

XÂY DỰNG THUẬT TOÁN THÍCH NGHI CHO CÁC BỘ LỌC PHI TUYẾN KHÔNG ĐỆ QUY THEO PHƯƠNG PHÁP BÌNH PHƯƠNG NHỎ NHẤT

NGUYỄN THẾ HIẾU

1. GIỚI THIỆU

Trong nhiều hệ thống vô tuyến điện tử có các bộ lọc thích nghi tuyến tính sử dụng thuật toán thích nghi trên cơ sở phương pháp bình phương nhỏ nhất [1 - 6]. Để tăng tính hội tụ của các thành phần bình phương nhỏ nhất cần sử dụng chỉ tiêu tổ hợp tối ưu hoá các hệ số của bộ lọc thích nghi tuyến tính [7].

Khi tín hiệu ở dạng không Gausse, các thuật toán xử lý thường được triển khai trên cơ sở các bộ lọc phi tuyến. Bài toán tổng hợp các hệ số của bộ lọc số không đệ quy phi tuyến theo chỉ tiêu các sai số trung bình bình phương nhỏ nhất để lọc tín hiệu không Gaussian trên nền nhiễu tạp cộng Gausse đã được xem xét trong [8]. Khi giải bài toán này đã sử dụng thông tin tiên nghiệm dưới dạng các hàm moment đã biết của tín hiệu và nhiễu tạp. Trong điều kiện thực tế thông tin tiên nghiệm này thường không tồn tại, tốt nhất nên sử dụng độ hội tụ của các hệ số lọc phi tuyến không đệ quy.

Mục đích của bài viết là thiết kế và khảo sát thuật toán thích nghi của các hệ số bộ lọc phi tuyến không đệ quy trên cơ sở phương pháp bình phương nhỏ nhất.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

Xét bài toán đồng nhất lọc mô hình phi tuyến theo sơ đồ thích nghi có hồi tiếp [6]. Biến đổi phi tuyến trong bộ lọc thích nghi phải đảm bảo tham số thích nghi có giá trị nhỏ nhất, độ linh hoạt của tính chất phi tuyến được triển khai đạt giá trị cao nhất. Giải pháp rút gọn (theo quan điểm chi phí tính toán) của bộ lọc thích nghi là tách riêng phần nhân quả phi tuyến và phần nhân quả tuyến tính. Nếu thiết lập sự biến đổi phi tuyến dưới dạng đa thức, toán tử biến đổi phi tuyến đối với các tác động vào-ra có dạng:

$$s_k = F[\mathbf{X}_k, \mathbf{A}_k, \mathbf{W}_k] = \sum_{j=1}^M \alpha_j \left(\sum_{i=0}^L w_i x_{k-i} \right)^j, \quad (1)$$

trong đó s_k - tín hiệu ra; $\mathbf{X}_k = [x_k \ x_{k-1} \ \dots \ x_{k-L}]$ - vector tín hiệu vào; $\mathbf{A}_k = [\alpha_1 \ \dots \ \alpha_M]^T$, $\mathbf{W}_k = [w_0 \ \dots \ w_L]^T$ - các vector hệ số trọng lượng ở phần tuyến tính và phần phi tuyến tương ứng của bộ lọc thích nghi; chỉ số k biểu diễn số thứ tự phép lặp của quá trình thích nghi.

Khi triển khai các thuật toán thích nghi theo phương pháp bình phương nhỏ nhất, phép lặp khi tính toán vector các hệ số phần tuyến tính và phần phi tuyến của bộ lọc thích nghi có dạng:

$$\hat{\mathbf{W}}_{k+1} = \hat{\mathbf{W}}_k - \Gamma \hat{\mathbf{V}}_k^w = \hat{\mathbf{W}}_k + 2\Gamma \varepsilon_k \left. \frac{d\hat{F}(s)}{ds} \right|_{h_k} \mathbf{X}_k, \quad (2)$$

$$\hat{\mathbf{A}}_{k+1} = \hat{\mathbf{A}}_k - \Psi \hat{\mathbf{V}}_k^w = \hat{\mathbf{A}}_k + 2\Psi \varepsilon_k \mathbf{H}_k, \quad (3)$$

trong đó: $\Gamma = \text{diag}[\gamma_0 \ \gamma_1 \ \dots \ \gamma_L]$, $\Psi = \text{diag}[\psi_1 \ \psi_2 \ \dots \ \psi_M]$ - ma trận tương ứng của các tham số hội tụ; $\varepsilon_k = d_k - s_k$ - Sai số thích nghi của bộ lọc theo tín hiệu; d_k - Tín hiệu ra của bộ lọc mô hình.

