

MỞ RỘNG THUẬT TOÁN CBSL CHO BÀI TOÁN ĐỊNH HƯỚNG VỚI MẢNG ĂNG TEN LỒNG GHÉP TRONG SÔ NA THỤ ĐỘNG

Nguyễn Văn Sơn^{1,2,*}, Nguyễn Ngọc Đông³

¹Hệ Quản lý học viên sau đại học, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

²Viện Kỹ thuật Hải quân, Quân chủng Hải quân

³Khoa Vô tuyến điện tử, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

Tóm tắt

Bài báo nghiên cứu việc áp dụng thuật toán CBSL (*Combine Filter - Broadband - Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit - Least Squares*) cho bài toán định hướng tín hiệu (DOA) trong sô na thụ động sử dụng mảng ăng ten lồng ghép (Nested). Thuật toán này kết hợp biểu diễn thưa và lọc răng lược thích nghi, được nhóm tác giả đề xuất trước đó. Bài báo tập trung phân tích mô hình tín hiệu cho mảng Nested và đánh giá hiệu suất của phương pháp đề xuất thông qua mô phỏng. Kết quả chỉ ra rằng phương pháp này cải thiện độ phân giải phổ, giảm số lượng đỉnh phụ và nâng cao độ chính xác định hướng, đồng thời phương pháp ước lượng DOA sử dụng thuật toán CBSL cho mảng Nested ưu việt hơn so với phương pháp truyền thống sử dụng mảng thẳng cách đều (ULA) về số lượng nguồn tín hiệu khi có cùng số lượng cảm biến vật lý với mảng ULA.

Từ khóa: Sô na; nested; thụ động; định hướng; thưa.

1. Đặt vấn đề

Trong hệ thống sô na thụ động, xác định hướng tín hiệu đến (*Direction of Arrival - DOA*) đóng vai trò quan trọng trong các ứng dụng quân sự, an ninh, giám sát môi trường và cảnh báo. Tuy nhiên, bài toán DOA đối mặt với nhiều thách thức do nhiễu, phản xạ, phân tán tín hiệu và yếu tố môi trường, làm giảm độ chính xác của các phương pháp định hướng truyền thống. Một trong những giải pháp phổ biến nhất để giải quyết bài toán DOA là sử dụng ưu điểm vượt trội của loại mảng ăng ten. Các mảng ăng ten giúp thu tín hiệu từ nhiều cảm biến khác nhau, từ đó sử dụng các kỹ thuật xử lý tín hiệu để ước lượng DOA của các nguồn tín hiệu.

Chúng ta đã biết rằng, trong một mảng thẳng cách đều (ULA) với N cảm biến có thể phát hiện tối đa tới $N-1$ nguồn tín hiệu. Nếu cần phát hiện nhiều nguồn hơn, những phương pháp này yêu cầu nhiều cảm biến hơn, dẫn đến tăng chi phí phần cứng và gánh nặng tính toán. Nói cách khác, đối với các phương pháp ước lượng DOA truyền thống tập trung vào mảng hình học ULA, số nguồn tín hiệu mà hệ thống có thể phát hiện bị

* Tác giả liên hệ, email: nguyenson91hvktqsk45@gmail.com
DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v20.n03.993

hạn chế bởi số lượng cảm biến trong mảng. Các mảng thưa có thể tăng số nguồn, điều này đã thu hút sự chú ý của nhiều nhà nghiên cứu trong [1], [2]. Gần đây, các mảng lồng ghép (*Nested*) [3], [4] đã được nghiên cứu. Cả hai loại mảng đều có hình học thưa. Mảng *Nested* bao gồm một cặp ULA nối tiếp nhau.

Trong những năm gần đây, các phương pháp ước lượng hướng đến cho mảng *Nested* đã được phát triển nhằm giải quyết các vấn đề về phân tán góc và tương tác giữa các cảm biến. Ban đầu, các giải pháp dựa trên mảng hiệu (*difference co-array*) kết hợp với bộ lọc và xấp xỉ hạng thấp có cấu trúc (SLRA) đã cải thiện độ phân giải [5]. Tuy nhiên, phương pháp này vẫn còn hạn chế do không thể loại bỏ hoàn toàn ảnh hưởng của sự ghép nối giữa các cảm biến. Để khắc phục hạn chế đó, một bước tiến được thực hiện bằng cách kết hợp mảng *Nested* thưa với mảng nguyên tố đồng dạng, sử dụng các kỹ thuật như SS-MUSIC, ANM-GL và DFT-OC nhằm giảm thiểu tác động của ghép nối và tăng khẩu độ ảo [6]. Mặc dù giảm được độ phức tạp tính toán, nhưng các phương pháp này vẫn chưa đạt hiệu suất tối ưu trong môi trường có yêu cầu chính xác cao.

Các hướng nghiên cứu tiếp theo như xây dựng họ cấu hình mảng *Nested* tổng quát (GNA) kết hợp với cảm biến nén (CS) [7] và ứng dụng mảng cảm biến vectơ âm thanh (AVS) với quaternion thông qua ANQ-MUSIC (QDCA) [8] đã nỗ lực cân bằng giữa độ chính xác và chi phí tính toán. Tuy nhiên, trong điều kiện thực tế với các nguồn tín hiệu có độ tương quan cao, hiệu suất của các giải pháp này vẫn còn hạn chế.

Các cải tiến gần đây như mảng *Nested* thưa song song kép (DS-PNA) cho ước lượng DOA hai chiều [9], các cấu trúc RSNA-I/II cho tín hiệu không tròn [10] và mảng *Nested* ba chiều [11] đã giúp giảm tương tác giữa cảm biến, nhưng vẫn gặp khó khăn trong việc xử lý các nguồn tín hiệu phức tạp. Bên cạnh đó, các cấu trúc nâng cao như EEAS-NA-CPA [12] và mảng *Nested* mở rộng thưa (SENA) cho thấy tiềm năng tăng khẩu độ và số nguồn phát hiện, nhưng vấn đề sai số ghép nối vẫn tồn tại [13].

