

Định Vị Mục Tiêu Ngầm Bằng Phương Pháp Trường Phối Hợp Hình Học

Trần Cao Quyền

Khoa Điện tử-Viễn Thông,

Trường Đại học Công nghệ (ĐHQGHN)

Email: quyentc@vnu.edu.vn, tran.cao.quyen1@gmail.com

Abstract— Bài toán định vị mục tiêu ngầm trong vùng biển nông đang nhận được sự quan tâm đặc biệt trong bối cảnh thời sự hiện nay. Phương pháp trường phối hợp để giải bài toán này là xu thế hiện đại được sử dụng ở các nước Mỹ và Tây Âu (NATO). Trong bài báo này chúng tôi đề xuất một thuật toán trường phối hợp hình học mà ở đó ta tìm kiếm một hướng chiếu để cực đại tín hiệu mong muốn. Các kết quả phân tích và mô phỏng bước đầu cho thấy thuật toán đề xuất làm việc tốt hơn so với thuật toán trường phối hợp truyền thống cả trong trường hợp phối hợp và trong một số trường hợp mất phối hợp (khi tín hiệu yếu hơn nền tạp âm, khi số snapshot hạn chế), trong khi chỉ yêu cầu tính toán đơn giản.

Keywords- SONAR, trường phối hợp, phân loại nhiều tín hiệu, thủy âm biển nông.

I. GIỚI THIỆU

Bài toán định vị mục tiêu ngầm được hiểu là xác định vị trí cự ly và độ sâu của mục tiêu trong điều kiện mục tiêu cố định hoặc di động trong một vùng biển nông nhất định. Bài toán này đã được nhiều tác giả như Tolstoy, Baggeorner, Kolev., [1-9] nghiên cứu nhưng đến nay nó vẫn có tính thời sự, đặc biệt trong bối cảnh yêu cầu cao về đảm bảo an ninh hàng hải biển Đông hiện nay. Đây là một bài toán khó và yêu cầu độ chính xác cao trong khi dữ liệu thu được từ một dàn hydrophone đứng hoặc ngang thường bị ảnh hưởng bởi môi trường (tạp âm biển, mặt biển, đáy biển, v.v) và các mô hình âm (tia, mode chuẩn, xấp xỉ parabolic, v.v) thì không kể hết được các tham số của ống dẫn sóng đại dương.

Phương pháp trường phối hợp (TPH) được đề xuất để khai thác tối đa kỹ thuật xử lý dàn hydrophone kết hợp các hiệu ứng vật lý truyền sóng trong ống dẫn sóng đại dương cho bài toán định vị mục tiêu ngầm [1,3]. Sự phát triển của phương pháp TPH có thể xem từ các phương pháp TPH truyền thống đến các phương pháp TPH cải tiến hơn để nâng cao độ tin cậy và chất lượng phân giải mục tiêu, đồng thời tránh sự ảnh hưởng của các điều kiện mất phối hợp [1-9].

Giả thiết là các yếu tố như tốc độ xử lý, phương pháp tính toán của máy tính và bài toán điều kiện bờ luôn có nghiệm thực thì các phương pháp TPH cải tiến gần đây như phân tích dữ liệu theo kinh nghiệm, TPH thích nghi và TPH lấy mẫu thưa đã được đề xuất [7-9]. Tuy nhiên khối lượng tính toán không hề nhỏ.

Trong bài báo này, tác giả đề xuất ý tưởng sử dụng phương pháp TPH hình học để giải bài toán định vị mục tiêu ngầm.

Bước đầu phương pháp đạt một số kết quả mô phỏng khả quan, có thể đơn giản hóa việc tính toán và các kết quả này so sánh được với các phương pháp TPH khác, đặc biệt trong một số trường hợp mất phối hợp (khi tạp âm biển dạng Gauss mức tín trên tạp (S/N) thấp -3 dB, số snapshot của các hydrophone thấp nhỏ hơn 30 mẫu). Các kết quả trên là rất có ích để xây dựng các hệ SONAR tự động trên thực tế.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: phần II giới thiệu các phương pháp TPH và TPH hình học đề xuất. Trong phần III, chúng tôi đánh giá hiệu năng của các phương pháp với các kết quả phân tích và mô phỏng. Cuối cùng, kết luận của bài báo được cho ở phần IV.

