

# NGHIÊN CỨU CẢI THIỆN ĐỘ PHÂN GIẢI DỌC CHO SONAR MẶT MỞ TỔNG HỢP NHIỀU MÁY THU SỬ DỤNG XUNG LFM TẠI VÙNG BIỂN VIỆT NAM

Nguyễn Đình Tĩnh\*, Trịnh Đăng Khánh, Nguyễn Ngọc Đông

**Tóm tắt:** Bài báo này đề xuất một giải pháp cải thiện độ phân giải dọc cho sonar mặt mở tổng hợp (SAS) nhiều máy thu sử dụng xung điều tần tuyến tính (LFM) tại vùng biển Việt Nam có tính đến sự thay đổi vector vận tốc truyền âm khi phát và tần số Doppler. Bằng việc mô tả các quá trình vật lý đầy đủ hơn giải pháp kinh điển, giải pháp đề xuất có thể cải thiện độ phân giải dọc cho SAS trong trường hợp có và không có sai số vận tốc truyền âm. Các kết quả mô phỏng minh chứng cho hiệu quả của giải pháp đề xuất với các số liệu đo được ở vùng biển Việt Nam.

**Từ khóa:** Sonar mặt mở tổng hợp; Nhiều máy thu; Phân giải dọc; Chiếu xạ ngược; Sai số vận tốc truyền âm.

## 1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Sonar mặt mở tổng hợp (SAS) hoạt động dựa trên việc kết hợp các tín hiệu thu ở các chu kỳ lặp liên tiếp khi phương tiện mang chuyển động trên một quỹ đạo thẳng để tạo ra độ phân giải dọc (phân giải theo chiều chuyển động của phương tiện mang) cao [1]. Nhờ vậy, SAS được sử dụng rộng rãi trong các ứng dụng tìm kiếm xác tàu đắm, phát hiện các vật thể nhỏ và khảo sát đại dương. Để nâng cao tốc độ quan sát, người ta sử dụng các SAS nhiều máy thu trong các ứng dụng hiện nay của SAS [1, 2]. Trong các hệ thống SAS nhiều máy thu, các xung LFM được sử dụng phổ biến để nâng cao độ phân giải cự ly [3-5].

Khi làm việc trong điều kiện lý tưởng, độ phân giải dọc của SAS bằng một nửa độ dài của một phần tử thu (theo chiều dọc), không phụ thuộc vào cự ly và tần số [1, 3]. Khi có sai số vận tốc truyền âm, nó kém đi theo sai số của vận tốc truyền âm [4]. Để cải thiện giá trị này, có thể giảm kích thước của phần tử thu và tăng số lượng chu kỳ lặp [5, 6]. Giải pháp này yêu cầu tăng số lượng phần tử thu và thời gian xử lý, khó áp dụng trên một phần cứng có sẵn. Giải pháp mềm dẻo hơn là tối ưu hóa các xử lý dựa trên thuật toán tạo ra ảnh SAS có chất lượng cao như thuật toán chiếu xạ ngược (BP - Back projection) [7].

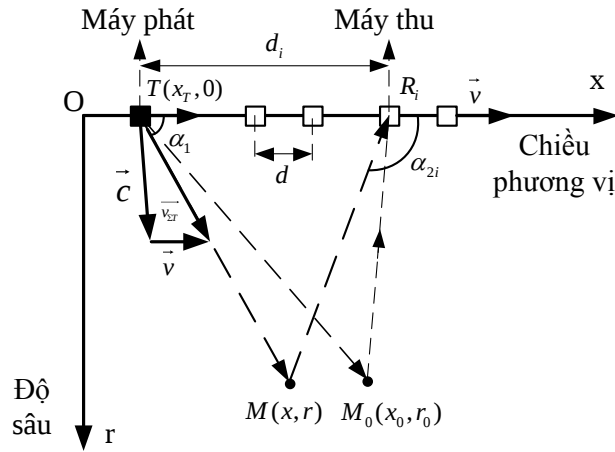
Để giảm sự phụ thuộc của chất lượng ảnh SAS vào độ chính xác nội suy, người ta sử dụng thuật toán BP trên miền tần số [8]. Thuật toán này dựa trên tính chất của biến đổi Fourier là thay thế việc xoay pha trên miền thời gian bằng xoay pha trên miền tần số. Tuy nhiên, thuật toán BP trên miền tần số trong [8] tính thời gian giữ chậm bỏ qua sự thay đổi vector vận tốc truyền âm khi phương tiện mang chuyển động và hiệu ứng Doppler. Vì vậy, độ phân giải dọc thu được có thể chưa đạt được giá trị tốt nhất. Ngoài ra, các thuật toán tái tạo ảnh SAS hiện có đều chưa sử dụng dữ liệu biển Việt Nam cho việc đánh giá hiệu quả.