Trong [14], nhóm tác giả đề xuất một giải pháp định hướng là sự kết hợp giữa thuật toán CBSL bản chất là sự kết hợp giữa biểu diễn thưa và bộ lọc răng lược thích nghi và mảng ULA. Trong bài báo này, nhóm tác giả sẽ áp dụng phương pháp đó cho mảng *Nested* với mục tiêu là cải thiện hiệu suất định hướng trong các tình huống phức tạp, đặc biệt là khi áp dụng cho các mục tiêu biển có chân vịt, vốn là nguồn tín hiệu có độ tương quan cao. Thông qua các kết quả mô phỏng, nghiên cứu này đánh giá hiệu quả của thuật toán CBSL khi áp dụng cho mảng *Nested*. Các kết quả cho thấy, thuật toán này không chỉ giảm thiểu sai số định hướng mà còn cải thiện độ phân giải phổ và giảm số lượng đỉnh phụ, khả năng phát hiện tốt nguồn tương quan và tăng số lượng nguồn phát hiện (so với các giải pháp truyền thống áp dụng cho mảng ULA có cùng số cảm biến).

Trên cơ các phân tích đó, phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: Phần 2 mô hình dữ liệu sẽ phân tích về mô hình toán học của dữ liệu thu trên cơ sở hệ thống mạng ăng ten Nested; Phần 3 trình bày về mô hình tiếng ồn từ các mục tiêu biển có chân vịt; Phần 4 mô tả Thuật toán CBSL; Phần 5 kết quả mô phỏng và thảo luận; Cuối cùng là Phần 6 kết luận.

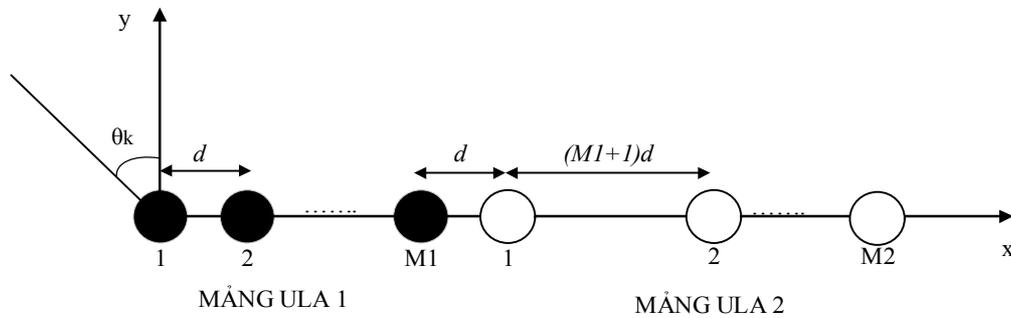
Ký hiệu: Các ký tự in đậm chữ thường, chữ hoa được sử dụng để đại diện cho các vector (ma trận).

2. Mô hình dữ liệu mảng Nested

Trong phần này, mô hình tín hiệu của mảng Nested tổng quát được giới thiệu, kết hợp với cấu trúc mảng bao gồm mảng vật lý và mảng ULA ảo.

2.1. Mảng vật lý

Cấu hình của mảng Nested tổng quát được minh họa trong Hình 1, giả sử θ_k là hướng đến DOA của nguồn thứ k . Mảng Nested tổng quát bao gồm hai mảng ULA nối tiếp nhau: Mảng ULA thứ nhất có M_1 cảm biến với khoảng cách giữa các phần tử là $d = \alpha\lambda / 2$. Mảng ULA thứ hai có M_2 cảm biến với khoảng cách giữa các phần tử là $(M_1 + 1)\alpha\lambda / 2$. Khoảng cách giữa hai mảng ULA là $d = \alpha\lambda / 2$, trong đó λ là bước sóng của sóng mang, α là hệ số tỉ lệ $\alpha > 0$.



Hình 1. Cấu hình mảng Nested.

Giả sử có K nguồn băng hẹp không tương quan từ vùng xa tác động đến mảng tuyến tính, tín hiệu thu được được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t), \quad (1)$$

trong đó: \mathbf{A} - ma trận hướng (steering matrix); $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$ - vector tín hiệu; $\mathbf{n}(t)$ - nhiễu Gauss cộng có kỳ vọng bằng 0 và phương sai σ_n^2 . Trong mảng Nested, ma trận hướng \mathbf{A} được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 \\ \mathbf{A}_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

với \mathbf{A}_1 và \mathbf{A}_2 lần lượt là các ma trận con tương ứng với ULA thứ nhất và ULA thứ hai.

$$\mathbf{A}_1 = [\mathbf{a}_1(\theta_1), \mathbf{a}_1(\theta_2), \dots, \mathbf{a}_1(\theta_K)], \quad (3)$$

trong đó, $\mathbf{a}_1(\theta_k)$ - vector hướng của nguồn thứ k đối với ULA thứ nhất:

$$\mathbf{a}_1(\theta_k) = \left[1, e^{-j\alpha\pi\sin\theta_k}, \dots, e^{-j(M_1-1)\alpha\pi\sin\theta_k} \right]^T. \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_2 = [\mathbf{a}_2(\theta_1), \mathbf{a}_2(\theta_2), \dots, \mathbf{a}_2(\theta_K)], \quad (5)$$

trong đó, $\mathbf{a}_2(\theta_k)$ - vector hướng của nguồn thứ k đối với ULA thứ hai:

$$\mathbf{a}_2(\theta_k) = \left[e^{-jM_1\alpha\pi\sin\theta_k}, e^{-j(M_1+1)\alpha\pi\sin\theta_k}, \dots, e^{-j(M_1+M_2-1)\alpha\pi\sin\theta_k} \right]^T. \quad (6)$$

