NGHIÊN CỨU MỘT SỐ THUẬT TOÁN ĐẢO ÂM CHO PHÉP ƯỚC LƯỢNG HIỆU QUẢ DỮ LIỆU VẬN TỐC ÂM DƯỚI NƯỚC VÀ MỘT SỐ ĐẶC TRƯNG VẬT LÝ LỚP ĐÁY BIỂN TRONG VÙNG BIỂN NƯỚC NÔNG

Lâm Viết Huy [1*], Ngô Thành Dũng [2], Trịnh Đăng Khánh[2]

Tóm tắt: *Nghiên cứu lý thuyết về đảo âm dưới nước nhằm xác định các tham số địa lý (ví dụ vị trí của nguồn âm và bộ thu, độ sâu đáy biển) và các tham số về môi trường (như dữ liệu vận tốc âm, mật độ lớp đáy, sự suy giảm và độ dày tại các lớp đáy). Bài báo giới thiệu tổng quan về đảo âm và tập trung giới thiệu về thuật toán đảo âm ước lượng tham số vận tốc đáy. Đây là tham số ảnh hưởng lớn tới chất lượng bài toán định vị mục tiêu ngầm trong vùng biển nước nông nhưng lại rất khó khăn trong việc đo đạc, thăm dò. Kết quả ước lượng vận tốc âm trình bày tại bảng 1 chỉ ra vận tốc âm ước lượng bị sai số rất thấp. Vì vậy, việc mô phỏng cũng chỉ ra rằng quá trình ước lượng là tương đối khả thi.*

Từ khóa: Đảo âm; Xử lý trường phối hợp; Thí nghiệm tại vùng nước nông.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

1.1. Giới thiệu chung

Vùng biển nước nông bị giới hạn bởi mặt biển và đáy biển với tỷ lệ giữa độ sâu và bước sóng từ 10 – 100. Với tỷ lệ này làm cho sự lan truyền của sóng âm tại môi trường nước nông tương tự với sóng điện từ lan truyền trong ống dẫn sóng[1]. Tương phản với vùng nước nông, tại các vùng nước sâu, môi trường nước trở nên đồng nhất hơn và ít phải chịu sự ảnh hưởng của các hiệu ứng đa đường, sự biến đổi nhanh chóng về tham số tại các lớp nước như nhiệt độ, độ mặn và các yếu tố phức hợp khác như tại vùng nước nông.

Sự khác biệt của vùng biển nước nông trước hết là do cấu tạo của lớp đáy. Để giải phương trình Helmholtz trong vùng biển nước nông đòi hỏi cần có các tham số âm học của lớp đáy biển (Bao gồm vận tốc âm lớp đáy, mật độ và hệ số suy giảm lớp đáy) nhằm xác định các điều kiện biên tại lớp đáy. Việc trực tiếp đo lường các tham số nói trên của lớp đáy (ví dụ khoan thăm dò) tiêu tốn nhiều thời gian, kinh phí, phạm vi thăm dò rộng lớn và cả những vấn đề về chủ quyền giữa các quốc gia,… Vì vậy, phương pháp đảo âm dựa trên những đo lường trường âm đã nhanh chóng được phát triển và được kỳ vọng sẽ làm chính xác hóa việc ước lượng các tham số âm học của lớp đáy.

