

# NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC ƯỚC LƯỢNG KHÁC BIỆT THỜI GIAN ĐẾN SỬ DỤNG KỸ THUẬT NỘI SUY ỨNG DỤNG TRONG BÀI TOÁN ĐỊNH VỊ NGUỒN ÂM THANH

IMPROVING THE ACCURACY OF TIME DELAY ESTIMATION USING INTERPOLATION TECHNIQUE APPLIED IN SOUND SOURCE LOCALIZATION PROBLEM

Trần Công Thìn<sup>1,\*</sup>

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2023.244>

## TÓM TẮT

Bài báo trình bày một số kết quả nghiên cứu giải pháp nâng cao chất lượng ước tính khác biệt thời gian tới sử dụng trong bài toán định vị nguồn âm thanh sử dụng nguyên lý TDOA. Trong đó đề xuất giải pháp cải thiện sai số định ước tính khác biệt thời gian tới sử dụng kỹ thuật nội suy áp dụng cho hàm tương quan chéo tổng quát. Trên cơ sở phân tích lý thuyết và tiến hành mô phỏng Monte-Carlo trên Matlab, kết hợp với dữ liệu được thu thập trong điều kiện thực tế bài báo sẽ đánh giá hiệu quả của giải pháp được đề xuất.

**Từ khóa:** Định vị nguồn âm, nội suy, GCC-PHAT.

## ABSTRACT

This paper presents some results of research on solutions to improve the quality of next time difference estimation using in sound source positioning problem using TDOA principle. In which, a solution is proposed to improve the next time difference estimation error using interpolation techniques applied to the general cross-correlation function. On the basis of theoretical analysis and conducting Monte-Carlo simulations on Matlab, combined with data collected in actual conditions, the paper will evaluate the effectiveness of the proposed solution.

**Keywords:** Sound source localization, interpolation, GCC-PHAT.

<sup>1</sup>Viện Điện tử, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự

\*Email: [thin.vdt@outlook.com](mailto:thin.vdt@outlook.com)

Ngày nhận bài: 21/10/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 26/11/2023

Ngày chấp nhận đăng: 25/12/2023

## 1. GIỚI THIỆU

Ước tính khác biệt thời gian tới (Time Delay Estimate - TDE) là một kỹ thuật được sử dụng rộng rãi trong xử lý tín hiệu. Đặc biệt, trong các hệ thống định vị nguồn âm thanh sử dụng nguyên lý TDOA (Time Differences of Arrival) ước lượng hiệu độ thời gian đến là bước quan trọng nhất, quyết định độ chính xác của hệ thống định vị nguồn âm [4]. Hiện nay việc ước tính khác biệt thời gian đến phần lớn dựa trên các thuật toán sử dụng thuật toán tương quan chéo tổng quát, trong đó hiệu quả nhất là phương pháp ước tính dựa

trên phương pháp biến đổi pha GCC-PHAT (Generalized Cross Correlation - Phase Transform). Trong các hệ thống xử lý tín hiệu số, giá trị khác biệt thời gian tới ước tính được là bội số của khoảng thời gian lấy mẫu, khi tốc độ lấy mẫu thấp sai số ước tính khác biệt thời gian tới là đáng kể, điều này làm tăng sai số định vị trong hệ thống định vị nguồn âm sử dụng nguyên lý TDOA. Mặt khác, khi nâng cao tần số lấy mẫu, gánh nặng tính toán của hệ thống tăng lên, điều này làm ảnh hưởng tới khả năng hoạt động thời gian thực của hệ thống. Để giải quyết vấn đề này, bài báo sẽ trình bày một số kết quả nghiên cứu cải thiện chất lượng ước lượng khác biệt thời gian tới sử dụng giải pháp nội suy đối với hàm tương quan chéo tổng quát GCC-PHAT, qua đó nâng cao độ chính xác ước tính khác biệt thời gian tới trong khi số lượng phép tính không tăng lên nhiều, vẫn đảm bảo khả năng hoạt động thời gian thực. Hiệu quả của giải pháp sẽ được chứng minh dựa trên kết quả mô phỏng Monte-Carlo kết hợp với dữ liệu được thu thập trong điều kiện thực tế.

