

STUDY OF LINEARLY CONSTRAINED LMS FILTER FOR CANCELLING NOISE IN RADAR SIGNAL PROCESSING

Mac Quoc Khanh

Weapon Institute - Vietnam Defense Industry

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 08/9/2024</p> <p>Revised: 29/10/2024</p> <p>Published: 30/10/2024</p>	<p>In electronic warfare, accurate estimation of signal parameters plays an important role in helping to correctly identify radiation sources and determine their operating modes. On the other hand, the signal at the receiver consists of echo and noisy signals. Therefore, to improve accuracy when estimating signal parameters, this article studies the linearly constrained last mean square algorithm (LC-LMS) for reducing noise in signal processing and verifies with a generated radar signal by generator E8267D. The effectiveness of the LC-LMS filter is evaluated through two main steps: the first step provides a simulation of the LC-LMS and compares it with LMS and its variants, such as normalized LMS (NLMS) and leaky LMS (LLMS), with simulated radar signals such as continuous waveforms and radar pulses in a MATLAB environment. The second step provides verification of the LC-LMS filter by generating radar signals from vector signal generator E8267D. Simulation results show that the LC-LMS filter has better noise filtering than the LMS and its variants, such as the NLMS and LLMS. Additionally, the validation results confirm that the LC-LMS filter can be applied to real-time radar signals with a signal-to-noise ratio (SNR) greater than 0 dB.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Linearly constrained filter</p> <p>Signal generator</p> <p>Signal to noise ratio</p> <p>Radar signals</p> <p>Root mean square error</p>	

NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG BỘ LỌC LMS TUYẾN TÍNH ĐỂ KHỬ NHIỀU TRONG XỬ LÝ TÍN HIỆU RA ĐA

Mac Quốc Khánh

Viện Vũ khí - Tổng cục Công nghiệp Quốc phòng

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 08/9/2024</p> <p>Ngày hoàn thiện: 29/10/2024</p> <p>Ngày đăng: 30/10/2024</p>	<p>Trong tác chiến điện tử, ước lượng chính xác các tham số tín hiệu đóng vai trò quan trọng giúp nhận dạng đúng các nguồn phát xạ và đưa ra các chế độ hoạt động của nó. Mặt khác, tín hiệu tại đầu vào máy thu bao gồm có các tín hiệu có ích và nhiễu. Chính vì vậy để nâng cao độ chính xác khi ước lượng các tham số tín hiệu, trong bài báo này tác giả nghiên cứu xây dựng bộ lọc tuyến tính thích nghi trung bình (LC-LMS) cho bài toán lọc nhiễu các tín hiệu ra đa. Hiệu quả của bộ lọc LC-LMS được đánh giá qua 2 bước chính: Bước một mô phỏng bộ lọc trên phần mềm MATLAB và so sánh với các bộ LMS và các cải tiến của LMS như: LMS chuẩn hóa (NLMS) hay LMS xấp xỉ (LLMS). Bước 2 kiểm chứng hiệu quả của LC-LMS với các tín hiệu từ máy phát sóng chuẩn E8267D. Kết quả mô phỏng cho thấy bộ lọc LC-LMS có khả năng lọc nhiễu tốt hơn so với các bộ lọc LMS và các bộ LMS cải tiến như: NLMS và LLMS. Ngoài ra, các kết quả thực nghiệm khẳng định rằng bộ lọc LC-LMS thích hợp xử lý các tín hiệu thời gian thực với tỉ số tín/ tạp lớn hơn 0 dB.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Bộ lọc LMS tuyến tính</p> <p>Máy phát sóng chuẩn</p> <p>Tỉ số tín/tạp</p> <p>Tín hiệu ra đa</p> <p>Sai số trung bình bình phương</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.11083>

Email: mkhanh2608@gmail.com

<http://jst.tnu.edu.vn>

175

Email: jst@tnu.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong chiến tranh hiện đại, hệ thống ra đa thụ động đóng vai trò quan trọng và các kết quả phân tích xử lý tín hiệu của hệ thống thụ động cung cấp một bức tranh toàn cảnh về điện từ trường, hỗ trợ người chỉ huy đưa ra các quyết định kịp thời để nâng cao hiệu quả chiến đấu và khả năng chiến thắng. Các nhiệm vụ chính của hệ thống ra đa thụ động bao gồm:

- Định hướng và định vị nguồn phát xạ;
- Phân loại và nhận dạng các nguồn phát xạ [1], [2].

Các phương pháp thông dụng được dùng để xử lý tín hiệu bao gồm có 3 nhóm chính: Nhóm thứ nhất là xử lý tín hiệu trên miền thời gian, nhóm phương pháp thứ 2 là xử lý tín hiệu trên miền tần số và nhóm giải pháp cuối cùng là xử lý tín hiệu trên cả hai miền thời gian và tần số [3], [4].