1.2. Giới thiệu về phương pháp Xử lý trường phối hợp, đảo âm và Hàm giá

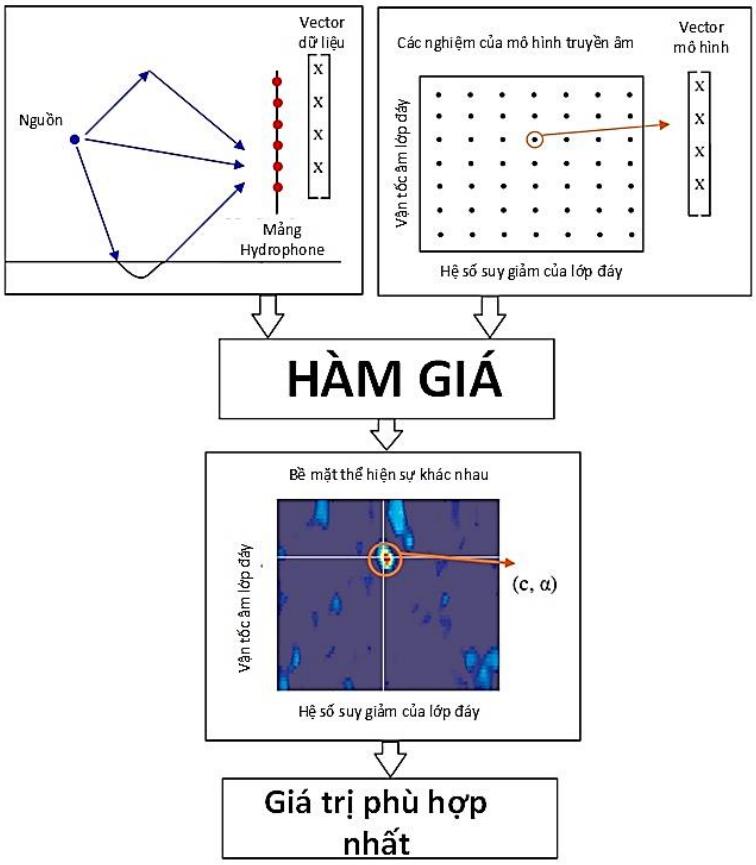
Để định vị mục tiêu ngầm trong môi trường phức tạp, không đồng nhất với sóng âm lan truyền trong đó có hiệu ứng đa đường (như vùng nước nông) thường sử dụng phương pháp trường phối hợp (Matched Field Processing-MFP). Phương pháp MFP được phát triển dựa trên cơ sở hình thành búp sóng phẳng, trong đó, cấu trúc trường phức tạp được tính đến trong mô hình truyền [2].

Phương pháp MFP được thực hiện bởi việc so sánh véc tơ áp suất trường âm được đo bởi mạng sensor với một không gian véc tơ trường thay thế tương ứng một lưới vị trí có thể của nguồn. Tọa độ lưới cung cấp sự đồng bộ tốt nhất với tín hiệu thực sẽ cho ước lượng vị trí nguồn. Véc tơ trường thay thế được tính sử dụng mô hình truyền sóng với các tham số môi trường đã biết. Độ chính xác định vị của phương pháp phụ thuộc nhiều vào việc tính toán trường thay thế, bao gồm các tham số môi trường, mô hình hóa, tính toán mô hình môi trường truyền cũng như cấu trúc của mạng và số phần tử trong mạng.

Phương pháp đảo âm sử dụng các mô hình lý thuyết kết hợp với các kết quả đo đạc thực tế trước đó của một hoặc một số tham số môi trường nhằm ước lượng các tham số chưa biết hoặc rất khó khăn trong việc đo đạc thực tế.

Việc tính toán đảo âm là một quá trình tối ưu: Tìm kiếm không gian tham số của mô hình để tìm các tham số lớp đáy mà hàm giá là cực tiểu. Theo thứ tự để tiến hành các phép tìm kiếm hiệu quả và giảm việc tính toán, người ta áp dụng cả phương pháp tối ưu từng vùng (local optimization) và tối ưu toàn bộ (global optimization).

Trên hình 1 biểu diễn các bước xử lý MFP đảo âm, sử dụng để ước lượng vận tốc âm lớp đáy và hệ số suy giảm.



Hình 1. *Các bước xử lý MFP sử dụng để ước lượng vận tốc âm lớp đáy và hệ số suy giảm.*

2. MÔ HÌNH TRUYỀN ÂM DƯỚI NƯỚC

2.1. Phương pháp mode chuẩn

Âm thanh truyền trong đại dương cũng bị chi phối bởi phương trình sóng với các tham số và các điều kiện biên đặc trưng cho môi trường biển. Lý thuyết về mode chuẩn đã được sử dụng rộng rãi cho việc mô hình hóa quá trình truyền âm trong vùng biển nước nông. Một trong số những công bố sớm nhất về mode chuẩn do Pekeris đưa ra vào năm 1948.