II. CÁC PHƯƠNG PHÁP

A. PHƯƠNG PHÁP TRƯỜNG PHỐI HỢP TRUYỀN THỐNG

Phương pháp trường phối hợp truyền thống hay bộ xử lý trường phối hợp biết đến nhiều nhất là bộ xử lý tuyến tính. Bộ xử lý này trực tiếp lấy tương quan dữ liệu đo \mathbf{F} với dữ liệu mô phỏng $\hat{\mathbf{F}}$, và bộ xử lý P_{Lin} là bình phương của các biên độ tương quan trên.

Công suất của bộ xử lý cho bởi

$$P_{Lin}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{w}^+ \mathbf{C} \mathbf{w} \quad (1)$$

ở đó

$$\mathbf{w} = \mathbf{F},$$

$$\mathbf{C} = \langle \mathbf{F} \mathbf{F}^+ \rangle,$$

$$\mathbf{F} = (\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_N)^T,$$

$$\hat{\mathbf{F}} = (\hat{\mathbf{F}}_1, \hat{\mathbf{F}}_2, \dots, \hat{\mathbf{F}}_N)^T,$$

- \mathbf{F}^+ là chuyển vị liên hiệp phức của \mathbf{F} ,
- \mathbf{F}^T là chuyển vị của \mathbf{F} ,
- F_n là trường âm đo tại tần số ω trên hydrophone thứ n , $\|F\| = 1$,

- \hat{F}_n là tín hiệu âm mô hình tại tần số ω trên hydrophone thứ n cho các tham số $\hat{\mathbf{x}}$, $\|\hat{F}\| = 1$,
- $\|F\| = \sqrt{F_1^2 + \dots + F_N^2}$ là norm L_2 của F ,
- $\langle a \rangle$ là kỳ vọng của a ,
- C là ma trận dữ liệu phổ chéo $N \times N$.

B. PHƯƠNG PHÁP TRƯỜNG PHỐI HỢP HÌNH HỌC

Ý tưởng trường phối hợp hình học dùng để giải bài toán định vị mục tiêu ngầm như sau: Có thể tìm một hướng chiếu trong không gian sao cho cực đại tín hiệu mong muốn hay không? Thực ra ý tưởng này rất đơn giản và trực quan tuy nhiên vấn đề là các khả năng triển khai trong môi trường ống dẫn sóng đại dương có khả thi không và sẽ dùng cách tiếp cận nào để áp dụng lời giải hình học này.

Thật may mắn là Schmidt đã có một công trình nổi tiếng mang tên MUSIC [10] giải bài toán tìm phương trong môi trường không gian tự do dùng sóng điện từ. Cách giải của Schmidt thường được gọi là phương pháp các không gian con, trong đó ta tìm kiếm trong toàn bộ không gian các vec-tơ hướng ra hướng tín hiệu mong muốn mà ở đó sẽ trực giao với không gian con các tạp âm.

Phổ MUSIC cho bởi

$$P_{Music} = \frac{1}{\mathbf{A}^H \mathbf{q} \mathbf{q}^H \mathbf{A}} \quad (2)$$

trong đó

- \mathbf{A} là vec-tơ hướng của dàn hydrophone N phần tử
- \mathbf{q} là vec-tơ riêng tạp âm ứng với trị riêng nhỏ nhất của ma trận hiệp biến dữ liệu thu.

Tuy cách giải này là Đại số nhưng hoàn toàn tương đương về mặt hình học. Thật vậy ở hướng chiếu của tạp âm tối thiểu thì cũng là tín hiệu cực đại vì không gian con tín hiệu trực giao với không gian con tạp âm.

Phương pháp hình học mà chúng tôi đề xuất cho bài toán định vị mục tiêu ngầm mang tính tổng quát tức là có thể giải bằng các phương pháp khác, không nhất thiết là phương pháp Đại số như MUSIC. Theo cách giải MUSIC thì yêu cầu là ma trận hiệp biến dữ liệu thu phải xác định dương thì bài toán mới có nghiệm. Về mặt vật lý tức là số hydrophone sử dụng phải lớn hơn số mục tiêu dự đoán. Mặt khác MUSIC cho lời giải của bài toán tìm phương nên đây là lời giải của bài toán một chiều.