Các phương pháp tiêu biểu để xử lý tín hiệu trên miền tần số là biến đổi Fourier nhanh (fast Fourier transform – FFT) hay biến đổi Z [5], [6]. Hạn chế lớn nhất của nhóm phương pháp này là chỉ quan sát được tín hiệu trên miền tần số và khó khăn khi xác định sự biến thiên tần số tín hiệu theo thời gian hay nói cách khác là nhận dạng các tín hiệu điều chế. Để khắc phục các hạn chế nói trên, các phương pháp xử lý tín hiệu trên cả hai miền thời gian- tần số đã được sử dụng. Các phương pháp này cung cấp thông tin tức thời về sự thay đổi tần số theo thời gian. Các kết quả phân tích này được gọi là ảnh thời gian – tần số của tín hiệu và nó được sử dụng như đầu vào của các bộ nhận dạng. Các phương pháp xử lý tín hiệu trên cả hai miền thời gian - tần số thông dụng bao gồm có biến đổi Fourier thời gian ngắn (short time Fourier transform – STFT) [7], phân bố Wigner-Ville (Wigner-Ville distribution – WVD) [8] hay biến đổi Wavelet liên tục (continuous Wavelet transform – CWT) [9]. Hạn chế của các phương pháp này là yêu cầu thời gian xử lý lớn và khó xử lý đối với tín hiệu có công suất thấp.

Mặt khác, để tăng độ chính xác khi ước lượng tham số tín hiệu, các hệ thống thụ động thường sử dụng kết hợp với các phương pháp xử lý trên miền thời gian như: các bộ lọc thông thấp, lọc thông cao hay lọc thông dải [10] để loại bỏ các tần số không mong muốn. Hơn nữa, các hệ thống thụ động còn sử dụng các bộ lọc số như FIR và IIR để hạn chế tác động của nhiễu và tăng tỉ số tín trên tạp âm (SNR) [11]. Hiện nay ngoài các bộ lọc số FIR và IIR, hệ thống còn sử dụng các bộ lọc khác như Wiener [12], LMS [13] và các biến thể của LMS như: LMS chuẩn hóa (Normalized LMS - NLMS) hoặc LLMS (leaky LMS) [14]. Hạn chế chung của các bộ lọc nói trên đó là chưa triệt để giải quyết bài toán tối ưu sai số trung bình nhỏ nhất. Để giải quyết bài toán trên, bài báo này xây dựng cơ sở lý thuyết bộ lọc tuyến tính thích nghi LMS (linearly constrained LMS – LC-LMS) để nâng cao chất lượng lọc nhiễu tín hiệu của hệ thống thụ động. Hiệu quả của bộ lọc LC-LMS được đánh giá qua 2 bước chính. Bước 1 mô phỏng đánh giá hiệu quả của bộ lọc LC-LMS so sánh với các bộ lọc LMS, NLMS và LLMS trên phần mềm MATLAB. Bước 2 thực hiện kiểm chứng hiệu quả của bộ LC-LMS bằng các tín hiệu từ máy phát sóng chuẩn E8267D.

Để giải quyết các vấn đề trên, nội dung của bài báo được bố cục gồm có 3 phần chính. Phần 2 trình bày cơ sở lý thuyết của bộ lọc LC-LMS. Phần 3 trình bày các kết quả mô phỏng đánh giá hiệu quả của bộ lọc LC-LMS so sánh với các bộ lọc khác sử dụng phần mềm MATLAB và kết quả kiểm tra với các tín hiệu từ máy phát sóng chuẩn E8267D. Các kết luận tổng kết và hướng nghiên cứu mới được trình bày trong phần 4 của bài báo.

2. Cơ sở lý thuyết của bộ lọc LMS tuyến tính

Trong trình sát xử lý tín hiệu [15], ngoài các bộ lọc số FIR, IIR, các hệ thống thụ động sử dụng kết hợp các bộ lọc thích nghi như Wiener, Newton's và LMS. Hạn chế chung của các bộ lọc nói trên đó là chưa giải quyết bài toán tối ưu hóa giá trị sai số trung bình bình phương (Mean Square Error – MSE). Mặt khác, tham số MSE đóng vai trò quan trọng và đặc biệt là giải quyết bài toán công suất đầu ra của các bộ lọc. Để giải quyết bài toán trên, bài báo này trình bày bộ lọc LC-LMS mục đích tối ưu hóa tham số MSE. Sai số giữa tín hiệu đầu ra bộ lọc và tín hiệu không có nhiễu được định nghĩa theo (1):

$$e(n) = d(n) - \mathbf{w}^T(n)\mathbf{x}(n) \quad (1)$$

trong đó $e(n)$ là sai số giữa tín hiệu đầu ra bộ lọc và tín hiệu không có nhiễu và $d(n)$ là tín hiệu đầu ra của bộ lọc, $\mathbf{w}(n)$ là ma trận trọng số, $\mathbf{w}^T(n)$ là ma trận chuyển vị của $\mathbf{w}(n)$ và $\mathbf{x}(n)$ tín hiệu với nhiễu. Mặt khác, đặt ẩn phụ (2)

$$\mathbf{c}^T \mathbf{w} = a \quad (2)$$

trong đó \mathbf{c} là vector cho trước, a là hằng số. Áp dụng phương pháp nhân tử Lagrange cho hàm sai số trung bình bình phương J_c theo (3):

$$J_c = E\{e^2(n)\} + \lambda(\mathbf{c}^T \mathbf{w} - a) \quad (3)$$

với λ là nhân tử Lagrange. Để thuận tiện cho tính toán, chúng ta đặt giả thuyết (4):

$$\nabla_{\mathbf{w}} J_c = 0 \text{ và } \frac{\partial J_c}{\partial \lambda} = 0 \quad (4)$$