2.2. Phương pháp mode chuẩn cho môi trường không phụ thuộc vào cự ly

Phương trình Helmholtz không đồng nhất trong hệ tọa độ trụ được miêu tả [3]:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial p}{\partial r}\right)+\rho(z)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\rho(z)}\frac{\partial p}{\partial z}\right)+\frac{\omega^2}{c^2(z)}p\approx-\frac{\delta(z-z_s)\delta(r)}{2\pi r} \quad (1)$$

Trong đó: p là áp suất âm; ρ là mật độ; c là vận tốc âm; z_s là độ sâu của nguồn âm.

Người ta sử dụng kỹ thuật phân tách biến để giải phương trình Helmholtz. Vế bên phải của phương trình (1) đặt bằng không để thu được phương trình Helmholtz thuần nhất.

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial p}{\partial r}\right)+\rho(z)\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\rho(z)}\frac{\partial p}{\partial z}\right)+\frac{\omega^2}{c^2(z)}p\approx 0 \quad (2)$$

Sử dụng phân tách biến (p(r, z) =R(r) Ψ(z)) và thay thế vào phương trình (2) ta được:

$$\frac{1}{R}\left[\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dR}{dr}\right)\right]+\frac{1}{\Psi}\left[\frac{d}{d(z)}\left(\frac{1}{\rho(z)}\frac{d\Psi}{dz}\right)+\frac{\omega^2}{c^2(z)}\Psi\right]=0 \quad (3)$$

Trong phương trình (3), thành phần trong ngoặc vuông đầu tiên là hàm chỉ phụ thuộc r; và thành phần trong ngoặc vuông thứ hai chỉ phụ thuộc vào z. Phương trình (3) chỉ có thể thỏa mãn khi cả hai thành phần trong ngoặc vuông bằng hằng số. Hằng số phân tách biến nói trên được định nghĩa là k_c^2. Áp dụng cho thành phần trong ngoặc vuông thứ hai của (3) ta được:

$$\rho(z)\frac{d}{dz}\left(\frac{1}{\rho(z)}\frac{d\Psi(z)}{dz}\right)+\left(\frac{\omega^2}{c^2(z)}-k_c^2\right)\Psi(z)=0 \quad (4)$$

Trong đường truyền sóng tại vùng biển nông, điều kiện biên tại mặt mở áp suất:

$$\Psi(z)\big|_{z=0}=0 \quad (5)$$

Điều kiện biên tại lớp đáy biển để đảm bảo tính liên tục của áp suất âm và vận tốc chuẩn:

$$\Psi(z)\big|_{z=H^+}=\Psi(z)\big|_{z=H^-} \quad (6)$$

$$\Psi(z)\big|_{z=0}=\frac{1}{\rho}\frac{d\Psi(z)}{dz}\Big|_{z=H^+}=\frac{1}{\rho}\frac{d\Psi(z)}{dz}\Big|_{z=H^-} \quad (7)$$

Trong đó: H là độ sâu lớp nước; z → H+ ký hiệu giới hạn theo chiều đi từ hướng đáy biển lên. z → H- ký hiệu giới hạn theo chiều đi từ hướng nước biển xuống.

Nghiệm chung của phương trình (4) trong phần đáy biển (z>H) có thể được biểu diễn dưới dạng như sau:

$$\Psi(z)\big|_{z>H}=B_1\ e^{-\gamma_b z}+B_2\ e^{\gamma_b z} \quad (8)$$

Trong đó:

$$\gamma_b\equiv\sqrt{k_c^2-\left(\frac{\omega}{c_b}\right)^2} \quad (9)$$

Với c_b là vận tốc âm lớp đáy.

Nếu γ_b được giả thiết là dương thì $B_2=0$ do biên của nghiệm sẽ tiến tới vô cùng.