Trong bài báo này chúng tôi đề xuất phương pháp trường phối hợp hình học để giải bài toán định vị mục tiêu ngầm, trước mắt sử dụng công thức (2) trong môi trường ống dẫn sóng đại dương (sóng âm) và mở rộng lên hai chiều (cực ly và độ sâu).

C. MÔ HÌNH ÂM

Mô hình âm sử dụng phương pháp mode chuẩn, lúc này áp suất âm thu cho bởi [11]

$$p(r, z) = \frac{i}{\rho(z_s) \sqrt{8\pi r}} e^{-i\frac{\pi}{4}} \sum_{m=1}^M \psi_m(z_s) \psi_m(z) \frac{e^{ik_m r}}{\sqrt{k_m}} \quad (3)$$

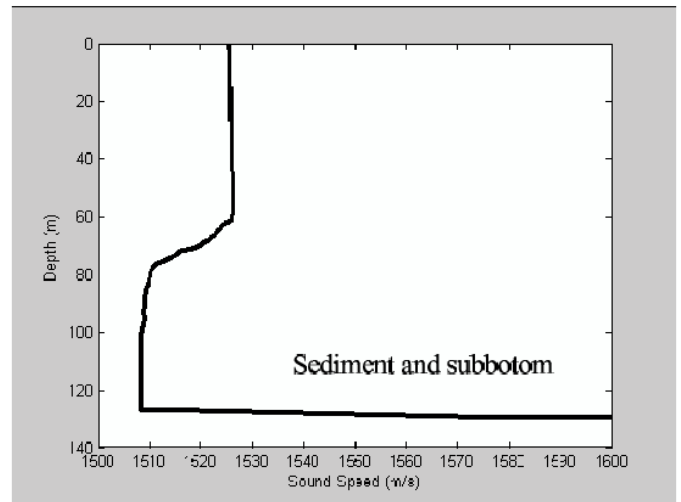
ở đó

- r là cự ly,
- z là độ sâu
- z_s là độ sâu nguồn
- ρ là mật độ nước biển
- ψ_m là biên độ mode thứ m
- k_m là giá trị riêng thứ m (số sóng).

D. DỮ LIỆU ÂM ĐẦU VÀO

Dữ liệu âm dàn hydrophone thụ động từ thí nghiệm SACLANT 1993 North Elba trên Internet được dùng. Dữ liệu này thu từ dàn hydrophone đứng ở vùng biển nông của bờ Tây Italia bởi trung tâm NATO SACLANT ở La Spezia, Italia. Trung tâm này đã xử lý các dữ liệu này phù hợp cho các nghiên cứu xử lý tín hiệu. Các chuỗi thời gian gốc được chuyển thành một chuỗi file MATLAB.mat mỗi cái bao gồm một ma trận "dat" của 48 hydrophone có 64K dữ liệu.

Mỗi file biểu diễn 1 phút dữ liệu. Dàn hydrophone bao gồm 48 cái với khoảng cách 2m giữa hai cái liền kề để đạt độ dài 94 m (từ 18.7 m đến 112.7 m). Nguồn phát tín hiệu giả ngẫu nhiên với tần số cộng hưởng 170 Hz. Với nguồn này có 10 file dữ liệu. Tốc độ âm cho tính toán cho ở Hình 1 sau



Hình 1. Vận tốc âm biển nông của thí nghiệm SACLANT 1993 North Elba, bờ Tây, Italia.

III. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

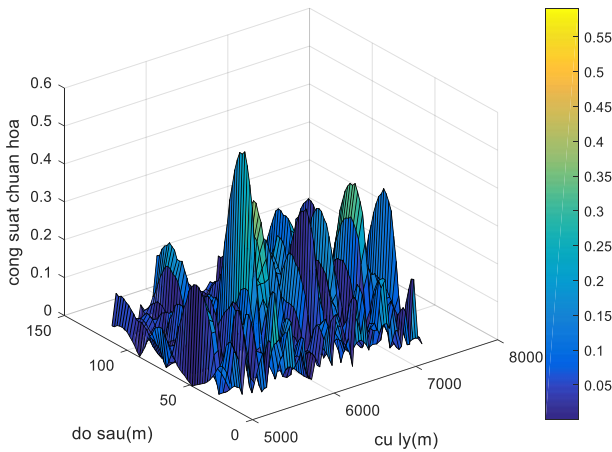
Nguồn được giả thiết đặt ở cự ly 6000 m và độ sâu 50 m và phát tần số trung tâm 170Hz trong trường hợp mục tiêu cố định. Dàn hydrophone gồm 48 phần tử đặt từ độ sâu 18.7 m đến 112.7 m trong đó khoảng cách giữa hai hydrophone liên