ở đây biểu thức $\frac{\partial J_c}{\partial \lambda} = 0$ biểu diễn tính tuyến tính của hàm sai số trung bình bình phương. Thay giá trị sai số $e(n)$ từ biểu thức (1) vào biểu thức (3) ta có:

$$J_c = J_{\min} + \xi^T \mathbf{R}_x \xi + \lambda(\mathbf{c}^T \xi - a') \quad (5)$$

với

$$\xi(n) = \mathbf{w}(n) - \mathbf{w}^0, \quad \mathbf{w}^0 = \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{p}_{dx} \text{ và } \mathbf{R}_x = E\{\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)\} \quad (6)$$

và

$$\mathbf{p}_{dx} = E\{d(n)\mathbf{x}(n)\}, \quad a' = a - \mathbf{c}^T \mathbf{w}^0 \quad (7)$$

Thay thế $\nabla_{\mathbf{w}} J_c = 0$ và $\frac{\partial J_c}{\partial \lambda} = 0$ vào biểu thức (5) chúng ta có:

$$\nabla_{\xi} J_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_c}{\partial \xi_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial J_c}{\partial \xi_M} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\xi_1 r_1 + 2\xi_2 r_2 + L + 2\xi_M r_M \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 2\xi_1 r_M + 2\xi_2 r_{M-1} + L + 2\xi_M r_1 \end{bmatrix} + \lambda \begin{bmatrix} c_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ c_M \end{bmatrix} = 0 \quad (8)$$

Công thức (8) có thể viết lại dưới dạng ma trận (9):

$$2\mathbf{R}_x \xi_c^0 + \lambda \mathbf{c} = 0 \quad (9)$$

trong đó ξ_c^0 là giá trị tối ưu của vector ξ . Ngoài ra, với điều kiện tuyến tính (10):

$$\frac{\partial J_c}{\partial \lambda} = \mathbf{c}^T \xi_c^0 - a' = 0 \quad (10)$$

Giải hệ phương trình (9) và (10) với các ẩn λ và ξ_c^0 ta được:

$$\lambda = -\frac{2a'}{\mathbf{c}^T \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{c}} \text{ và } \xi_c^0 = \frac{a' \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{c}}{\mathbf{c}^T \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{c}} \quad (11)$$

Thay giá trị λ vào biểu thức (5) để tìm giá trị nhỏ nhất của J_c ta có:

$$J_c = J_{\min} + \frac{a'^2}{\mathbf{c}^T \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{c}} \quad (12)$$

với $\mathbf{w}(n) = \xi(n) + \mathbf{w}^0$ thay vào biểu thức (11) ta thu được:

$$\mathbf{w}_c^0 = \mathbf{w}^0 + \frac{a' \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{c}}{\mathbf{c}^T \mathbf{R}_x^{-1} \mathbf{c}} \quad (13)$$

Phương trình (2) được giải qua 2 bước:

Bước 1:

$$\mathbf{w}'(n) = \mathbf{w}(n) + 2\mu e(n) \mathbf{x}(n) \quad (14)$$

Bước 2:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \eta(n) \quad (15)$$

trong đó $\eta(n)$ thỏa mãn điều kiện $\mathbf{c}^T \mathbf{w}(n+1) = a$ với $\eta^T(n) \eta(n)$ có giá trị nhỏ nhất. Để thỏa mãn điều kiện trên, $\eta(n)$ được chọn theo phương pháp nhân tử Lagrange (16):

$$\eta(n) = \frac{a - \mathbf{c}^T \mathbf{w}'(n)}{\mathbf{c}^T \mathbf{c}} \mathbf{c} \quad (16)$$

Cuối cùng, thay giá trị $\eta(n)$ từ biểu thức (16) vào (15)::

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}'(n) + \frac{a - \mathbf{c}^T \mathbf{w}'(n)}{\mathbf{c}^T \mathbf{c}} \mathbf{c} \quad (17)$$

Tín hiệu đầu ra của bộ lọc $y(n)$ được tính theo công thức (18):

$$y(n) = \mathbf{w}^T(n) \mathbf{x}(n) \quad (18)$$

Bảng 1. Các tham số của bộ lọc

Bộ lọc	Tham số	Giá trị
Bộ lọc LMS	Kích thước bộ lọc M (-)	32
	Step size	0,01
Bộ lọc LLMS	Kích thước bộ lọc M (-)	32
	Hệ số cố định nhỏ nhất a (-)	0,25
Bộ lọc NLMS	Kích thước bộ lọc M (-)	32
	Hệ số cố định ϵ (-)	0,5
Bộ lọc LC-LMS	Kích thước bộ lọc M (-)	32
	Hệ số cố định a, c (-)	0,8 và 1

