

ĐỀ XUẤT GIẢI PHÁP NÂNG CAO CHẤT LƯỢNG ĐỊNH HƯỚNG TRÊN CƠ SỞ BIỂU DIỄN KHÔNG GIAN THỜI GIAN TẦN SỐ TÍN HIỆU DÙNG CHO CÁC HỆ THỐNG SONAR THỤ ĐỘNG

Nguyễn Thanh Chinh*, Nguyễn Ngọc Đông*, Phạm Khắc Hoan*, Nguyễn Đức Minh*

* Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

* Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

Tóm tắt—Bài báo xem xét tổng quan về các thuật toán định hướng trên cơ sở biểu diễn không gian thời gian tần số (spatial time frequency distribution: STFD) tín hiệu, bao gồm lịch sử phát triển, cơ sở toán học và mô hình hệ thống. Đồng thời, bài báo cũng xem xét một số loại mô hình mục tiêu và các phương pháp ước lượng hướng nguồn tín hiệu trên cơ sở STFD điển hình. Từ đó đề xuất một giải pháp mới áp dụng cho ước lượng hướng các mục tiêu biển có chân vịt, đó là sự kết hợp của sự chọn lọc các đặc trưng (character specifies selection: CSS) của tín hiệu mục tiêu với sự định hướng trên cơ sở STFD, giải pháp CSS-STFD-DOA. Giải pháp này tăng cường tiền xử lý tín hiệu để loại bỏ nhiễu và chỉ chọn lọc các thành phần phổ rời rạc đặc trưng của chân vịt ở vùng tần số thấp. Một số trường hợp mô phỏng được thực hiện để đánh giá chất lượng của giải pháp sử dụng dữ liệu mô phỏng đầu vào xây dựng trên cơ sở các tín hiệu thực. Kết quả mô phỏng cho thấy, giải pháp CSS-STFD-DOA có khả năng làm việc ổn định, định hướng chính xác và có hiệu năng tốt hơn các thuật toán STFD-DOA, đặc biệt là trong các tình huống nhiễu mạnh.

Từ khóa— Sonar, định hướng (DOA), biểu diễn thời gian tần số (TFD), mục tiêu biển, chân vịt.

I. MỞ ĐẦU

Biểu diễn thời gian tần số (time-frequency distribution: TFD) được sử dụng rất nhiều trong các lĩnh vực của đời sống xã hội cũng như trong quốc phòng an ninh, bao gồm: xử lý giọng nói, xử lý các tín hiệu y sinh, ứng dụng trong xử lý tín hiệu sonar, radar và các hệ thống định vị toàn cầu. Trong những năm gần đây, hầu hết các nghiên cứu về TFD bậc hai đã tập trung vào các cấu trúc tín hiệu thời gian đơn thành phần và đa thành phần và các biểu diễn tần số thời gian (t - f) tương ứng. Các kết quả nghiên cứu này cho những tiến bộ lớn trong phân tích và xử lý tín hiệu, đặc biệt đối với các tín hiệu không dừng không dừng. Trong bài toán định hướng, TFD được xem xét trên cơ sở một mạng các

cảm biến sắp đặt theo một trật tự nào đó trong không gian, việc bố trí các cấu trúc không gian các cảm biến này hình thành biểu diễn không gian thời gian tần số (spatial time-frequency distribution: STFD). Bài toán định hướng (direction of arrival: DOA) trên cơ sở STFD ngày càng được quan tâm vì những lợi thế vượt trội của phương pháp này.

Kết quả công bố [1] đã đề xuất một phương pháp mới để ước lượng DOA trong trường hợp số lượng cảm biến nhỏ hơn số nguồn tín hiệu, sử dụng kết hợp theo dõi nền tiếng ồn xung quanh, kết hợp phát hiện nguồn tín hiệu để xác định tốt nguồn chiếm ưu thế trong các ô phân biệt t - f . Tiếp theo, các véc tơ riêng riêng quan trọng nhất của ma trận hiệp phương sai tương ứng với các ô phân biệt này được nhóm lại thành cụm và việc ước lượng hướng được thực hiện trên cơ sở trọng tâm cụm. Dey và cộng sự [2] cũng đề xuất một ứng dụng của tai nghe thông minh cho phép thu nguồn âm thanh là giọng nói có chọn lọc trong môi trường. Thuật toán ứng dụng trong thiết bị này được chia thành hai phần: phần đầu tiên là áp dụng thuật toán phát hiện giọng nói ở vùng trường xa công suất lớn trên nền môi trường tiếng ồn lớn; phần thứ hai là định vị nguồn âm. Ứng dụng của kỹ thuật này là một hệ thống tai nghe thông minh, trong đó người dùng có thể nghe tốt có chọn lọc âm thanh từ một hướng xác định.

Năm 2021, Feng và cộng sự đã đề xuất thuật toán ước lượng DOA cho tín hiệu dải rộng [3]. Thuật toán này đã sử dụng quy trình phân tách thích nghi nhanh tín hiệu dựa trên các phép biến đổi chuỗi ngắn (chirplet) để xây dựng ma trận hiệp phương sai t - f . Việc phân chia không gian con được tiến hành tương tự như cách làm của thuật toán MUSIC (multiple signal classification) và ESPRIT (estimation of signal parameters via rotational invariant techniques) truyền thống [3]. Việc chồng chập đã được thực hiện cho không gian con tín hiệu dải hẹp và dải rộng để xây dựng một ma trận t - f chung. Thuật toán DOA tín hiệu dải rộng trên cơ sở chirplet đã được đề xuất và đánh giá. Ưu điểm của việc sử dụng thuật toán này là không có hạn chế đối với các cấu trúc mảng, không quá phức tạp và hiệu suất cao.

Bên cạnh đó, trước khi thực hiện thuật toán DOA, một

Tác giả liên hệ: Nguyễn Đức Minh,

Email: minhnd@ptit.edu.vn

Đến tòa soạn: 22/01/2024, chỉnh sửa: 15/03/2024, chấp nhận đăng: 26/3/2024.

