Phương pháp xử lý tín hiệu và tạo ảnh 3D cho các vật thể dưới nước bằng công nghệ Sonar chủ động

Nguyễn Văn Đức, Nguyễn Quốc Khương
Trường Điện Điện tử, Đại học Bách Khoa Hà Nội
Tác giả liên hệ: Nguyễn Văn Đức. Email: duc.nguyenvan1@hust.edu.vn
Ngày nhận bài: 10/05/2024, ngày sửa chữa: 10/03/2025, ngày duyệt đăng: 22/05/2025
DOI: 10.32913/mic-ict-research-vn.v2025.n1.1273

Tóm tắt: Bài báo đề xuất phương pháp xử lý tín hiệu và tạo ảnh 3D của các vật thể dưới nước bằng cách sử dụng công nghệ nhận dạng và định vị bằng sóng âm Sonar. Phương pháp tạo ảnh 3D của các vật thể dưới nước đề xuất trong bài báo được thực hiện bằng cách sử dụng nhiều đầu thu tín hiệu sóng âm (cũng được gọi là ăng ten thu tín hiệu sóng âm), và một số đầu phát tín hiệu sóng âm (cũng được gọi là ăng ten phát tín hiệu sóng âm) nhằm mục đích thu thập dữ liệu để tạo ảnh Sonar 3D có độ phân giải lớn. Dựa trên dữ liệu thu được từ hệ ăng ten đa điểm thu ở dưới nước, thuật toán tạo ảnh Sonar 3D sẽ tính toán giá trị ma trận điểm ảnh trên cơ sở độ mở búp sóng quét của các ăng ten phát tín hiệu sóng âm, khoảng cách điểm phản xạ phát hiện được, tốc độ di chuyển của tàu, v.v. Sau khi xác định được giá trị ma trận ảnh, bức ảnh của vật thể dưới nước được dựng trong không gian 3D. Các kết quả thực nghiệm được thực hiện ở một số vùng hồ nước sâu như hồ Hòa Bình, hồ Đồng Đò và vịnh Hạ Long.

Từ khóa: *công nghệ định vị sóng âm - Sonar, hệ ăng ten mảng, công nghệ quét ảnh vật thể dưới nước và dựng lên trong không gian ba chiều (3D).*

Title: **Method for Processing Signals and Creating 3D Images for Underwater Objects using Active Sonar Technology**

Abstract: The article proposes a method of 3D image signal processing for underwater objects by using sonar positioning technology. The proposed method is based on the acoustic signal collected from many receivers. The 3D imaging algorithm will calculate the pixel matrix value based on the sweep beam aperture of the transmit transducers, the detected distance from the sonar scanner to the reflected object, the speed of ship movement, etc. After determining the image matrix value, the scanned image is reconstructed on the 3D space. The experimental results were carried out in some deep lake areas such as Hoa Binh, Dong Do lake and Ha Long bay.

Keywords: *active sonar systems, antenna array technology, 3D scanning image.*

I. GIỚI THIỆU

Công nghệ định vị bằng sóng âm Sonar là một công nghệ sử dụng sự lan truyền sóng âm trong môi trường nước để xác định và định vị các vật cản trong môi trường nước, hoặc đáy nước. Công nghệ định vị bằng sóng âm Sonar được phân loại thành hai loại công nghệ cơ bản:

- Công nghệ Sonar chủ động có hệ thống tự phát xung sóng và nghe tiếng vọng lại [1–3].

- Công nghệ Sonar bị động (hay Sonar thụ động) có hệ thống chỉ nghe âm thanh do tàu bè hay nguồn âm khác phát ra; tầm hoạt động nhỏ hơn so với Sonar chủ động và ứng dụng cho do thám ngầm dưới biển [4]. Các công nghệ Sonar chủ động và thụ động đều được thiết kế ứng dụng cho điều khiển lái các tàu ngầm và tàu tự hành dưới nước AUV (Autonomous Underwater Vehicles) [5, 6].

Trong bài báo này, nhóm tác giả không đi sâu vào việc trình bày kiến trúc phần cứng để thu nhận được tín hiệu phản xạ từ nhiều đầu sóng âm. Bản chất một kiến trúc phần cứng thực hiện nhiệm vụ này được nhóm tác giả công bố trong công trình khoa học [7–9]. Tín hiệu nhận được từ các ăng ten thu sóng âm được lọc nhiễu ngoài băng thông qua các bộ lọc có kiến trúc FIR. Để độc giả dễ theo dõi nội dung bài báo, nhóm tác giả chỉ tập trung mô tả thuật toán dựng ảnh Sonar 3D dựa trên các dữ liệu đã được đo đạc trên nền tảng phần cứng đã được thiết kế trước. Dữ liệu nhận được từ nền tảng phần cứng là thông tin về khoảng

cách từ các điểm phản xạ tới hệ ăng ten thu. Nội dung thông tin này chưa đủ thông tin để dựng được bức ảnh quét 3D. Để tạo được bức ảnh quét dưới nước, chúng ta cần xây dựng ma trận điểm ảnh dựa vào đủ số lượng thông tin về bức ảnh quét thu được, các trọng số điểm ảnh được tính toán dựa trên cơ sở các búp sóng quét của các ăng ten thu và phát, cường độ tín hiệu thu được, cũng như là vận tốc chuyển động của tàu gắn thiết bị Sonar. Công trình khoa học [10] trình bày về phương pháp ước lượng độ mở búp sóng của các ăng ten thu phát tín hiệu. Bài báo này đề xuất cách tính các trọng số điểm ảnh dựa vào các tham số đề cập ở trên, cũng như phương pháp dựng lên bức ảnh Sonar 3D.

Trước khi đi vào chi tiết thuật toán tạo ảnh 3D cho vật thể ở dưới nước, bài báo đánh giá tổng quan tình hình nghiên cứu hiện nay trên thế giới về lĩnh vực này.