Dựa trên việc xem xét các quá trình vật lý đầy đủ hơn giải pháp đã có, bài báo này đề xuất một giải pháp cải thiện độ phân giải dọc cho SAS nhiều máy thu sử dụng xung LFM bằng thuật toán BP trên miền tần số ở một vùng biển Việt Nam. Mức cải thiện của giải pháp đề xuất so với giải pháp kinh điển [8] được đánh giá bằng cách so sánh các kết quả mô phỏng được tạo ra trên phần mềm MATLAB trong cả hai trường hợp: có và không có sai số vận tốc truyền âm.

## 2. MÔ HÌNH TÍN HIỆU THU CỦA SAS SỬ DỤNG XUNG LFM

Để tập trung nghiên cứu giải pháp cải thiện độ phân giải dọc, bài báo này xét mô hình hình học 2 chiều của SAS nhiều máy thu như hình 1. Hệ thống SAS trong mô hình này gồm một máy phát và  $N$  phần tử thu đều nhau một khoảng  $d$ , chuyển động thẳng đều theo trục  $Ox$  (chiều phương vị) với vận tốc  $v$ . Gọi  $c$  là vận tốc truyền âm trong nước biển. Tại thời điểm  $t = 0$ , máy phát ở điểm  $O(0,0)$ . Thời gian truyền tín hiệu từ máy phát đến điểm  $M$  là  $\tau_1$  được xác định bởi [9]:

$$\tau_1 = \frac{\sqrt{(x-vt)^2 + r^2}}{v_{\Sigma T}} = \frac{\sqrt{(x-vt)^2 + r^2}}{v \cos \alpha_1 + \sqrt{c^2 - v^2 \sin^2 \alpha_1}} \quad (1)$$



**Hình 1.** Mô hình hình học của SAS nhiều máy thu.

Trong đó,  $\alpha_1$  và  $\vec{v}_{\Sigma T}$  lần lượt được xác định theo các biểu thức [9]:

$$\alpha_1 = \arccos \left( \frac{x - vt}{\sqrt{(x - vt)^2 + r^2}} \right) \quad (2)$$

$$v_{\Sigma T} = v \cos \alpha_1 + \sqrt{c^2 - v^2 \sin^2 \alpha_1} \quad (3)$$

Tín hiệu thu được ở máy thu thứ  $i$  theo hướng từ  $M$  đến  $R_i$  được xác định bởi góc  $\alpha_{2i}$  theo biểu thức [6, 10]:

$$\alpha_{2i} = \arccos \left( \frac{x - [d_i + v(\tau_1 + \tau_{2i}) + vt]}{\sqrt{[x - (d_i + v(\tau_1 + \tau_{2i}) + vt)]^2 + r^2}} \right) \quad (4)$$

Thời gian truyền tín hiệu từ  $M$  đến máy thu thứ  $i$  là  $\tau_{2i}$  được xác định [9, 10]:

$$\tau_{2i} = \frac{v(\sqrt{(x-vt)^2 + r^2} - (d_i + v\tau_1) \cos \alpha_1) + \sqrt{\Delta_i}}{c^2 - v^2} \quad (5)$$

Với  $\Delta_i$  được xác định theo [6, 9].

Khi sử dụng tín hiệu xung LFM, biểu thức mô tả của tín hiệu phát có dạng:

$$s_T(\tau) = w(\tau) \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi\gamma\tau^2) \quad (6)$$

Trong đó,  $\gamma$  là tốc độ điều tần được đo bằng Hz/s,  $w(\tau)$  là đường bao của tín hiệu phát có dạng chữ nhật hoặc hình chuông.