số kỹ thuật tiền xử lý tín hiệu được áp dụng để nâng cao chất lượng tín hiệu đầu vào. Một số kỹ thuật như tăng cường giọng nói dựa trên phương pháp không gian con [4], tách nguồn mù [5], phân cụm dựa trên băng con [6] và biểu diễn thời gian - tần số thích nghi (adaptive spatial time-frequency distribution: ASTFD) [7]. Trong [7], Khan và cộng sự đã chứng minh rằng ASTFD làm tốt việc phân tích các tín hiệu gần nhau hơn so với các phương pháp tiền xử lý khác. ASTFD triển khai tối ưu hóa hướng các trục chính của đồ thị và độ mở của hàm lỗi tại mỗi điểm trong miền t - f để có được sự biểu diễn t - f rõ ràng hơn (bản chất là chọn độ rộng và hướng của bộ lọc hai chiều), sau đó được khai thác để ước lượng DOA [8]. Năm 2018, Haiyan và nhóm nghiên cứu đã đề xuất một phương pháp ước lượng STFD DOA trên cơ sở mạng cảm biến véc tơ (Vector-sensor Array) [8], tác giả đề cập đến các phép đo thu được bằng mảng cảm biến véc tơ âm thanh và phát triển một phương pháp mới, khai thác thông tin STFD của tín hiệu mảng cảm biến véc tơ cơ bản để đạt được hiệu suất ước lượng DOA tốt hơn ngay cả trong môi trường nhiễu tiếng ồn lớn và các nguồn tín hiệu kết hợp. Năm 2022, Pranav và Buket đã xem xét tổng quan về các thuật toán DOA đã được nghiên cứu [9]. Thực hiện đánh giá và so sánh hiệu suất của ba thuật toán nổi tiếng, bao gồm MUSIC, ESPRIT và phân tích giá trị riêng (EVD), có và không sử dụng ASTFD ở giai đoạn tiền xử lý tín hiệu. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán ASTFD DOA đã cải thiện đáng kể hiệu suất của MUSIC. Tuy nhiên, thời gian tính toán đã tăng lên do triển khai thuật toán ASTFD như một bước tiền xử lý tín hiệu.

Đặc biệt, năm 2021 Xueyan và các cộng sự đã công bố một thuật toán STFD DOA dùng cho sonar thụ động khi có lan truyền đa đường bằng cách thiết lập mô hình tín hiệu đa đường và sử dụng phương pháp phân tích t - f dùng biến đổi bậc hai để giảm các yếu tố biểu diễn chéo (cross-term) trong khi vẫn giữ được độ phân giải tốt [10]. Sau đó, thuật toán ước lượng hướng của tất cả các đường truyền trong tình huống đa đường và thực hiện một kỹ thuật để nhóm các đường truyền thuộc cùng một nguồn vào với nhau. Kỹ thuật nhóm này dùng ý tưởng là phẳng tịnh tiến, lùi và tiêu chuẩn phát hiện điểm biên t - f . Cuối cùng, thuật toán DOA được áp dụng cho từng nhóm đường truyền và cho ra kết quả hướng của các đường truyền trực tiếp. Thuật toán cũng có thể sử dụng cho các sonar chủ động và có thể được mở rộng áp dụng để định hướng các nguồn tín hiệu dải rộng, phức tạp hơn.

Các nghiên cứu kể trên đã tận dụng hiệu quả tài nguyên và lợi thế của biểu diễn STFD, đó là việc cô lập vùng t - f của từng nguồn trên mặt phẳng t - f . Mặc dù vậy, các nghiên cứu này tập trung xem xét các nguồn tín hiệu điều tần (frequency modulation: FM) dạng tuyến tính hoặc phi tuyến [11-15]. Đặc tính của các nguồn FM là có biểu diễn rõ ràng trên mặt phẳng t - f khi sử dụng các phân tích STFD, thường là một đường thẳng hoặc đường cong liên tục. Biểu hiện đó giúp cho việc phân tách các nguồn khá thuận lợi. Đối với bài toán định hướng các mục tiêu biển có chân vịt trong các hệ thống sonar thụ động thì tín hiệu có ích là tiếng ồn của các mục tiêu sinh ra khi chuyển động có các đặc trưng riêng, khác với các loại mục tiêu khác và khác nhau đối với các mục tiêu có chân vịt khác nhau, đó chính là các phổ thành phần phổ của tín hiệu tiếng ồn chân vịt trong

vùng tần số thấp (nhỏ hơn 100 Hz) [16, 17]. Các đặc trưng của tín hiệu này hầu hết chưa được khai thác trong các nghiên cứu, ứng dụng STFD-DOA. Bài báo này đề xuất giải pháp mới trên cơ sở STFD-DOA kết hợp với tiền xử lý chọn lọc các đặc trưng của tiếng ồn chân vịt và dùng thuật toán MUSIC cho ma trận STFD tương đương của hệ thống, giải pháp CSS-STFD-DOA nhằm tăng độ chính xác định hướng mục tiêu biển cho các hệ thống sonar thụ động.

Trên cơ sở đó, phần còn lại của bài báo có cấu trúc như sau: phần II, mô hình dữ liệu sẽ xác định biểu diễn toán học của dữ liệu mạng ăng-ten cũng như mô hình toán của tiếng ồn từ các nguồn có chân vịt. Phần III sẽ xem xét về cơ sở toán học của các thuật toán định hướng trên cơ sở TFD và thuật toán đề xuất. Phần IV đưa ra một số bài mô phỏng và thảo luận, cuối cùng là phần kết luận.

II. MÔ HÌNH DỮ LIỆU

Để thống nhất trong tính toán và các minh họa, bài báo sử dụng các giả thiết như sau: Mạng ăng-ten tuyến tính cách đều (ULA) có m chấn tử, khoảng cách giữa hai chấn tử liên tiếp là d , tính theo mét. Trong đó vùng quan sát, có tổng cộng Q nguồn tín hiệu, tín hiệu thứ q nằm ở các góc hướng θ_q . Đoạn dữ liệu có độ dài N ; $(.)^T$ là toán tử chuyển vị và $(.)^H$ là toán tử chuyển vị liên hợp phức.

A. Mô hình dữ liệu mảng

Trong xử lý dải hẹp, khi Q tín hiệu thu được nhận bởi mạng m chấn tử, mô hình dữ liệu tuyến tính là:

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

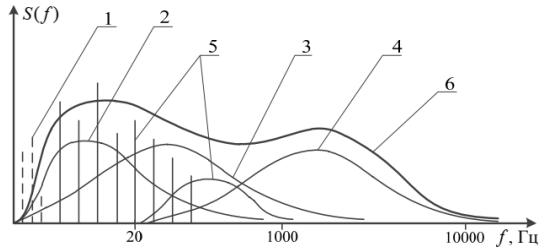
trong đó, $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^T$ là ma trận dữ liệu thu được từ m chấn tử, kích thước $m \times N$; $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), \dots, s_Q(t)]^T$ là ma trận các nguồn tín hiệu, kích thước $Q \times N$; $\mathbf{A} = \mathbf{A}(\Theta) = [\mathbf{a}(\theta_1) \dots \mathbf{a}(\theta_Q)]$ là ma trận hướng có mang thông tin về góc hướng của các nguồn tín hiệu, $\mathbf{a}(\theta_q) = [1, e^{-jd \sin(\theta_q)/c}, \dots, e^{-j(m-1)d \sin(\theta_q)/c}]^T$ là véc tơ hướng ứng với nguồn tín hiệu thứ q ; $\mathbf{n}(t)$ là ma trận nhiễu Gaussian cộng tính.