1. Tình hình nghiên cứu hiện nay trên thế giới

Bài báo [11] trình bày phương pháp dự đoán và nội suy hình ảnh quét Sonar 3D cho các thiết bị tự hành dưới nước. Phán đoán hình ảnh là một công nghệ phức tạp đòi hỏi các thông tin dự đoán về môi trường truyền dẫn và phụ thuộc vào điểm quan sát vật thể. Trên thực tế người ta ít sử dụng công nghệ phán đoán hình ảnh Sonar, mà tìm cách phân tích dữ liệu thu thập được để có dữ liệu chính xác nhất có thể để xử lý và nội suy thành các bức ảnh Sonar. Tập thể tác giả trong công trình khoa học [12] trình bày phương pháp tái tạo ảnh Sonar 3D theo phương pháp nội suy hỗn hợp. Nhược điểm của phương pháp này là độ phức tạp của thuật toán, đặc biệt khi kích cỡ ma trận điểm ảnh tăng. Do vậy khó áp dụng trong bài toán xử lý tín hiệu trong thời gian thực. Công trình khoa học [13] trình bày phương pháp dựng ảnh Sonar 3D sử dụng mạng trí tuệ nhân tạo. Đây là hướng nghiên cứu mới, tuy nhiên để có thể có chất lượng bức ảnh tốt, nguồn dữ liệu đầu vào cần đảm bảo chất lượng và đủ lớn. Bên cạnh đó, tốc độ học máy không bắt kịp sự thay đổi của bức ảnh và môi trường. Do vậy, phương pháp này cho đến nay cũng mới chỉ dừng lại ở nghiên cứu lý thuyết mà chưa có ứng dụng trong thực tiễn.

Sáng chế US3500302 [14], "Sonar bathymetry system transmit-receive sequence programmer" của Hoa Kỳ công bố ngày 13.01.1969 đưa ra phương pháp xác định độ sâu đáy nước và thực hiện trên mạch cứng, không đề cập đến phương pháp quét ảnh Sonar 3D.

Tập thể tác giả [15] đưa ra phương pháp tạo ảnh Sonar 3D, tuy nhiên không đề cập đến các tham số búp sóng quét, vận tốc của tàu, đây là các tham số quan trọng tạo nên bức ảnh quét, cũng như các kết quả trình bày dưới dạng mô phỏng, chưa đưa ra các kết quả thực hiện bằng thực tế. Do vậy, chưa thể có đánh giá được đúng độ phức tạp của hệ thống để có thể triển khai trên các nền tảng phần cứng trong điều kiện thời gian thực.

Bài báo [16] trình bày phương pháp tạo ảnh từ hệ Sonar quét sườn. Bài báo trình bày mô hình toán học để nội suy và tổng hợp ảnh 3D Sonar quét sườn. Các yếu tố thực tế như vận tốc tàu di chuyển, phương pháp dựng ảnh từ hai nửa quét sườn, chiều sâu và chiều rộng bức ảnh quét không được mô tả trong thuật toán.

Bài báo [17] trình bày về phương pháp ước lượng và bù Doppler cho hệ thống thông tin thủy âm. Kết quả bù Doppler cho hệ thống thông tin có thể ứng dụng để cải thiện tín hiệu thu của hệ thống Sonar chủ động, hoặc sử dụng để ước lượng tốc độ chuyển động tương đối giữa hệ Sonar chủ động và đối tượng cần quét ảnh.

Bài báo [18] trình bày phương pháp dựng ảnh Sonar 3D dựa trên mô hình hình học. Để giảm thiểu sai số đo đạc từ các tia phản xạ đáy, bài báo đề xuất ứng dụng bộ lọc thích ứng để bám đuổi và phân tách thông tin phản xạ đáy của chùm tia phản xạ đa đường. Bài toán xây dựng các bộ lọc thích ứng để giảm thiểu nhiễu phân tập kênh đa đường được cho là hiệu quả, tuy nhiên kênh thủy âm là loại kênh biến thiên nhanh, dẫn đến khó bám đuổi các thông tin về kênh truyền. Trong bài báo cũng không đề cập đến vận tốc chuyển động của tàu là tham số quan trọng để xây dựng bộ lọc thích ứng.

Công trình khoa học [19] trình bày phương pháp thiết kế hệ Sonar chủ động sử dụng hệ ăng ten mảng là các hydrophone hình cầu, kèm các kết quả mô phỏng. Bài báo chưa đề cập đến phương pháp dựng ảnh Sonar, các kết quả dừng lại ở các mô phỏng bằng máy tính.

Công bố khoa học của nhóm tác giả [10] trình bày các kết quả đánh giá độ mở búp sóng quét của hệ Sonar quét sườn, với các kịch bản, thiết kế hệ thống là các kết quả được trình bày trong bài báo này.

2. Phương pháp đề xuất

Mục đích của bài báo này nhằm khắc phục nhược điểm đã đề cập ở trên bằng cách đề xuất phương pháp quét ảnh 3D sử dụng công nghệ nhận dạng và định vị bằng sóng âm của các vật thể dưới nước. Phương pháp tạo ảnh 3D của các vật thể dưới nước được thực hiện bằng cách sử dụng nhiều đầu thu tín hiệu sóng âm, và một số đầu phát tín hiệu sóng âm nhằm mục đích thu thập dữ liệu để tạo ảnh 3D có độ phân giải lớn.

Bài báo đề xuất phương pháp tạo ảnh siêu âm 3D bằng cách sử dụng từ 1 đến nhiều đầu phát tín hiệu sóng âm với búp sóng định hướng, mỗi đầu phát tín hiệu sóng âm sẽ sử dụng một tần số riêng biệt, và được phát với một búp sóng định hướng nhất định để quét tín hiệu hướng tới một phạm vi diện tích của bức ảnh siêu âm 3D cần quét.

Phương pháp đề xuất sử dụng nhiều đầu thu tín hiệu sóng âm được sắp xếp một cách phù hợp về khoảng cách để các tín hiệu thu được từ mỗi đầu thu tín hiệu sóng âm tương đối độc lập với nhau. Tín hiệu thu được từ mỗi đầu thu tín hiệu sóng âm sau đó được khuếch đại và lọc nhiễu phục vụ cho việc xử lý các bức ảnh siêu âm 3D.

Để tạo được ảnh Sonar 3D, hệ thống ăng ten phát (transducer phát) và ăng ten thu (đầu thu tín hiệu sóng âm thu) sẽ được dịch chuyển tịnh tiến theo hướng tàu chạy. Sau mỗi một chu kỳ xử lý tín hiệu thì 01 ảnh 2D (ảnh không gian hai chiều) được dựng lên, tuy nhiên hệ thống xử lý liên tiếp các bước ảnh 2D dịch chuyển theo hướng tàu, do vậy sẽ tạo được ảnh 3D (ảnh không gian ba chiều) theo thời gian thực.