3. Kết quả và bàn luận

Hiệu quả của bộ lọc LC-LMS được đánh giá qua hai bước. Bước 1 đánh giá thông qua các tín hiệu mô phỏng trên MATLAB và so sánh với các bộ lọc NLMS và VS-LMS. Bước 2 tiến hành kiểm chứng hiệu quả của bộ lọc LC-LMS với các tín hiệu từ máy phát sóng chuẩn E8267D.

3.1. Kết quả đánh giá với các tín hiệu mô phỏng trong MATLAB

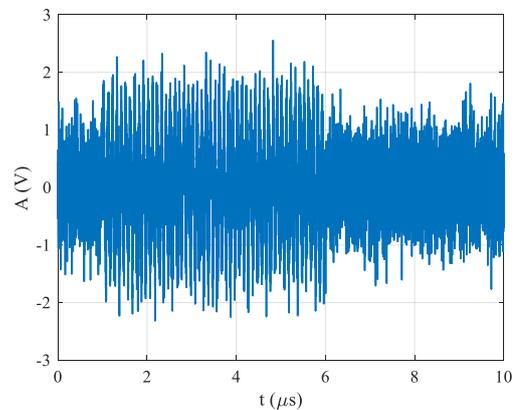
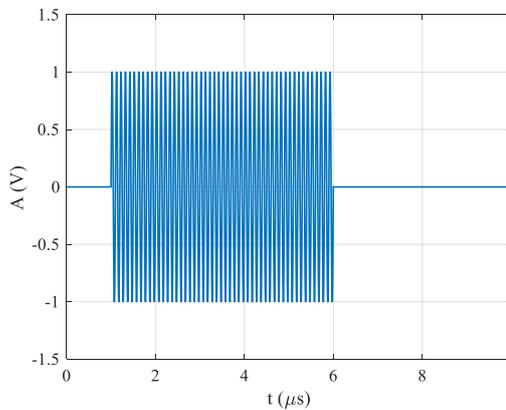
Trong phần này, tác giả tiến hành so sánh đánh giá hiệu quả của bộ LC-LMS với các bộ lọc khác như LMS, LL-LMS và NLMS với 2 dạng tín hiệu: tín hiệu liên tục (CW) và tín hiệu xung đa trên phần mềm MATLAB. Các tham số của các bộ lọc sử dụng trong mô phỏng được tổng hợp trong Bảng 1 và tham số tín hiệu được liệt kê trong Bảng 2.

3.1.1. Kiểm tra với tín hiệu xung ra đa

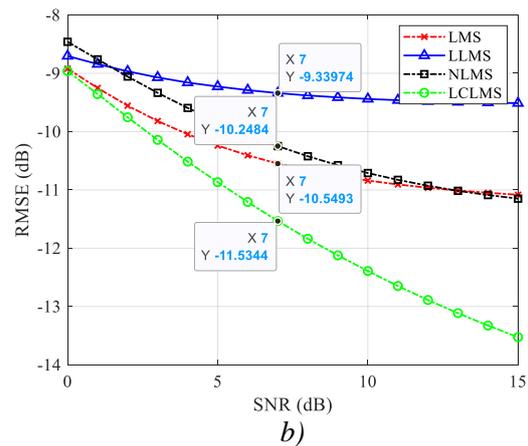
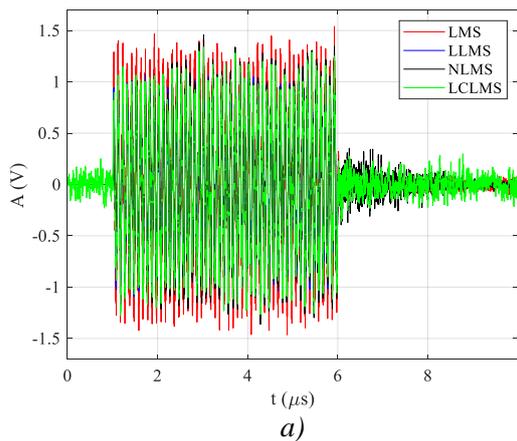
Hình 1 minh họa tín hiệu xung ra đa khi không có nhiễu (Hình 1a) và khi có nhiễu với tỉ số SNR = 0 dB (Hình 1b). Hình 1b cho thấy khi có nhiễu dẫn tới sai số trong ước lượng các tham số thời gian của tín hiệu (độ rộng xung τ , chu kỳ lặp T_{op}).