B. Mô hình toán học của nguồn tiếng ồn từ các mục tiêu biển có chân vịt.

Các mục tiêu biển như tàu mặt nước, tàu ngầm hoặc phương tiện dưới nước khác di chuyển trong môi trường nước đều tạo ra tiếng ồn do có sự bức xạ của các nguồn âm khác nhau. Tùy thuộc vào nguồn tạo ra tiếng ồn, phổ tiếng ồn có thể là rời rạc hoặc liên tục, nằm trong một dải tần nhất định, hoặc cũng có thể là phổ hỗn hợp, bao gồm tổng các thành phần phổ rời rạc và phổ liên tục. Tiếng ồn của mỗi loại mục tiêu có đặc trưng riêng, được thể hiện trong các đặc trưng của phổ phát xạ, nhưng nhìn chung, phổ phát xạ của một mục tiêu biển chiếm một dải tần rộng từ hạ âm đến siêu âm [16], và chúng bao gồm các thành phần sau (minh họa trên Hình 1):

- 1 - Các thành phần phổ rời rạc do phát xạ do các trục và cánh chân vịt gây ra trong quá trình quay;
- 2 - Phổ tiếng ồn phát xạ do thân mục tiêu gây ra khi dòng nước chạy xung quanh nó;
- 3 - Phổ tiếng ồn phát xạ gây ra do các cánh chân vịt khi

có dòng nước chảy xung quanh (tiếng ồn xoáy cánh quạt);



Hình 1. Phổ năng lượng điển hình tiếng ồn của tàu

4 - Phổ của tiếng ồn xâm thực của chân vịt;

5 - Phổ rời rạc và phổ liên tục của tiếng ồn do các máy móc và cơ cấu cơ khí trên mục tiêu khi hoạt động tạo ra;

Trên hình 1, đường số 6 là phổ chung của tiếng ồn do tàu tạo ra (chồng chất của tất cả các thành phần tiếng ồn của trường âm thanh).

Cường độ phổ tiếng ồn phát xạ bởi các mục tiêu trên biển không đồng đều trên toàn bộ dải tần và được xác định bởi nhiều yếu tố, trong đó các yếu tố chính là: máy chính và các cơ cấu của máy chính, số lượng và chủng loại cơ cấu phụ trợ, cấu trúc và cách thức di chuyển, tốc độ quay của động cơ, tốc độ của vật mang, điều kiện lan truyền sóng âm trong khu vực hoạt động [17]. Vì thế, khó có thể xác định chính xác chân dung phổ của một mục tiêu nhất định do các điều kiện thu khác nhau. Tuy nhiên, ở đây chúng ta quan tâm chủ yếu đến các thành phần phổ rời rạc thuộc vùng tần số thấp (nhỏ hơn 100 Hz) do chân vịt gây ra mang nhiều đặc trưng của mục tiêu khác nhau. Trong những tình huống tác chiến phức tạp hoặc ở các điều kiện thủy văn không thuận lợi, việc phát hiện được mục tiêu ngầm là nhiệm vụ được ưu tiên hàng đầu.

Giả sử trong vùng quan sát có nhiều mục tiêu quan tâm ở các hướng khác nhau, mỗi mục tiêu có thể coi là một nguồn sinh ra tiếng ồn. Mô hình toán học của tín hiệu trên miền thời gian của nguồn tiếng ồn thứ q có dạng [16]:

$$s_q(t) = s_{qD}(t) + s_{qC}(t) + n(t) \\ = s_{qD}(t) + \left(1 + \sum_{l=1}^L A_l \cos(2\pi f_l t)\right) c(t) + n(t), \quad (2)$$

trong đó: s_{qD} - là thành phần tín hiệu chứa các thành phần phổ rời rạc tín hiệu tiếng ồn gây ra bởi các cơ cấu cơ khí, máy móc, chân vịt trên mục tiêu cũng như nhiễu thủy động học; $s_{qC}(t)$ - là thành phần tín hiệu tiếng ồn liên tục, có dạng là tín hiệu tần số cao, dải động $c(t)$ (gây ra do bọt khí vỡ trong quá trình chân vịt quay) và bị điều chế bởi tần số quay của trục và cánh chân vịt; A_l - biên độ của thành phần phổ thứ l ; $n(t)$ - tạp âm nền.

Như vậy, s_{qD} sẽ chứa các thành phần phổ f_d là hài của tần số trục chân vịt f_r :

$$f_d = l f_r. \quad (3)$$

Các thành phần phổ rời rạc này có thể được tách ra bởi kỹ thuật LOFAR (ghi lại các phân tích tần số thấp) hoặc DEMON (phát hiện sự điều chế đường bao trên nhiễu) [16] để làm vai trò của tín hiệu có ích trong xử lý tín hiệu. Giải pháp đề xuất CSS-STFD-DOA sử dụng cơ sở biểu diễn WVD (Winger-Ville distribution) để tách các vùng t - f của thành phần s_{qD} phục vụ cho bài toán DOA.

III. THUẬT TOÁN ĐỊNH HƯỚNG TRÊN CƠ SỞ BIỂU DIỄN THỜI GIAN TẦN SỐ

A. Các thuật toán định hướng kinh điển

Trong khoảng thời gian dài, các thuật toán DOA trên cơ sở biểu diễn không gian-thời gian được nghiên cứu, phát triển và thu được những kết quả tích cực. Các thuật toán tiêu biểu trên cơ sở này là tạo búp sóng kinh điển (Conventional Beamforming - CB), đáp ứng phương sai không méo cực tiểu (Minimum Variance Distortion Response - MVDR), phân tách đa nguồn (Multiple Signal Classification - MUSIC), chuẩn cực tiểu (Minimum Normal - MIN-NORM), ước lượng thông số tín hiệu bằng phương pháp quay bất biến (ESPRIT), hợp lý cực đại (Maximum Likelihood - MLE),... Mặc dù đạt được thành công ở những mức độ khác nhau, nhưng nhìn chung, các thuật toán này đều khai thác thông tin có ích chứa trong ma trận hiệp phương sai $\mathbf{R}_{xx}$. Bản chất của ma trận này là khai thác thông tin về sự sai khác thời gian của tín hiệu trên các cảm biến của mạng. Ma trận $\mathbf{A}$ là ma trận đủ hạng cột, nghĩa là các véc tơ hướng tương ứng với Q góc hướng đến khác nhau là độc lập tuyến tính. $\mathbf{R}_{xx}$ được xác định bởi [3]:

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}(t)\mathbf{x}^H(t)] = \mathbf{A}\mathbf{R}_s\mathbf{A}^H + \sigma^2\mathbf{I}, \quad (4)$$

trong đó $\mathbf{R}_s = E[\mathbf{s}(t)\mathbf{s}^H(t)]$ là ma trận tự tương quan của tín hiệu.