$$\hat{\mathbf{V}}_k^w = \frac{\partial(\varepsilon_k)^2}{\partial \hat{\mathbf{W}}_k} = 2\varepsilon_k \frac{\partial(\varepsilon_k)}{\partial \hat{\mathbf{W}}_k} = -2\varepsilon_k \left. \frac{d\hat{F}(s)}{ds} \right|_{h_k} \mathbf{X}_k, \quad (4)$$

$$\hat{\mathbf{V}}_k^a = \frac{\partial(\varepsilon_k)^2}{\partial \hat{\mathbf{A}}_k} = 2\varepsilon_k \frac{\partial(\varepsilon_k)}{\partial \hat{\mathbf{A}}_k} = -2\varepsilon_k \frac{\partial \hat{F}(h_k)}{\partial \hat{\mathbf{A}}_k} = -2\varepsilon_k \mathbf{H}_k, \quad (5)$$

- Các đại lượng vector xác định gradient của hệ số phần tuyến tính và phần phi tuyến ở bộ lọc thích nghi;

$h_k = \sum_{i=0}^L \hat{w}_i x_{k-i} = \mathbf{X}_k \hat{\mathbf{W}}_k$, $\mathbf{H}_k = [h_k^1 \ h_k^2 \ \dots \ h_k^M]^T$ - Tín hiệu vô hướng và tín hiệu vector của phần nhân quả tuyến tính ở bộ lọc thích nghi;

$$\hat{F}(h_k) = \sum_{i=0}^L \hat{a}_i h_k^i - \text{Giá trị hàm biến đổi phi tuyến của bộ lọc thích nghi.}$$

Sự khác biệt giữa thuật toán thích nghi ở phần tuyến tính trong bộ lọc phi tuyến so với thuật toán bình phương nhỏ nhất đã biết [6] là tồn tại đạo hàm của hàm biến đổi phi tuyến tại điểm

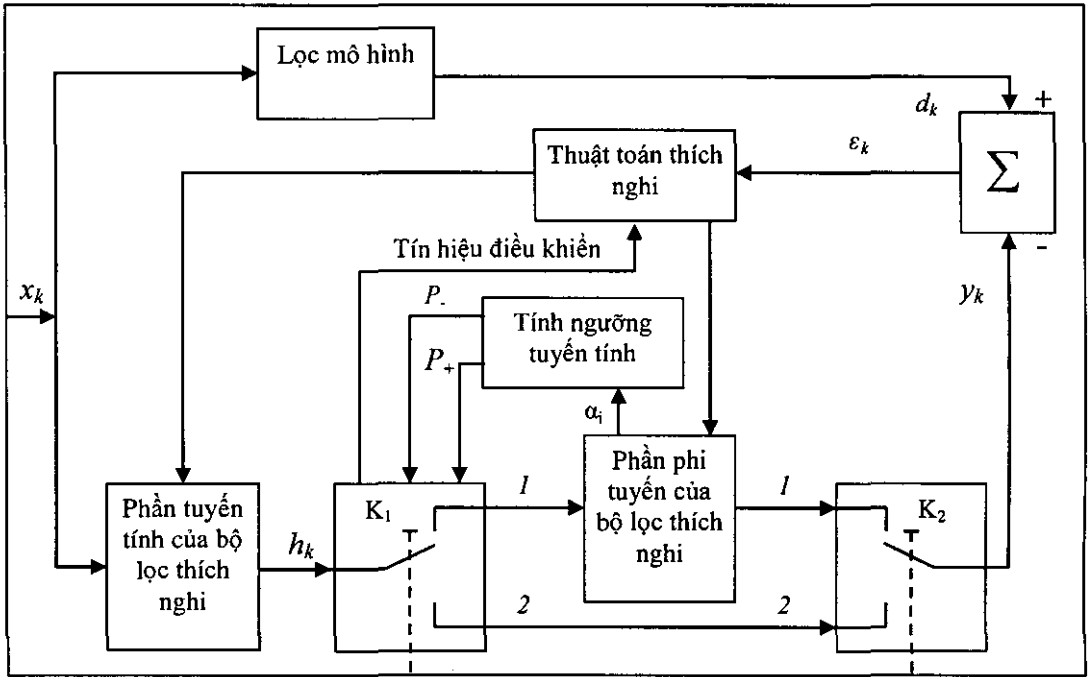
$\left. \frac{d\hat{F}(s)}{ds} \right|_{h_k}$ trong (4) đối với giá trị gradient hàm công tác của phần tuyến tính ở bộ lọc thích nghi phi tuyến không đệ quy.