Kết quả, ma trận hướng của mảng Nested được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \left(\mathbf{a}_1(\theta_1) \right) & \dots & \left(\mathbf{a}_1(\theta_K) \right) \\ \left(\mathbf{a}_2(\theta_1) \right) & \dots & \left(\mathbf{a}_2(\theta_K) \right) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2.2. Xây dựng mảng ULA ảo từ mảng Nested (Virtual ULA)

Từ tín hiệu thu được $\mathbf{x}(t)$ trong (1), ma trận hiệp phương sai được tính như sau:

$$\mathbf{R} = \mathbb{E}[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma_n^2\mathbf{I}, \quad (8)$$

với σ_n^2 là công suất nhiễu. Sau khi vector hóa \mathbf{R} , ta có:

$$\text{vec}(\mathbf{R}) = \mathbf{B}\mathbf{p} + \mathbf{e}_n, \quad (9)$$

trong đó, $\mathbf{p} = [\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_K^2]^T$ - công suất tín hiệu của các nguồn từ 1 đến K , $\mathbf{e}_n = [e_1^T, e_2^T, \dots, e_{M_1+M_2}^T]^T$ là nhiễu. Để mô tả ma trận hướng \mathbf{B} , sử dụng tích Kronecker giữa vector hướng của mảng vật lý và phép biến đổi liên hợp của nó. Cụ thể, ta có:

$$\mathbf{b}(\theta_k) = \mathbf{a}_k \otimes \mathbf{a}_k^*, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (10)$$

$\mathbf{b}(\theta_k)$ - vector hướng tương ứng với nguồn thứ k trong ma trận \mathbf{B} . Với cách biểu diễn này, \mathbf{B} đại diện cho mảng ULA ảo được tạo ra từ tích Kronecker của vector hướng của

mảng vật lý và phép biến đổi liên hợp của nó.

Mảng ULA ảo của mảng tuyến tính có các vị trí phần tử được biểu diễn như sau:

$$\mathbb{P} = \{p = p_1 - p_2 \mid p_1, p_2 \in P\}, \quad (11)$$

trong đó, P là tập hợp các vị trí của cảm biến vật lý.

Theo các phương trình (4), (6), (7), vị trí vật lý của các cảm biến trong mảng Nested được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}' = & \{ \alpha m \lambda / 2 \mid m = 0, 1, \dots, M_1 - 1 \} \\ & \cup \{ \alpha n \lambda / 2 \mid n = M_1 + 0(M_1 + 1), M_1 + 1(M_1 + 1), \dots, M_1 + (M_2 - 1)(M_1 + 1) \} \end{aligned} \quad (12)$$

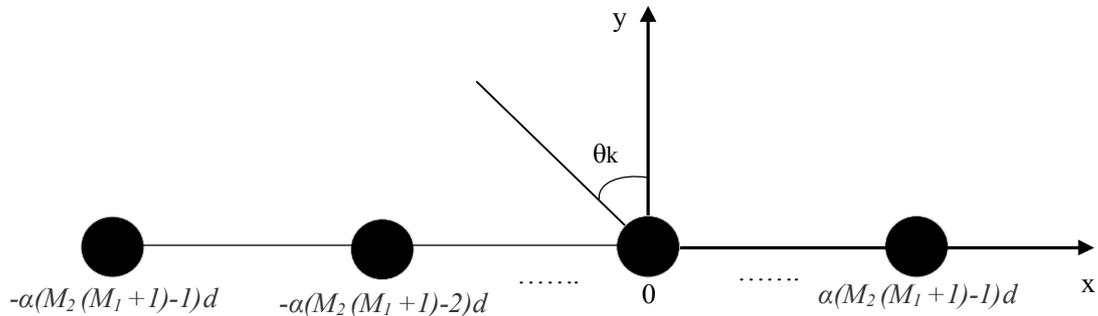
Như đã biết, vị trí của mảng ULA ảo trong mảng Nested thông thường với $\alpha = 1$ được cho bởi [18].

$$\mathbb{P}'_d = \{ m \lambda / 2 \mid m = -(M_2(M_1 + 1) - 1), -(M_2(M_1 + 1) - 2), \dots, 0, \dots, M_2(M_1 + 1) - 1 \} \quad (13)$$

Theo các phương trình (11)-(13), có thể suy ra rằng các vị trí của mảng ULA ảo trong mảng Nested được biểu diễn như sau:

$$\mathbb{P}'_d = \{ \alpha m \lambda / 2 \mid m = -(M_2(M_1 + 1) - 1), -(M_2(M_1 + 1) - 2), \dots, 0, \dots, M_2(M_1 + 1) - 1 \} \quad (14)$$

Điều này tương ứng với một mảng ULA, trong đó khoảng cách giữa các phần tử liên tiếp lớn hơn một hệ số α so với ULA thông thường. Nhìn chung, việc ước lượng hướng đến DOA sử dụng mảng Nested có thể được chuyển đổi thành ước lượng với mảng ULA theo phương trình (9). Hình 2 minh họa cấu trúc hình học của mảng ULA ảo của mảng Nested.