Ước lượng $\mathbf{R}_{xx}$ theo biểu thức sau:

$$\mathbf{R}_{xx} \approx \hat{\mathbf{R}}_{xx} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}(n)\mathbf{x}^H(n). \quad (5)$$

Thuật toán CB sử dụng ngay ma trận này để ước lượng phổ không gian, trong khi đó thuật toán MVDR cần phải tính ma trận nghịch đảo $\mathbf{R}_{xx}^{-1}$. Các thuật toán DOA trên cơ sở phân tích không gian còn lại tiếp cận theo cách khác. Ma trận hiệp phương sai được phân tích trị riêng để tìm ra một ma trận có các cột là các véc tơ riêng và ma trận đường chéo chứa các trị riêng của $\mathbf{R}_{xx}$. Nếu sắp xếp các giá trị riêng theo thứ tự tăng hoặc giảm và các véc tơ riêng cũng sắp xếp theo cách tương tự thì các véc tơ riêng ứng với các giá trị riêng lớn tạo thành một không gian con $\mathbf{U}_s$ gọi là không gian con tín hiệu. Các véc tơ riêng còn lại tạo thành một không gian con khác gọi là không gian con nhiễu $\mathbf{V}_n$. Nếu có một véc tơ nào đó thuộc về tín hiệu, thì khi chiếu véc tơ đó lên không gian con nhiễu sẽ có kết quả rất nhỏ, lý tưởng là bằng 0. Hàm phổ không gian tỉ lệ nghịch với kết quả của phép chiếu trên, tức là hàm phổ khi đó sẽ cực đại tại các góc có nguồn tín hiệu.

B. Biểu diễn thời gian tần số và bài toán định hướng

Biểu diễn thời gian tần số là biểu diễn dựa trên sự phân tích đặc tính của tín hiệu trên cả hai miền, miền thời gian và miền tần số. Các biểu diễn này có thể là tuyến tính, bậc hai, hoặc một quy luật khác. Nghĩa là, tín hiệu được xem xét đồng thời trên cả hai miền, miền tần số và miền thời gian. Cách tiếp cận này khắc phục được nhược điểm của các phương pháp trước đây, khắc phục được sự “phiên diện” trong phân tích tín hiệu.

Một trong những nghiên cứu nổi bật về việc phân tích tín hiệu đồng thời theo thời gian tần số là lớp các biểu diễn Cohen

[9] mà biểu diễn lõi là WVD, TFD trên cơ sở lớp Cohen của tín hiệu dải hẹp $x(t)$ được định nghĩa như sau:

$$D_{xx}(t, f) = \iint \phi(t-u, \tau) x(u + \frac{\tau}{2}) x^*(u - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} du d\tau, \quad (6)$$

trong đó, t và f thể hiện các biến về thời gian, hàm $\phi(t, u)$ là hàm lõi t - f , τ là biến dịch thời gian và $(.)^*$ là toán tử liên hợp phức. Tích phân được lấy từ $-\infty$ đến $+\infty$. Biểu thức (6) cũng được gọi là tự biểu diễn t - f (auto-term) của tín hiệu $x(t)$. Tương tự như vậy, biểu diễn chéo t - f (cross-term) giữa hai tín hiệu cũng được định nghĩa theo (7). Nếu sử dụng thời gian giữ chậm là số nguyên τ , thì (6) có thể được viết lại thành (8).

Dạng rời rạc lớp Cohen của biểu diễn thời gian tần số của tín hiệu $x(t)$ được cho bởi biểu thức (9) [9]:

$$D_{x_i x_k}(t, f) = \iint \phi(t-u, \tau) x_i(u + \frac{\tau}{2}) x_k^*(u - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} du d\tau \quad (7)$$

$$D_{xx}(t, f) = 2 \iint \phi(t-u, \tau) x(u + \tau) x^*(u - \tau) e^{-j4\pi f\tau} du d\tau \quad (8)$$

$$D_{xx}(t, f) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi(u, \tau) x(t+u+\tau) x^*(t+u-\tau) e^{-j4\pi f\tau} \quad (9)$$

$$\mathbf{D}_{xx}(t, f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi(k, \tau) \mathbf{x}(t+k+\tau) \mathbf{x}^*(t+k-\tau) e^{-j4\pi f\tau} \quad (10)$$

trong đó $\phi(u, \tau)$ là hàm lõi (kernel) thời gian-tần số. Thực tế, các tín hiệu thu được có độ dài hữu hạn và được rời rạc hóa để thuận tiện cho xử lý bằng các thiết bị kỹ thuật số, ma trận biểu diễn không gian-thời gian-tần số (ma trận STFD) có được bằng cách thay $x(t)$ bởi véc tơ các mẫu dữ liệu $\mathbf{x}(t)$, ma trận này có kích thước $m \times m$ và được xác định như biểu thức (10).

Thay (1) vào (10) và lưu ý rằng kỳ vọng của ma trận biểu diễn chéo t - f giữa tín hiệu và nhiễu bằng 0, dẫn đến:

$$E[\mathbf{D}_{xx}(t, f)] = \mathbf{D}_{ss}(t, f) + E[\mathbf{D}_{nn}(t, f)] = \mathbf{A} \mathbf{D}_{QQ}(t, f) \mathbf{A}^H + E[\mathbf{D}_{nn}(t, f)] \quad (11)$$

Biểu thức (11) tương tự như biểu thức (4) thường được sử dụng trong ước lượng DOA liên quan đến ma trận tương quan tín hiệu với ma trận tương quan không gian dữ liệu. Tuy nhiên, trong (11) các ma trận tương quan được thay thế bằng các ma trận STFD. Có nghĩa là các biểu diễn không gian thời gian tần số có thể được sử dụng để giải bài toán định hướng. Điều quan trọng là mối quan hệ (11) đúng với mọi điểm (t, f) trong kết quả biểu diễn đối với tín hiệu thu được. Tuy nhiên, có những điểm có cường độ lớn nhưng không phải là tín hiệu có ích khi có nhiễu tác động, dẫn đến các kết quả sai của hệ thống xử lý. Để giảm ảnh hưởng của nhiễu và đảm bảo thuộc tính đủ hạng cột cho ma trận STFD, nhiều điểm t - f được xem xét đồng thời sử dụng các kỹ thuật đó là chéo hóa khối đồng thời (joint block diagonalization: JBD) hoặc trung bình biểu diễn t - f [18].

Các thuật toán STFD DOA chủ yếu tập trung vào quá trình xử lý để đưa ra được ma trận STFD tương đương cho nhiều điểm t - f , sau đó ma trận này lại được xử lý bằng các thuật toán DOA trên cơ sở không gian con quen thuộc,

chẳng hạn thuật toán MUSIC. Thuật toán được kết hợp như vậy được đặt tên là t - f MUSIC.

Một đặc điểm vượt trội khác của phương pháp STFD DOA là nếu Q_0 nguồn tín hiệu được chọn thay vì Q nguồn trên cơ sở các dấu hiệu thời gian-tần số của chúng ($Q_0 < Q$) thì biểu thức (11) trở thành:

$$E[\mathbf{D}_{xx}^o(t, f)] = \mathbf{A}^o \mathbf{D}_{Q_0 Q_0}^o(t, f) (\mathbf{A}^o)^H + E[\mathbf{D}_{nn}^o(t, f)], \quad (12)$$

trong đó $\mathbf{A}^o$ và $\mathbf{D}_{Q_0 Q_0}^o(t, f)$ lần lượt là ma trận trộn và ma trận STFD của Q_0 nguồn tín hiệu.