Bảng 2. Tham số tín hiệu mô phỏng

Tín hiệu	Các tham số tín hiệu	Giá trị
Tín hiệu liên tục (CW)	Tần số sóng mang f_c (MHz)	5
	Tần số sóng mang f_c (MHz)	5
Xung ra đa	Độ rộng xung τ (μ s)	5
	Chu kỳ lặp T_{op} (μ s)	10
Các tham số chung	Tần số lấy mẫu f_s (MHz)	1000
	Tỉ số tín/tạp âm SNR (dB)	0 đến 15



Hình 1. Tín hiệu xung ra đa: (a) không có nhiễu và (b) SNR = 0 dB



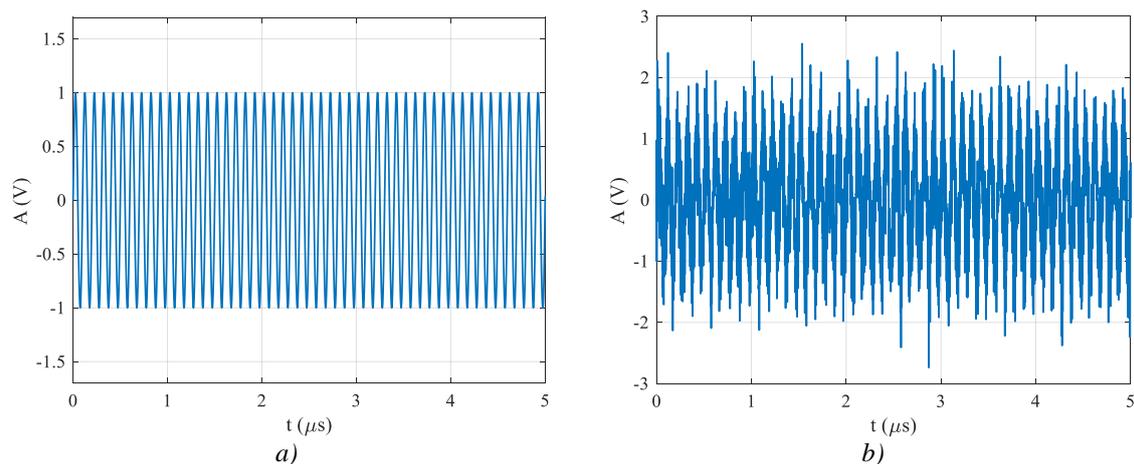
Hình 2. Các tín hiệu sau lọc nhiễu và sai số trung bình bình phương: (a) tín hiệu đã lọc nhiễu; (b) sai số trung bình bình phương (RMSE) phụ thuộc vào tỉ số SNR

Hình 2a cho thấy, tất cả các bộ lọc có khả năng lọc bỏ nhiễu và làm tăng tỉ số SNR hay nói cách khác là giúp tăng độ chính xác khi ước lượng tham số thời gian của tín hiệu. Mặc khác, Hình 2a cho thấy các bộ lọc có hiệu suất khác nhau. Hình 2b thể hiện sai số trung bình bình phương (RMSE) của các bộ lọc phụ thuộc vào tỉ số SNR. Hình 2b cho thấy, tại SNR = 7dB,

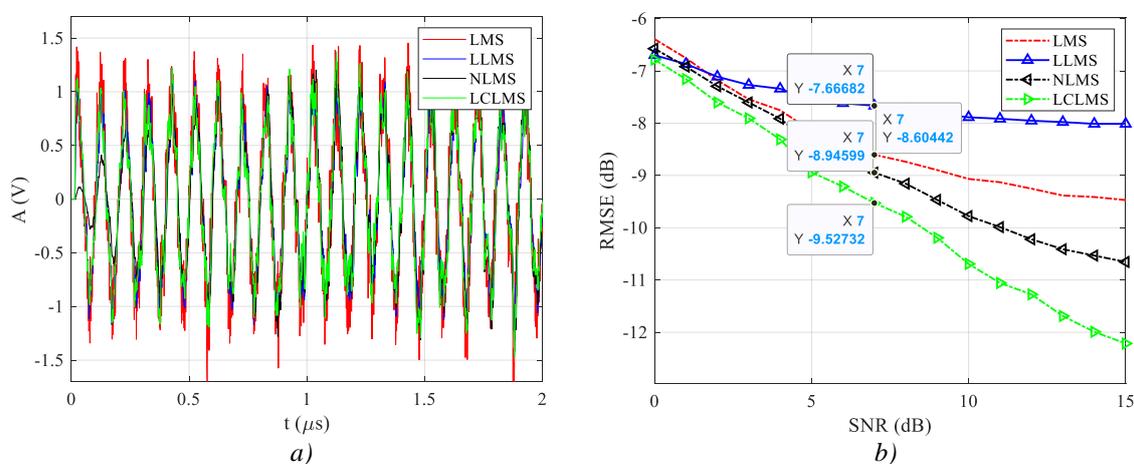
LC-LMS cho RMSE nhỏ nhất (RMSE = -11,53dB, đường màu xanh lá), tiếp theo đó là LMS (RMSE = -10,55dB, đường màu đỏ), NLMS (RMSE = -10,25dB, đường màu đen) và LLMS có RMSE cao nhất (RMSE = -9,33dB, đường màu xanh lam).