Phân tích thuật toán trên cho thấy, khoảng hội tụ quá trình thích nghi của của bộ lọc mô hình phi tuyến tăng đột biến so với sự thích nghi của bộ lọc tuyến tính. Để thu hẹp khoảng hội tụ nên đưa ra một trị số là ngưỡng tuyến tính, có tác dụng hạn chế khoảng giá trị tín hiệu đầu ra từ phần tuyến tính của bộ lọc thích nghi. Với sai số cho trước của phép biến đổi phi tuyến, các ngưỡng tuyến tính đó có thể được thay thế bằng bộ khuếch đại tuyến tính. Tùy theo thông tin tiên nghiệm về dạng biến đổi phi tuyến, khuếch đại tuyến tính có thể là hằng, có thể là giá trị thích nghi, nhưng đều tính được trên cơ sở giá trị hàm biến đổi phi tuyến và giá trị hàm thích nghi. Nếu tính đến các ngưỡng thích nghi của tuyến tính, sơ đồ cấu trúc thích nghi sẽ có dạng hình 1.

Thuật toán làm việc của bộ tính ngưỡng độ tuyến tính là xác định hai giá trị tín hiệu đầu ra của phần tuyến tính, trong giới hạn đó (với sai số định trước) có thể thay phần phi tuyến bằng bộ khuếch đại tuyến tính. Nếu hàm số phần phi tuyến là đa thức như biểu thức (1), hệ số khuếch đại của bộ khuếch đại tuyến tính $K_{kd} = \alpha_i$, còn các giá trị ngưỡng tuyến tính có thể nhận được từ phân tích các hệ số thích nghi của phần phi tuyến α_i ($i = 1, 2, \dots, M$) theo thuật toán sau đây:

$$\delta \geq \left| \sum_{j=1}^M \alpha_j h_k^j - \alpha_j h_k \right| \rightarrow P_{\pm} = h_k, \quad (6)$$

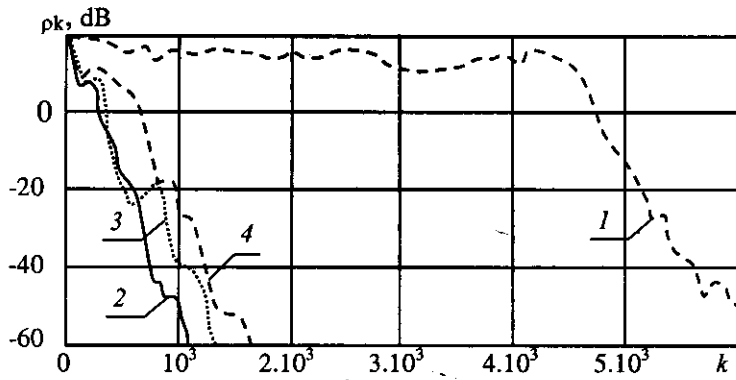
trong đó δ : mức sai lệch cho phép của đặc tuyến bộ biến đổi phi tuyến và bộ khuếch đại tuyến tính.



