

# NGHIÊN CỨU XÂY DỰNG MÔ HÌNH TÍN HIỆU THU CHO SONAR MẶT MỞ TỔNG HỢP NHIỀU MÁY THU VỚI DỮ LIỆU VỀ VẬN TỐC TRUYỀN ÂM Ở BIỂN VIỆT NAM

Nguyễn Đình Tĩnh<sup>1,\*</sup>, Nguyễn Thanh Hưng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Khoa Vô tuyến điện tử, Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

## Tóm tắt

Bài báo này xây dựng mô hình tín hiệu thu cho sonar mặt mở tổng hợp (SAS) nhiều máy thu sử dụng tín hiệu liên tục được định cửa (xung CW) và xung điều tần tuyến tính (LFM) tính đến sự thay đổi của giá trị vận tốc truyền âm theo độ sâu và hiệu ứng Doppler. Với việc mô tả đầy đủ các quá trình vật lý hơn các mô hình truyền thống và biểu diễn tường minh tín hiệu về mặt toán học, mô hình đề xuất có thể cung cấp bộ số liệu cho việc nghiên cứu, phát triển các thuật toán tạo ảnh SAS nhằm tiết kiệm thời gian và chi phí thu thập dữ liệu thực tế. Các kết quả mô phỏng thể hiện các đặc trưng của các tín hiệu được tạo ra từ mô hình đề xuất với dữ liệu thực tế về vận tốc truyền âm ở biển Việt Nam.

**Từ khóa:** Sonar mặt mở tổng hợp; nhiều máy thu; mô hình tín hiệu; bản ghi vận tốc; vận tốc tương đương; hiệu ứng Doppler.

## 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 sonar chuyển động trên một quỹ đạo thẳng để tạo ra một mạng ảo có kích thước lớn hơn nhiều lần kích thước vật lý của anten [1]. Với nguyên lý này, SAS có thể tạo ra độ phân giải dọc (phân giải theo phương vị hay phân giải theo chiều chuyển động của SAS) cao, độc lập với cự ly và tần số của tín hiệu [1-3]. Nhờ vậy, SAS được sử dụng rộng rãi trong vẽ bản đồ đáy biển, phát hiện các vật thể nhỏ, tìm kiếm xác tàu đắm và khảo sát địa chất ở đáy đại dương [1, 2].

So với ra đa mặt mở tổng hợp, SAS có tốc độ quét khu vực quan sát chậm hơn do vận tốc truyền âm trong nước nhỏ hơn nhiều vận tốc truyền sóng điện từ trong không khí. Để nâng cao tốc độ quan sát, các SAS nhiều máy thu được cấu hình gồm một bộ chiếu xạ và một mạng nhiều phần tử thu được sử dụng rộng rãi trong thực tế hiện nay [1-4]. Với cấu hình phức tạp và điều kiện làm việc khi phương tiện mang chuyển động liên tục, việc xây dựng một mô hình tín hiệu cho SAS nhiều máy thu có ý nghĩa quan trọng trong việc nghiên cứu và phát triển các thuật toán tái tạo ảnh SAS.

---

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

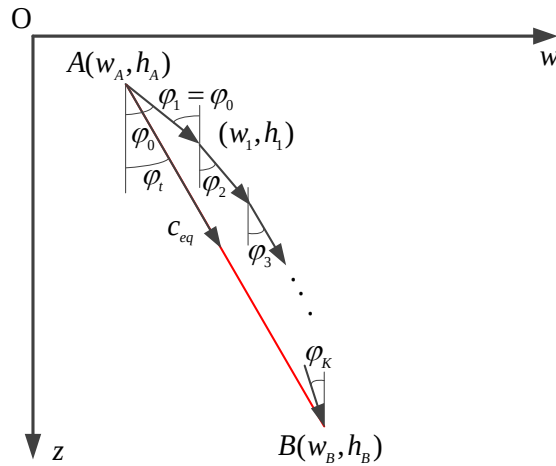
Để xây dựng được mô hình tín hiệu cho SAS nhiều máy thu, người ta thường xem một cặp anten thu/phát như một anten duy nhất nằm ở trung điểm của hai phần tử hay còn gọi là phương pháp xấp xỉ tâm pha PCA [5]. Mô hình dựa trên phương pháp này tạo ra sai số PCA [4]. Để loại bỏ nó, X. Zhang và cộng sự đã đề xuất mô hình tính đến sự chuyển động của anten trong quá trình thu tín hiệu [4, 6]. Tuy nhiên, mô hình này không tính sự thay đổi giá trị vận tốc truyền âm theo độ sâu và hiệu ứng Doppler. Với các điều kiện này, các mô hình truyền thống của SAS không mô tả được đầy đủ các quá trình vật lý.

Dựa trên việc tính đến sự thay đổi của giá trị vận tốc truyền âm theo độ sâu và tần số Doppler, bài báo này xây dựng mô hình tín hiệu thu cho SAS nhiều máy thu sử dụng xung CW và xung LFM với dữ liệu về vận tốc truyền âm ở biển Việt Nam. Từ các biểu thức mô tả và sử dụng công cụ mô phỏng, mô hình tín hiệu được xây dựng có thể cung cấp các bộ dữ liệu cho việc nghiên cứu và phát triển các thuật toán tái tạo ảnh SAS.

## 2. Mô hình tín hiệu thu của SAS nhiều máy thu

### 2.1. Xây dựng công thức tính vận tốc truyền âm tương đương

Theo độ sâu, vận tốc truyền âm thay đổi theo một hàm phi tuyến của độ mặn, nhiệt độ, độ sâu và có thể được mô tả bằng bản ghi vận tốc âm thanh (SVP) [7, 8]. Do đó, tia âm có thể đi theo đường cong (hoặc gấp khúc). Thời gian truyền sóng giữa hai điểm AB như hình 1 có thể được xác định bằng tổng thời gian truyền sóng của từng đoạn nhỏ mà ở đó vận tốc truyền âm không thay đổi. Vận tốc truyền âm tương đương  $c_{eq}$  được xác định bằng cách lấy độ dài quãng đường truyền thẳng AB chia cho tổng thời gian truyền sóng.



