычисляет производную  $\xi[nT_d]$  и сравнивает результат с порогом  $h$ .

Если принять, что СКО  $\xi[nT_d]$  на интервале сходимости определяется как [5]:

$$\xi[nT_d] = B \exp(-nT_d/T_{LMS}), \quad (6)$$

где  $B$  — постоянная величина, тогда производная по времени для выражения (6) есть функция отрицательная.

Для заданного интервала стационарности  $T_s$  управление (3) с учетом (4) и (5) можно переписать в следующем виде относительно  $\xi[nT_d]$ :

$$\mu[n] = \begin{cases} \alpha^{-1} \lambda_{\max}, & \text{если } \frac{d\xi[nT_d]}{dT_d} < h, \\ \alpha \lambda_{\min}, & \text{если } \frac{d\xi[nT_d]}{dT_d} \geq h. \end{cases} \quad (7)$$

Структурная схема адаптивного фильтра с алгоритмом управления (7) показана на рис. 1.

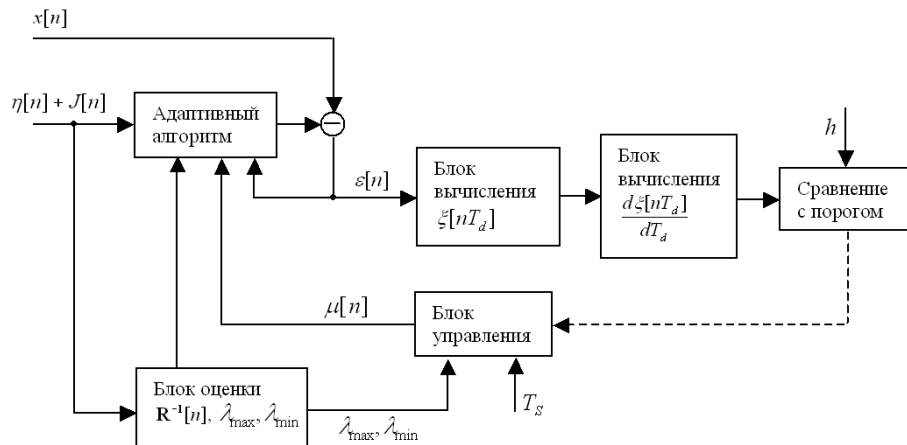


Рис. 1. Структурная схема адаптивного фильтра с управлением и известным  $T_s$

**Алгоритм управления с учетом знака производной.** В общем случае интервал стационарности помехи носит изменяющийся характер во времени. Структурное изменение помехи повлияет на величину и знак производной в (5), что может служить упрощенной оценкой  $T_s$ . С учетом изменения знака в производной СКО алгоритм управления (7) можно переписать в следующем виде:

$$\mu[n] = \begin{cases} \alpha \lambda_{\max}, & \text{если } \frac{d\xi[nT_d]}{dT_d} < h \text{ или } \frac{d\xi[nT_d]}{dT_d} > -h, \\ \alpha^{-1} \lambda_{\min}, & \text{если } \frac{d\xi[nT_d]}{dT_d} \geq h. \end{cases} \quad (8)$$

Закон управления, согласно (8), требует дополнительного сравнения производной (5) с положительным значением порога.

Выигрыш в скорости сходимости можно оценить как отношение постоянных времени адаптации для заданных  $\mu$ :

$$\gamma = \frac{T_{LMS}(\mu_1)}{T_{LMS}(\mu_0)} = \frac{\alpha^{-1} \lambda_{\max}}{\alpha \lambda_{\min}} = \alpha^{-2} \lambda_{\max} / \lambda_{\min}. \quad (9)$$

Для широкополосных помех отношение собственных значений корреляционной матрицы находится в пределах  $10^3 \dots 10^5$ . При  $\alpha=10$  выигрыш в снижение времени адаптации составляет  $10 \dots 10^3$ .

Из выражения (9) видно, что управление коэффициентом сходимости по алгоритму (8) наиболее эффективно для помех, корреляционные матрицы которых имеют большой разброс собственных значений.

**Моделирование.** В качестве помехи  $J[n]$  выберем математическую модель сложного фазоманипулированного сигнала, имитирующего полезный сигнал системы спутниковой навигации с параметрами:  $f_0=10$  МГц,  $T_p=0,1/f_0$ ;  $\Theta[n]=0$ ,  $F[n]=1$ , ПСП длиной 4095. Параметры помехи:  $f_0=(10-5 \cdot 10^{-4})$  МГц, ПСП формируется по отличному от сигнала полиному длиной 4095 и длительностью импульса  $T_p=0,1/f_0$ ,  $\Theta[n]=0$  для сигнала и помехи. Отношение сигнал-помеха:  $-20$  дБ; сигнал-шум:  $-5$  дБ; помеха-шум:  $15$  дБ. Аддитивные шумы сигнала и помехи некоррелированные. Длина адаптивного фильтра  $N=64$ .