Biểu thức (12) rất quan trọng trong ứng dụng STFD DOA vì nó cho phép: thay vì phải xử lý tất cả các nguồn tín hiệu trong vùng quan sát tại một thời điểm nào đó, hệ thống có thể xử lý một số nguồn trong đó bằng cách lập ma trận STFD riêng của các nguồn đó theo (12). Có nghĩa là, kể cả số nguồn nhiều hơn số lượng chân tử của mạng ăng-ten thì việc xử lý vẫn được thực hiện đúng khi mỗi lần xử lý chọn số lượng nguồn nhỏ hơn số chân tử.

C. Giải pháp đề xuất, CSS-STFD-DOA

Giải pháp đề xuất dựa trên cơ sở sử dụng kỹ thuật DEMON để tách các thành phần phổ rời rạc tần số thấp (3) của tín hiệu tiếng ồn trên các mục tiêu biến có trên vệt, sau đó sử dụng biểu diễn WVD để biểu diễn tín hiệu trên miền t - f , tiếp theo sẽ lập ma trận STFD trên cơ sở lấy tất cả các điểm có phổ đặc trưng tách được (CSS). Sau đó, áp dụng thuật toán MUSIC để thực hiện bài toán DOA. Các bước thuật toán như sau:

Đầu vào: Tín hiệu thu $x(t)$, L : số điểm lân cận, N : số lượng mẫu.

Bước 1. Sử dụng kỹ thuật DEMON tách đường bao tiếng ồn, chứa các phổ rời rạc tần số thấp và ước lượng số nguồn tín hiệu.

Bước 2. Biến đổi thời gian tần số và biểu diễn trên mặt phẳng t - f bằng biểu diễn WVD.

Bước 3. Với t, f khác 0, tìm điểm M_0 có công suất cực đại, điểm này có tọa độ (t_{0max}, f_{0max}) .

Bước 5. Tìm các M_i là họ của M_0 , có tọa độ tương ứng là $t_{0max}, f_{0max} + i * df, i \in -L : L$.

Bước 6. Xác định ma trận STFD trung bình cho các điểm M_0 và M_i .

Bước 7. Áp dụng thuật toán MUSIC cho 1 nguồn, tìm hướng nguồn này.

Bước 8. Gán công suất cho vùng t - f thuộc nguồn thứ q (đã xác định trong bước 7) bằng 0.

Bước 9. Lặp lại bước 2 đến khi đạt số lượng nguồn đã ước lượng hoặc đến khi hết dải tần số quan tâm.

Đầu ra: Các góc $[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_Q]$ cần ước lượng.

Giải pháp này có một số ưu điểm so với các thuật toán kinh điển và các thuật toán cùng cơ sở (STFD DOA) như sau: thứ nhất, so với các thuật toán kinh điển, CSS-STFD-DOA có khả năng định hướng khi tín hiệu không dừng và khi số lượng mục tiêu nhiều hơn số lượng chân tử ăng-ten. Thêm vào đó, tỉ số tín/tạp (signal-to-noise: SNR) cũng được tăng cường [11]. Thứ hai, so thuật toán STFD DOA, thay vì tính trung bình hàm biểu diễn của tất cả các điểm có năng lượng cao, CSS-STFD-DOA chỉ chọn các điểm có mối quan hệ họ hàng (bước 5) làm tăng khả năng phân biệt đối với các

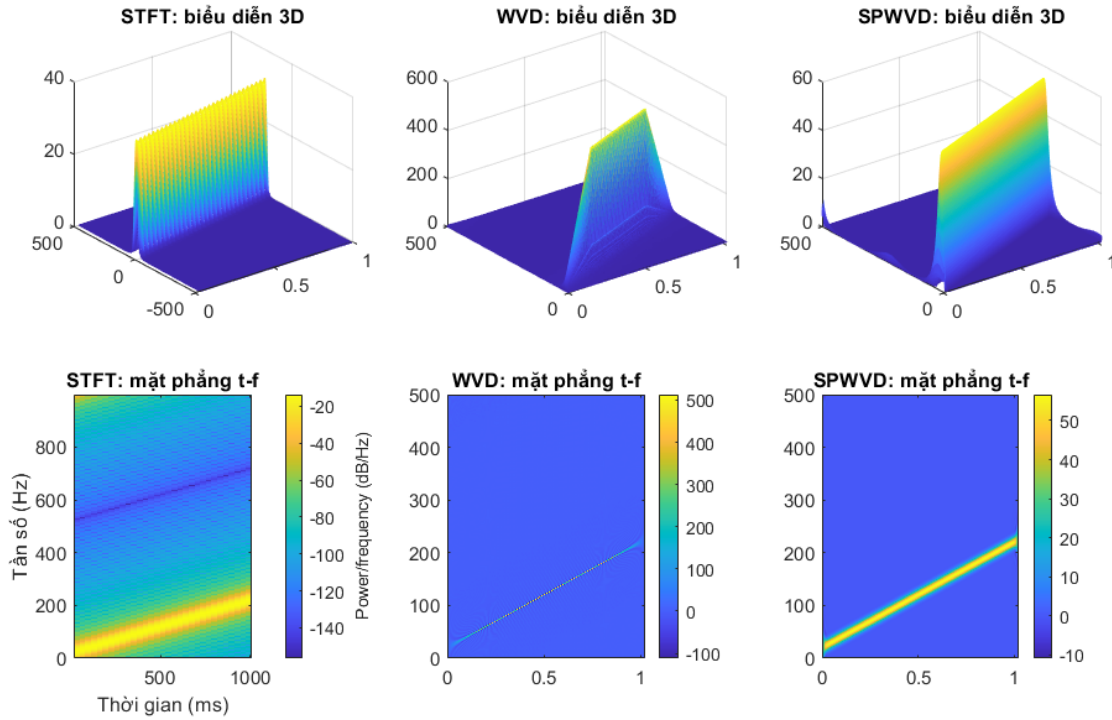
nguồn tín hiệu chứa phổ dạng (3).

pháp đề xuất.