Các tín hiệu xung phản xạ từ vật thể cần quét ảnh được so sánh với vị trí xung sóng âm gốc gửi trực tiếp từ khối phát tín hiệu đến khối xử lý tín hiệu thu. Thông qua việc so sánh này, khoảng cách từ điểm quan sát đến vật cản được xác định.

Dựa vào nguồn dữ liệu là các xung phản xạ, bài báo đề xuất xây dựng ma trận điểm ảnh với kích thước dựa trên độ phân giải của bức ảnh ở trục chiều sâu của nước, và trục ngang của lát cắt ảnh 3D vuông góc với phương chuyển động của tàu.

Để cải thiện nguồn dữ liệu thu được, các tín hiệu thu được từ các đầu thu tín hiệu sóng âm cần thực hiện lọc nhiễu bằng phương pháp lọc song song trên mỗi băng con của từng đầu thu tín hiệu sóng âm [9]. Các giá trị điểm ảnh của ma trận tạo ảnh được xác định thông qua hệ số định hướng của búp sóng phát và búp sóng thu, cùng với hệ số suy hao của kênh truyền phụ thuộc với khoảng cách.

Phần còn lại của bài báo này được trình bày như sau: Mục II trình bày chi tiết về thuật toán tạo ảnh Sonar 3D đề xuất trong bài báo. Mục III thảo luận về kết quả đo đạc. Mục IV kết luận bài báo.

II. ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP DỰNG ẢNH SONAR 3D CHO HỆ THỐNG SONAR CHỦ ĐỘNG

Chất lượng và độ chính xác của bức ảnh quét Sonar phụ thuộc nhiều vào chất lượng tín hiệu thu được. Trong bài báo này, tín hiệu thu được đã được xử lý lọc nhiễu như trình bày trong các tài liệu [9]. Độ phân giải của bức ảnh quét phụ thuộc vào các tham số của thuật toán dựng ảnh Sonar 3D như thảo luận dưới đây.

Sơ đồ thiết kế hệ thống quét ảnh siêu âm 3D được mô tả như mô tả ở Hình 1, bao gồm khối nguồn (1), khối phát tín hiệu (2) và khối thu và xử lý tín hiệu (3). Thuật toán tạo ảnh 3D (5) nhận tín hiệu thu từ khối thu (3), cùng thông tin về vận tốc chuyển động của tàu gắn hệ thống quét ảnh siêu âm để tạo ra ma trận điểm ảnh 3D. Thông tin về vận tốc của tàu được xác định bằng khối (4). Vận tốc tàu mang hệ Sonar chủ động có thể xác định bằng GPS, hoặc tốc độ kế trên tàu. Trong trường hợp đặc biệt có thể sử dụng các hệ ăng ten đa búp sóng để xác định vận tốc dựa theo hiệu ứng Doppler. Trong khuôn khổ bài báo này chúng tôi không thảo luận sâu về các phương pháp xác định vận tốc tàu mang hệ Sonar chủ động.

Hình 2 trình bày sơ đồ vị trí các đầu phát tín hiệu sóng âm và đầu thu tín hiệu sóng âm thu sử dụng để tạo ảnh siêu âm 3D. Trong Hình 2 trục tọa độ x là bề rộng búp sóng quét theo mặt cắt ngang, z trục tọa độ thể hiện độ sâu của đáy biển, y là trục chỉ hướng tàu chuyển động. Số lượng đầu thu tín hiệu sóng âm được sử dụng là M , trong khi đó số lượng đầu phát tín hiệu sóng âm được dùng là 2 (trong trường hợp tổng quát là N, tuy nhiên được mô tả trong bài báo này là 2 đầu phát tín hiệu sóng âm để việc mô tả toán học cho đơn giản). Các đầu phát tín hiệu sóng âm được hướng ra hai nửa của mặt phẳng đáy và được kéo theo di chuyển của tàu. Đầu phát tín hiệu sóng âm thứ nhất ký hiệu là Tx_1, phát xung siêu âm $S_1(t)$ với tần số dao động f_1. Đầu phát tín hiệu sóng âm thứ hai ký hiệu là Tx_2, phát xung siêu âm $S_2(t)$ với tần số dao động f_2. Số đầu phát tín hiệu sóng âm có thể được nâng cao để nâng cao chất lượng ảnh quét.

Hình 3 trình bày thuật toán xác định độ sâu đáy biển là một tham số để tạo được ảnh quét siêu âm 3D, trong đó T_h là mức ngưỡng của tín hiệu dùng để nhận biết có sự phản xạ của tín hiệu đáy. Mức ngưỡng tín hiệu thường được xác định cao hơn mức nhiễu nền. Để xác định được mức độ can nhiễu nền, hệ thống trước đó cần có phép đo hoặc ước lượng mức độ can nhiễu nền độc lập với phép xử lý tín hiệu Sonar [20]. Trong khuôn khổ bài báo này chúng tôi không tham vọng đi sâu vào vấn đề này. Tham số Do_sau là tham số sử dụng để xác định độ sâu có thể đo được.

Thuật toán tạo ảnh 3D, được mô tả chi tiết sau đây. Về mặt toán học, tín hiệu thu được tại mỗi đầu thu tín hiệu sóng âm được biểu diễn dưới dạng:

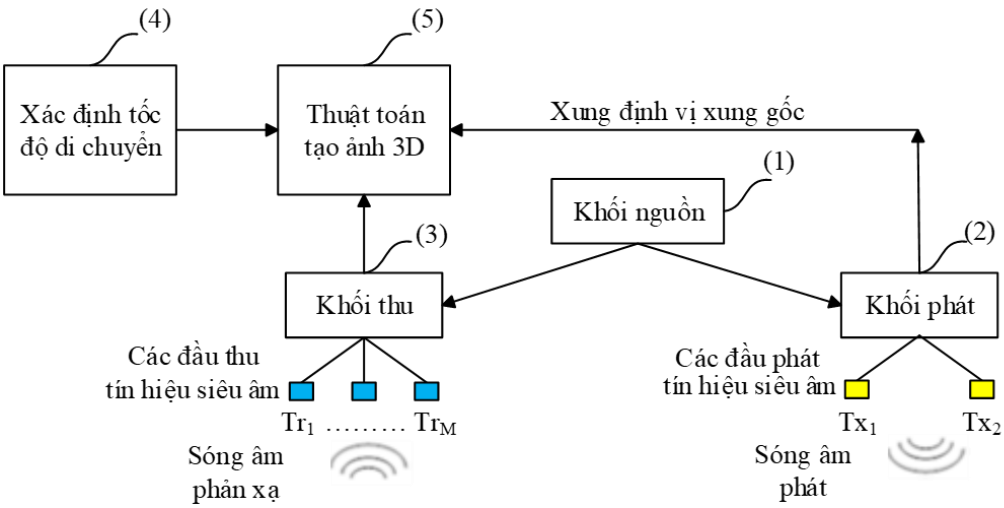
$$x_m(t) = A_m \cos\left(2\pi f_m t + \phi_m\right) \tag{1}$$