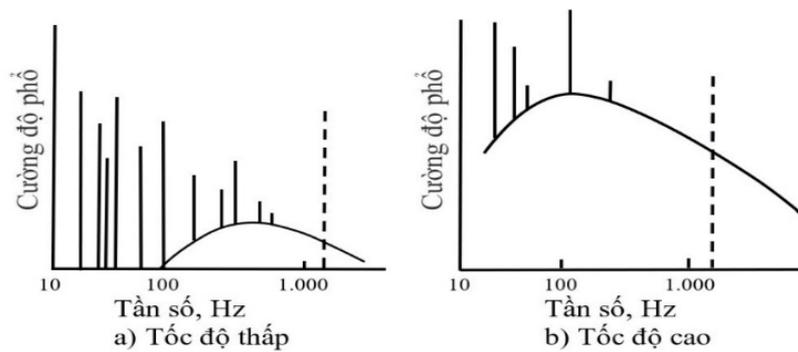
Hình 2. Cấu trúc hình học của mảng ULA ảo trong mảng Nested, trong đó $d = \lambda / 2$.

3. Mô hình tín hiệu tiếng ồn của các mục tiêu biển có chân vịt

Phổ tần số do tốc độ quay cánh quạt chân vịt, gây ra bởi sự va đập của cánh quạt chân vịt và sự tiếp xúc của cánh quạt, có các thành phần phổ rời rạc. Tần số của dãy các thành phần tần số của cánh quạt được cho bởi công thức:

$$f_m = m \times s \times n, \quad (15)$$

trong đó: f_m - tần số (Hz) của hài bậc m trong dãy tần số của cánh quạt của chân vịt; s - số cánh quạt trên chân vịt; n - tốc độ quay của chân vịt, tính bằng số vòng quay mỗi giây.



Hình 3. Biểu đồ phổ của tiếng ồn tàu ngầm ở hai tốc độ khác nhau.

Phổ tần số do tốc độ quay cánh quạt của chân vịt chiếm ưu thế trong vùng tần số từ 1 Hz đến 100 Hz của biểu đồ phổ tiếng ồn tàu ngầm (Hình 3) và thường được sử dụng bởi hệ thống sonar để ước lượng và nhận dạng mục tiêu. Mô hình toán học của tín hiệu tiếng ồn từ mục tiêu biển có chân vịt trên miền thời gian có dạng:

$$s(t) = s_D(t) + s_C(t) + n(t) = s_D(t) + (1 + a(t))c(t) + n(t), \quad (16)$$

trong đó: $s_D(t)$ - thành phần tín hiệu chứa các vạch phổ rời rạc gây ra bởi các cơ cấu cơ khí, máy móc, chân vịt trên mục tiêu; $s_C(t)$ - thành phần tín hiệu liên tục gây ra bởi nhiễu thủy động và các bọt khí vỡ trong quá trình chân vịt quay; $n(t)$ - tổng các thành phần tạp âm tác động lên hệ thống; $a(t)$ - hàm điều chế biên độ; $c(t)$ - tiếng ồn có tần số cao; thành phần tiếng ồn rời rạc $s_D(t)$ có thể biểu diễn dưới dạng:

$$s_D(t) = \sum_{j=1}^J A_j \sin(2\pi f_j t + \phi_j), \quad (17)$$

trong đó: j - tổng số các vạch phổ; A_j, f_j, ϕ_j lần lượt là biên độ, tần số và pha của vạch phổ

thứ j ; $s_D(t)$ đại diện cho phần tín hiệu rời rạc gây ra bởi cấu trúc cơ khí của chân vịt (như các cánh quạt của chân vịt, ổ trục) và các dao động cơ học định kỳ của mục tiêu, cung cấp thông tin quan trọng về cấu trúc cơ học của mục tiêu. Phân tích các tần số f và biên độ A có thể giúp xác định các đặc tính của chân vịt, như tốc độ quay, số cánh quạt, hoặc tình trạng vận hành. Trong các ứng dụng như hệ thống sonar hoặc radar, $s_D(t)$ là một đặc trưng quan trọng để nhận dạng mục tiêu và phân biệt chúng với các nguồn tín hiệu khác.

Các vạch phổ có tần số nhỏ hơn 100 Hz là các vạch phổ tạo ra bởi trục và cánh chân vịt. Năng lượng của các vạch phổ này không phụ thuộc vào vận tốc mà chỉ phụ thuộc vào cấu trúc và đặc điểm của từng loại tàu. Tùy theo đặc điểm cấu trúc và thiết kế của từng loại tàu mà phổ tiếng ồn tổng hợp của mục tiêu có đặc trưng khác nhau. Tuy nhiên, chúng có một số điểm chung như sau:

Thứ nhất, những thành phần phổ rời rạc vùng hạ âm thường có mức phổ lớn hơn trung bình, nằm trong khoảng từ 10 dB đến 25 dB tùy theo loại mục tiêu và điều kiện vận hành;

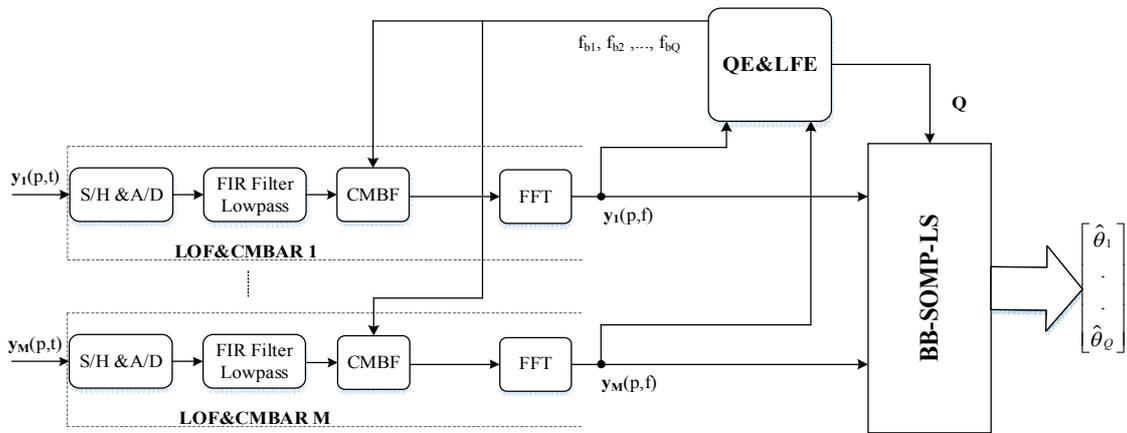
Thứ hai, đối với phổ liên tục ở vùng tần số thấp, mức phổ tăng +6 dB/octave, còn ở vùng tần số cao, mức phổ lại giảm -6 dB/octave. Những đặc tính này giúp ích rất nhiều cho việc phát hiện tín hiệu yếu trên nền nhiễu và phân loại các mục tiêu. Đặc biệt, việc điều chế biên độ tín hiệu tiếng ồn dải rộng gây ra bởi chân vịt tạo ra một số thành phần phổ vạch dải hạ âm. Các vạch phổ tạo ra bởi (17) trong vùng hạ âm được sử dụng để giải một số bài toán quan trọng trong xử lý tín hiệu, đặc biệt là bài toán ước lượng hướng.