3.1.2. Kiểm tra với tín hiệu liên tục

Tương tự, Hình 3a ví dụ minh họa tín hiệu liên tục (CW) khi không có nhiễu và Hình 3b là tín hiệu CW với SNR = 0 dB. Hình 3b cho thấy khi tỉ số SNR thấp dẫn tới khó khăn khi quan sát dạng tín hiệu trên miền thời gian và ước lượng tham số tín hiệu. Tín hiệu đầu ra của các bộ lọc và RMSE phụ thuộc vào SNR được trình bày trên Hình 4.



Hình 3. Tín hiệu CW: (a) không có nhiễu và (b) SNR = 0 dB



Hình 4. Các tín hiệu sau lọc nhiễu và RMSE: (a) tín hiệu đã lọc nhiễu và (b) RMSE phụ thuộc SNR

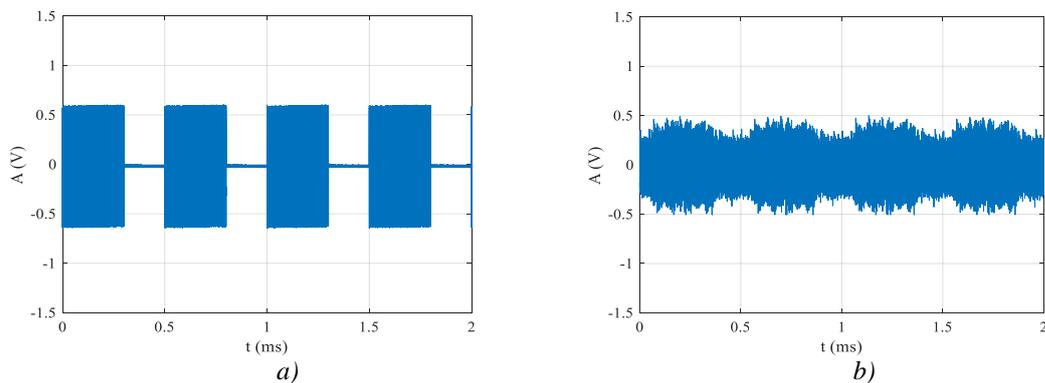
Hình 4a cho thấy, các bộ lọc LMS và các cải tiến của LMS đều có khả năng lọc bỏ nhiễu với tín hiệu CW. Hình 4b cho thấy, với cùng SNR = 7 dB, LC-LMS cho RMSE nhỏ nhất (RMSE = -9,53 dB), tiếp theo NLMS (RMSE = -8,95 dB) và LMS (RMSE = -8,60 dB) và LLMS cho RMSE lớn nhất (RMSE = -7,67 dB). Hay nói cách khác, LC-LMS có hiệu quả lọc nhiễu tốt nhất (đường xanh lá), tiếp theo NLMS (đường màu đen), LMS (đường màu đỏ) và hiệu quả lọc nhiễu thấp nhất là LLMS (đường màu xanh lam). Từ các kết quả mô phỏng cho thấy LC-LMS cho hiệu quả lọc nhiễu tốt hơn so với LMS và các cải tiến khác như NLMS và LLMS.

3.2. Kết quả thực nghiệm với tín hiệu từ máy phát sóng chuẩn E8267D

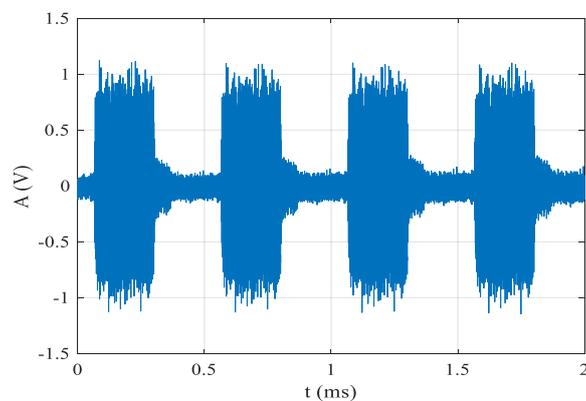
Trong phần này, tác giả tiến hành đánh giá hiệu quả của bộ LC-LMS với các tín hiệu từ máy phát sóng chuẩn E8267D. Sơ đồ thực nghiệm phát tín hiệu ra đa từ máy phát sóng E8267D được minh họa trên Hình 5. Máy phát sóng chuẩn E8267D làm việc trong dải tần từ 20 kHz đến 20 GHz và có khả năng phát các tín hiệu ra đa như: CW, xung ra đa, AM, FM, LFM.