trong đó, ϕ_m và f_m là góc pha của tín hiệu tới và tần số dao động của tín hiệu. Sóng mang được ký hiệu là $f_c(t) = \cos(2\pi f_c t)$. Khi nhân tín hiệu thu được với sóng mang thu được:

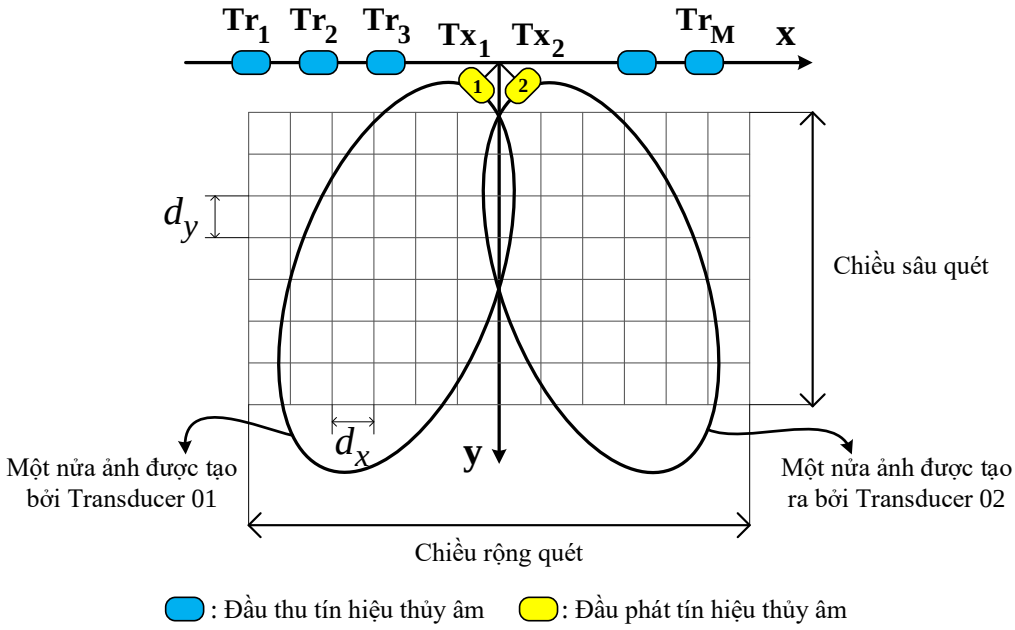
$$f_y(t) = x_m(t) f_c(t) = A_m \cos\left(2\pi f_m t + \phi_m\right) \cos\left(2\pi f_c t\right) \tag{2}$$

Sau khi triển khai giải tích ta thu được:

$$\begin{aligned} f_y(t) = \frac{A_m}{2}\{&\cos\left[2\pi\left(f_m + f_c\right)t + \phi_m\right] \\ &+ \cos\left[2\pi\left(f_c - f_m\right)t + \phi_m\right]\} \end{aligned} \tag{3}$$



Hình 1. Sơ đồ thiết kế hệ quét ảnh Sonar chủ động.



Hình 2. Sơ đồ bố trí các ăng ten thu phát sóng âm và tạo búp sóng quét.

Tín hiệu thể hiện ở công thức (3) có chứa thành phần tần số cao là tổng của hai tần số và thành phần tần số thấp là hiệu của 2 tần số. Sau đó, sử dụng bộ lọc thông thấp để loại bỏ thành phần tần số cao. Như vậy, tín hiệu thu được là thành phần hiệu của 2 tần số

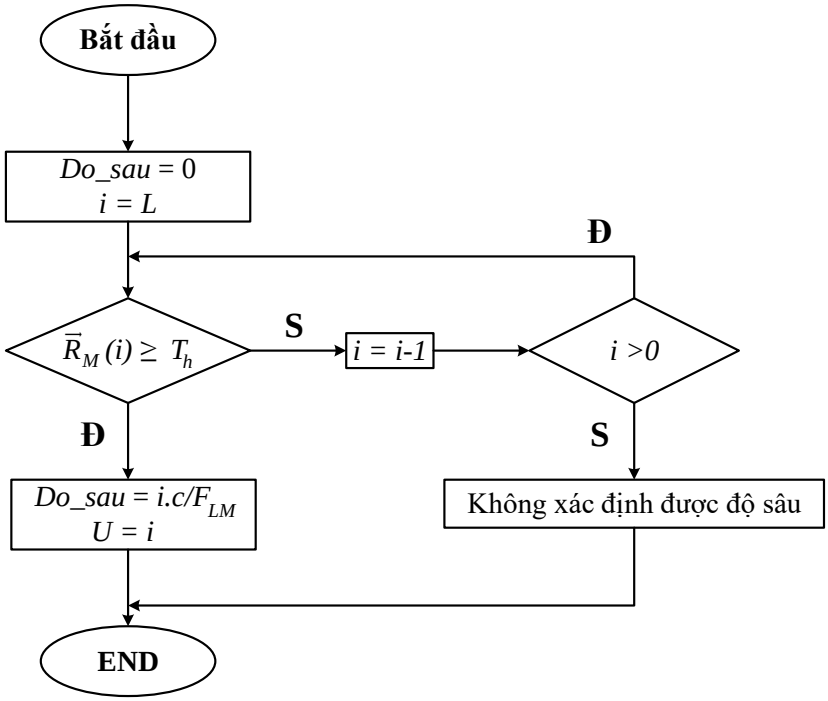
$$f_y(t) = \cos\left[2\pi\left(f_c - f_m\right)t + \phi_m\right] \quad (4)$$

Tín hiệu ở công thức (4) được lấy mẫu qua bộ biến đổi A/D. Dựa trên tín hiệu xung gốc được gửi từ bên phát, bài báo đề xuất tách tín hiệu xung gốc và giữ lại tín hiệu xung phản xạ từ tín hiệu thu được. Sau đó, thuật toán tạo ảnh siêu âm 3D sẽ lọc tách riêng từng kênh rồi xây dựng ma trận tín hiệu đầu vào $\mathbf{R_1}$ và $\mathbf{R_2}$ gồm M hàng (tương ứng M đầu thu) và L cột (tương ứng với N mẫu tín hiệu thu). Ma trận tín hiệu đầu vào $\mathbf{R_1}$,$\mathbf{R_2}$ sau đó được đưa vào thuật toán tạo ảnh.