4. Thuật toán CBSL

Cho một hệ thống thu tín hiệu với M kênh, tín hiệu thu được tại kênh thứ m có dạng $y_m(p, t)$, $m = 1, 2, \dots, M$. Trong đó, p biểu diễn chỉ số khung thời gian hoặc số hiệu tín hiệu và t là thời gian thu. Hình 4 mô tả sơ đồ khối chức năng thuật toán CBSL.

4.1. Tiền xử lý tín hiệu

Ở mỗi kênh tín hiệu có bộ phân tích, ghi kết hợp lọc răng lược thích nghi (*Low Frequency Analysis, Recording and Adaptive Comb Filter* - LOF&CMBAR) kết nối với đầu ra của chấn tử ăng ten. Một trong những kỹ thuật phổ biến để tách được các thành phần đơn tần, tần số thấp này là LOFAR (*Low Frequency Analysis and Recording*). Các bộ lọc răng lược thích nghi được thêm vào LOFAR, nằm sau bộ lọc thông thấp FIR và nằm trước FFT, với mục đích chọn lọc các tần số cơ bản xác định đặc trưng của chân vịt.



Hình 4. Sơ đồ khối chức năng thuật toán CBSL.

4.2. Trích xuất đặc trưng

Từ phổ tín hiệu $y_m(p, f)$, khối *Quantization Estimation & Line Frequency Extraction (QE & LFE)* thực hiện trích xuất các thành phần tần số chính tương ứng với các nguồn tín hiệu, thu được tập hợp các tần số đặc trưng: f_1, f_2, \dots, f_Q trong đó Q là số lượng nguồn cần ước lượng. Đồng thời, bộ này cũng sử dụng thuật toán tích lũy không tương can để xác định số lượng mục tiêu trong vùng quan sát, đây là bước quan trọng trong việc phân tích tín hiệu để quyết định có bao nhiêu mục tiêu trong vùng quan sát và phản hồi ngược các tần số cơ bản ước lượng được đến khâu CMBF để điều chỉnh tần số của các khâu cộng hưởng (thích nghi) CMBF.

4.3. Bộ ước lượng hướng dải rộng

Bộ ước lượng hướng dải rộng sử dụng thuật toán SOMP-LS (BB-SOMP-LS) để ước lượng góc hướng của các mục tiêu có tín hiệu dải rộng. Bộ này là sự mở rộng của thuật toán SOMP-LS cho tín hiệu dải rộng. Bộ BB-SOMP-LS đóng vai trò quan trọng trong thuật toán đề xuất, đảm nhiệm nhiệm vụ ước lượng chính xác hướng đến của các nguồn tín hiệu từ dữ liệu quan sát thu được. Thuật toán kết hợp hai thành phần chính: *Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit (SOMP)* để xử lý tín hiệu dải rộng và *Least Squares (LS)* nhằm tối ưu hóa trong quá trình lựa chọn nguyên tử (cột trong ma trận từ điển), giúp nâng cao độ chính xác của thuật toán. Sau khi hoàn thành quá trình lặp, thuật toán cung cấp đầu ra là tập hợp các hướng đến ước lượng kèm theo biên độ tín hiệu tương ứng.

5. Kết quả mô phỏng và thảo luận

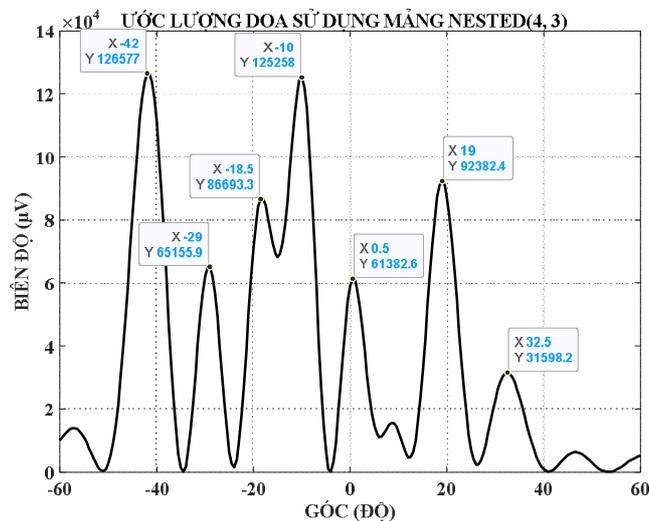
Thuật toán CBSL áp dụng cho mô hình biểu diễn thưa trong số na giám giáit ngầm

thụ động cho mảng thẳng cách đều ULA đã mang đến hiệu quả được thể hiện trong [14] và trong phần này, chúng tôi mô phỏng để chứng minh tính ưu việt của thuật toán CBSL áp dụng cho mô hình biểu diễn thưa cho mảng Nested có cùng số lượng cảm biến và khẩu độ ăng ten.