Hình 5. Sơ đồ thực nghiệm



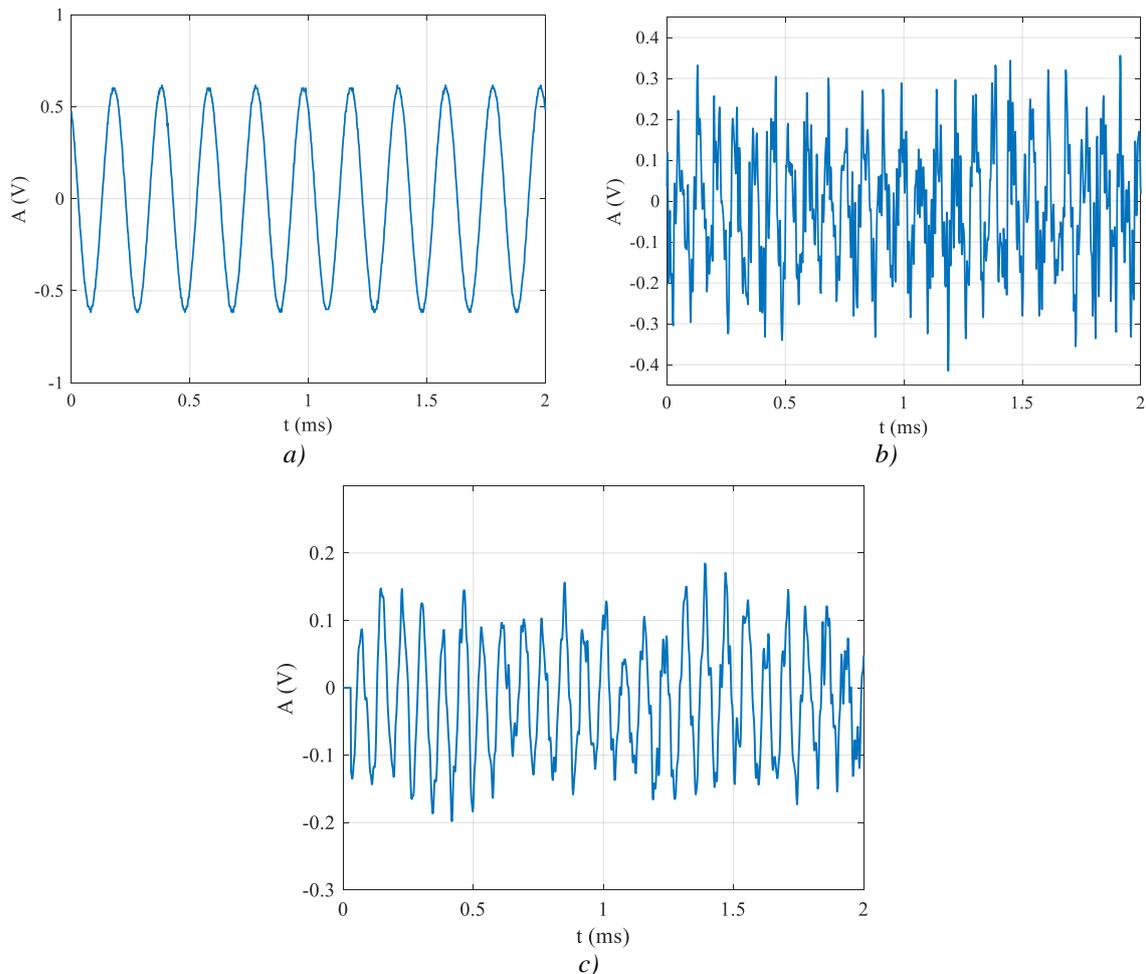
Hình 6. Tín hiệu xung ra đa: (a) không có nhiễu và (b) SNR = 0 dB



Hình 7. Tín hiệu xung ra đa sau bộ lọc LC-LMS

3.2.1. Kiểm chứng với tín hiệu xung ra đa

Hình 6a minh họa tín hiệu xung ra đa phát ra khi không có nhiễu từ máy phát sóng chuẩn E8267D. Hình 6b minh họa tín hiệu xung ra đa với $SNR = 0dB$ và cho thấy khi có nhiễu tác động dẫn tới giảm độ chính xác khi ước lượng các tham số thời gian của tín hiệu. Hình 7 là kết quả lọc nhiễu của bộ lọc LC-LMS và cho thấy rằng bộ lọc LC-LMS có khả năng loại bỏ các nhiễu và tăng độ chính xác khi ước lượng tham số thời gian của tín hiệu (độ rộng xung và chu kỳ lặp) với $RMSE = 0,22 (-)$.



Hình 8. Tín hiệu CW: (a) không có nhiễu; (b) $SNR = 0 dB$ và (c) tín hiệu sau lọc

3.2.2. Kiểm chứng với tín hiệu CW

Trong phần này, tác giả tiến hành kiểm tra hiệu quả của bộ lọc LC-LMS với tín hiệu CW phát ra từ máy phát sóng chuẩn E8267D. Hình 8a minh họa tín hiệu CW khi không bị nhiễu tác động và Hình 8b minh họa tín hiệu CW với $SNR = 0 dB$. Hình 8c là tín hiệu đầu ra sau bộ lọc LC-LMS. Hình 8c cho thấy bộ lọc LC-LMS chỉ có tác dụng loại bỏ nhiễu và tăng tỉ số SNR và $RMSE$ áp dụng với tín hiệu CW là $RMSE = 0,44 (-)$. Từ các kết quả mô phỏng và thực nghiệm cho thấy, bộ lọc LC-LMS hiệu quả đối với cả tín hiệu có SNR thấp ($SNR = 0 dB$) và LC-LMS cho hiệu quả lọc nhiễu tốt hơn với tín hiệu xung ($RMSE = 0,22 (-)$) trong khi tín hiệu CW có $RMSE = 0,44 (-)$.