Hình 1. Sơ đồ cấu trúc thích nghi có bộ tính ngưỡng tuyến tính

Các thiết bị chuyển mạch K1 và K2 làm việc đồng bộ với nhau và chia trực dương của các giá trị tín hiệu h_k ($k = 0, 1, 2, \dots$) thành dải $[P_-, P_+]$ và $(-\infty, P_-) \cup (P_+, +\infty)$. Nếu giá trị tức thời của tín hiệu thuộc dải thứ nhất, tức $h_k \in [P_-, P_+]$, thiết bị chuyển mạch sẽ được bật sang vị trí "1", tín hiệu điều khiển được tách trên thuật toán thích nghi tương ứng các công thức (2)-(5). Nếu $h_k \notin [P_-, P_+]$, thiết bị chuyển mạch được bật sang vị trí "2" và thuật toán thích nghi làm việc theo phương pháp bình phương nhỏ nhất [6], tức là trong biểu thức (4) $\hat{\mathbf{V}}_k^w = -2\varepsilon_k \mathbf{X}_k$. Khi đó tính thích nghi của các hệ số đa thức phản phi tuyến ở bộ lọc thích nghi luôn được thực hiện, tức là không phụ thuộc vào vị trí của thiết bị chuyển mạch.

Kết quả nghiên cứu các quá trình hội tụ cho bộ lọc mô hình với bộ biến đổi phi tuyến dạng đa thức bậc ba, tức $M = 3$, khi lấy trung bình theo 100 triển khai được tổng hợp ở hình 2, trong đó $\rho_k = 10 \lg \overline{\varepsilon_k^2}$.



Hình 2. Bộ lọc mô hình với bộ biến đổi phi tuyến dạng đa thức bậc ba
 Các đường cong trên hình vẽ:

1: Thuật toán thích nghi không có ngưỡng tuyến tính;

2: Thuật toán thích nghi có ngưỡng tuyến tính thích nghi; 3: Thuật toán thích nghi với ngưỡng tuyến tính hằng số cao $|P_{\pm}| = 1$;

4: Thuật toán thích nghi với ngưỡng tuyến tính hằng số thấp $|P_{\pm}| = 0,05$

Phân tích các kết quả trên cho thấy, nếu so sánh độ hội tụ, thuật toán thích nghi không sử dụng ngưỡng tuyến tính kém hơn thuật toán thích nghi có sử dụng ngưỡng tuyến tính. Thuật toán thích nghi sử dụng ngưỡng tuyến tính thích nghi có dạng phức tạp hơn so với thuật toán thích nghi khi ngưỡng tuyến tính là hằng, nhưng lại cho phép có được độ hội tụ cực đại.

Tóm lại, các kết quả thực nghiệm cho thấy khi tính toán hệ số của bộ lọc phi tuyến không đệ quy nên sử dụng thuật toán có ngưỡng tuyến tính thích nghi.

Để minh họa sử dụng thuật toán thích nghi tương ứng với các công thức (2) - (5) ta xét bài toán lọc phi tuyến tín hiệu phi Gausse trên nền nhiễu tạp cộng không Gausse. Giả sử $x_s(k)$ - chuỗi không Gausse dừng ngẫu nhiên với giá trị trung bình bằng không, tán xạ bằng một và hàm tương quan $R_s(n)$. Nhiễu tạp $x_n(k)$ - quá trình ngẫu nhiên Gausse dừng, đối xứng không phụ thuộc $x_s(k)$ với phương sai bằng một và hàm tương quan:

$$R_N(n) = R_s(n). \quad (7)$$

Tín hiệu đầu vào của bộ lọc thích nghi phi tuyến được cho dưới dạng:

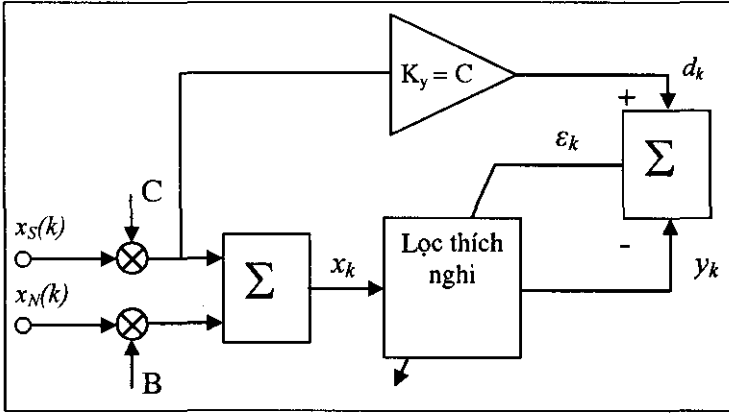
$$x(k) = Cx_s(k) + Bx_n(k); \quad C^2 + B^2 = 1. \quad (8)$$