Hình 1. Minh họa vận tốc truyền âm tương đương.

Giả sử tia âm xuất phát từ điểm  $A(w_A; h_A)$  với góc hợp với phương thẳng đứng góc  $\varphi_0$ , trong khoảng độ sâu từ  $h_A$  đến  $h_1$  vận tốc truyền âm có giá trị không đổi là  $c_1$  (chia theo SVP đo được), tia âm sẽ truyền thẳng đến vị trí  $(w_1; h_1)$  được xác định bởi:

$$w_1 = w_A + (h_1 - h_A) \tan \varphi_1 = w_A + (h_1 - h_A) \tan \varphi_0 \quad (1)$$

Áp dụng định luật Snell [9], biểu thức thu được khi tia âm đến  $(w_2; h_2)$  là:

$$w_2 = w_1 + (h_2 - h_1) \tan \varphi_2 = w_A + (h_1 - h_A) \tan \varphi_0 + (h_2 - h_1) \tan \left( \arcsin \left( \frac{c_2}{c_1} \sin \varphi_0 \right) \right) \quad (2)$$

Tiếp tục quá trình tính toán, khi tia âm truyền tới B( $w_B; h_B$ ), biểu thức có dạng:

$$w_B = w_A + \sum_{i=1}^K (h_i - h_{i-1}) \tan \left( \arcsin \left( \frac{c_i}{c_1} \sin \varphi_0 \right) \right) \quad (3)$$

trong đó,  $h_0 = h_A$ ,  $h_K = h_B$ .

Ứng với mỗi giá trị góc  $\varphi_0$  và bộ số liệu đo  $h_i$  có thể xác định được  $w_B$ . Từ đó, có thể tính được độ dài đoạn thẳng AB.

Với việc chia đoạn theo dữ liệu đo, thời gian truyền sóng được xác định bởi:

$$\tau_\Sigma = \sum_{i=1}^K \frac{(h_i - h_{i-1})}{c_i \times \cos \varphi_i} = \sum_{i=1}^K \frac{(h_i - h_{i-1})}{c_i \times \cos \left( \arcsin \left( \frac{c_i}{c_1} \sin \varphi_0 \right) \right)} \quad (4)$$

Vận tốc tương đương  $c_{eq}$  khi thay thế thời gian truyền sóng theo quỹ đạo gấp khúc bằng quỹ đạo thẳng được xác định bởi:

$$c_{eq} = \frac{AB}{\tau_\Sigma} = \frac{\sqrt{(h_B - h_A)^2 + (w_B - w_A)^2}}{\tau_\Sigma} \quad (5)$$

Các biểu thức (4) và (5) cho thấy  $c_{eq}$  thay đổi theo góc nghiêng ban đầu ( $\varphi_0$ ).

Khi quan sát các mục tiêu dưới đáy biển, sai số góc nghiêng ban đầu giữa quỹ đạo truyền thực và đường truyền thẳng AB (theo góc nghiêng  $\varphi_i$ ) được xác định bởi:

$$\Delta \varphi = \varphi_0 - \varphi_t = \varphi_0 - \arctan \frac{w_B - w_A}{h_B - h_A} \quad (6)$$

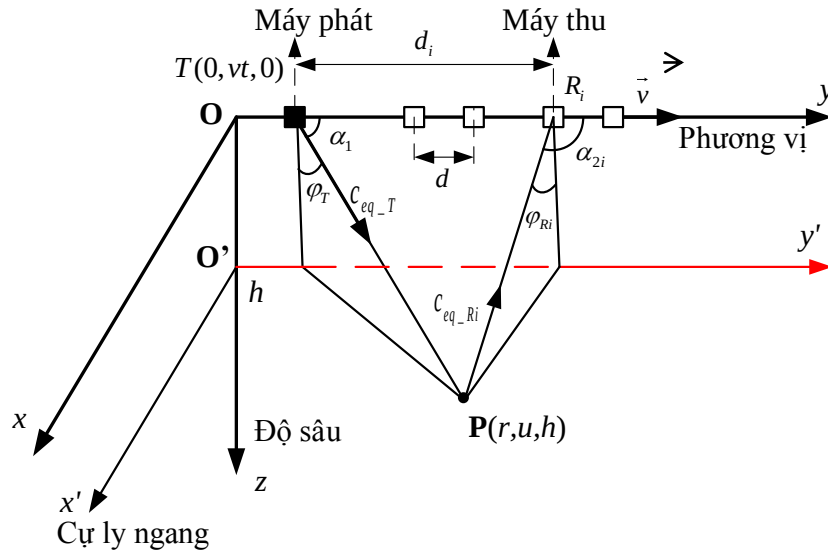
Biểu thức (6) cho thấy  $\Delta \varphi$  phụ thuộc vào  $\varphi_0$ . Sự thay đổi của  $c_{eq}$  và  $\Delta \varphi$  với SVP thực tế sẽ được khảo sát trong mục 3 với các SVP thu được ở biển Việt Nam.

## 2.2. Mô hình hình học có tính đến sự thay đổi giá trị vận tốc truyền âm theo độ sâu

Với sự thay đổi của vận tốc âm theo độ sâu, có thể tạo ra các vùng sáng âm khi truyền sóng âm ở độ sâu lớn và các vùng tối âm khi truyền sóng âm gần với hướng nằm ngang so với nguồn phát xạ [9]. SAS quan sát các mục tiêu nằm ở đáy biển và các độ sâu không lớn, nên có thể bỏ qua các vùng này khi xây dựng mô hình tín hiệu thu.