tiếp là 2m. Khi mô phỏng thì đánh giá các trường hợp mất phối hợp vì ảnh hưởng của tạp âm Gauss với mức tín trên tạp (SNR) nhỏ -3 dB và các trường hợp số snapshot thu được ít hơn 30 mẫu.

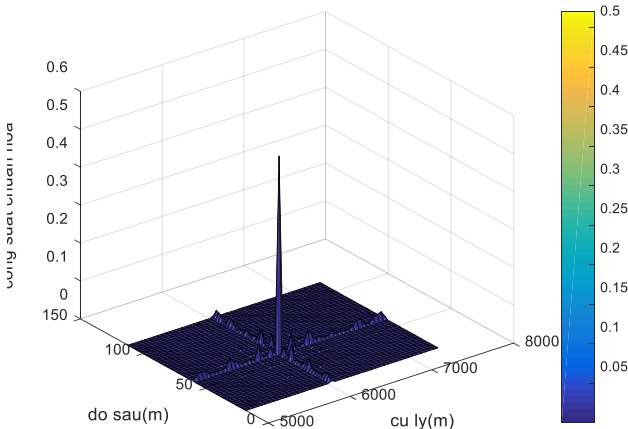
A. KHI CÓ PHỐI HỢP

Kết quả mô phỏng dùng bộ dữ liệu âm của SACLANT trong trường hợp phối hợp và chọn mức SNR=10 dB được chỉ ra trên Hình 2 áp dụng thuật toán TPH truyền thống và Hình 3 áp dụng thuật toán TPH hình học.

Từ Hình 2 ta thấy có thể định vị nguồn ở vị trí độ sâu 50 m, và cự ly 6000 m tuy nhiên có nhiều búp phụ bên cạnh búp chính. Từ Hình 3 ta thấy phương pháp TPH hình học ngoài khả năng định vị mục tiêu còn có khả năng nén tạp âm nền khá mạnh, việc quan sát và chỉ thị mục tiêu rõ ràng vì chọn được hướng chiếu hình học làm cực đại tín hiệu.



Hình 2. TPH truyền thống, có phối hợp với SNR=10 dB.

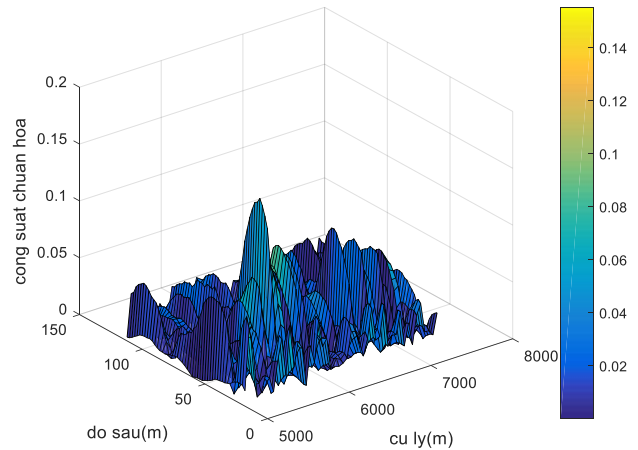


Hình 3. TPH Hình học, có phối hợp với SNR=10 dB.