## 2. ƯỚC LƯỢNG ĐỘ KHÁC BIỆT THỜI GIAN ĐẾN

### 2.1. Định vị nguồn âm theo nguyên lý TDOA

Phương pháp định vị nguồn âm theo nguyên lý TDOA được xây dựng trên cơ sở ước tính khác biệt thời gian đến  $\tau_{ij}$  của tín hiệu âm thanh thu được trên các cảm biến [1, 2].

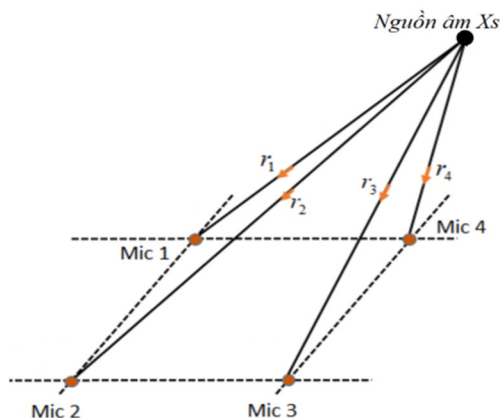
$$\tau_{ij} = \tau_i - \tau_j \quad (1)$$

Trong đó:  $\tau_i$  và  $\tau_j$  lần lượt là thời gian tín hiệu truyền từ nguồn âm tới cảm biến thứ  $i$  và thứ  $j$ .

Triển khai công thức (1) với  $r_i, r_j$  là khoảng cách từ nguồn âm tới các cảm biến và vận tốc lan truyền của âm thanh trong không khí  $v$ , thu được phương trình biểu diễn một hyperboloid trong không gian 3 chiều [4]:

$$\tau_{ij} = \frac{r_i}{v} - \frac{r_j}{v} = \frac{\|\mathbf{x}_s - \mathbf{m}_i\| - \|\mathbf{x}_s - \mathbf{m}_j\|}{v} \quad (2)$$

Với  $\mathbf{x}_s = [x_s, y_s, z_s]^T$ ,  $\mathbf{m}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ ,  $\mathbf{m}_j = [x_j, y_j, z_j]^T$  lần lượt là tọa độ của nguồn âm và tọa độ của hai cảm biến thứ  $i$  và thứ  $j$  trong không gian.



Hình 1. Mô hình một hệ thống định vị nguồn âm

Để xác định tọa độ nguồn âm  $\mathbf{x}_s$  trong không gian 3 chiều, cần giao hội của ít nhất 3 hyperboloid, tương ứng với việc xây dựng ba phương trình độc lập theo công thức (2), do đó cần ít nhất 4 cảm biến âm thanh để tạo thành 3 cặp cảm biến độc lập. Việc giải hệ ba phương trình theo công thức (2) sẽ tìm được vị trí nguồn âm trong không gian 3 chiều. Như vậy, để định vị nguồn âm theo nguyên lý TDOA, cần thực hiện hai bước, ước tính hiệu thời gian đến  $\tau_{ij}$  và giải hệ phương trình để xác định tọa độ của nguồn âm.

**2.2. Ước tính hiệu thời gian đến**

Để ước tính khác biệt thời gian đến của tín hiệu thu được trên hai cảm biến, các nghiên cứu trong những năm gần đây chỉ rằng phương pháp sử dụng tương quan chéo tổng quát mang lại hiệu quả cao nhất [4, 6]. Trong phương pháp này, hiệu thời gian đến được ước tính theo công thức [6]:

$$\hat{\tau}_{ij} = \arg \max_{\tau_{x_i x_j}} r_{x_i x_j}(\tau) \tag{3}$$

Với  $r_{x_i x_j}$  là hàm tương quan chéo tổng quát [6]:

$$r_{x_i x_j}(\tau) \triangleq \mathcal{F}^{-1} \Psi_{x_i x_j}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_{x_i x_j}(f) e^{i2\pi f \tau} df \tag{4}$$

$$= \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi(f) S_{x_i x_j}(f) e^{i2\pi f \tau} df$$

Trong đó :

$$S_{x_i x_j}(f) \triangleq \mathbf{E}[\mathbf{X}_i(f) \mathbf{X}_j^*(f)] \frac{1}{2} \text{ là hàm Cross Spectrum;}$$

$\Phi(f)$  là hàm trọng số trong miền tần số.