Đầu vào cho 3 bài mô phỏng: Tín hiệu sau LOF&CMBAR (các phổ vạch) của 2 nguồn tương quan với các thông số như sau: Vận tốc truyền âm trong nước: 1512 m/s; Tần số tín hiệu 12 Hz; SNR = 10 dB (sử dụng cho bài mô phỏng 1, 2); Hướng -10° ; $+10^\circ$ (sử dụng cho bài mô phỏng 2, 3); Loại tín hiệu hình Sin; Hệ số tương quan 0,85; Độ dài 1 khung dữ liệu: 1024; Số khung dữ liệu: 256; Tần số lấy mẫu: 2100 Hz; Độ phân giải góc: $0,5^\circ$; Độ dài đoạn dữ liệu xử lý của SOMP-LS: 64.

Bài mô phỏng 1: Đánh giá khả năng phát hiện số nguồn tín hiệu sử dụng thuật toán CBSL cho mảng Nested có $M_1 = 4$ và $M_2 = 3$, các nguồn giả định $\{-40^\circ; -30^\circ; -20^\circ; -10^\circ; 0^\circ; 20^\circ; 30^\circ\}$.

Cấu hình mảng Nested: Số lượng cảm biến của mảng ULA thứ nhất và thứ hai lần lượt là $M_1 = 4$ và $M_2 = 3$, hệ số tỉ lệ $\alpha = 1$ để cấu thành mảng Nested, bao gồm $M_1 + M_2 = 7$ cảm biến vật lý; Đặc tính định hướng: vô hướng. Vị trí cảm biến của mảng ULA 1: $\{0, 1d, 2d, 3d\}$. Vị trí cảm biến của mảng ULA 2: $\{4d, 9d, 14d\}$. Như vậy, vị trí cảm biến của mảng ULA ảo sẽ là $\{-14d, -13d, -12d, -11d, \dots, 0, \dots, 11d, 12d, 13d, 14d\}$ với $d = \lambda / 2$.



Hình 5. Khả năng phát hiện số nguồn tín hiệu của thuật toán CBSL cho mảng Nested.

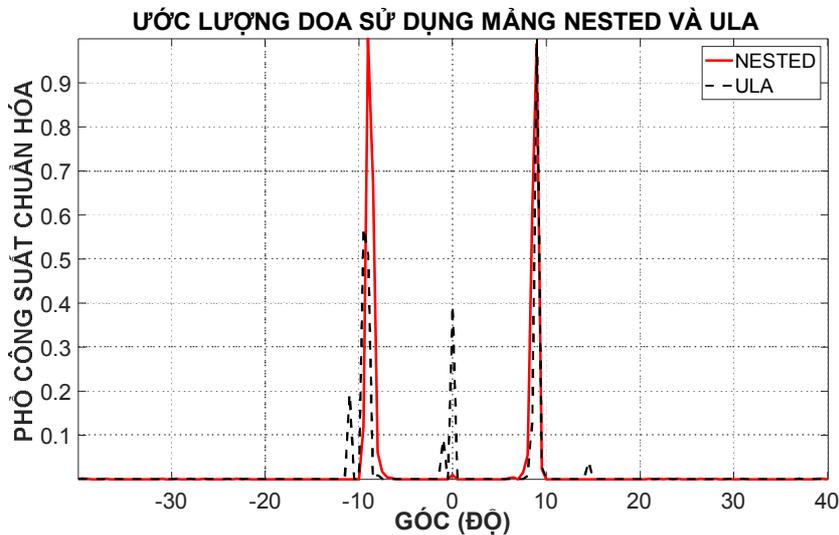
Nhận xét: Như chúng ta đã biết, các phương pháp ước lượng DOA truyền thống khi áp dụng cho mảng ULA có N cảm biến chỉ có thể phát hiện tối đa N-1 nguồn tín

hiệu, với $N = 7$, tối đa chỉ có thể phát hiện tối đa 6 nguồn. Hình 5 thể hiện khả năng phát hiện số nguồn của thuật toán, có thể nhận thấy phương pháp ước lượng DOA sử dụng thuật toán CBSL cho mảng Nested cũng chỉ có 7 cảm biến vật lý nhưng có thể phát hiện 7 nguồn, các nguồn được phát hiện tương đối chính xác lần lượt là $\{-42^\circ; -29^\circ; -18,5^\circ; -10^\circ; 0,5^\circ; 19^\circ; 32,5^\circ\}$. Như vậy, phương pháp ước lượng DOA sử dụng thuật toán CBSL cho mảng Nested ưu điểm hơn so với phương pháp truyền thống sử dụng mảng ULA về số lượng nguồn tín hiệu khi có cùng số lượng cảm biến vật lý.

Bài mô phỏng 2: So sánh hiệu năng hoạt động của thuật toán CBSL cho mảng ULA và mảng Nested, dải rộng, kết quả thể hiện như Hình 6.

Cấu hình mảng ULA: Số cảm biến (M): 9; Khoảng cách giữa các cảm biến $d = \lambda / 2 = 63$ (m); Đặc tính định hướng: vô hướng.

Cấu hình mảng Nested: Số lượng cảm biến của mảng ULA thứ nhất và thứ hai lần lượt là $M_1 = 5$ và $M_2 = 4$, hệ số tỉ lệ $\alpha = 1$ để cấu thành mảng Nested, bao gồm $M_1 + M_2 = 9$ cảm biến vật lý; Đặc tính định hướng: vô hướng. Vị trí cảm biến của mảng ULA 1: $\{0, 1d, 2d, 3d, 4d\}$. Vị trí cảm biến của mảng ULA 2: $\{5d, 11d, 17d, 23d\}$. Như vậy, vị trí cảm biến của mảng ULA ảo sẽ là $\{-23d, -22d, -21d, -20d, \dots, 0, \dots, 20d, 21d, 22d, 23d\}$, với $d = \lambda / 2 = 63$ (m).