Thay vào điều kiện biên (6) và (7) ta được:

$$\Psi(H)=B_1e^{-\gamma_b H} \quad (10)$$

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\Psi(H)}{dz}=-B_1\frac{\gamma_b e^{-\gamma_b H}}{\rho_b} \quad (11)$$

Trong đó, ρ_b là mật độ lớp đáy. Chia hai phương trình (10) và (11) cho nhau, ta được:

$$\Psi(H)+\frac{\rho_b}{\rho\sqrt{k_c^2-\left(\frac{\omega}{c_b}\right)^2}}\frac{d\Psi(H)}{dz}=0 \quad (12)$$

Phương trình (4) với điều kiện biên (5) và (12) là một dạng phương trình nhóm Sturm-Liouville với giá trị nhóm $k_{n,c}$ và nhóm hàm Ψn(z), trong đó, n là số mode.

Công trình của Jensen và những cộng sự vào năm 2000 đã chỉ ra nghiệm của phương trình Helmholtz như sau:

$$p(r,z) \approx \frac{i}{\rho(z_s)}\sqrt{\frac{1}{8\pi}}e^{\left(\frac{i\pi}{4}\right)}\sum_{n=1}^{M}\Psi_n(z_n)\Psi_n(z)\frac{e^{ik_{a,c}r}}{\sqrt{k_{n,c}r}} \quad (13)$$

Trong phương trình (13), nhóm vector Ψn(z) cũng được gọi là hàm độ sâu chuẩn và nó có tính trực giao:

$$\int_0^\infty \Psi_m(z)\Psi_n(z)/\rho(z)dz = \delta_{mn} \quad (14)$$

Trong đó, khoảng tích phân bao gồm cả lớp nước và lớp đáy.

Giá trị nhóm kn,c là một số phức:

$$k_{n,c} = k_n + i\beta_n \quad (15)$$

Với $k_n$là số sóng ngang và $\beta_n$là mô hình hệ số suy giảm.

Số sóng ngang cũng được sử dụng để định nghĩa vận tốc nhóm và vận tốc pha:

Vận tốc nhóm của mode thứ n là:

$$V_g^n = \frac{d\omega}{dk_n} \quad (16)$$

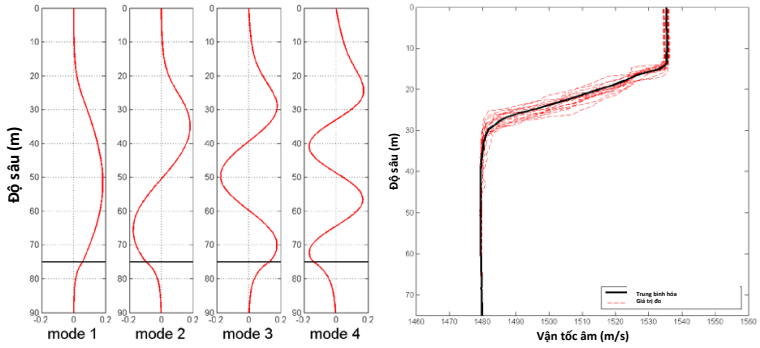
Vận tốc pha của mode thứ n là:

$$V_p^n = \frac{\omega}{k_n} \quad (17)$$

Vận tốc nhóm đặc trưng cho vận tốc truyền năng lượng của một mode, và vận tốc pha đặc trưng cho vận tốc ngang của một pha trong mặt phẳng sóng đặc trưng của một mode.

Để tính toán trường âm sử dụng phương pháp mode chuẩn, nhóm vector Ψn(z) và giá trị nhóm kn,c cần được tìm ra. Với một môi trường đã biết, Ψn(z) và kn,c có thể thu được khi sử dụng một mô hình mode chuẩn ví dụ như mô hình KRAKEN của M.Porter đưa ra vào năm 1992 [4].