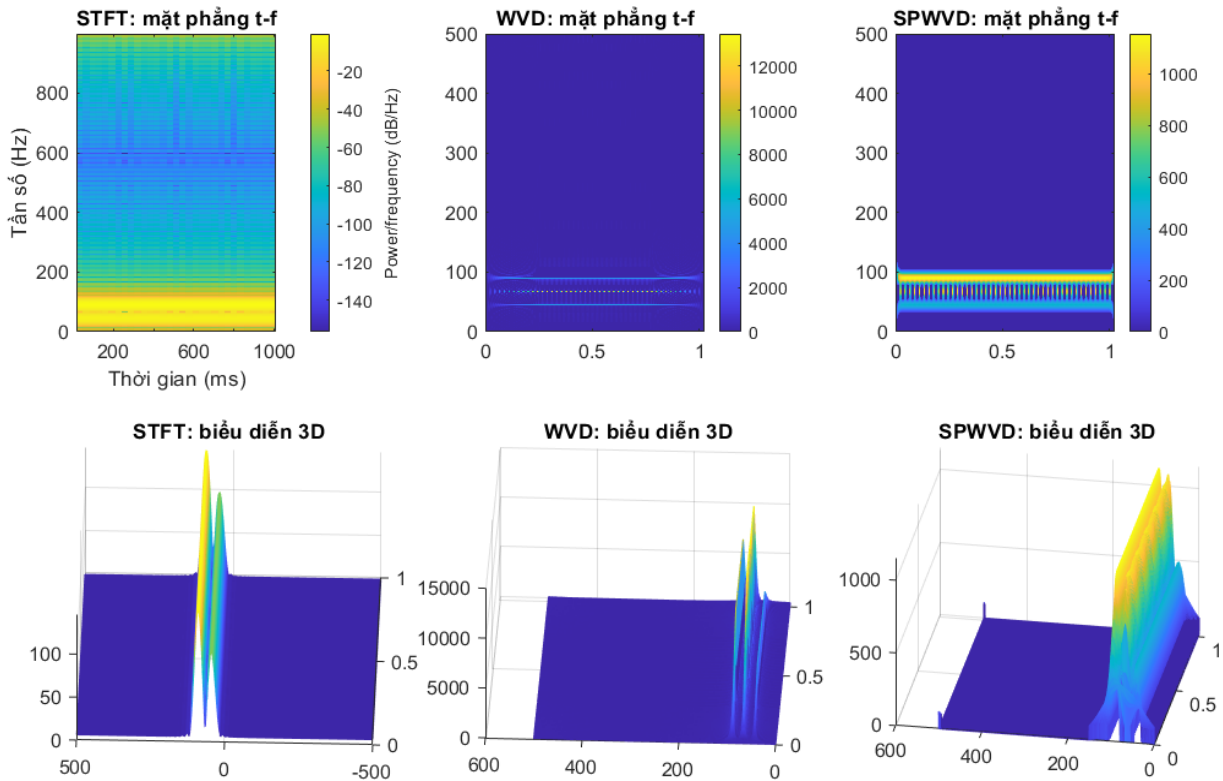
IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

Bài báo sử dụng công cụ Matlab R2022b để tạo dữ liệu và mô phỏng biểu diễn STFD cũng như hoạt động của giải

Bài mô phỏng số 1: Khảo sát TFD của tín hiệu điều tần tuyến tính (linear frequency modulation: LFM) với các công cụ TFD: STFT (short time Furrier transform), WVD, SPWVD (smooth pseudo WVD). Kết quả mô phỏng thể



Hình 2. TFD của tín hiệu LFM thể hiện trên mặt phẳng t - f và hình ảnh 3D.



Hình 3. TFD của tín hiệu hai thành phần đơn tần trên mặt phẳng t - f và hình ảnh 3D.

hiện trên hình 2.

Kết quả cho thấy tín hiệu LFM cho biểu hiện rõ là một đường thẳng đậm trên nền nhiễu và tách biệt khi sử dụng công cụ TFD. Biểu diễn WVD cho độ phân giải tốt nhất, biểu diễn STFT cho độ phân giải kém nhất.

Bài mô phỏng số 2: Khảo sát TFD của tín hiệu gồm hai thành phần đơn tần, tần số 45 Hz và 90 Hz. Kết quả thể hiện trên hình 3.

Kết quả khảo sát cho thấy: Biểu diễn STFT có độ phân giải thấp, khó phân biệt trong trường hợp tín hiệu có nhiều thành phần, vùng t - f chồng lấn nhau. Thêm vào đó, biểu diễn SPWVD mặc dù có hiệu quả rất tốt với các tín hiệu FM nhưng hiệu quả đối với tín hiệu loại này kém hơn, vùng t - f cross-term lớn, chồng lấn với vùng t - f auto-term. Ngược lại, biểu diễn WVD có độ phân giải tốt nhất, mặc dù vùng t - f cross-term có xuất hiện với cường độ lớn, nhưng vẫn tách biệt, có thể cô lập khỏi vùng t - f auto-term.

Như vậy, đối với các tín hiệu có nhiều thành phần dạng tiếng ồn chân vịt, sử dụng WVD sẽ tốt hơn STFT và SPWVD.

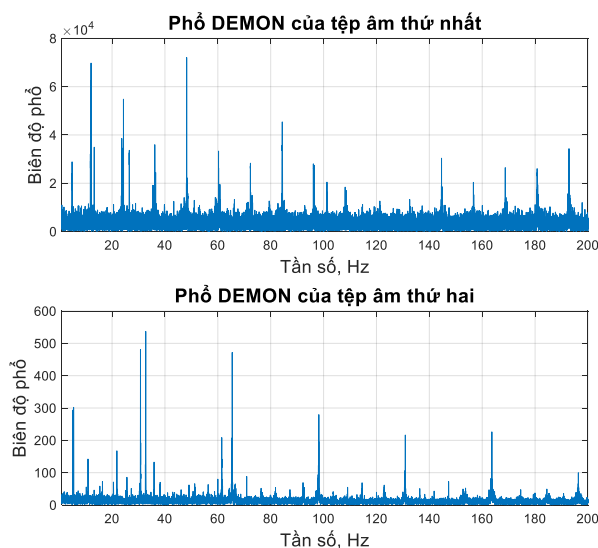
Bài mô phỏng số 3: Đánh giá làm việc của thuật toán CSS-STFD-DOA với tín hiệu thực.

Sử dụng 02 file âm thanh tiếng ồn của các loại mục tiêu:

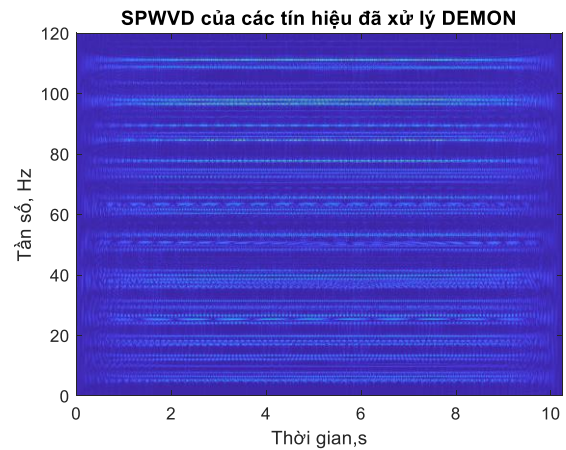
01 file trong cơ sở dữ liệu âm ShipEar [19] và 01 file lấy từ mẫu âm thu tại vùng biển Việt Nam. Mẫu thứ nhất

Theo hình 4, các thành phần phổ rời rạc có tần số bằng số nguyên lần tần số quay của trục chân vịt và các cánh chân vịt tạo ra chiếm ưu thế vượt trội, phân biệt hẳn với mức nền, có thể sử dụng kỹ thuật chọn lọc để tách riêng phần tín hiệu có ích phục vụ cho việc xử lý tiếp theo. Bên cạnh đó, khi sử dụng biểu diễn STFD, các thành phần auto-term phân biệt hẳn với nền, là các vạch biểu diễn năng lượng đậm màu, song song với trục thời gian (Hình 5). Thuật toán CSS-STFD-DOA thực hiện chọn các vạch này để tính ma trận STFD phục vụ cho bài toán định hướng.