Hình 6. Hàm phổ không gian ước lượng DOA khi áp dụng thuật toán CBSL cho mảng Nested và mảng ULA.

Nhận xét: Mục đích của mô phỏng là so sánh hiệu suất định hướng của thuật toán CBSL trong trường hợp sử dụng mảng Nested và mảng ULA khi có cùng số cảm biến vật lý. Kết quả cho thấy:

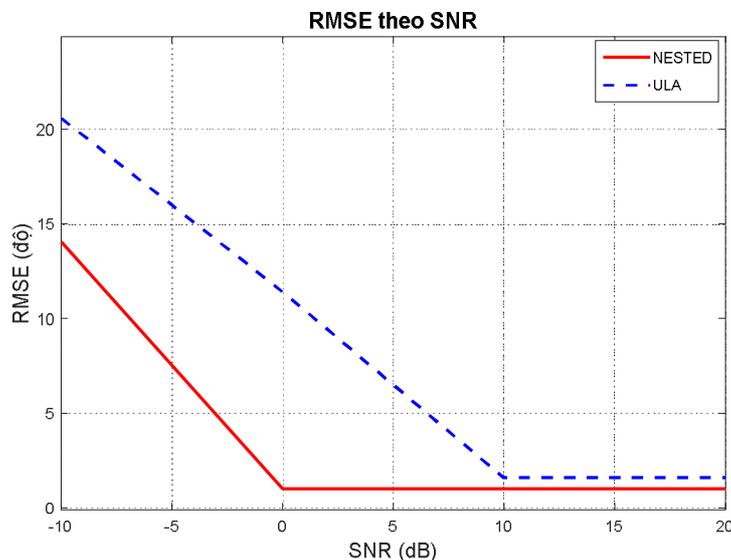
Về khả năng định hướng chính xác: Cả hai trường hợp đều xác định đúng hướng của hai nguồn tín hiệu tương quan tại góc -10° và 10° .

Về hiện tượng đỉnh phụ: Trường hợp sử dụng Nested xuất hiện ít đỉnh phụ hơn (1 đỉnh tại góc 0° với phổ công suất chuẩn hóa rất thấp). Trường hợp 2 ULA xuất hiện 4 đỉnh phụ tại các góc -11° , -1° , 0° và $14,5^\circ$, trong đó một số đỉnh phụ có phổ công suất chuẩn hóa khá cao, làm giảm độ tin cậy của kết quả định hướng.

Về mức suy giảm công suất phổ chuẩn hóa giữa hai nguồn: Trường hợp 2 (ULA) cho thấy mức suy giảm lớn giữa hai nguồn chính. Phổ công suất chuẩn hóa tại nguồn thứ nhất (-10°) chỉ đạt 56,98% so với giá trị cực đại tại nguồn thứ hai (10°). Trường hợp 1 (Nested) thể hiện phổ công suất chuẩn hóa đồng đều hơn, với phổ tại nguồn thứ hai đạt 98,4% so với giá trị cực đại tại nguồn thứ nhất.

Như vậy, thuật toán CBSL khi áp dụng trên mảng Nested cho hiệu suất tốt hơn so với mảng ULA, đặc biệt trong việc duy trì mức suy giảm nhỏ giữa hai đỉnh phổ chính và giảm thiểu số lượng và cường độ đỉnh phụ. Kết quả này khẳng định ưu điểm của thuật toán CBSL sử dụng mảng Nested.

Bài mô phỏng 3: Đánh giá sai số chuẩn RMSE theo SNR (với các tham số mảng ULA và mảng Nested như bài mô phỏng 2). Kết quả thể hiện trên Hình 7.



Hình 7. Sai số thuật toán khi áp dụng cho mảng ULA và mảng Nested.

Nhận xét: Mục đích của mô phỏng này là đánh giá và so sánh hiệu suất ước lượng của thuật toán CBSL khi áp dụng cho hai cấu hình mảng khác nhau, bao gồm mảng ULA và mảng Nested, thông qua tiêu chí sai số trung bình (RMSE). Phân tích RMSE

giúp làm rõ sự ảnh hưởng của các điều kiện SNR khác nhau đến độ chính xác của thuật toán. Kết quả cho thấy các thuật toán đều hoạt động hiệu quả và ổn định trong vùng SNR cao ($SNR \geq 10$ dB), sai số RMSE cỡ 2° . Tuy nhiên, khi mức nhiễu tăng đáng kể (tương ứng với sự suy giảm nhanh của SNR), thuật toán CBSL áp dụng cho mảng ULA ghi nhận sai số lớn. Ngược lại, khi áp dụng thuật toán này trên mảng Nested, sai số ước lượng được duy trì ở mức nhỏ và ổn định trong toàn bộ dải SNR được khảo sát. Do đó, mảng Nested không chỉ giúp thuật toán duy trì độ chính xác cao hơn mà còn đảm bảo hiệu suất ổn định, làm nổi bật lợi thế vượt trội so với mảng ULA. Tuy nhiên, có thể thấy rằng khi áp dụng thuật toán cho mảng Nested chỉ hiệu quả trong vùng SNR cỡ $SNR \geq 0$ dB, ngược lại thuật toán cho sai số rất lớn; thuật toán CBSL khá phức tạp khi kết hợp cùng mảng Nested còn phải tính toán ngoại suy phần tử nên thời gian tính toán khá lâu, tiêu tốn phần cứng khi mô phỏng và kể cả khi triển khai trên thực tế.