Khi bỏ qua gián đoạn hướng của máy phát, tín hiệu thu được tại điểm  $M$  được xác định tương tự như [11]:

$$s_p(\tau, t) = w(\eta_h(\tau - \tau_1)) \times \exp \left\{ j2\pi f_c \eta_h(\tau - \tau_1) + j\pi\gamma(\eta_h(\tau - \tau_1))^2 \right\} \quad (7)$$

Với  $\eta_1$  là hệ số co giãn theo thời gian của tín hiệu thu được ở điểm M do hiệu ứng Doppler, được xác định:

$$\eta_1 = \frac{c}{c - v \cos \alpha_1} \quad (8)$$

Sau khi bỏ qua hệ số định hướng của máy thu và phản xạ từ mặt biển, tín hiệu thu được ở máy thu thứ  $i$  được thể hiện bằng biểu thức:

$$s_i(\tau, t) = w(\eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{i\_mo})) \exp \left\{ \begin{aligned} &j2\pi f_c \eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{i\_mo}) \\ &+ j\pi \gamma (\eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{i\_mo}))^2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Trong đó,  $\eta_{2i}$  là hệ số co giãn theo thời gian của tín hiệu thu được ở máy thu thứ  $i$ ,  $\tau_{i\_mo}$  là thời gian truyền tín hiệu sửa đổi.

$$\eta_{2i} = \frac{c + v \cos \alpha_{2i}}{c} \quad (10)$$

$$\tau_{i\_mo} = \frac{\tau_1}{\eta_{2i}} + \tau_{2i} \quad (11)$$

Biểu thức (7) mô tả tín hiệu thu của SAS có tính đến sự thay đổi của vector vận tốc truyền âm và hiệu ứng Doppler. Từ mô tả toán học này, thời gian trễ của tín hiệu có thể xác định được chính xác hơn cách tiếp cận kinh điển. Từ đó, một giải pháp cải thiện độ phân giải dọc cho SAS nhiều máy thu sẽ được đề xuất ở phần 3.

### 3. CẢI THIỆN ĐỘ PHÂN GIẢI DỌC CHO SAS NHIỀU MÁY THU BẰNG THUẬT TOÁN BP TRÊN MIỀN TẦN SỐ

Để so sánh hiệu quả của giải pháp đề xuất so với giải pháp kinh điển, bài báo này xét trường hợp cần điều khiển búp sóng của SAS tới điểm  $M_0(x_0, r_0)$  bằng thuật toán BP (hay thuật toán tương quan [2]). Thuật toán BP trên miền tần số thực hiện bước sau: nén xung (LPH - Lọc phối hợp) bằng cách nhân phổ của tín hiệu thu với phổ liên hợp phức của tín hiệu tham chiếu (tín hiệu phát); bù pha trên miền tần số; biến đổi ngược Fourier để biến đổi tín hiệu trở lại miền thời gian; tính tổng và lấy cực đại các tín hiệu đã được bù pha để thu được ảnh của điểm cần quan sát [8].

Với thuật toán này, cường độ tín hiệu phản xạ tại  $M_0(x_0, r_0)$  được xác định bởi [2, 8]:

$$\gamma(x, r, x_0, r_0) = \max \left( \sum_{m=1}^{M_P} \sum_{i=1}^N F^{-1} \left[ S_i(f_\tau, t) P^*(f_\tau) \exp(j2\pi f_\tau \Delta \tau_i) \right] \right) \quad (12)$$

Trong đó,  $F^{-1}$  là phép biến đổi ngược Fourier,  $f_\tau$  là tần số tức thời tương ứng với thời gian  $\tau$ ,  $M_P$  là số lượng chu kỳ lặp để xử lý kết hợp,  $S_i(f_\tau, t)$  là biến đổi Fourier của tín hiệu  $s_i(\tau, t)$  và  $P^*(f_\tau)$  là phổ liên hợp phức của tín hiệu phát.  $\Delta \tau_i$  là lượng giữ chậm thời gian so với một cự ly tham chiếu  $r$ , được xác định [8]:

$$\Delta \tau_i = \tau_i - 2r / c \quad (13)$$

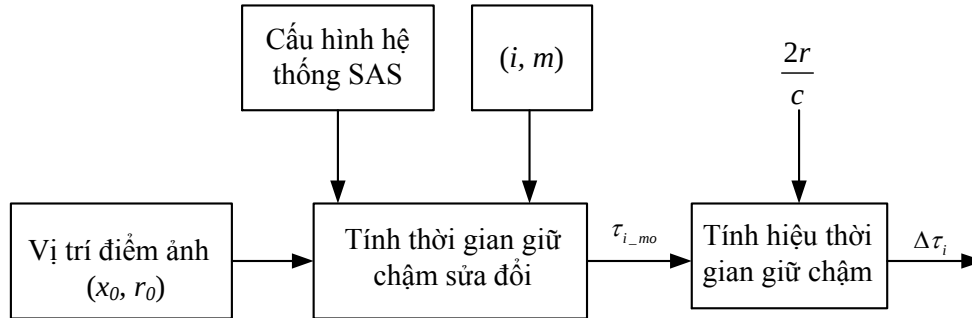
Với thuật toán BP trên miền tần số [8], thời gian trễ  $\tau_i$  được xác định bởi:

$$\tau_i = \frac{v(vt + d_i) + c\sqrt{(vt)^2 + r^2}}{c^2 - v^2} + \frac{\sqrt{\left[ v(vt + d_i) + c\sqrt{(vt)^2 + r^2} \right]^2 + (c^2 - v^2)(2vtd_i + d_i^2)}}{c^2 - v^2} \quad (14)$$

Dựa trên việc tính đến đầy đủ các quá trình vật lý hơn thuật toán kinh điển [8], bài báo này đưa ra cách tính thời gian trễ theo  $\tau_i$  biểu thức:

$$\tau_i = \tau_{i\_mo}(x_0, y_0) \quad (15)$$

Từ đó, sơ đồ của khối tính thời gian giữ chậm sửa đổi được mô tả như hình 2.



**Hình 2.** Sơ đồ của khối tính thời gian giữ chậm sửa đổi.

Với việc xét đầy đủ các quá trình vật lý hơn giải pháp đã có, giải pháp đề xuất có thể cải thiện độ phân giải dọc cho SAS nhiều máy thu và sẽ được minh chứng ở phần 4.

Khi cố định biến cự ly  $r$ , hàm  $\gamma(x, r, x_0, r_0)$  trong (12) chỉ phụ thuộc vào biến phương vị  $x$ , và được gọi là lát cắt phương vị [6, 8 - 10].

#### 4. CÁC KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

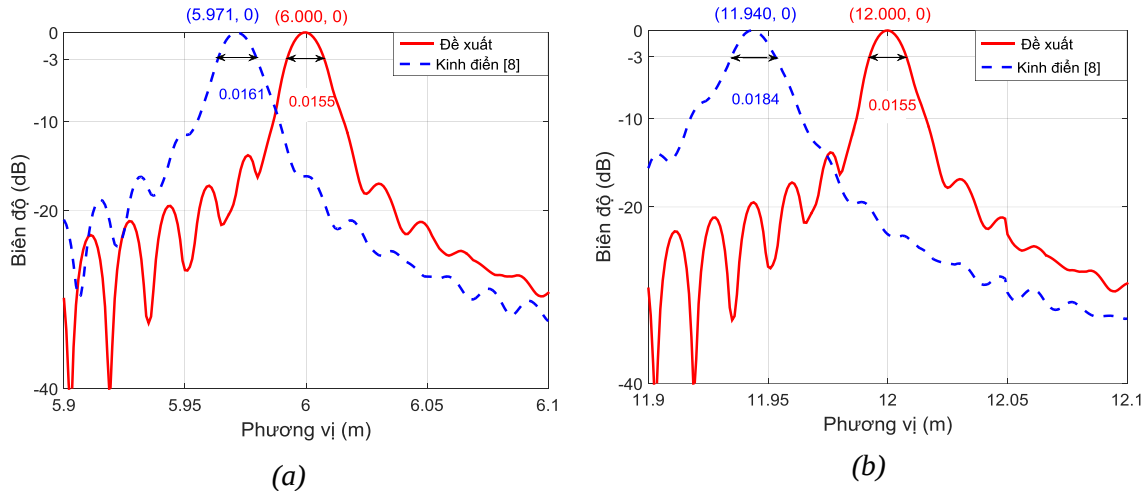
Để đánh giá hiệu quả của giải pháp đề xuất, bài báo này xét một hệ thống SAS nhiều máy thu có cấu hình như bảng 1. Trong đó, độ dài mạng thu, vận tốc phương tiện mang, chu kỳ lặp được chọn từ điều kiện lấy mẫu không gian để giảm mức cánh sóng phụ [1].