Khi sử dụng các tín hiệu này có đặc tính phổ DEMON và biểu diễn STFT như trên làm đầu vào mô phỏng, các thuật toán đều có khả năng làm việc tốt và cho kết quả chính xác với các thông số mô phỏng đã đặt và mẫu âm thanh đầu vào đã chọn. Điểm đáng chú ý là, thuật toán CSS-STFD-DOA đã thể hiện khả năng làm việc vượt trội



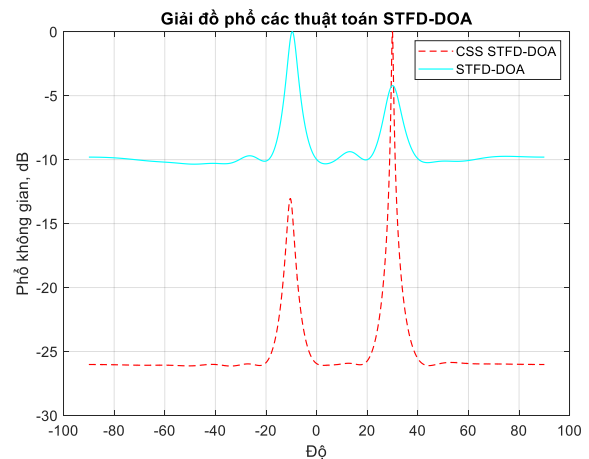
Hình 4. Phổ DEMO của các file âm thanh đầu vào.



Hình 5. Biểu diễn STFD của tín hiệu trộn đầu ra ăng-ten.

được thiết lập mô phỏng với góc hướng là -10^0 , mẫu thứ 2 với góc hướng là $+30^0$.

Phổ DEMON tín hiệu tiếng ồn từ các loại mục tiêu thể hiện trên Hình 4, hình ảnh biểu diễn STFD của tín hiệu trộn đầu ra mạng ăng-ten thể hiện trên Hình 5. Kết quả kiểm tra hoạt động của thuật toán STFD-DOA và CSS-STFD-DOA thể hiện trên Hình 6.



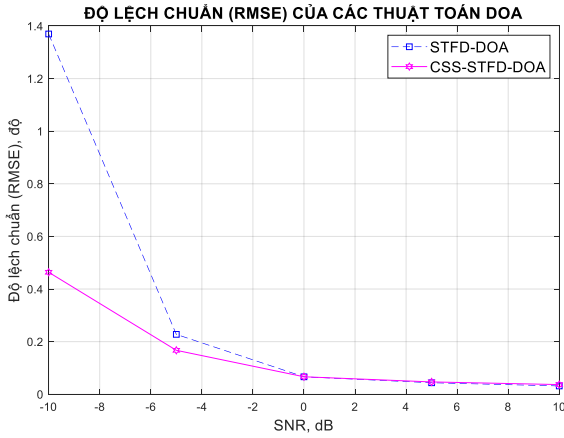
Hình 6. Kết quả thuật toán CSS-STFD-DOA và STFD-DOA với các nguồn tín hiệu tiếng ồn thực địa.

khi cho ra mức chênh lệch đỉnh - nền khoảng 26 dB và đỉnh phổ khá hẹp, mức chênh lệch đỉnh - nền chỉ khoảng 10 dB đối với thuật toán STFD-DOA thông thường. Đỉnh phổ cũng hẹp hơn, thể hiện độ phân giải cao hơn khi sử dụng thuật toán CSS-STFD-DOA (Hình 6).

Bài mô phỏng số 4: Đánh giá độ lệch chuẩn RMSE (root mean square error) định hướng của thuật toán STFD-DOA và CSS-STFD-DOA với các giá trị SNR khác nhau.

Sử dụng tín hiệu mô phỏng có 8 thành phần phổ rời rạc, tần số quay của trục chân vịt là 5,4 Hz; nguồn tín hiệu nằm ở góc hướng $+20^0$ và mức tương quan năng lượng các vạch tương tự như cấu trúc file âm thanh số 2. Kết quả mô phỏng đánh giá RMSE thể hiện trên hình 7.

Kết quả cho thấy: ở trong vùng nhiễu yếu, $SNR \geq 0$ dB hai thuật toán có hiệu quả làm việc như nhau. Điều này có



Hình 7. Độ lệch chuẩn của các thuật toán

thể được giải thích là mức năng lượng của tín hiệu vượt trội hơn hẳn so với mức năng lượng của nhiễu, nên khi chọn mức năng lượng của riêng tín hiệu hoặc cả tín hiệu và nhiễu, thì mức năng lượng của tín hiệu vẫn vượt trội hơn. Tuy nhiên, khi nhiễu mạnh ($SNR < 0$ dB) việc chọn lọc các điểm t - f của đúng nguồn tín hiệu có ích làm tăng hiệu quả đáng kể so với việc tín trung bình toàn bộ các điểm trên mặt phẳng t - f . Nhiễu mạnh làm cho RMSE tăng theo các mức độ khác nhau của các thuật toán. Tại giá trị $SNR < -10$ dB, với giải pháp đề xuất CSS-STFD-DOA có độ lệch chuẩn khoảng $0,41^0$, trong khi đó, giá trị này của thuật toán STFD-DOA là $1,4^0$.

V. KẾT LUẬN

Bài báo đã phân tích tổng quan về bài toán DOA trong các hệ thống sonar, đánh giá các ưu điểm và hạn chế của những phương pháp đã được công bố. Đồng thời, bài báo cũng xem xét mô hình toán học của tín hiệu tiếng ồn từ các mục tiêu biển có chân vịt, cơ chế phát xạ và các đặc trưng tiếng ồn. Trên cơ sở xem xét biểu diễn STFD để hình thành các ma trận STFD phục vụ cho bài toán DOA, bài báo đã chọn biểu diễn WVD kết hợp với chọn lọc vùng t - f các đặc trưng của tiếng ồn chân vịt, đề xuất giải pháp định hướng CSS-STFD-DOA. Các bài mô phỏng đã được thực hiện để xem xét, đánh giá và so sánh các biểu diễn STFD đối với hai loại nguồn tín hiệu: đơn thành phần và đa thành phần. Khả năng hoạt động của giải pháp đề xuất CSS-STFD-DOA được đánh giá bằng việc định hướng các mẫu tín hiệu xây dựng từ các file âm thanh thực và khảo sát so sánh độ lệch chuẩn định hướng của thuật toán cơ bản và giải pháp mới được đề xuất. Cơ sở toán học và các kết quả mô phỏng khẳng định CSS-STFD-DOA là giải pháp có nhiều ưu điểm so với các thuật toán trước đó, phù hợp cho bài toán định hướng trong sonar.