Nhờ sử dụng  $c_{eq}$ , một mô hình hình học 3 chiều cho SAS nhiều máy thu được mô tả trên hình 2 với các trục Ox, Oy, Oz lần lượt thể hiện chiều cự ly ngang, chiều chuyển

động của phương tiện mang, và chiều độ sâu. Các máy thu cách đều nhau một khoảng  $d$  (bằng kích thước của một phần tử thu theo trục Oy [1]), khoảng cách từ tâm máy phát đến tâm máy thu thứ  $i$  là  $d_i$ .  $c_{eq\_T}$  và  $c_{eq\_Ri}$  là các vận tốc tương đương khi phát và thu ở máy thu thứ  $i$  theo (5). Để đơn giản, SAS được xem là chuyển động thẳng đều với vận tốc  $v$ .



Hình 2. Mô hình hình học của SAS nhiều máy thu.

Giả sử tại  $t = 0$  máy phát tại  $(0;0;0)$ , tại thời điểm  $t$  máy phát tại  $T(0,vt,0)$ . Thời gian truyền sóng từ máy phát đến mục tiêu điểm tại  $P(r,u,h)$  được xác định bởi:

$$\tau_1 = \frac{\sqrt{(u-vt)^2 + r^2 + h^2}}{c_{eq\_T}} \quad (7)$$

trong đó,  $c_{eq\_T}$  là vận tốc truyền âm tương đương khi phát theo góc nghiêng ban đầu:

$$\varphi_T \approx \arccos \frac{h}{\sqrt{(u-vt)^2 + r^2 + h^2}} \quad (8)$$

Phần sau sẽ chứng minh sai khác của  $c_{eq}$  tính theo đường truyền thẳng  $\varphi_t$  và tính theo góc nghiêng thực tế  $\varphi_0$  rất nhỏ với các SVP thu được từ biển Việt Nam.

Góc giữa hướng chuyển động của SAS và hướng truyền sóng TP được xác định [10]:

$$\alpha_1 = \arccos \left( \frac{u-vt}{\sqrt{(u-vt)^2 + r^2 + h^2}} \right) \quad (9)$$

Khi tín hiệu đến điểm P, sự tán xạ sẽ xảy ra theo các hướng. Tín hiệu phản xạ bắt đầu truyền đến máy thu thứ  $i$  theo hướng  $\overrightarrow{PR_i}$  được xác định bởi góc  $\alpha_{2i}$ :

$$\alpha_{2i} = \arccos \left( \frac{u - (d_i + v\tau_1 + vt)}{\sqrt{[u - (d_i + v\tau_1 + vt)]^2 + r^2 + h^2}} \right) \quad (10)$$

Thời gian truyền tín hiệu từ điểm P đến máy thu thứ  $i$  là  $\tau_{2i}$  thỏa mãn:

$$\begin{aligned} c_{eq\_Ri}^2 \tau_{2i}^2 &= (u - vt)^2 + r^2 + h^2 + (d_i + v\tau_1 + v\tau_{2i})^2 \\ &\quad - 2\sqrt{(u - vt)^2 + r^2 + h^2} (d_i + v\tau_1 + v\tau_{2i}) \cos \alpha_1 \end{aligned} \quad (11)$$

trong đó,  $c_{eq\_Ri}$  là vận tốc truyền âm tương đương khi thu tín hiệu ở máy thu thứ  $i$  theo góc nghiêng ban đầu  $\varphi_{Ri}$  được xác định bởi:

$$\varphi_{Ri} \approx \arccos \frac{h}{\sqrt{[u - (d_i + v\tau_1 + vt)]^2 + r^2 + h^2}} \quad (12)$$

Sai khác của  $c_{eq}$  khi thu do sai số góc nghiêng cũng rất nhỏ và sẽ được minh chứng ở phần 3.1 với các SVP thu được từ biển Việt Nam.

Biến đổi (11), nhận được phương trình bậc 2 (ẩn  $\tau_{2i}$ ) sau:

$$\begin{aligned} (c_{eq\_Ri}^2 - v^2) \tau_{2i}^2 - 2v \left( d_i + v\tau_1 - \sqrt{(u - vt)^2 + r^2 + h^2} \times \cos \alpha_1 \right) \tau_{2i} \\ - \left( (u - vt)^2 + r^2 + h^2 + (d_i + v\tau_1)^2 - 2\sqrt{(u - vt)^2 + r^2 + h^2} (d_i + v\tau_1) \cos \alpha_1 \right) = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

Giải phương trình bậc 2 này và lấy nghiệm dương,  $\tau_{2i}$  được xác định:

$$\tau_{2i} = \frac{v \left( d_i + v\tau_1 - \sqrt{(u - vt)^2 + r^2 + h^2} \times \cos \alpha_1 \right) + \sqrt{\Delta_i}}{c_{eq\_Ri}^2 - v^2} \quad (14)$$

trong đó,  $\Delta_i$  là biệt thức của phương trình bậc 2 (13):

$$\begin{aligned} \Delta_i &= v^2 \left( d_i + v\tau_1 - \sqrt{(u - vt)^2 + r^2 + h^2} \times \cos \alpha_1 \right)^2 \\ &\quad + (c_{eq\_Ri}^2 - v^2) \left( (u - vt)^2 + r^2 + h^2 + (d_i + v\tau_1)^2 \right. \\ &\quad \left. - 2\sqrt{(u - vt)^2 + r^2 + h^2} (d_i + v\tau_1) \cos \alpha_1 \right) \end{aligned} \quad (15)$$

Từ mô hình hình học này, có thể xây dựng các mô hình tín hiệu thu từ SAS sử dụng xung CW, xung LFM, hoặc xung điều tần hyperbol (HFM) [11]. Do các xung CW

và xung LFM được sử dụng phổ biến trong các hệ thống SAS [1, 4, 6, 11] nên bài báo này tập trung xây dựng mô hình tín hiệu thu cho SAS sử dụng hai loại tín hiệu này.