Tối ưu hoá các vectơ hệ số \mathbf{A} và \mathbf{W} của toán tử phi tuyến (1) được thực hiện tương ứng với chỉ tiêu sai số trung bình bình phương nhỏ nhất:

$$\overline{\varepsilon^2} = E \left\{ \left[x_s(k) - F[x(k), \mathbf{A}, \mathbf{W}] \right]^2 \right\} \xrightarrow{\mathbf{A}, \mathbf{W}} \min, \quad (9)$$

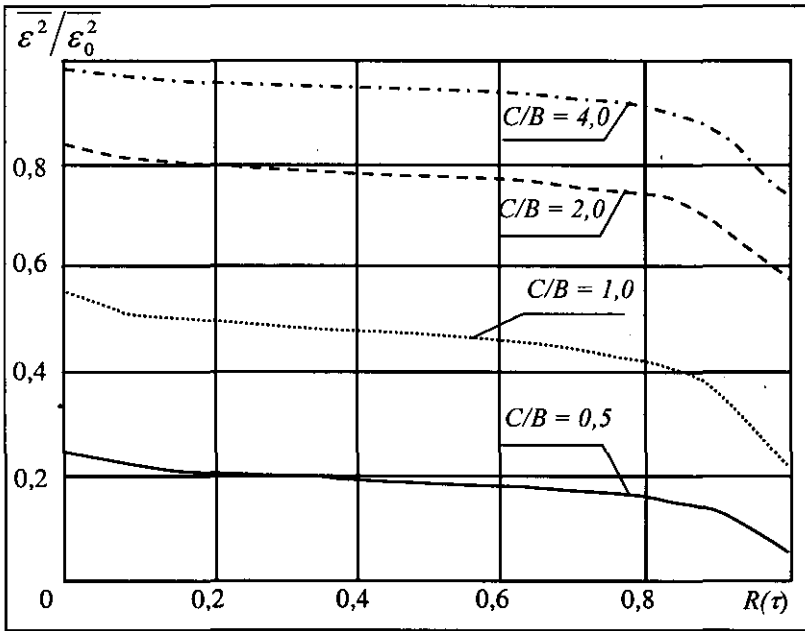
trong đó $E\{\bullet\}$ - kì vọng toán học của đại lượng ngẫu nhiên.

Sơ đồ thích nghi tối ưu theo tiêu chuẩn (9) của bộ lọc thích nghi phi tuyến được vẽ ở hình 3, bộ khuếch đại tuyến tính có hệ số khuếch đại $K_y = C$ được đưa ra để bù trừ tín hiệu có ích trên đầu ra của bộ lọc tuyến tính tối ưu theo chỉ tiêu sai số trung bình bình phương nhỏ nhất.



Hình 3. Sơ đồ thích nghi tối ưu

Quan hệ giữa sai số trung bình bình phương $\overline{\varepsilon^2}$ và hệ số tương quan cách đoạn chu kỳ $R(\tau) = M\{x_s(k)x_s(k+1)\}$ ở sơ đồ thích nghi đã xét được thể hiện trên hình 4, trong đó $\overline{\varepsilon^2}$ - sai số trung bình bình phương trên đầu ra bộ lọc tuyến tính tối ưu không thích nghi.