Thuật toán dựng ảnh Sonar 3D được mô tả chi tiết như sau:

B1: Thiết lập các thông số hệ thống bao gồm label=(b)

1) M : là tham số xác định số lượng đầu đầu thu tín



Hình 3. Thuật toán xác định độ sâu để tạo ảnh Sonar 2D hoặc 3D.

hiệu sóng âm.

2) $R_i(x, y)$: xác định tọa độ các đầu thu tín hiệu sóng âm thu được $i = 1 : M$.
3) $T_1(x_1, y_1), T_2(x_2, y_2)$: xác định tọa độ của 2 đầu phát tín hiệu sóng âm phát.
4) d_x, d_y lần lượt xác định độ phân giải của điểm ảnh theo trục x và y.
5) X_{max} xác định bề rộng quét lớn nhất của vùng quét.
6) Y_{max} xác định chiều sâu quét lớn nhất của vùng quét.
7) Số điểm ảnh lớn nhất tính theo chiều ngang được xác định là:

$$N_{x_max} = X_{max}/d_x \tag{5}$$

8) Độ phân giải lớn nhất theo chiều sâu được xác định là:

$$N_{y_max} = Y_{max}/d_y \tag{6}$$

9) $\mathbf{W_i}$ là ma trận tọa độ các các điểm ảnh kích thước $[N_{x_max} \times N_{y_max}]$ ứng với đầu thu tín hiệu sóng âm thứ i.
10) x, y là tọa độ của mỗi điểm trên mặt phẳng ảnh.
11) $P_1(x, y), P_2(x, y)$ là hàm trọng số búp sóng tín hiệu phát lần lượt ứng với đầu phát tín hiệu sóng âm phát ở tần số f_1 và f_2.
12) $Q_i(x, y)$ là hàm trọng số búp sóng tín hiệu thu của các đầu thu tín hiệu sóng âm thu $i = 1 : M$.
13) $d_{Tx1}(x, y)$ là ma trận khoảng cách từ đầu phát tín hiệu sóng âm thứ nhất tới các điểm ảnh của ma trận $\mathbf{W_i}$.
14) $d_{Tx2}(x, y)$ là ma trận khoảng cách từ đầu phát tín hiệu sóng âm thứ hai tới các điểm ảnh của ma trận $\mathbf{W_i}$.
15) $d_{Tri}(x, y)$ là ma trận khoảng cách từ đầu thu tín hiệu sóng âm thu thứ i tới các điểm ảnh của ma trận $\mathbf{W_i}$
16) $d_{i,1}(x, y)$ là ma trận quãng đường truyền tín hiệu từ đầu phát tín hiệu sóng âm phát 1 tới đầu thu tín hiệu sóng âm thu thứ i, và được xác định bằng công thức

$$d_{i,1}(x, y) = d_{Tx1}(x, y) + d_{Tri}(x, y) \tag{7}$$

17) $d_{i,2}(x, y)$ là ma trận quãng đường truyền tín hiệu từ Đầu phát tín hiệu sóng âm phát 2 tới đầu thu tín hiệu sóng âm thu thứ i.

$$d_{i,2}(x, y) = d_{Tx2}(x, y) + d_{Tri}(x, y) \tag{8}$$

18) $t_{i,1}$ là thời gian truyền tín hiệu từ đầu phát tín hiệu sóng âm phát 1 đến đầu thu tín hiệu sóng âm thứ i được xác định bằng:

$$t_{i,1} = d_{i,1}(x, y)/c \tag{9}$$

trong đó c là vận tốc sóng âm trong môi trường nước.

19) $t_{i,2}$ là thời gian truyền tín hiệu từ đầu phát tín hiệu sóng âm phát 2 đến đầu thu tín hiệu sóng âm thứ i được xác định bằng:

$$t_{i,2} = d_{i,2}(x, y)/c \tag{10}$$

20) Khởi tạo ma trận giá trị trọng số cho các điểm ảnh có tọa độ (x, y)

$$\mathbf{W_i} = \begin{cases} P_1(x,y)Q_i(x,y)/\left(d_{i,1}\right)^2 & x = -N_{x_\max}/2 : 0 \\ P_2(x,y)Q_i(x,y)/\left(d_{i,2}\right)^2 & x = 0 : +N_{x_\max}/2 \end{cases} \tag{11}$$

21) T_h là mức ngưỡng xác nhận có tín hiệu phản xạ. Nếu tín hiệu nhỏ hơn mức này là nhiễu.
22) F_{LM} là tần số lấy mẫu tín hiệu khi biến đổi A/D.
23) v là tốc độ di chuyển của tàu.
24) Khởi tạo $k = 1$ là chỉ số xác định số thứ tự của ảnh thứ nhất.

B2: Thu tín hiệu thu từ mạch biến đổi A/D từ các đầu thu tín hiệu sóng âm.

B3: Tín hiệu này sẽ được lọc thông thấp có băng thông bằng $1/\Delta t$. Tiếp đó, xác định giá trị cực đại của tín hiệu thu để xác định vị trí xung gốc. Sau đó, cắt bỏ phần tín hiệu có độ dài bằng $(t + \Delta t)$ tính từ giá trị lớn nhất để loại bỏ phần nhiễu, phần tín hiệu còn lại là các xung phản xạ thu được.