Trên hình 2 là một ví dụ chỉ ra 4 mode được tính bằng KRAKEN ở tần số 200 Hz trên cơ sở các thực nghiệm dữ liệu vận tốc âm của nước ngoài:



Hình 2. *Bốn mode đầu tiên tính toán với dữ liệu vận tốc âm không phụ thuộc cự ly.*

3. PHƯƠNG PHÁP ƯỚC LƯỢNG VẬN TỐC ÂM TỪ DỮ LIỆU HÀM MODE THEO ĐỘ SÂU

3.1. Xây dựng ma trận mật độ phổ chéo (CSDM) sử dụng dữ liệu đo được về áp suất âm của các nhóm tần số ở khoảng cách nguồn phát và nguồn thu là cố định

Ma trận mật độ phổ chéo được xây dựng sử dụng dữ liệu từ mảng hydrophone đứng, trải trên toàn bộ cột nước. Các tiếp cận để xác định CSDM trong bài viết này sử dụng dữ liệu phổ áp suất trên các tần số khác nhau trong một dải hẹp tại khoảng cách cố định của nguồn phát-nguồn thu.

Theo lý thuyết về mode chuẩn, tại trường xa, áp suất âm do kích thích của nguồn phát dạng điểm được nêu ra ở phương trình (13).

Tại khoảng cách cố định r_0, ta xây dựng được một ma trận áp suất âm P gồm N_z - hàng, N_f - cột.

$$P = \begin{bmatrix} p(z_1, f_1, r_0)p(z_1, f_2, r_0) \dots\ p(z_2, f_1, r_0)p(z_2, f_2, r_0) \dots p\left(z_1, f_{N_f}, r_0\right) p\left(z_2, f_{N_f}, r_0\right) \\ \dots\ p(z_{N_f}, f_1, r_0)\ p(z_{N_f}, f_2, r_0)\ \dots\ p(z_{N_f}, f_{N_f}, r_0) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Trong đó: z_1, z_2,…z_{N_f} là độ sâu của các đầu thu; N_f là tổng số đầu thu, f_1, f_2,…f_{N_f} là các tần số trong dải hẹp. Băng thông của dải hẹp được viết dưới dạng:

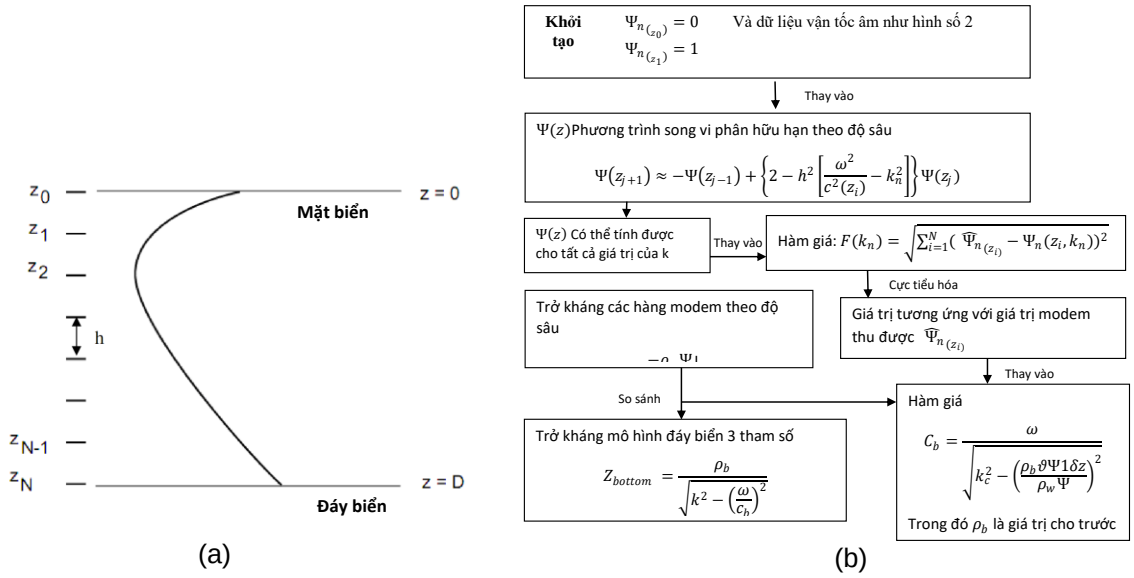
$$B = f_{N_f} - f_1 \quad (19)$$

Vì vậy, ma trận mật độ phổ chéo C là:

$$C = PP^H \quad (20)$$

3.2. Thuật toán ước lượng vận tốc âm lớp đáy

Trong các tài liệu của Jensen và các cộng sự đã chia cột nước thành N khoảng bằng nhau để xây dựng nên các mắt lưới bằng nhau $z_i = ih$, $i=0,1,\dots N$. Trong đó, h là độ rộng mắt lưới $h=D/N$ (xem trên hình 3a).



Hình 3. *Chia hữu hạn các mắt lưới(a); Sơ đồ thuật toán ước lượng vận tốc âm lớp đáy sử dụng dữ liệu mode thu được (b).*

Bằng cách phân chia hữu hạn các mắt lưới, ta có thể áp dụng vi phân hữu hạn phương trình sóng (4). Nếu mật độ trong cột nước là không đổi thì phương trình (4) trở thành:

$$\frac{d^2\Psi(z)}{dz^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2(z)} - k_c^2\right)\Psi(z) = 0 \quad (21)$$

Tiến hành khai triển Taylor, tính xấp xỉ đạo hàm bậc nhất theo hai chiều ta được:

$$\frac{d^2\Psi(z_j)}{dz^2} \approx \frac{\Psi(z_{j-1}) - 2\Psi(z_j) + \Psi(z_{j+1})}{h^2} \quad (22)$$

Sử dụng (21) và (22) dẫn tới ta tính được vi phân theo độ sâu của phương trình sóng:

$$\Psi(z_{j+1}) \approx -\Psi(z_{j-1}) + \left\{2 - h^2\left[\frac{\omega^2}{c^2(z_i)} - k_n^2\right]\right\}\Psi(z_j) \quad (23)$$

Từ (23) ta thấy rằng, nếu ta cho trước một bộ dữ liệu về vận tốc dưới nước và cho trước hai giá trị khởi tạo cho $\Psi(0)$ và $\Psi(h)$, giá trị của hàm theo độ sâu từ mặt cho tới đáy biển hoàn toàn có thể tính được bằng phương pháp truy hồi cho tất cả các giá trị của k_n theo (23). Các giá trị số sóng riêng k_n tương ứng với mỗi mode thu được, được tìm bằng cách lấy giá trị tối thiểu của hàm giá:

$$F(k_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} (\widehat{\Psi_n}(z_i) - \Psi_n(z_i, k_n))^2} \tag{24}$$

Trong đó, $\widehat{\Psi_n}(z_i)$ là mode thu được thứ n. Trong phương pháp tuần tự, giá trị mode tương ứng với giá trị mode thu nhận được được tính toán mà không biết các tham số đáy biển.

Điều kiện biên tại đáy biển được thiết lập bằng cách so sánh trở kháng tại nửa trên đáy biển với trở kháng tính toán được từ giá trị mode theo độ sâu tính theo phương pháp tuần tự nêu trên. Giá trị vận tốc âm đáy biển tương ứng với giá trị mode giống nhất với dữ liệu mode thu nhận được thì được lựa chọn. Trên hình 3b miêu tả chi tiết sơ đồ thuật toán ước lượng này.