**Bảng 1.** Các tham số của hệ thống SAS nhiều máy thu sử dụng xung LFM.

| Các tham số                                                        | Giá trị | Đơn vị  |
|--------------------------------------------------------------------|---------|---------|
| Tần số trung tâm (tần số sóng mang) ( $f_c$ )                      | 100     | kHz     |
| Dải thông của tín hiệu ( $\Delta f_M$ )                            | 20      | kHz     |
| Độ rộng xung phát ( $T_P$ )                                        | 10      | ms      |
| Vận tốc của vật mang ( $v$ )                                       | 1,8     | m/s     |
| Khoảng cách từ tâm máy phát đến tâm phần tử thu đầu tiên ( $d_1$ ) | 0,03    | m       |
| Khoảng cách giữa hai phần tử thu ( $d$ )                           | 0,02    | m       |
| Số lượng các phần tử thu ( $N$ )                                   | 32      | Phần tử |
| Chu kỳ lặp của xung phát ( $T_L$ )                                 | 0,15    | s       |

Xét trường hợp vận tốc truyền âm trong nước biển không đổi và bằng 1500 m/s. Với hai mục tiêu ở các tọa độ (42 m, 6 m) và (84 m, 12 m), số lượng chu kỳ lặp được chọn tương ứng lần lượt là 75 và 150. Các giá trị số chu kỳ lặp này tạo ra gần như cùng độ phân giải của SAS ở hai cự ly và thỏa mãn điều kiện các búp sóng thu chồng lên nhau ở vị trí các mục tiêu được chọn. Giả sử việc lấy mẫu được thực hiện đối với tín hiệu phức, tần số lấy mẫu được chọn lớn hơn tần số cực đại của tín hiệu [12] ( $f_s = 125$  kHz).

Các lát cắt phương vị của các mục tiêu được minh họa trên các hình 3a và hình 3b. Trong mỗi hình vẽ, các đường nét liền và nét đứt lần lượt thể hiện các lát cắt phương vị thu được từ giải pháp đề xuất và giải pháp kinh điển.



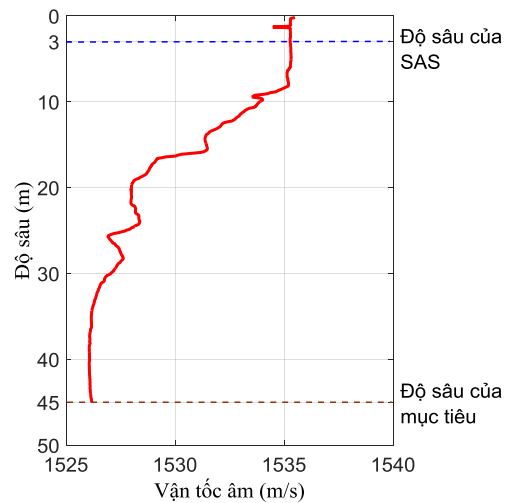
**Hình 3.** Các lát cắt phương vị của SAS nhiều máy thu sử dụng xung LFM

a) Mục tiêu ở (42 m, 6 m), b) Mục tiêu ở (84 m, 12 m).

Các kết quả mô phỏng ở hình 3 cho thấy giải pháp đề xuất cung cấp vị trí mục tiêu với sai số xấp xỉ bằng không. Trong khi đó, giải pháp kinh điển tạo ra ảnh mục tiêu với các sai số vị trí lần lượt là 0,029 m và 0,060 m với hai tọa độ (42 m, 6 m) và (84 m, 12 m). Khi mục tiêu ở cự ly càng xa, giá trị của độ lệch vị trí thu được từ giải pháp kinh điển càng lớn.