4. Kết luận

Trong bài báo này, tác giả tiến hành so sánh, đánh giá và thực hiện bộ lọc LC-LMS sử dụng MATLAB. Bộ lọc LC-LMS được đánh giá thông qua 2 bước chính: bước thứ nhất so sánh với các bộ lọc khác như LMS, LLMS và NLMS bằng các tín hiệu mô phỏng. Các kết quả mô phỏng cho thấy, tất cả các bộ lọc có khả năng lọc nhiễu với SNR = 0 dB. Ngoài ra, với cùng SNR = 7dB, LC-LMS có hiệu suất cao nhất hay nói cách khác RMSE = - 11,53 dB nhỏ nhất, tiếp theo là LMS (RMSE = -10,55 dB), NLMS (RMSE = -10,25 dB) và thấp nhất là LLMS với RMSE = -9,33 dB. Bước thứ 2 kiểm chứng bộ LC-LMS bằng các tín hiệu từ máy phát sóng chuẩn E8267D. Ngoài ra, các kết quả thực nghiệm khẳng định rằng bộ lọc LC-LMS thích hợp xử lý các tín hiệu từ máy phát sóng chuẩn với SNR = 0 dB và kết quả thực nghiệm cho thấy LC-LMS cho hiệu quả cao hơn đối với các tín hiệu xung ra đa (RMSE = 0,22 (-)) trong khi với tín hiệu CW (RMSE = 0,44 (-)).

Trong các nghiên cứu tiếp theo, tác giả tiến hành thực thi bộ lọc LC-LMS trên công nghệ phân cứng FPGA và kiểm chứng hiệu quả của bộ lọc với tín hiệu thu thực tế để làm cơ sở xây dựng thiết bị thu trình sát.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] V. Kubecek and P. Svoboda, "Passive Surveillance System for Air Traffic Control," *28th European Microwave Conference*, Amsterdam, Netherlands, 1998, pp. 546-551, doi: 10.1109/EUMA.1998.338047.
- [2] H. D. Griffiths and J. B. Christopher, *An Introduction to Passive Radar*, 2nd edition, Artech House, UK, 2022.
- [3] S. K. Mitra, *Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach*, 4th edition, McGraw-Hill, 2011,
- [4] L. N. Trefethen, *Spectral Methods in MATLAB*, SIAM, Philadelphia, USA, 2011.
- [5] A. Graham, *Communications, Radar and Electronic Warfare*, John Wiley and Sons, West Sussex, UK, 2011.
- [6] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 3rd edition, McGraw-Hill, 2022.
- [7] H. Zhivomirov, "On the Development of STFT-analysis and ISTFT-synthesis Routines and their Practical Implementation," *TEM Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 56-64, 2019, doi: 10.18421/TEM81-07.
- [8] J. Y. Chen and B. Z. Li, "The Short-time Wigner-Ville Distribution," *Signal Processing*, vol. 219, 2024, doi: 10.1016/j.sigpro.2024.109402.
- [9] M. Walenczykowska and A. Kawalec, "Application of Continuous Wavelet Transform and Artificial Neural Network for Automatic Radar Signal Recognition," *Sensors*, vol. 22, no. 19, 2022, doi: 10.3390/s22197434.
- [10] J. M. Giron-Sierra, *Digital signal processing with MATLAB examples*, vol. 1, Springer, New York, USA, 2017.
- [11] A. Chandra and S. Chattopadhyay, "Design of Hardware Efficient FIR filter: A Review of the State-of-art Approaches," *Engineering Science and Technology*, vol. 19, no. 1, pp. 212-226, 2016, doi: 10.1016/j.jestch.2015.06.006.
- [12] A. Pathan and T. D. Memon, "A Correlation-less Approach Towards Adaptive Channel Equalizer Based on Wiener-Hopf Equation," *Wireless Personal Communications*, vol. 118, no. 4, 2021, pp. 3539-3548, doi: 10.1007/s11277-021-08193-w.
- [13] I. Ushenina, "FPGA Implementation of LMS Adaptive Filters Using High-Level Synthesis Tools," in *SMART Automatics and Energy. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 272, Springer, Singapore, 2022, doi: 10.1007/978-981-16-8759-4_47.
- [14] S. Zhao, J. Xu, and Y. Zhang, "A Variable Step-size Leaky LMS Algorithm," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/7951643.
- [15] A. D. Poularikas and Z. M. Ramadan, *Adaptive Filtering Primer with MATLAB*, CRC Press, USA, 2006.