B4: Tách sóng để tách riêng từng kênh. Vì hệ thống sử dụng 2 tần số phát khác nhau nên số kênh tách ra tương đương với 2 lần số đầu thu M. Dựa trên xung xung gốc $g(t)$ truyền từ bên phát. Ghép các tín hiệu thu lại ta được hai ma trận tín hiệu thu $\mathbf{R_1}$ và $\mathbf{R_2}$ kích thước $M \times L$ (M hàng L cột) M là số đầu đầu thu tín hiệu sóng âm thu. Số mẫu tín hiệu biểu diễn trong các ma trận $\mathbf{R_1}$ và $\mathbf{R_2}$ được xác định là:

$$L = F_{LM} \times (T - \Delta t) \tag{12}$$

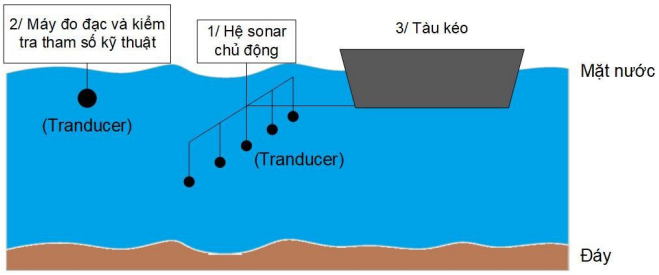
Các ma trận $\mathbf{R_1}$ và $\mathbf{R_2}$ tương ứng với các tần số phát f_1 và f_2 sẽ được sử dụng để tạo ra một nửa ảnh như Hình 2.

B5: Tiếp tục với ảnh thứ $k + 1$ bằng cách quay lại bước 2.

III. KẾT QUẢ THỰC NGHIỆM VÀ THẢO LUẬN

Kịch bản thử nghiệm hệ thống được trình bày ở **hình 4**, trong đó đó tàu thử nghiệm được sử dụng để gắn các trang bị kỹ thuật, với ký hiệu (1) là hệ Sonar chủ động, (2) là máy đo đạc và kiểm tra tham số kỹ thuật, và (3) là tàu kéo hệ thống. Transducer là các đầu thu phát tín hiệu sóng âm.

Hệ thống được thiết kế thực tế sử dụng hai búp sóng quét sườn đặt hai mạn tàu với tần số quét là 165 KHz và 200 Khz. Hệ thống được thiết kế sử dụng 8 đầu thu tín hiệu sóng âm song song, được phân bố đối xứng với 4 đầu thu



Hình 4. Kịch bản thử nghiệm hệ Sonar chủ động.

Bảng I
CÁC THAM SỐ HỆ THỐNG.

Tham số	Giá trị
Chu kỳ phát xung Sonar T	0.1s
Độ rộng một xung Sonar Δt	0.4ms
Tần số lấy mẫu tại phía thu	192kHz
Số lượng transducer phát M	2
Số lượng hydrophone thu N	8
Khoảng cách thiết lập giữa hai Hydrophone liền kề L	$0.09m$
Tx_1 Tần số phát của transducer thứ nhất f_1	165kHz
Tx_2 Tần số phát của transducer thứ 2 f_2	200kHz

được sử dụng cho quét một bên sườn (một bên của mạn tàu). Thiết bị thử nghiệm Sonar quét sườn với kiến trúc 2 đầu phát và 8 đầu thu tín hiệu sóng âm.

Tham số hệ thống thử nghiệm được trình bày vắn tắt như ở Bảng I, trong đó đáng chú ý là các tần số của transducer phát, khoảng cách đặt của các hydrophone thu, chu kỳ phát tín hiệu Sonar và độ rộng một xung Sonar. Chúng ta chú ý là xung Sonar được điều chế ở các tần số f_1 và f_2. Điều kiện thời tiết trong lúc thử nghiệm được mô tả ở Bảng II. Nhóm nghiên cứu không tiến hành đo đặc mức nhiễu, tuy nhiên với điều kiện này về cơ bản điều kiện thời tiết là thuận lợi cho thử nghiệm. Trong giới hạn các nghiên cứu này, bài báo chỉ tập trung vào sự ảnh hưởng các tham số kỹ thuật đến chất lượng hệ thống mà chưa tập trung vào các nghiên cứu về sự ảnh hưởng các điều kiện tự nhiên như sóng, gió hay bão. Các chấn tử ăng ten phát là transducer BII-7562/200 [21] là họ transducer định hướng có tính định hướng khá tốt. Độ mở búp sóng là 7^0 được sử dụng trong công thức (11).

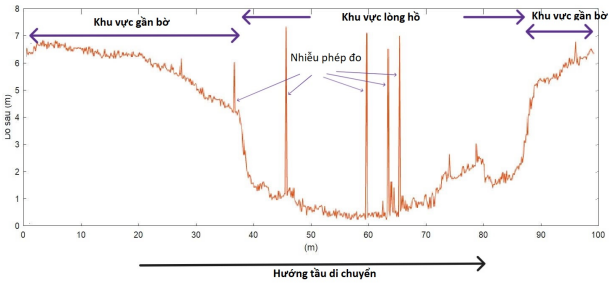
Hình ảnh thử nghiệm quét ảnh đáy hồ Đồng Đò được trình bày ở Hình 5, trong đó kết quả thu được bằng cách sử

Bảng II
CÁC ĐIỀU KIỆN MÔI TRƯỜNG

Thời tiết	trời không nắng, không mưa
Nhiện độ	$25°C$
Gió	gió nhẹ
Sóng	sóng lăn tăn

Hình 5. Hình ảnh thử nghiệm hệ Sonar chủ động quét hình ảnh đáy 2D tại hồ Đồng Đò ngày 16 tháng 10 năm 2021

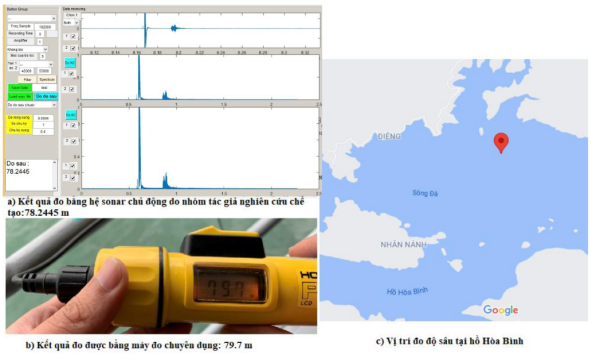
dụng phương pháp được so sánh trực tiếp trong thời gian thực với hệ thống Sonar chuyên dụng. Các kết quả so với hệ Sonar chuyên dụng cho thấy không có sự khác biệt đáng kể giữa hai hệ thống. Hệ thống thử nghiệm được di chuyển theo một mặt cắt ngang của hồ Đồng Đò, tức thuyền di chuyển từ một bờ phía bên này sang bờ phía bên kia.