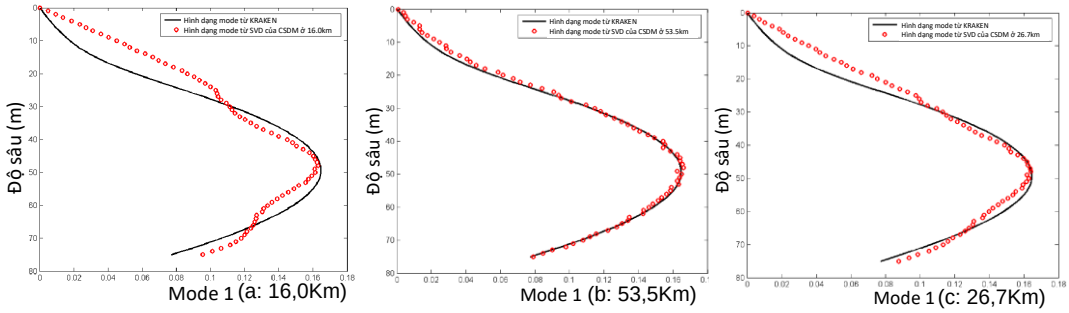
3.3. Kết quả mô phỏng ước lượng vận tốc âm lớp đáy

Để chứng minh khả năng làm việc của thuật toán ước lượng tham số vận tốc âm lớp đáy như đã trình bày ở phần 3. Phần này sử dụng KRAKEN để tạo môi trường mô phỏng trường âm. Giá trị vận tốc âm lớp đáy đưa vào KRAKEN là 1588 m/s, và các tham số khác bao gồm: dữ liệu vận tốc âm dưới nước, độ sâu lớp nước (75 m), độ sâu nguồn phát (50 m), mật độ lớp đáy (1.85 g/cm^3), là những số liệu khá tương đồng với các cuộc thí nghiệm thực tế. Vì vậy, mặc dù là mô phỏng nhưng nó cũng phản ánh khá trung thực các điều kiện thực nghiệm.

Trường âm mô phỏng có tính đến nhiễu (SNR = 10 dB) được sử dụng để tính ma trận mật độ phổ chéo CSDM. Trường áp suất âm từ 70 Hz đến 130 Hz với bước tần số 1.5 Hz được dùng để tính toán. Như vậy, ma trận P (theo 3.1) gồm 41 cột.

Sử dụng phương trình tính mật độ phổ chéo (20), ta tính toán được ma trận mật độ phổ chéo CSDM. Trên hình 4a, 4b, 4c, đường màu đen nét liền biểu diễn mode 1 từ KRAKEN, hình chấm tròn đỏ biểu thị hình dạng mode 1 thu được từ quá trình phân tách đơn biến (SVD) của ma trận mật độ phổ chéo CSDM tại các khoảng cách 16 km, 26.7 km, 53.5 km tương ứng. Trên hình số 8 biểu thị đường phụ thuộc giữa sai số và khoảng cách của KRAKEN và CSDM. Sai lệch càng giảm khi cự ly càng tăng lên, và kết quả được liệt kê cụ thể tại bảng số 1.

Kết quả tại bảng 1 chỉ ra vận tốc âm tính được (1584.5 m/s) bị sai số 3.5 m/s tại cự ly 53.5 m. Vì vậy, việc mô phỏng cũng chỉ ra rằng, quá trình ước lượng theo sơ đồ trên hình 3b tại cự ly 53.4 km là tương đối khả thi.



Hình 4. *Mode 1 tại 16.0 km (a); Mode 1 tại 26.7 km (b); Mode 1 tại 53.5 km (c).*

Bảng 1. *Vận tốc âm lớp đáy tính từ dữ liệu mô phỏng.*

Cự ly	Giá trị vận tốc âm đáy tính được	Giá trị nhập vào	Sai số ước lượng
16.0 km	1572.7 m/s	1588 m/s	-15.3 m/s
26.7 km	1578.4 m/s	1588 m/s	-9.6 m/s
53.5 km	1584.5 m/s	1588 m/s	-3.5 m/s