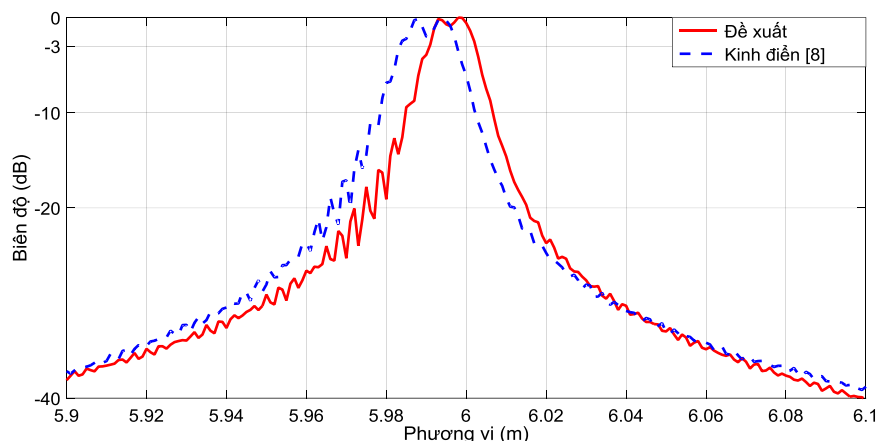
Độ phân giải dọc (tính ở mức -3 dB) thu được giải pháp đề xuất không thay đổi khi ở các cự ly khác nhau theo tỷ lệ của số chu kỳ lặp. Giá trị này là 0,0155 m ở cả hai vị trí (42 m, 6 m) và (84 m, 12 m). Trong khi đó, độ phân giải dọc thu được từ giải pháp kinh điển lần lượt là 0,0161 m và 0,0184 m cho mục tiêu ở (42 m, 6 m) và (84 m, 12 m). Với cùng số chu kỳ lặp, giải pháp đề xuất cho độ phân giải dọc tốt hơn giải pháp truyền thống. Sự cải thiện độ phân giải dọc của giải pháp đề xuất so với giải pháp truyền thống càng lớn khi mục tiêu ở cự ly càng xa.

Khi xét đến sự thay đổi của vận tốc truyền âm theo độ sâu, bài báo này sử dụng số liệu về vận tốc âm thu được ở vùng biển Việt Nam có tọa độ (017°03'09"N, 107°27'17"E) ngày 15 tháng 4 năm 2021. Bản ghi vận tốc âm thanh này thu được nhờ thiết bị đo SWiFT SVP của hãng Valeport [13]. Với các số liệu thu được, bản ghi vận tốc âm thanh ở vùng biển Việt Nam có tọa độ như trên được mô tả như hình 4.



**Hình 4.** Bản ghi tốc độ âm thanh ở vùng biển Việt Nam.

Giả thiết rằng độ sâu của SAS và của mục tiêu (nằm ở đáy) lần lượt là 3 m và 45 m. Từ các giá trị này, độ sâu của mục tiêu so với SAS như mô hình ở phần 2 là 42 m. Với bản ghi vận tốc âm như hình 4, mô hình tín hiệu có thể được mô tả với giá trị của  $c$  được thay bằng giá trị trung bình ( $c = 1529,13$  m/s). Để khảo sát hiệu quả của giải pháp đề xuất khi có sai số vận tốc truyền âm, bài báo này giả thiết rằng vận tốc truyền âm cho xử lý được lấy tại điểm đặt SAS  $c = 1535,27$  m/s (sai số 0,4%) như trong tài liệu [5]. Với các giả thiết này, các lát cắt phương vị của mục tiêu ở (42 m, 6 m) thu được từ giải pháp đề xuất và giải pháp kinh điển được mô tả trên hình 5.



**Hình 5.** Lát cắt phạm vi của SAS nhiều máy thu khi có sai số vận tốc truyền âm.

Hình 5 cho thấy, khi sai số vận tốc truyền âm là 0,4% như trên, độ phân giải thu được từ giải pháp đề xuất và giải pháp kinh điển lần lượt là 0,0114 m và 0,0143 m. Từ đó, giải pháp đề xuất cho độ phân giải tốt hơn 0,0029 m so với giải pháp kinh điển [8].