Hình 6. Kết quả hình ảnh quét đáy ảnh 2D hồ Đồng Đò ngày 16 tháng 10 năm 2021.

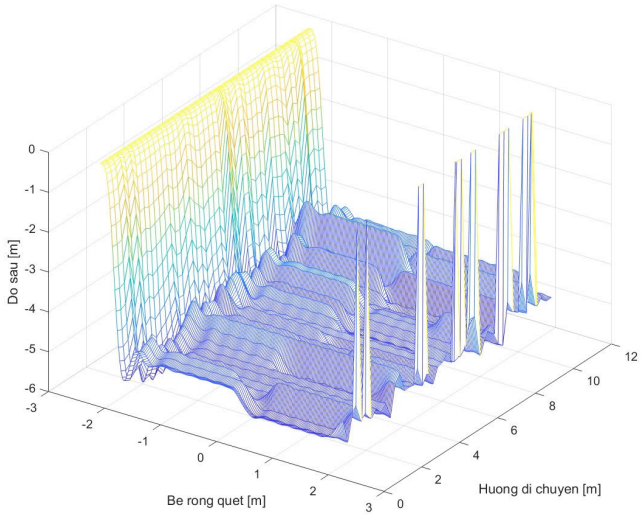
Hình 6 trình bày chi tiết hình ảnh màn hình hiển thị kết quả quét đáy hồ Đồng Đò dưới dạng hình ảnh hai chiều 2D. Từ kết quả đo đạc và hiển thị trên màn hình 2D, chúng ta nhìn thấy hồ Đồng Đò có hai sườn dốc phải và dốc trái, thoải dần xuống lòng hồ với độ sâu tại ví trí đo được của lòng hồ khoảng 8 m. Một số hình ảnh đo được về độ sâu không phù hợp với thực tế là nhiễu của phép đo, lý do các transducer phát không được gắn cố định trên mạn thuyền cũng như thuyền sử dụng không phải là các tàu lớn, do vậy có độ tròng trành sóng khá cao, gây ra nhiễu phép đo. Ngoài ra, nhiễu cũng có thể là do thiết kế các mạch điện tử và hệ thống chưa tối ưu cũng như chưa loại bỏ hết các nguồn nhiễu bên ngoài.

Hình 7 so sánh kết quả đo độ sâu sử dụng thiết bị quét Sonar do nhóm nghiên cứu thiết kế chế tạo dựa trên thuật toán đề xuất so với kết quả đo đạc sử dụng thiết bị chuyên dụng. Kết quả đo được thực hiện tại hồ Hòa Bình ngày 21.10.2021. Hai thiết bị được đo tại cùng một thời điểm và đặt ở vị trí khá gần nhau. Sự khác biệt giữa hai kết quả đo là 1,5 m, tức đây là sự khác biệt tuyệt đối, còn sự khác biệt so về mặt tương đối là 1,8 % của thang đo 79 m, sự khác biệt này không khẳng định là sai số của phép đo, vì kết quả đo còn phụ thuộc vào hướng của búp sóng quét. Mặc dù hướng của cả hai thiết bị đều được đặt theo phương thẳng đứng, nhưng vì lý do kỹ thuật thực nghiệm, các hướng quét của các thiết bị không thể khẳng định là trùng nhau. Các kết quả đo đạc nhiều lần ở các vị trí và kịch bản khác nhau so với các thiết bị chuyên dụng khẳng định tính đúng đắn của phép đo.



Hình 7. Kết quả so sánh đo độ sâu tại hồ Hòa Bình ngày 21 tháng 10 năm 2021 giữa thiết bị do nhóm nghiên cứu thiết kế chế tạo dựa trên thuật toán đề xuất với thiết bị chuyên dụng.

Hình 8 trình bày kết quả quét đáy vịnh Hạ Long, và dựng ảnh hiển thị 3D. Khu vực quét đáy thực hiện gần Hòn Ti Tốp. Kết quả quét đáy vịnh cho thấy đáy khá bằng phẳng, là điểm khác biệt so với kết quả quét đáy ở hồ Đồng Đò. Kết quả hiển thị lúc bắt đầu đo và lúc kết thúc đo là sai số phép đo vì đầu quét tín hiệu trước khi thực hiện phép đo chưa được gá cố định.



Hình 8. Kết quả quét đáy 3D Vịnh Hạ Long ngày 23 tháng 10 năm 2021, khu vực gần hòn Ti Tốp.

IV. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất phương pháp quét ảnh 2D và 3D sử dụng công nghệ nhận dạng và định vị bằng sóng âm của các vật thể dưới nước. Phương pháp tạo ảnh 3D của các vật thể dưới nước được thực hiện bằng cách sử dụng nhiều đầu thu tín hiệu sóng âm, và một số đầu phát tín hiệu sóng âm nhằm mục đích thu thập dữ liệu để tạo ảnh 3D có độ phân giải lớn. Phương pháp xử lý tín hiệu và tạo ảnh đề xuất cho phép xử lý tín hiệu từ nhiều đầu thu, cho phép lọc nhiễu hiệu quả, giảm độ phức tạp hệ thống, thuận lợi cho việc thực hiện hệ thống quét ảnh bằng phần cứng và phần mềm. Bài báo cũng trình bày kết quả đo đạc thực tế của việc quét đáy hồ Đồng Đò, các kết quả đo đạc được so sánh và đánh giá bởi các thiết bị chuyên dụng cho thấy sự tin cậy của phép đo. Để có đánh giá toàn diện về ảnh hưởng của các tham số hệ thống và tham số môi trường, cũng như là các kịch bản thử nghiệm khác nhau, nhóm nghiên cứu cần tiến hành thêm nhiều phép đo và so sánh với các kỹ thuật hiện tại. Tuy nhiên đây là các công việc đòi hỏi sự chuẩn bị công phu. Bài báo này dừng lại về phân tích sự hoạt động của thuật toán đề xuất, có minh chứng về khả năng thực hiện thuật toán trên nền tảng phần cứng thông qua thực nghiệm. Các vấn đề còn mở sẽ là các đối tượng nghiên cứu tiếp theo của tập thể tác giả.