REFERENCES

- [1] Tho, N.T.N.; Zhao, S.; Jones, D.L. *Robust DOA estimation of multiple speech sources*. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Florence, Italy, 4–9 May 2014; pp. 2287–2291.
- [2] Dey, A., et al., gold-MUSIC based DOA estimation using ULA antenna of DS-CDMA sources with propagation delay

- diversity. International Journal of Electronics and Communications 2018. Volume 84: p. 162-170.
- [3] Feng, A., Z. Zhao, and Q. Yin. *Wideband direction-of-arrival estimation using fast chirplet-based adaptive signal decomposition algorithm*. in IEEE 54th Vehicular Technology Conference. VTC Fall 2001. Proceedings (Cat. No. 01CH37211). 2001. IEEE.
- [4] Asano, F., et al., *Speech enhancement based on the subspace method*. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing 8(5):497- 507. Oct 2000.
- [5] Visser, E., T.-W. Lee, and M. Otsuka. *Speech enhancement in a noisy car environment*. in Proc. 3rd International Conference on Independent Component Analysis and Source Separation. 2001.
- [6] Mitianoudis, N., M.E.J.I.J.o.A.C. Davies, and S. Processing, *Audio source separation: Solutions and problems*. 2004. 18(3): p. 299-314.
- [7] Ali Khan, N., et al., *Direction of arrival estimation using adaptive directional time-frequency distributions*, Springer, 29(2): p. 503-521, 2018.
- [8] Song, H., et al. *Vector-Sensor Array DOA Estimation Based on Spatial Time-Frequency Distribution*. in 2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC). 2018. IEEE.
- [9] Eranti, P.K. and B.D.J.E. Barkana, *An overview of direction-of-arrival estimation methods using adaptive directional time-frequency distributions*, MPDI, 11(9): p. 1321, 2022
- [10] Han, X., et al., *A passive DOA estimation algorithm of underwater multipath signals via spatial time-frequency distributions*. IEEE Transactions on Vehicular Technology 70(4): p. 3439-3455. 2021
- [11] Amin, M.G., et al., *Spatial time-frequency distributions: Theory and applications*, Springer, p. 269-310, 2003.
- [12] Boashash, B., N.A. Khan, and T.J.D.S.P. Ben-Jabeur, *Time-frequency features for pattern recognition using high-resolution TFDs: A tutorial review*. HAL, 40: p. 1-30, 2015.
- [13] Heidenreich, P., L.A. Cirillo, and A.M.J.S.P. Zoubir, *Morphological image processing for FM source detection and localization*, Elsevier, 89(6): p. 1070-1080, 2009.
- [14] Rankine, L., M. Mesbah, and B.J.S.P. Boashash, *IF estimation for multicomponent signals using image processing techniques in the time-frequency domain*, Elsevier, 87(6): p. 1234-1250, 2007.
- [15] Zhang, H., et al., *IF estimation of FM signals based on time-frequency image*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 51(1): p. 326-343, 2015.
- [16] J.Urick, R., *Principles of Underwater sound*, McGraw-Hill, 1983.
- [17] Kumar, G.K., et al. *Simulation of Radiated Noise signature of a marine vessel*. in 2015 IEEE Underwater Technology (UT), 2015.
- [18] Amin, M.G. and Y.J.D.S.P. Zhang, *Direction finding based on spatial time-frequency distribution matrices*, Elsevier, 10(4): p. 325-339, 2000.
- [19] Santos-Domínguez, D., et al., *ShipsEar: An underwater vessel noise database*. 2016. 113: p. 64-69.

PROPOSAL FOR ENHANCING QUALITY OF DIRECTIONAL OF ARRIVAL ALGORITHM BASED ON SPATIAL-TIME-FREQUENCY DISTRIBUTION FOR PASSIVE SONAR SYSTEMS

Abstract : The article provides an overview of direction finding algorithms based on the spatial-time-frequency distribution (STFD), including system models, mathematical foundations, and developmental history.

Additionally, it reviews various target models and typical estimation methods for direction finding based on STFD. A novel solution proposed for maritime propeller-equipped targets is the combination of character specifies selection (CSS) of target features with STFD-based direction finding, termed the CSS-STFD-DOA solution. This solution enhances preprocessing to eliminate noise and selectively picks out characteristic spectral components of the lines spectrum in the low-frequency region. Simulation scenarios are conducted to assess the algorithm's performance using input simulation data constructed based on real-world signals. Simulation results demonstrate that the CSS-STFD-DOA solution exhibits stable operation, accuracy, and superior performance compared to STFD-DOA algorithms, particularly in noisy situation.

Keywords: Sonar, direction of arrival (DOA), time-frequency distribution (TFD), marine target, propeller.



Nguyễn Thanh Chính tốt nghiệp đại học chuyên ngành ra đa năm 2003 và tốt nghiệp thạc sĩ chuyên ngành Kỹ thuật ra đa – dẫn đường năm 2011 tại Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn. Nhận chức danh Nghiên cứu viên chính năm 2015 khi đang công tác tại Viện Kỹ thuật Hải quân. Hiện đang là Nghiên cứu sinh ngành Kỹ thuật ra đa – dẫn đường tại Khoa vô tuyến - điện tử, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn.

Lĩnh vực nghiên cứu chính: Lý thuyết xử lý tín hiệu, bài toán phát hiện và định hướng trong sonar, radar sử dụng mạng anten.



Nguyễn Ngọc Đông tốt nghiệp đại học chuyên ngành kỹ thuật vô tuyến năm 2009, tốt nghiệp thạc sĩ ngành Kỹ thuật vô tuyến năm 2010, nhận bằng tiến sĩ kỹ thuật năm 2018 chuyên ngành hệ thống vô tuyến tại Đại học Tổng hợp Quốc gia thông tin và vô tuyến điện tử Belarus. Hiện đang là giảng viên ngành kỹ thuật ra đa – dẫn đường tại Khoa vô tuyến - điện tử, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn.

Lĩnh vực nghiên cứu chính: Lý thuyết xử lý tín hiệu, xử lý không-thời gian tín hiệu và bài toán phát hiện và định hướng trong sonar, radar sử dụng mạng anten.



Phạm Khắc Hoan tốt nghiệp đại học chuyên ngành Điện tử viễn thông tại Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn năm 2001. Nhận bằng tiến sĩ kỹ thuật chuyên ngành điện – điện tử tại Đại học Tổng hợp Quốc gia thông tin và vô tuyến điện tử Belarus năm 2008. Hiện đang giảng dạy tại Khoa vô tuyến - điện tử, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, học hàm Phó Giáo sư.

Lĩnh vực nghiên cứu: Lý thuyết thông tin và mã hóa, bảo mật thông tin sử dụng hệ thống mã mật và xử lý tín hiệu trong các hệ thống tác chiến điện tử.



Nguyễn Đức Minh tốt nghiệp đại học chuyên ngành Vật lý-Vô tuyến năm 2000 tại Đại học Khoa học tự nhiên- Đại học Quốc gia Hà Nội. Tốt nghiệp Thạc sĩ ngành Công nghệ Điện tử - Viễn thông năm 2006 tại Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội. Nhận bằng tiến sĩ kỹ thuật ngành Kỹ thuật Ra đa-Dẫn đường năm 2019 tại Học viện Kỹ thuật Quân sự.

Hiện đang giảng dạy tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông.

Lĩnh vực nghiên cứu: Lý thuyết phát hiện trong radar nhiều vị trí, xử lý tín hiệu, điện tử máy tính.