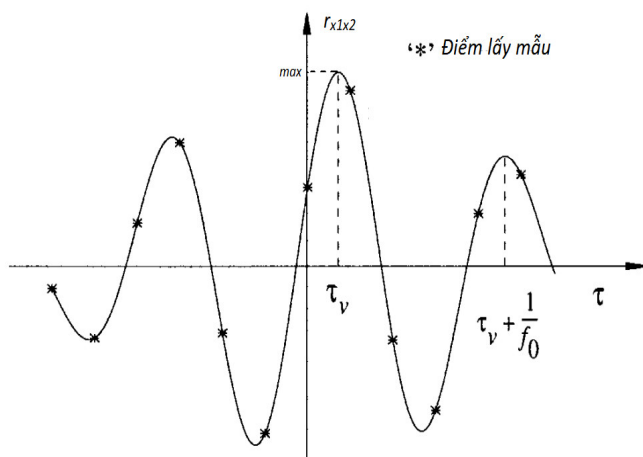
Có nhiều cách lựa chọn hàm trọng số  $\Phi(f)$  khác nhau, tương ứng với các phương pháp tính toán hiệu thời gian đến khác nhau như, tương quan chéo kinh điển (CCC - Classical Cross Correlation), biến đổi làm trơn tín hiệu (SCOT - Smoothed Coherence Transform), biến đổi pha (PHAT - Phase Transform).

Trong các phương pháp nêu trên thì GCC-PHAT là phương pháp có hiệu quả cao nhất, hoạt động hiệu quả và có độ chính xác cao [4, 6]. Trong phương pháp này hàm trọng số trong miền tần số được tính theo công thức [6]:

$$\Phi(f) = \frac{1}{|S_{x_i x_j}(f)|} = \frac{1}{|X_i(f) [X_j(f)]^*|} \tag{5}$$

Với hàm trọng số được tính toán theo công thức trên toàn bộ thành phần biên độ được loại bỏ, việc ước lượng hiệu thời gian đến phụ thuộc hoàn toàn vào pha của tín hiệu, khi đó công thức (4) có thể được biến đổi dưới dạng sau: F

$$\hat{\tau}_{ij} = \arg \max \left[ F^{-1} \left( \left[ \frac{X_i(f) [X_j(f)]^*}{|X_i(f) [X_j(f)]^*|} \right] \right) \right] \tag{6}$$



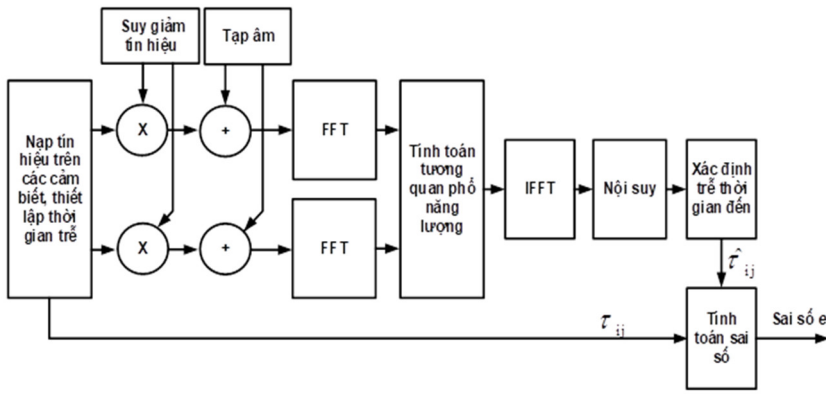
Hình 2. Sai số ước tính khác biệt thời gian tới do tần số lấy mẫu thấp

Khi ước tính khác biệt thời gian đến của tín hiệu thu được trên các cặp cảm biến theo công thức 6 đối với các hệ thống số, kết quả thu được sẽ là số nguyên lần của thời gian lấy mẫu, điều này gây ra sai số ước tính. Bên cạnh đó, do tần số lấy mẫu chưa đủ lớn, cực đại của hàm  $r_{x1x2}$  không trùng với điểm lấy mẫu như trên hình 2. Một trong những giải pháp nhằm loại bỏ sai số này là giảm thời gian giữa các lần lấy mẫu, hay chính là tăng tần số lấy mẫu, tuy nhiên giải pháp đó khiến tăng gánh nặng xử lý của hệ thống, làm chậm thời gian tính toán xử lý, giảm khả năng hoạt động theo thời gian thực của hệ thống. Để giải quyết vấn đề đó, bài báo đề xuất sử dụng giải pháp nội suy hàm  $r_{x1x2}$  qua đó nâng cao độ chính xác ước lượng khác biệt thời gian tới, loại bỏ ảnh hưởng tần số lấy mẫu nhỏ, đồng thời gánh nặng tính toán tăng thêm là không quá lớn, vẫn đảm bảo được khả năng hoạt động thời gian thực của hệ thống mà không cần thiết phải nâng cấp năng lực tính toán.