Hình 4. Quan hệ giữa sai số trung bình bình phương $\overline{\varepsilon^2}$ và hệ số tương quan cách đoạn chu kỳ

Mối quan hệ trên cho thấy, so với bộ lọc tuyến tính tối ưu, việc sử dụng bộ lọc thích nghi phi tuyến cho phép giảm sai số trung bình bình phương của tín hiệu đầu ra. Nếu tăng các mối liên hệ tương quan trong tín hiệu đầu vào hay giảm tỉ lệ tín/nhiều, hiệu quả đạt được trong đại lượng sai số trung bình bình phương cũng tăng. Nguyên nhân là khi thoả mãn điều kiện (7), (8), bộ khuếch đại với hệ số khuếch đại theo công suất $K = C^2$ chính là bộ lọc tuyến tính tối ưu. Thí dụ, khi có tỉ lệ tín/nhiều cao trên đầu vào, bộ lọc thích nghi phi tuyến suy biến thành bộ lọc tuyến tính, còn khi tỉ lệ tín/nhiều thấp, các tính chất phi tuyến của bộ lọc thích nghi càng thể hiện rõ hơn, kết quả làm suy yếu thành phần nhiễu trong hỗn hợp thích nghi đầu vào của tín hiệu và nhiễu tạp.

3. KẾT LUẬN

Bài viết trên đây đã xây dựng thành công thuật toán có hiệu quả tạo thích nghi cho các bộ lọc phi tuyến không đệ quy, đã chứng minh khả năng vượt trội của lọc phi tuyến các nhiễu cận tín hiệu so với lọc tuyến tính tối ưu. Thuật toán tính hệ số các bộ lọc phi tuyến không đệ quy dựa trên phương pháp bình phương nhỏ nhất kết hợp sử dụng phép tuyến tính hóa thông qua các ngưỡng thích nghi của sự tuyến tính. Trong quá trình nghiên cứu đã chứng minh được việc sử dụng các ngưỡng thích nghi đảm bảo tuyến tính trong thuật toán lọc phi tuyến không đệ quy cho phép giảm đáng kể thời gian thích nghi so với các thuật toán không tính đến tính chất tuyến tính của bộ lọc, nhất là khi tác động đầu vào nhỏ.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Nguyễn Thế Hiếu - Thuật toán lập phi tuyến cho bộ giải điều chế đa người dùng, Tạp chí Thông tin, Khoa học công nghệ, Bộ Thông tin và Truyền thông **20** (3) (2008) 2008.
2. Nguyễn Thế Hiếu - Thực hiện thuật toán phân tích Wavelet trên cơ sở lọc đệ quy, Tạp chí Nghiên cứu khoa học Kỹ thuật Quân sự **24** (2008).
3. John G. Proakis, Masoud Salehi - Digital Communications, Fifth Edition, Raw- Hill International Edition, 2008.
4. Марля-мл. С. Л. - Цифровой спектральный анализ и его приложения, М.: Мир, 1968.
5. Адаптивные фильтры / Под ред. К. Ф. Н. Коуэна, П. М. Гранта. - М.: Мир, 1988.
6. Уидроу Б., Стирня С. - Адаптивная обработка сигналов, Пер. с англ. Ю. К. Сальникова / Под ред. В. В. Шахгитдяна. - М.: Радио и связь, 1989.
7. Кириллов С. Н., Степанов М. В. - Комбинированный критерий оптимизации коэффициентов адаптивных фильтров с конечной импульсной характеристикой, - Радиотехника, (2) (1999).
8. Ланнэ А. А. - Нелинейные полиномиальные цифровые фильтры, Цифровая обработка сигналов (1) (1999)

SUMMARY

BUILDING AN ADAPTIVE ALGORITHM FOR NON-LINEAR NONRECURSIVE FILTERS BY LEAST SQUARES METHOD

The algorithm of an evaluation of factors of nonrecursive filters, founded on the least squares method, with application of linearization by means of adaptive thresholds of linearity is offered, is demonstrated, the introduction that of adaptive thresholds of linearity in algorithm of identification of the non-linear nonrecursive filter allows considerably to reduce time of adapting as contrasted to by algorithms which are not taking into account linear properties of the filter at small input action. In the end, the offered algorithm allows to receive better quality of a filtration non- Gaussian signals on a background additive a noise of Gaussian as contrasted to by optimum linear filters of the Wiener.

From results that proved in the article, an algorithm with capability of causing an adaptive effect for nonrecursive filters was completely built. It showed a great capability of the non-linear nonrecursive filter in comparison with the optimum linear filter in nearby - signal noise elimination.

Địa chỉ:

Nhận bài ngày 10 tháng 3 năm 2008

Viện Điện tử, Viễn thông,

Viện Khoa học và Công nghệ quân sự.