### 2.3. Mô hình tín hiệu thu của SAS sử dụng xung CW

Với SAS sử dụng xung CW, tín hiệu phát có tần số mang  $f_c$  được biểu diễn bởi:

$$s_r(\tau, t) = w(\tau) \exp(j2\pi f_c \tau) \quad (16)$$

trong đó,  $w(\tau)$  là dạng đường bao của tín hiệu phát (chữ nhật hoặc hình chuông).

Tín hiệu đến điểm P được mô tả bằng biểu thức:

$$s_p(\tau, t) = \omega_{TP}(t) w[\eta_1(\tau - \tau_1)] \times \exp\{j2\pi f_c [\eta_1(\tau - \tau_1)]\} \quad (17)$$

trong đó:  $\omega_{TP}(t)$  là hệ số định hướng của máy phát đến điểm P,  $\eta_1$  là hệ số co giãn tín hiệu trên miền thời gian thu được ở điểm P do hiệu ứng Doppler [12]:

$$\eta_1 = \frac{c_{eq\_T}}{c_{eq\_T} - v \cos \alpha_1} \quad (18)$$

Tín hiệu thu được ở máy thu thứ  $i$  do các tán xạ từ điểm P với giả thiết sự tán xạ các hướng là như nhau được xác định bởi:

$$s_i(\tau, t) = \omega_{TP}(t) \omega_{Ri}(t) w[\eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{2i}) - \eta_1 \tau_1] \times \exp\{j2\pi f_c \eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{2i}) - \eta_1 \tau_1\} \quad (19)$$

trong đó:  $\omega_{Ri}(t)$  là hệ số định hướng của máy thu thứ  $i$  đến điểm P,  $\eta_{2i}$  là hệ số co giãn tín hiệu trên miền thời gian thu được ở máy thu thứ  $i$  do hiệu ứng Doppler [12]:

$$\eta_{2i} = \frac{c_{eq\_Ri} + v \cos \alpha_{2i}}{c_{eq\_Ri}} \quad (20)$$

Khi kết hợp các tín hiệu trong độ rộng búp sóng của các phần tử thu và phát, các hệ số định hướng  $\omega_{TP}(t)$  và  $\omega_{Ri}(t)$  gần như không đổi và có thể được bỏ qua. Với điều kiện này và bỏ qua từ mặt biển, tín hiệu thu được ở máy thu thứ  $i$  được xác định bởi:

$$s_i(\tau, t) = w[\eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{2i}) - \eta_1 \tau_1] \times \exp\{j2\pi f_c \eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{2i}) - \eta_1 \tau_1\} \quad (21)$$

Đặt:

$$\tau_{i\_mo} = \frac{\tau_1}{\eta_{2i}} + \tau_{2i} \quad (22)$$

là thời gian truyền tín hiệu sửa đổi.

Biểu thức ngắn gọn mô tả tín hiệu thu ở máy thu thứ  $i$  là:

$$s_i(\tau, t) = w(\eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{i\_mo})) \exp\{j2\pi f_c \eta_1 \eta_{2i}(\tau - \tau_{i\_mo})\} \quad (23)$$

## 2.4. Mô hình tín hiệu thu của SAS sử dụng xung LFM

Với hệ thống SAS sử dụng xung LFM, biểu thức mô tả tín hiệu phát có dạng:

$$s_T(\tau) = w(\tau) \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi\gamma\tau^2) \quad (24)$$

trong đó,  $\gamma$  là tốc độ điều tần được đo bằng Hz/s.

Tương tự phần 2.3, tín hiệu thu được tại điểm P có dạng:

$$s_p(\tau, t) = w(\eta_1(\tau - \tau_1)) \times \exp\left\{j2\pi f_c \eta_1(\tau - \tau_1) + j\pi\gamma(\eta_1(\tau - \tau_1))^2\right\} \quad (25)$$

Tín hiệu thu được ở máy thu thứ  $i$  được thể hiện bằng biểu thức:

$$s_i(\tau, t) = w(\eta_1\eta_{2i}(\tau - \tau_{2i}) - \eta_1\tau_1) \times \exp\left\{j2\pi f_c (\eta_1\eta_{2i}(\tau - \tau_{2i}) - \eta_1\tau_1) + j\pi\gamma(\eta_1\eta_{2i}(\tau - \tau_{2i}) - \eta_1\tau_1)^2\right\} \quad (26)$$

Với việc sử dụng thời gian truyền tín hiệu sửa đổi như (22), biểu thức ngắn gọn mô tả tín hiệu thu của SAS sử dụng xung LFM ở máy thu thứ  $i$  là:

$$s_i(\tau, t) = w(\eta_1\eta_{2i}(\tau - \tau_{i\_mo})) \exp\left\{j2\pi f_c \eta_1\eta_{2i}(\tau - \tau_{i\_mo}) + j\pi\gamma(\eta_1\eta_{2i}(\tau - \tau_{i\_mo}))^2\right\} \quad (27)$$

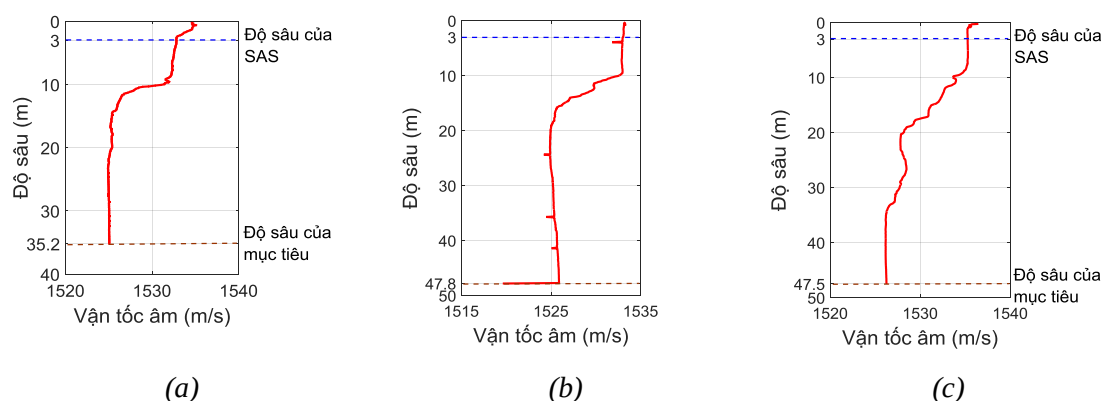
Với các biểu thức (23) và (27), có thể tạo ra được các bộ dữ liệu thu mô tả các quá trình vật lý đầy đủ hơn các mô hình truyền thống.