**3. NÂNG CAO ĐỘ CHÍNH XÁC ƯỚC LƯỢNG KHÁC BIỆT THỜI GIAN TỚI**

**3.1. Mô phỏng đánh giá độ chính xác quá trình ước tính khác biệt thời gian tới**

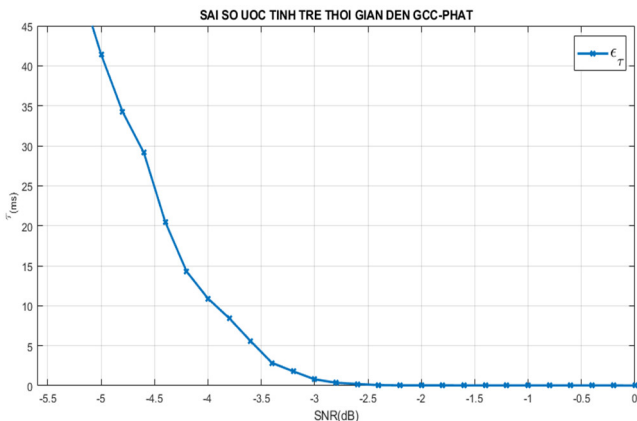
Để đánh giá hiệu quả của các giải pháp nâng cao độ chính xác ước tính khác biệt thời gian tới, một chương trình mô phỏng được thực hiện trên Matlab. Hình 3 thể hiện sơ đồ khối các bước thực hiện của chương trình mô phỏng.



Hình 3. Mô phỏng ước tính hiệu thời gian đến

Trước hết cần thiết lập tín hiệu gốc chứa sự kiện âm thanh, sự kiện âm thanh này có thể là tiếng nói, tiếng động cơ xe, tiếng nổ... là âm thanh mà hệ thống được định vị nguồn âm được xây dựng cần định vị. Từ tín hiệu gốc này xây dựng các tín hiệu âm thanh thu được trên cảm biến thứ  $i$  và  $j$ , trong đó khác biệt thời gian đến  $\tau_{ij}$  được thiết lập. Tín hiệu sau đó được bổ xung thành phần tập âm và hệ số suy giảm. Để ước tính hiệu thời gian đến của tín hiệu trên hai cảm biến trước hết cần biến đổi tín hiệu sang miền tần số bằng thuật toán FFT (Fast Fourier Transform), sau đó tính tương quan phổ năng lượng theo công thức (5). Biến đổi các giá trị thu được về miền thời gian theo thuật toán IFFT (Inverse Fast Fourier Transform), và xác định khác biệt thời gian đến  $\hat{\tau}_{ij}$  của hai tín hiệu theo công thức (6). Cuối cùng thực tính toán sai số khác biệt thời gian đến theo công thức:

$$\epsilon_{\tau} = \left\| \tau_{ij} - \hat{\tau}_{ij} \right\| \tag{7}$$



Hình 4. Sai số ước tính khác biệt thời gian đến

Tiến hành mô phỏng với SNR khác nhau nằm trong khoảng  $[-5,5 \div 0]$ dB, bước nhảy 0,2dB, với mỗi giá trị SNR (Signal to Noise Ratio) thực hiện 1000 mẫu thử, trong đó tín hiệu âm thanh được đưa vào mô phỏng là tiếng nổ đầu nòng của súng AK47 được lấy mẫu với tần số  $f = 8$ kHz, kết quả thu được sau đó được đưa vào đánh giá sai số. Kết quả trên hình 3 thể hiện sai số khác biệt thời gian đến trung bình trong các điều kiện SNR khác nhau. Có thể nhận thấy, sai số ước tính khác biệt thời gian đến tỉ lệ thuận với tỉ số SNR, khi SNR > -2,5dB cao sai số ước tính khác biệt thời gian tới  $\epsilon_{\tau}$  tương đối

nhỏ, tuy nhiên khi SNR < -2,5dB sai số ước tính khác biệt thời gian tới  $\epsilon_{\tau}$  tăng nhanh. Khi sai số ước tính khác biệt thời gian tới tăng tương ứng với các hệ số của hệ phương trình tính toán vị trí nguồn âm theo phương pháp TDOA có sai số tăng, điều này dẫn tới khó khăn trong việc tính toán vị trí nguồn âm. Nguồn âm được tính toán được có sai số định vị cao, hoặc thậm chí có thể khiến hệ phương trình vô nghiệm không tìm được vị trí nguồn âm thanh.