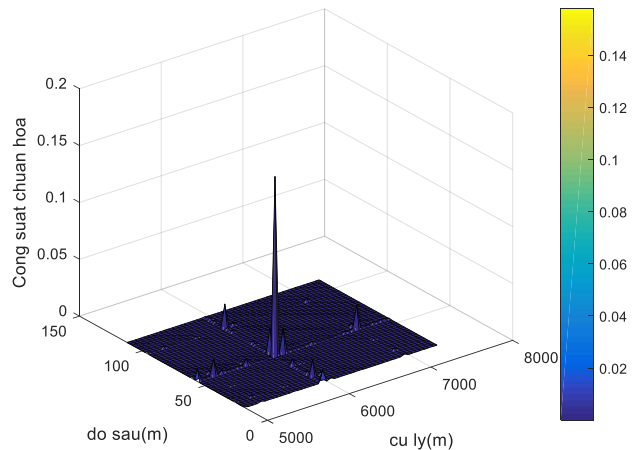
B. KHI MẤT PHỐI HỢP

Trong trường hợp mất phối hợp, giả thiết có thể xảy ra là mức SNR thấp=-3dB và số lượng snapshot thu thập nhỏ hơn

30 mẫu. Hình 4 và Hình 5 chỉ ra kết quả mô phỏng cho phương pháp TPH truyền thống và phương pháp TPH hình học. Lúc này mức nền của cả hai phương pháp đều nhỏ, tuy nhiên kết quả định vị dùng phương pháp TPH hình học vẫn thể hiện sự ưu việt hơn TPH truyền thống vì khả năng kháng nhiễu cao hơn, đỉnh định vị sắc nhọn hơn.



Hình 4. TPH truyền thống khi mất phối hợp, SNR= -3 dB, số snapshot <30 mẫu.



Hình 5. TPH Hình học khi mất phối hợp, SNR= -3 dB, số snapshot <30 mẫu.

IV. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất phương pháp TPH Hình học để giải bài toán định vị mục tiêu ngầm trong vùng biển nông dùng bộ dữ liệu âm của SACLANT. Các kết quả mô phỏng cho thấy định vị dùng TPH Hình học tốt hơn TPH truyền thống trong trường hợp phối hợp và trong một số trường hợp mất phối hợp (khi tín hiệu yếu hơn nền tạp âm, khi số snapshot hạn chế). Có thể nói thuật toán đề xuất đã thành công bước đầu vì sự hiệu quả và yêu cầu tính toán đơn giản. Trong tương lai, tác giả sẽ hoàn thiện thuật toán cho các trường hợp mất phối hợp khác.

LỜI CẢM ƠN

Công trình này được tài trợ một phần từ đề tài KHCN cấp ĐHQGHN, Mã số đề tài: QG.17.40

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. Tolstoy, *Matched Field Processing for Underwater Acoustics*, World Scientific, 1993.
- [2] A. Tolstoy, “Application of matched field processing to inverse problems in underwater acoustics”, IOP science, **16**(6), pp.1655-1666, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1088/0266-5611/16/6/304>
- [3] A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and P. N. Mikhalevsky, “An overview of matched field methods in ocean acoustics”, IEEE J. Ocean Engineering, **18** (4), pp. 401-424, Oct. 1993.
- [4] A. B. Baggeroer, W. A. Kuperman, and H. Schmidt, “Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem”, J. Acoustic. Soc. Am. **83**(2), pp.571-587, Feb 1988.
- [5] N. Kolev, *Sonar Systems*, InTech, Tamil Nadu, 2011.
- [6] R. Klemm, “Interrelations between matched field processing and airborne MTI radar”, IEEE Jour. Ocean. Engineering, **18** (3), pp.168-180, July 1993.
- [7] Q. Wang and Q. Jiang, “Simulation of matched field processing localization based on empirical mode decomposition and Karhunen-Loeve expansion in underwater waveguide environment”, EURASIP J. Adv. Signal Processing, Volume 2010, Article ID 483524, 7 pages.
- [8] K. L. Gemba, W. S. Hodgkiss, and P. Gerstoft, “Adaptive and compressive matched field processing”, J. Acoustic. Soc. Am, **141**(92), pp.92-103, 2017.
- [9] W. Mantzel and J. Romberg, “Compressive matched field processing”, J. Acoustic. Soc. Am, **132**(1), pp.90-102, 2017.
- [10] R. O. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameter estimation”, IEEE Trans. Antennas, Propagation, **AP-34**(3), pp.276-280, 1986.
- [11] F. B. Jensen, W. A. Kuperman, M. B. Porter, and H. Schmidt, *Computational Ocean Acoustics*, Springer, Science, 2011.