## 3. Khảo sát sự thay đổi của vận tốc truyền âm tương đương

Để minh họa cho việc tính  $c_{eq}$  từ các SVP thực, phần này sử dụng các SVP từ biển Việt Nam với các tọa độ và thời gian: (16°59'04''N, 107°20'05''E) và (17°03'42''N, 107°26'28''E) cùng ngày 12/4/2021, (17°03'33''N, 107°27'04''E) ngày 15/4/2021. Các SVP này thu được nhờ thiết bị đo SWiFT SVP của hãng Valeport [8] và được mô tả như hình 3. Với độ sâu máy phát và các máy thu của SAS là 3 m và mục tiêu ở đáy biển, độ sâu của của mục tiêu so với SAS theo mô hình hình học ở phần 2.2 ứng với 3 SVP lần lượt là 32,2 m, 44,8 m và 44,5 m.

Xét hệ thống SAS nhiều máy thu có các tham số như bảng 1. Trong đó, kích thước một phần tử thu theo chiều dọc cũng bằng khoảng cách (tính từ tâm) giữa hai phần tử thu liên tiếp và vận tốc chuyển động của phương tiện mang  $v$  được chọn từ điều kiện để tránh xuất hiện nhiễu búp chính khi tổng hợp mặt mở ( $vT_l \leq L/2$ ) [1]. Với chu kỳ lặp là 0,21 m, hệ thống có thể quan sát được mục tiêu ở đáy theo cự ly nghiêng cực đại là 150 m. Từ đó, góc nghiêng cực đại so với phương thẳng đứng được xác định:

$$\varphi_{t\max} = \arccos \frac{32,2}{150} \approx 78^\circ \quad (28)$$

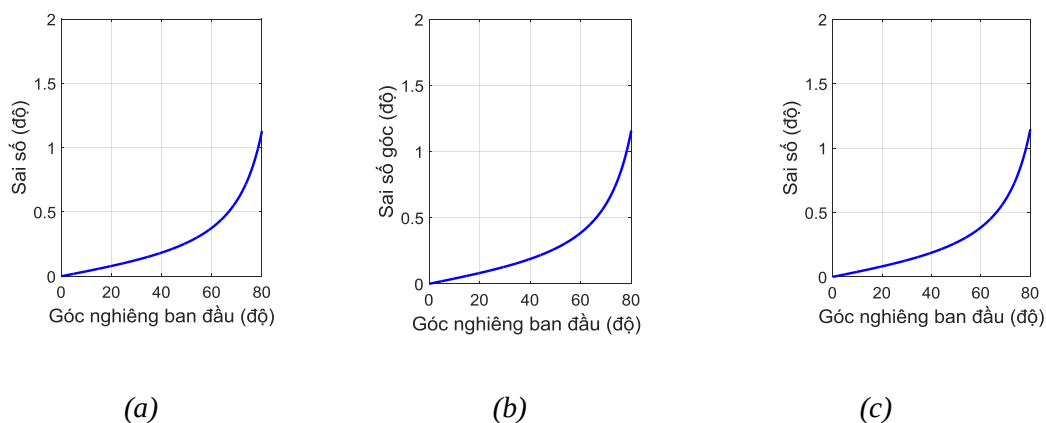


Hình 3. Các SVP thu được ở vùng biển Việt Nam ở các tọa độ  
a) ( $16^{\circ}59'04''N$ ,  $107^{\circ}20'05''E$ ); b) ( $17^{\circ}03'42''N$ ,  $107^{\circ}26'28''E$ ); c) ( $17^{\circ}03'33''N$ ,  $107^{\circ}27'04''E$ ).

Bảng 1. Các tham số của SAS nhiều máy thu

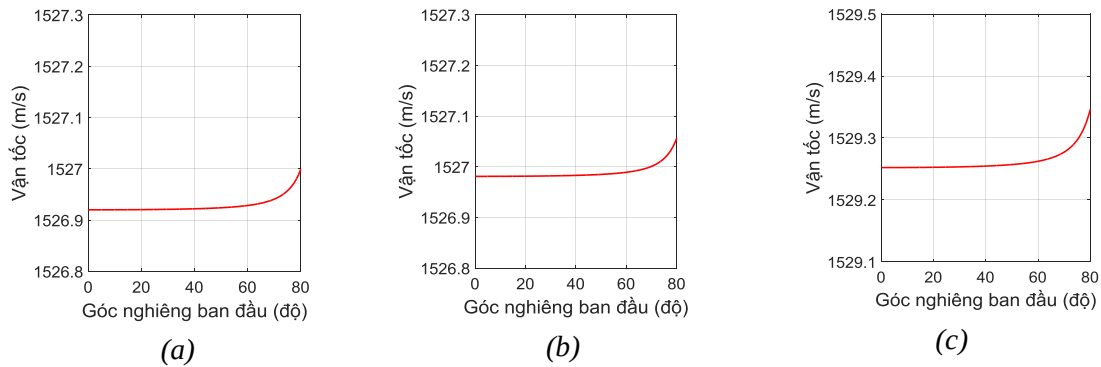
| Các tham số                                                | Giá trị | Đơn vị  |
|------------------------------------------------------------|---------|---------|
| Tần số sóng mang ( $f_c$ )                                 | 100     | kHz     |
| Vận tốc của phương tiện mang ( $v$ )                       | 2       | m/s     |
| Khoảng cách từ máy phát đến phần tử thu đầu tiên ( $d_1$ ) | 0,03    | m       |
| Khoảng cách giữa hai phần tử thu liên tiếp ( $d$ )         | 0,02    | m       |
| Số lượng các phần tử thu ( $N$ )                           | 50      | phần tử |
| Chu kỳ lặp của xung phát ( $T_l$ )                         | 0,2     | s       |