LỜI CẢM ƠN

Công trình khoa học này được tài trợ trong khuông khổ đề tài mã số T2023-PC-034 của Đại học Bách khoa Hà Nội. Các tác giả trận trọng cảm ơn.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] I. G. Bryden, "An active sonar system using acvd beamforming," *Applied Acoustics*, vol. 27, no. 4, pp. 275–285, 1989.

[2] M. Caccia, G. Bruzzone, and G. Veruggio, "Active sonar-based bottom-following for unmanned underwater vehicles," *Control Engineering Practice*, vol. 7, no. 4, pp. 459–468, 1999.

[3] E. J. Sullivan, *Active Sonar*, pp. 1737–1755. New York, NY: Springer New York, 2008.

[4] B. H. Maranda, *Passive Sonar*, pp. 1757–1781. New York, NY: Springer New York, 2008.

[5] G. Marani, S. K. Choi, and J. Yuh, "Underwater Autonomous Manipulation for Intervention Missions AUVs," *Ocean Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 15–23, 2009.

[6] D. W. Kim, "Tracking of REMUS Autonomous Underwater Vehicles with Actuator Saturations," *Automatica*, vol. 58, no. C, pp. 15–21, 2015.

[7] N. Q. Khuong and N. V. Duc, "Phuong phap thiet ke he thong quet anh cac vat the duoi nuoc su dung dong thoi nhieu dau thu phat tin hieu song am," Bằng độc quyền sáng chế số 39938 do Cục Sở hữu trí tuệ cấp ngày 26.04.2024.

[8] N. Q. Khuong and N. V. Duc, "Phuong phap quet anh khong gian ba chieu su dung cong nghe nhan dang va dinh vi song am duoi nuoc," Bằng độc quyền sáng chế số 39939 do Cục Sở hữu trí tuệ cấp ngày 26.04.2024.

[9] N. Van Duc and N. Khuong Quoc, "Hệ thống sonar chủ động sử dụng đồng thời nhiều đầu thu phát tín hiệu sóng âm," *Chuyên san Công nghệ thông tin và truyền thông - Tạp chí Công nghệ thông tin và truyền thông*, 2024.

[10] V. D. Nguyen, N. M. Luu, Q. K. Nguyen, and T.-D. Nguyen, "Estimation of the acoustic transducer beam aperture by using the geometric backscattering model for side-scan sonar systems," *Sensors*, vol. 23, no. 4, 2023.

[11] S.-C. Yu, T.-W. Kim, G. Marani, and S. K. Choi, "Real-time 3d sonar image recognition for underwater vehicles," in *2007 Symposium on Underwater Technology and Workshop on Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, pp. 142–146, 2007.

[12] Z. Li, B. Qi, and C. Li, "3d sonar image reconstruction based on multilayered mesh search and triangular connection," in *2018 10th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics (IHMSC)*, vol. 02, pp. 60–63, 2018.

[13] M. Sung, J. Kim, H. Cho, M. Lee, and S.-C. Yu, "Underwater-sonar-image-based 3d point cloud reconstruction for high data utilization and object classification using a neural network," *Electronics*, vol. 9, no. 11, 2020.

[14] J. G. Moss, "Sonar bathymetry system transmit-receive sequence programmer," U.S. Patent US3500302A, 1969.

[15] A. Lorenson and D. Kraus, "3d-sonar image formation and shape recognition techniques," in *OCEANS 2009-EUROPE*, pp. 1–6, 2009.

[16] E. Coiras, Y. Petillot, and D. M. Lane, "Multiresolution 3-d reconstruction from side-scan sonar images," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 2, pp. 382–390, 2007.

[17] V. D. Nguyen, H. L. N. Thi, Q. K. Nguyen, and T. H. Nguyen, "Low complexity non-uniform fft for doppler compensation in ofdm-based underwater acoustic communication systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 82788–82798, 2022.

[18] A.-A. Saucan, C. Sintes, T. Chonavel, and J.-M. Le Caillec, "Model-based adaptive 3d sonar reconstruction in reverberating environments," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 24, no. 10, pp. 2928–2940, 2015.

[19] I. Rahaman, M. S. Hossain, M. Y. Hossain, and N. Hosen, "Performance enhancement of active sonar system in under water environment using spherical hydrophone array," in *2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, pp. 628–632, 2019.

[20] C. Y. Nguyen, H. V. Do, V. D. Nguyen, and H. A. Muzamane, "Underwater ambient noise model and verification in the underwater ofdm system," in *2017 International Conference on Information and Communications (ICIC)*, pp. 233–239, 2017.

[21] B. I. INC, "Bii-7560 series echo sounder transducer: Broadband & high power datasheet," Available online: https://www.benthowave.com/products/BII-7560echosounder.html.

Nguyễn Văn Đức tốt nghiệp kỹ sư chuyên ngành Kỹ thuật thông tin năm 1995, tốt nghiệp Thạc sí kỹ thuật năm 1997 chuyên ngành điện tử viễn thông, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội; tốt nghiệp Tiến sĩ chuyên nghành kỹ thuật thông tin Trường ĐH tổng hợp Hannover, CHLB Đức năm 2003. Từ năm 1998 đến nay là giảng viên trường Đại học Bách Khoa Hà Nội. Lĩnh vực nghiên cứu hiện

nay là hệ thống thông tin thủy âm, hệ thống Sonar, công nghệ MIMO, OFDM.
Email: duc.nguyenvan1@hust.edu.vn

Nguyễn Quôc Khương tốt nghiêp kỹ sư chuyên ngành kỹ thuật thông tin năm 1995, tốt nghiệp thạc sỹ kỹ thuật năm 1997 chuyên ngành điện tử viễn thông, Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội; tốt nghiệp tiễn sỹ chuyên nghành kỹ thuật thông tin Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội năm 2011. Từ năm 1998 đến nay là giảng viên trường Đại học Bách Khoa Hà Nội. Lĩnh vực nghiên cứu hiện nay là hệ thống thông tin thủy âm, hệ thống Sonar, công nghệ MIMO, OFDM.
Email: khuong.nguyenvan@hust.edu.vn