6. Kết luận

Bài báo đã đề xuất và phân tích một phương pháp mở rộng của thuật toán CBSL cho mảng ăng ten lồng ghép trong bài toán định hướng nguồn tín hiệu cho hệ thống số na thụ động. Phương pháp, dựa trên sự kết hợp giữa biểu diễn thừa và lọc răng lược thích nghi, đã chứng minh hiệu quả vượt trội so với mảng thẳng cách đều (ULA), thể hiện qua nhiều ưu điểm: cải thiện độ phân giải phổ, giảm khoảng cách giữa các đỉnh chính, hạn chế đỉnh phụ, giảm sai số định hướng và nâng cao tính ổn định trong dải làm việc. Những kết quả này khẳng định tiềm năng ứng dụng của thuật toán CBSL-Nested trong việc nâng cao độ chính xác và độ tin cậy của các hệ thống số na hiện đại.

Tuy nhiên, các kết quả mô phỏng hiện tại mới chỉ được thực hiện trong môi trường nhiễu Gauss và dưới một số giả định lý tưởng. Ngoài ra, độ chính xác có xu hướng giảm ở miền SNR thấp (< 0 dB), thời gian tính toán còn lớn và yêu cầu phần cứng phức tạp. Do đó, các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung mở rộng mô hình sang các loại nhiễu phi Gauss thường gặp trong môi trường biển (như K và Weibull), đồng thời phát triển các kỹ thuật tối ưu nhằm giảm chi phí tính toán và tăng khả năng ứng dụng thực tế.

Tài liệu tham khảo

- [1] A. Moffet, "Minimum-redundancy linear arrays", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. 16, Iss. 2, pp. 172-175, 1968. DOI: 10.1109/TAP.1968.1139138
- [2] G. S. Bloom and S. W. Golomb, "Applications of numbered undirected graphs", in *Proceedings of the IEEE*, Vol. 65, Iss. 4, pp. 562-570, 1977. DOI: 10.1109/PROC.1977.10517

- [3] P. Pal and P. P. Vaidyanathan, "Nested arrays in two dimensions, Part I: Geometrical considerations", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 60, No. 9, pp. 4694-4705, 2012. DOI: 10.1109/TSP.2012.2203814
- [4] P. Pal and P. P. Vaidyanathan, "Nested arrays: A novel approach to array processing with enhanced degrees of freedom", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 58, No. 8, pp. 4167-4181, 2010. DOI: 10.1109/TSP.2010.2049264
- [5] C. Wen, G. Shi, and X. Xie, "Estimation of directions of arrival of multiple distributed sources for nested array", *Signal Processing*, Vol. 130, pp. 315-322, 2017. DOI: 10.1016/j.sigpro.2016.07.011
- [6] J. Li, Y. He, P. Ma, X. Zhang, and Q. Wu, "Direction of arrival estimation using sparse nested arrays with coprime displacement", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 21, Iss. 4, pp. 5282-5291, 2020. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3034761
- [7] P. Zhao *et al.*, "Generalized nested array configuration family for direction-of-arrival estimation", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 72, Iss. 8, pp. 10380-10392, 2023. DOI: 10.1109/TVT.2023.3260196
- [8] Y. Lou, X. Qu, D. Wang, and J. Cheng, "Direction-of-arrival estimation for nested acoustic vector-sensor arrays using quaternions", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 61, pp. 1-14, 2023. DOI: 10.1109/TGRS.2023.3274182
- [9] G. Jiang, J. Huang, and Y. Yang, "Dual-sparse parallel nested array for two-dimensional direction of arrival estimation", *Circuits, Systems, and Signal Processing*, Vol. 43, No. 12, pp. 8060-8073, 2024. DOI: 10.1007/s00034-024-02816-w
- [10] L. Zhou, Z. Feng, K. Ye, J. Qi, and S. Hong, "Design of relocating sparse nested arrays for DOA estimation of non-circular signals", *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 173, 2024. DOI: 10.1016/j.aeue.2023.154976
- [11] G. Jiang, J. Huang, and Y. Yang, "High-accuracy 2D DOA estimation with three parallel sparse nested array", *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 179, 2024. DOI: 10.1016/j.aeue.2024.155319
- [12] C. Qin, L. Yang, J. Dang, B. Dang, and Y. Zhou, "An enhanced expanding and shift sparse array based on the coprime array and nested array", *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 18, Iss. 3, pp. 493-499, 2024. DOI: 10.1049/rsn2.12495
- [13] S. He, N. Sun, and Z. Yang, "Designing sparse extended nested arrays with high degrees of freedom and low coupling", *Signal Processing*, Vol. 227, 2025. DOI: 10.1016/j.sigpro.2024.109702
- [14] N. V. Son, N. T. Chinh, and N. N. Dong, "A novel directional finding algorithm applying to underwater passive sonar system based on sparse representation combined adaptive comb filter", *The International Conference on Intelligent Systems & Networks*, 2024, Springer, pp. 382-391.

EXTENDING THE CBSL ALGORITHM FOR DIRECTION OF ARRIVAL ESTIMATION WITH A NESTED ARRAY IN PASSIVE SONAR

Abstract: *This paper investigates the application of the CBSL (Combine Filter - Broadband - Simultaneous Orthogonal Matching Pursuit - Least Squares) algorithm for Direction of Arrival (DOA) estimation in passive sonar using a Nested Array. The algorithm integrates sparse representation and adaptive comb filtering, which was previously proposed by the authors. The paper focuses on analyzing the signal model for the Nested Array and evaluating the performance of the proposed method through simulations. The results demonstrate that this approach improves spectral resolution, reduces the number of sidelobes, and enhances DOA accuracy compared to the Uniform Linear Array (ULA).*

Keywords: Sonar; nested; passive; direction finding; sparse.

Nhận bài: 05/06/2025; Hoàn thiện: 03/09/2025; Chấp nhận đăng: 15/10/2025