Để khảo sát sự thay đổi của các tham số trong dải góc nghiêng rộng hơn, góc nghiêng cực đại được chọn là  $80^{\circ}$ . Sự thay đổi  $\Delta\varphi$  và  $c_{eq}$  với dải góc nghiêng  $\varphi_0 = 0^{\circ}$  đến  $\varphi_0 = 80^{\circ}$  ứng với 3 SVP trên lần lượt được mô tả trong hình 4 và hình 5.



Hình 4. Các sai số góc nghiêng  $\Delta\varphi$  với các SVP ở biển Việt Nam.





Hình 5. Các vận tốc truyền âm tương đương với các SVP ở biển Việt Nam.

Từ hình 4 và hình 5, các giá trị sai số cực đại của góc nghiêng  $\Delta\varphi_{\max}$ , sai số cực đại vận tốc truyền âm tương đương  $\Delta c_{eq\max}$  theo  $\Delta\varphi_{\max}$  và dải thay đổi của  $c_{eq}$  khi quan sát mục tiêu dưới đáy biển với  $\varphi_{0\max} = 80^\circ$  được thể hiện như bảng 2.

Bảng 2. Sai số góc nghiêng lớn nhất và sự thay đổi của vận tốc truyền âm tương đương theo góc nghiêng lớn nhất với các SVP

| Tọa độ thu được SVP         | $\Delta\varphi_{\max}$ (độ) | $\Delta c_{eq\max}$ (%) | $c_{eq\min}$ (m/s) | $c_{eq\max}$ (m/s) |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------|
| (16°59'04''N, 107°20'05''E) | 1,13                        | 0,0009                  | 1526,920           | 1526,999           |
| (17°03'42''N, 107°26'28''E) | 1,16                        | 0,0008                  | 1526,981           | 1527,056           |
| (17°03'33''N, 107°27'04''E) | 1,15                        | 0,0012                  | 1529,252           | 1529,347           |

Các kết quả ở bảng 2 cho thấy với việc quan sát các mục tiêu đáy biển,  $\Delta c_{eq\max}$  theo  $\Delta\varphi_{\max}$  rất nhỏ nên có thể sử dụng vận tốc truyền âm tương đương theo góc nghiêng ban đầu  $\varphi_t$  thay thế cho góc nghiêng ban đầu  $\varphi_0$ . Hay nói cách khác, các phép tính gần đúng của  $c_{eq\_T}$  và  $c_{eq\_Ri}$  có sai số rất nhỏ. Đặc biệt, dải biến thiên của vận tốc truyền âm tương đương cũng rất nhỏ nên có thể sử dụng một giá trị vận tốc truyền âm tương đương ở điểm giữa của dải cho xử lý tổng hợp mặt mờ.

#### 4. Tạo tín hiệu thu cho SAS nhiều máy thu sử dụng xung CW và LFM với SVP từ biển Việt Nam

##### 4.1. Mô phỏng tín hiệu thu của SAS nhiều máy thu sử dụng xung CW

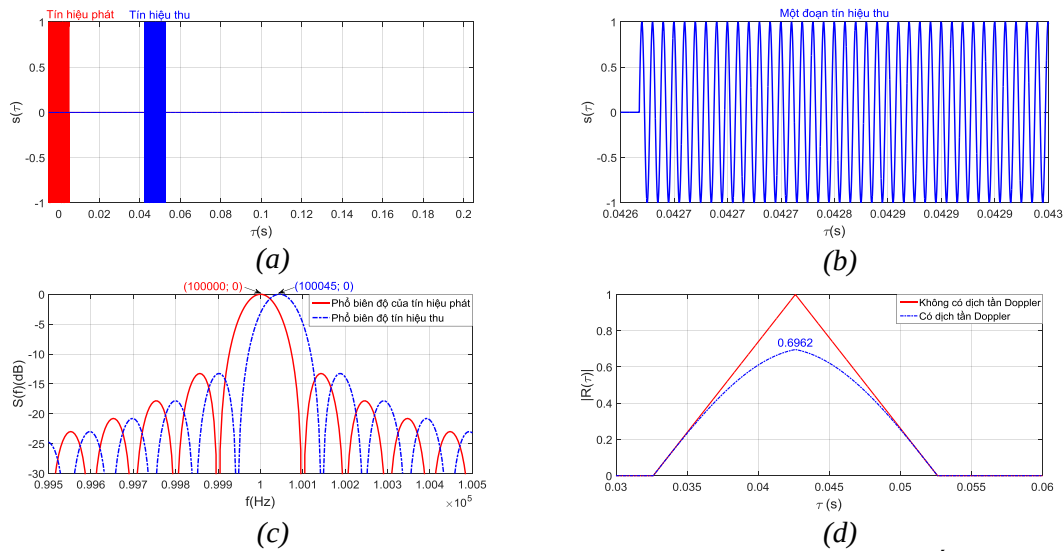
Để minh họa cho việc tạo ra tín hiệu thu với SAS sử dụng xung CW, phần này xét một ví dụ của hệ thống SAS nhiều máy thu có cấu hình như bảng 1 với các tham số  $f_0 = 100$  KHz,  $d = 0,02$  m,  $d_1 = 0,03$  m,  $v = 1,5$  m/s,  $T_l = 0,21$  s, độ rộng xung  $\tau_x = 10$  ms. Từ đó, có thể tạo ra được dữ liệu thu cho một máy thu bất kỳ thứ  $i$  ( $i \leq N$ ) ở chu kỳ lặp bất kỳ có tín hiệu nằm trong độ rộng búp sóng. Kết quả mô phỏng tín hiệu thu từ mục tiêu điểm ở (16 m; 6 m; 32,2 m) trong hệ tọa độ Oxyz với SVP ở tọa độ địa lý

(16°59'04''N, 107°20'05''E) từ máy thu thứ 45, chu kỳ lặp thứ 2 và tần số lấy mẫu ( $f_s$ ) là 10 MHz trên phần mềm MATLAB 2015A như hình 6a và hình 6b.