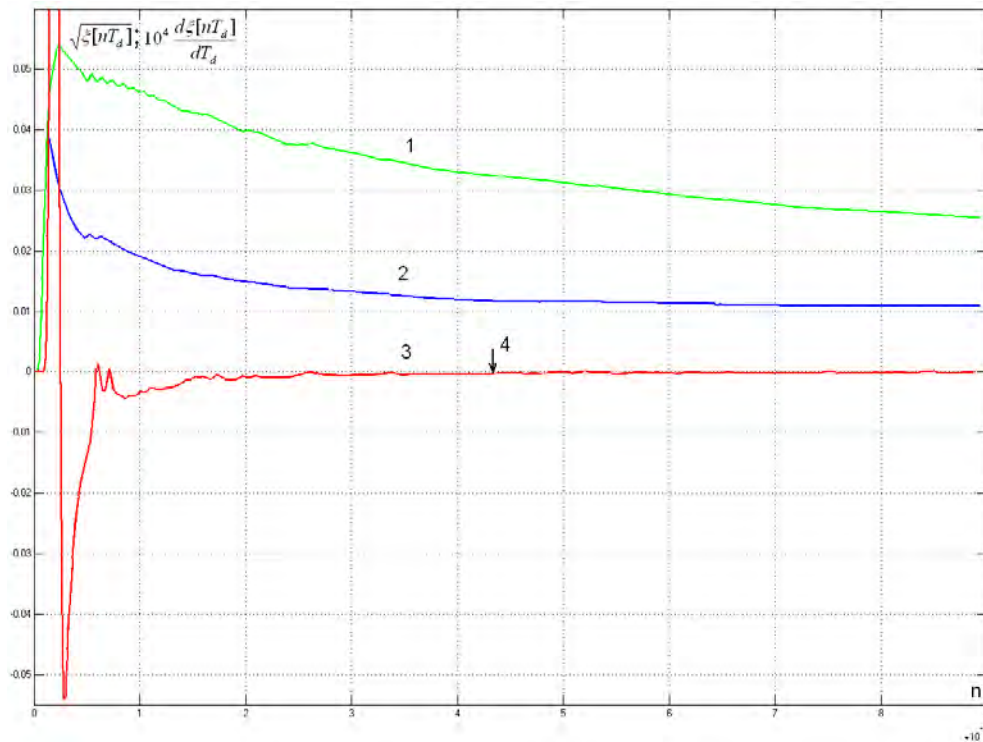


Рис. 2. Зависимости СКО адаптивных фильтров: 1 — без управления; 2 — с управлением; 3 — производная СКО; 4 — момент переключения

На рис. 2. показаны зависимости  $\sqrt{\xi[n]}$  адаптивного фильтра с наличием управления и без него, производная СКО. Выбрав порог  $h = -0,3 \cdot 10^{-4}$ , определяем соответствующее время переключения. После переключения  $\mu \rightarrow \mu_1$  точность фильтрации продолжает повышаться до значения, соответствующего предельной точности для метода наименьших квадратов [5].

## THE ALGORITHM OF AN ADAPTIVE FILTRATION BY PIECEWISE CONTINUOUS MANAGEMENT IN SYSTEMS OF SATELLITE NAVIGATION

D.L. HODUKO, S.B. SALOMATIN

### Abstract

The algorithm of an adaptive filtration with application with piecewise continuous management for systems of satellite navigation is considered. The algorithm of management is given at a known and unknown interval stationarity. The block diagram of the adaptive filter and modelling job of the filter is submitted. The quantitative prize of the adaptive filter with management is shown.

### Литература

1. Второй Белорусский космический конгресс // Материалы конгресса. Минск, 2005.
2. Bradley P. Badke. Global Positioning System Anti-Jamming Techniques. Ph. D Dissertation, Arizona State University, 2002.
3. *Благодатских В.И.* Ведение в оптимальное управление / Под ред. В.А. Садовниченко. М., 2001.
4. Mohinder S. G., Lawrence R.W., Angus P.A. Global positioning systems, inertial navigation, and integration. 2001 John Wiley & Sons, Inc.
5. Уидроу Б., Стурнз С.Д. Адаптивная обработка сигналов. М., 1989.а