5. KẾT LUẬN

Nghiên cứu lý thuyết về đảo âm dưới nước nhằm xác định các tham số địa lý (ví dụ vị trí của nguồn âm và bộ thu, độ sâu đáy biển) và các tham số về môi trường (như dữ liệu vận tốc âm, mật độ lớp đáy, sự suy giảm và độ dày tại các lớp đáy). Bài viết giới thiệu tổng quan về đảo âm và tập trung giới thiệu về thuật toán đảo âm ước lượng tham số vận tốc đáy. Đây là tham số ảnh hưởng lớn tới chất lượng bài toán định vị mục tiêu ngầm trong vùng biển nước nông nhưng lại rất khó khăn trong việc đo đạc, thăm dò. Kết quả ước lượng vận tốc âm trình bày tại bảng 1 chỉ ra vận tốc âm ước lượng (1584.5 m/s) bị sai số 3.5 m/s tại cự ly 53.5 m. Vì vậy, việc mô phỏng cũng chỉ ra rằng quá trình ước lượng theo sơ đồ trên hình 3b tại cự ly 53.4 km là tương đối khả thi. Các sai số tại bảng 1 có thể do nguyên nhân chính là trong quá trình tính toán mật độ phổ chéo, ta đã bỏ qua một số giá trị biên độ của ma trận do việc tính xấp xỉ và loại bỏ những giá trị nhỏ nằm ngoài đường chéo chính. Thông qua thuật toán ước lượng tham số vận tốc âm lớp đáy đã trình bày, trong thực tiễn còn đặt ra những bài toán cho các phép ước lượng tiếp theo như: Ước lượng hệ số suy giảm lớp đáy, ước lượng vị trí nguồn âm (mục tiêu ngầm), ước lượng độ sâu đáy biển và ước lượng đồng thời nhiều tham số (ước lượng cả vận tốc âm và hệ số suy giảm lớp đáy).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Lin Wan, "*Shallow-Water Acoustics*", Georgia Institute of Technology, (December2010), tr.23.

[2]. Nguyễn Xuân Long, "*Nghiên cứu thuật toán xử lý trường phối hợp thích nghi cho Sonar thụ động định vị mục tiêu ngầm trong vùng biển nước nông Việt Nam*", Luận án tiến sĩ kỹ thuật, Viện KHCNQS, (tháng 12/2016) tr 08-10.

[3]. Paul C. Etter, "*Underwater acoustic Modeling and Simulation*", Taylor & Francis Group, (2003).

[4]. M. B. Porter, "*The Kraken Normal Mode Program*" NRL/MR/5120, Naval Research Laboratory (5/1992), tr 71-105.

ABSTRACT

RESEARCH ON ACOUSTIC INVERTED ALGORITHMS TO ALLOW EFFECTIVELY ESTIMATE UNDERWATER SOUND SPEED DATA AND SOME SEABED PARAMETERS IN SHALLOW WATER

Theory of Inverted acoustic plays a significant role in estimating geo-acoustic and environmental parameters (e.g source and receiver location, sea deeth, sound speed profiles, seabed densities, seabed attenuation and thickness). These parameters are essential in constructing a set of underwater acoustic data to managing, localization underwater targets in shallow water. In VietNam, with long beach and big continental area, doing experiments on the whole area of Vietnamese sea is very difficult and expensive, especially coring, measuring sound speed and attenuation in sediments, etc. So that besides direct measurement of these parameters, we also apply a suitable and optimization inverted acoustic algorithm to estimate unknown parameters from a set of available data. Through algorithms, we can evaluate and construct more data set for underwater targets detecting and localizing systems. This article introduces about inversion acoustic method applied to estimate seabed sound speed parameters. This parameter significantly affects the quantity of detection and localization, but it is difficult to measure in actual experiments directly.

Keywords: Inverted acoustic; Matched Field Processing; Shallow water experiment.

Nhận bài ngày 29 tháng 6 năm 2021
Hoàn thiện ngày 20 tháng 7 năm 2021
Chấp nhận đăng ngày 02 tháng 8 năm 2021

Địa chỉ: [1]Ban quản lý cảnh giới và bảo vệ vùng trời Quốc gia/ Bộ Tham mưu Quân chủng PK-KQ;
[2]Bộ môn Ra đa/Khoa VTĐT/Học Viện Kỹ thuật quân sự.
*Email: lamhuy.work@gmail.com.