Hình 6a và hình 6b thể hiện được thời gian trễ của tín hiệu từ khi phát đến khi thu tại máy thu. Từ đó, các tín hiệu thu ở các máy thu và các chu kỳ lặp có thể được tạo ra và được ghi vào các file dữ liệu cho việc nghiên cứu và phát triển các thuật toán tái tạo ảnh SAS. Với các tín hiệu này, phổ biên độ của chúng được phân tích như hình 6c.

Thay các tham số của hệ thống SAS nhiều máy thu vào các công thức (18) và (20), các hệ số cơ giản tín hiệu trên miền thời gian có các giá trị lần lượt là:  $\eta_1 = 1,000153$ ,  $\eta_{2i} = 1,000299$ . Từ đó lượng dịch tần Doppler cho trường hợp này được xác định:

$$f_d = f_0(\eta_1\eta_{2i} - 1) = 100000 \times (1,000153 \times 1,000299 - 1) = 45,2(\text{Hz})$$



Hình 6. Mô tả các xung CW được tạo ra và phân tích các tham số

a) Tín hiệu phát - thu; b) Một đoạn tín hiệu thu; c) Phổ biên độ tần số; d) Đầu ra LPH.

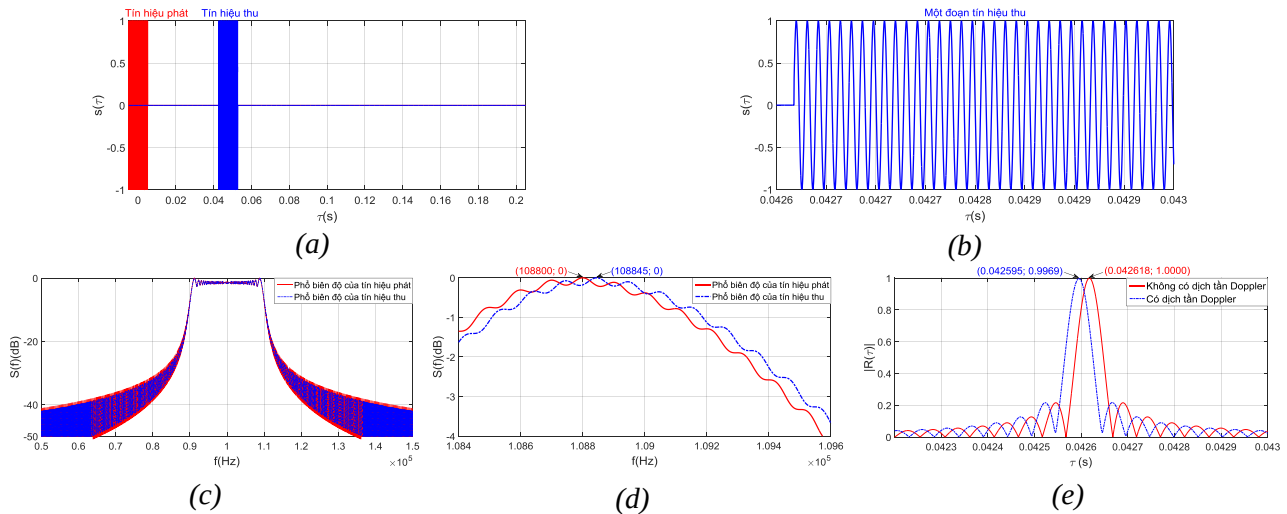
Hình 6c cho thấy lượng dịch tần Doppler của tín hiệu thu so với tín hiệu phát là 45 Hz. Kết quả này cũng phù hợp với tính toán theo các công thức (18) và (20) là 45,2 Hz.

Để đánh giá ảnh hưởng của lượng dịch tần Doppler, phần này so sánh tín hiệu đầu ra bộ lọc phối hợp (LPH) của hai tín hiệu đầu vào có cùng thời gian trễ sửa đổi. Tín hiệu thứ nhất không có dịch tần Doppler (tín hiệu phát được giữ chậm) và tín hiệu thứ 2 có dịch tần Doppler (tín hiệu thu từ hệ thống SAS nhiều máy thu). Minh họa của các tín hiệu sau LPH trong hai trường hợp này được thể hiện trên hình 6d. Kết quả trên hình này cho thấy đường bao của tín hiệu thu từ SAS sau LPH có vị trí cực đại trùng với vị trí cực đại của tín hiệu phát được giữ chậm cùng thời gian nhưng mức đỉnh chỉ bằng 0,6962 so với mức đỉnh của tín hiệu sau LPH khi không có dịch tần Doppler.

#### 4.2. Mô phỏng tín hiệu thu của SAS nhiều máy thu sử dụng xung LFM

Để tạo tín hiệu thu với SAS sử dụng xung LFM, phần này xét hệ thống SAS có cấu hình tương tự như hệ thống SAS sử dụng xung CW và có độ rộng phổ của tín hiệu phát  $\Delta f_M = 20$  KHz. Tương tự như đối với SAS sử dụng xung CW, có thể tạo ra bộ dữ liệu thu ở máy thu 25 chu kỳ lặp 2 từ mục tiêu điểm ở (16 m; 6 m; 32,2 m) với SVP thu được ở tọa độ địa lý (16°59'04''N, 107°20'05''E) như hình 7a và hình 7b, phổ biên độ của tín hiệu phát và thu như hình 7c và hình 7d, tín hiệu ở đầu ra LPH như hình 7e.