## 5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất được giải pháp cải thiện độ phân giải dọc cho SAS nhiều máy thu sử dụng xung LFM ở vùng biển Việt Nam bằng thuật toán BP trên miền tần số. Giải pháp đề xuất đã xét đến các quá trình vật lý đầy đủ hơn giải pháp kinh điển gồm việc tính đến sự thay đổi của vector vận tốc truyền âm và hiệu ứng Doppler. Các kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả cải thiện độ phân giải dọc của giải pháp đề xuất khi tái tạo ảnh SAS trong cả hai trường hợp có và không có sai số vận tốc truyền âm.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. N. Kolev, "Sonar Systems," InTech, Croatia (2011), pp.3-25.
- [2]. M. P. Hayes, and P. T. Gough, "Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current Status," IEEE J. Oceanic Engineering, Vol. 34, No. 3 (2009), pp. 207-224.
- [3]. J. Dillon and R. Charron, "Resolution Measurement for Synthetic Aperture Sonar," OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE, Seattle, USA, 2019, pp. 1-6.
- [4]. Xia Ji, Lisheng Zhou, and Weihua Cong, "Effect of incorrect sound velocity on synthetic aperture sonar resolution," proc. MATEC Web of Conf.283, 04013 (2019).
- [5]. R. E. Hansen, T. O. Sæbø, H. J. Callow, and P. E. Hagen, "The SENSOTEK Synthetic Aperture Sonar - results from HUGIN AUV trials," Norwegian Defence Research Establishment (2007), pp. 11-12.
- [6]. N. Đ. Tình, T. Đ. Khánh, N. T. Hưng, and N. V. Trà, "Một giải pháp cải thiện tỷ số tín hiệu/ tạp cho sonar mặt mở tổng hợp nhiều máy thu," Tạp chí Nghiên cứu KH&CN quân sự, Số 71, 02 - 2021, tr. 49-56.
- [7]. X. Zhang, W. Ying, and X. Dai, "High-resolution imaging for the multireceiver SAS," The Journal of Engineering, 19 (2019), pp. 6057-6062.
- [8]. X. Zhang, P. Yang, C. Tan, and W. Ying, "BP algorithm for the multireceiver SAS," IET Radar Sonar Navig., Vol. 13, Iss. 5 (2019), pp. 830-838.
- [9]. N. D. Tình, and T. D. Khanh, "A New Imaging Geometry Model for Determining Phase Distribution in Multi-receiver Synthetic Aperture Sonar," Proc. 6<sup>th</sup> NAFOSTED Conference on Information and Computer Science, Hanoi, Vietnam (2019), pp. 518-521.
- [10]. N. Đ. Tình, T. Đ. Khánh, "Nghiên cứu giải pháp cải thiện chất lượng ảnh cho sonar mặt mở tổng hợp nhiều máy thu," Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật, Số 214, 05-2021, tr. 17-28.

- [11]. D. W. Hawkins and P. T. Gough, "Temporal Doppler effects in SAS," Proc. Inst. Acoust., vol. 26, no. 5 (2004), pp. 1–10.
- [12]. Cumming, I., Wong, F., "Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation," Artech House (2005), Chapter 2.
- [13]. <https://www.valeport.co.uk/products/swift-svp/>

### ABSTRACT

#### RESEARCH ON SOLUTION IMPROVING ALONG-TRACK RESOLUTION FOR MULTI-RECEIVER SYNTHETIC APERTURE SONAR USING LFM PULSES IN THE VIET NAM'S SEA ZONE.

*This paper proposes a solution to improve the along-track resolution for multi-receiver synthetic aperture sonar (SAS) using linear frequency modulated (LFM) pulses considering the variation of acoustic velocity vector during transmission and the Doppler frequency. Based on the more complete consideration of physical processes than the conventional solution, the proposed solution can improve the along-track resolution for SAS with and without the sound velocity error. The simulation results demonstrate the effectiveness with data measured in the sea zone of Vietnam.*

**Keywords:** Synthetic aperture sonar; Multi-receiver; Along-track resolution; Back projection; Sound velocity error.

*Nhận bài ngày 27 tháng 4 năm 2021*

*Hoàn thiện ngày 11 tháng 5 năm 2021*

*Chấp nhận đăng ngày 30 tháng 7 năm 2021*

*Địa chỉ:* Khoa Vô tuyến điện tử/ Học viện Kỹ thuật quân sự.

*\*Email:* tinhnd\_k31@lqdtu.edu.vn.