Hình 7d cho thấy phổ biên độ tần số của tín hiệu thu so với tín hiệu phát cũng dịch 45 Hz và bằng với tính toán lý thuyết. Từ hình 7e, tín hiệu ra LPH có vị trí cực đại bị dịch so với vị trí cực đại của tín hiệu phát được giữ chậm cùng thời gian với một lượng là 23  $\mu$ s. Ngoài ra, mức đỉnh của tín hiệu sau nén khi có dịch tần Doppler chỉ bằng 0,9969 so với mức đỉnh của tín hiệu sau nén xung khi không có dịch tần Doppler.



Hình 7. Mô tả các xung LFM được tạo ra và phân tích các tham số  
 a) Tín hiệu phát - thu; b) Một đoạn tín hiệu thu; c) Phổ biên độ tần số;  
 d) Phổ biên độ phóng to; e) Đầu ra LPH.

### 5. Kết luận

Bài báo đã xây dựng được mô hình tín hiệu thu cho SAS nhiều máy thu với việc xem xét các quá trình vật lý đầy đủ hơn các mô hình truyền thống bao gồm sự thay đổi của vận tốc truyền âm theo độ sâu và hiệu ứng Doppler. Các kết quả khảo sát với SVP từ biển Việt Nam cho thấy  $\Delta \varphi_{\max}$  và  $c_{eq}$  thay đổi rất nhỏ trong dải góc nghiêng quan sát của SAS. Từ đó, có thể xác định hoàn toàn được các tham số của tín hiệu thu từ SAS gồm thời gian giữ chậm, lượng dịch tần Doppler theo giá trị vận tốc truyền âm tương đương đã tính

được. Dựa trên mô hình tín hiệu được xây dựng và các công cụ mô phỏng, các bộ dữ liệu thu của hệ thống SAS nhiều máy thu có thể được tạo ra và phân tích phục vụ cho việc nghiên cứu, phát triển các thuật toán tái tạo ảnh SAS.

## Lời cảm ơn

Chân thành cảm ơn nhóm thực hiện dự án mã số CNC.M02.DAHT/2018 do Tiến sĩ Nguyễn Mạnh Cường làm chủ nhiệm đã cung cấp các SVP ở biển Việt Nam.

## Tài liệu tham khảo

- [1] N. Kolev, "Sonar Systems," *InTech*, Croatia, 2011, pp. 3-25.
- [2] R. E. Hansen, "Synthetic Aperture Sonar Technology Review," *Marine Technology Society Journal*, 47(5), September 2013, pp. 117-127.
- [3] M. P. Hayes, P. T. Gough, "Synthetic Aperture Sonar: A Review of Current Status," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 34(3), July 2009, pp. 207-224.
- [4] X. Zhang, J. Tang, H. Zhong, "Multireceiver Correction for the Chirp Scaling Algorithm in Synthetic Aperture Sonar," *IEEE J. Oceanic Engineering*, 39(3), July 2014, pp. 472-481.
- [5] A. Bellettini, M. A. Pinto, "Theoretical Accuracy of Synthetic Aperture Sonar Micronavigation Using a Displaced Phase-Center Antenna," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 27, No. 4, October 2002, pp. 780-789.
- [6] X. Zhang, P. Yang, C. Tan, W. Ying, "BP algorithm for the multireceiver SAS," *IET Radar Sonar Navig.*, 13(5), February 2019, pp. 830-838.
- [7] P. C. Etter, *Underwater acoustic modeling and simulation*, Fourth edition, Taylor & Francis Group, 2013, pp. 28-35.
- [8] <https://www.valeport.co.uk/products/swift-svp/>
- [9] A. D. Waite, *Sonar for practising Engineers*, John Wiley & Sons Ltd., England, 2002, pp. 51- 60.
- [10] N. D. Tinh, T. D. Khanh, "A New Imaging Geometry Model for Multi-receiver SAS Considering the Variation of Sound Speed in Seawater," *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing*, Vol. 10, No. 4, August 2021, pp. 302-308.
- [11] R. E. Hansen, T. O. Sæbø, H. J. Callow, P. E. Hagen, The SENSOTEK Synthetic Aperture Sonar: Results from HUGIN AUV trials, Norwegian Defence Research Establishment (FFI), 2007, pp. 11-21.
- [12] D. W. Hawkins, P. T. Gough, "Temporal Doppler effects in SAS," *Proc. Inst. Acoust.* 26(5), 2004, pp. 1-10.

## INVESTIGATION ON THE CONSTRUCTION OF THE RECEIVED SIGNAL MODEL FOR MULTI-RECEIVER SYNTHETIC APERTURE SONAR IN VIETNAM'S SEA

**Abstract:** *In this article, the received signal models are constructed for multi-receiver synthetic aperture sonar (SAS) using CW pulses and LFM pulses when considering the change of acoustic velocity in seawater and the Doppler effect. With a more complete description of the physical processes than the traditional models and the mathematical representation of signals, the proposed model can provide data sets for the research and the development of SAS imaging algorithms to save time and cost in actual data collection. The simulation results illustrate the characteristics of the signals generated from the proposed model with real data of acoustic velocity in Vietnam's sea.*

**Keywords:** Synthetic aperture sonar (SAS); multi-receiver; signal model; sound velocity profile; equivalent velocity; Doppler effect.

*Nhận bài: 05/01/2022; Hoàn thiện sau phản biện: 07/03/2022; Chấp nhận đăng: 16/09/2022*