Do đó, bài toán nâng cao độ chính xác ước tính khác biệt thời gian tới sử dụng các giải pháp nội suy được đặt ra nhằm thiện độ chính xác so với trường hợp sử dụng thuật toán GCC-PHAT truyền thống.

### 3.2. Ứng dụng kỹ thuật nội suy nâng cao chất lượng ước lượng khác biệt thời gian tới

Nội suy là các kỹ thuật quan trọng trong xử lý dữ liệu và tín hiệu, cho phép ước tính giá trị các điểm dữ liệu chưa biết trong phạm vi một tập hợp rời rạc chứa các điểm dữ liệu đã biết. Có nhiều giải pháp kỹ thuật khác nhau để thực hiện nội suy tín hiệu, trong đó có các phương pháp cơ bản như là nội suy tuyến tính, nội suy đa thức và nội suy spline.

Nội suy tuyến tính giả định rằng giữa hai điểm dữ liệu đã biết, hàm số thay đổi tuyến tính. Để xấp xỉ giá trị tại điểm cần nội suy, phương pháp này sử dụng đoạn đường thẳng nối hai điểm đã biết gần nhất theo công thức [5]:

$$y = y_0 + \frac{(x - x_0).(y - y_0)}{x_1 - x_0} \tag{8}$$

Trong đó:

$(x,y)$  là vị trí và giá trị tương ứng tại điểm cần nội suy  $(x_0,y_0)$  và  $(x_1,y_1)$  là vị trí và giá trị tại các điểm lân cận.

Phương pháp này có ưu điểm đơn giản, dễ thực hiện, thích hợp cho dữ liệu có sự biến đổi tuyến tính đơn giản. Tuy nhiên đối với các tín hiệu phức tạp như hàm  $r_{x1x2}$  phương pháp nội suy tuyến tính có thể tạo ra sai số lớn, do hàm  $r_{x1x2}$  không tuân theo giả định tuyến tính, do đó cần sử dụng các phương pháp nội suy hiện đại hơn như nội suy đa thức (Polynomial Interpolation) hay nội suy spline.

Nội suy đa thức là một kỹ thuật xử lý tín hiệu mạnh mẽ, được sử dụng để ước tính giá trị một hàm chưa biết bằng một đa thức tạo nên từ các điểm dữ liệu đã được xác định. Phương pháp nội suy đa thức giả định rằng có một đa thức bậc  $n$  (với  $n$  là số điểm dữ liệu đã biết) có thể đi qua tất cả các điểm dữ liệu đã biết. Điều này có nghĩa là chúng ta có thể xây dựng một đa thức bậc  $n$  mà đảm bảo giá trị tại các điểm đã biết là chính xác. Sau đó, chúng ta có thể sử dụng đa thức này để tính toán giá trị tại các điểm cần nội suy. Phương pháp nội suy đa thức có khả năng xấp xỉ rất chính xác đối với các dữ liệu đã biết. Nó là một phương pháp đa năng có thể được áp dụng trong nhiều tình huống khác nhau.

Một trong những hạn chế chính của phương pháp nội suy đa thức là hiện tượng nổi sóng (Runge's phenomenon),

khi các đa thức bậc cao có thể tạo ra sự biến đổi không mong muốn ở các vùng giữa các điểm dữ liệu đã biết, gây ra sự không ổn định trong việc ước tính. Ngoài ra, nội suy đa thức cũng có thể dẫn đến tình trạng quá khớp (Overfitting), khi đa thức bậc cao có thể đi qua tất cả các điểm dữ liệu đã biết một cách quá khớp, khiến cho việc ước tính không chính xác ở các điểm không có dữ liệu. Việc lựa chọn bậc đa thức cần phải cân nhắc cẩn thận. Bậc đa thức thấp có thể không đủ mô hình hóa sự biến đổi, trong khi bậc đa thức cao có thể dẫn đến các vấn đề như đã đề cập ở trên. Thông thường, việc lựa chọn bậc đa thức phải dựa vào tính chất của dữ liệu và mục tiêu ứng dụng cụ thể.

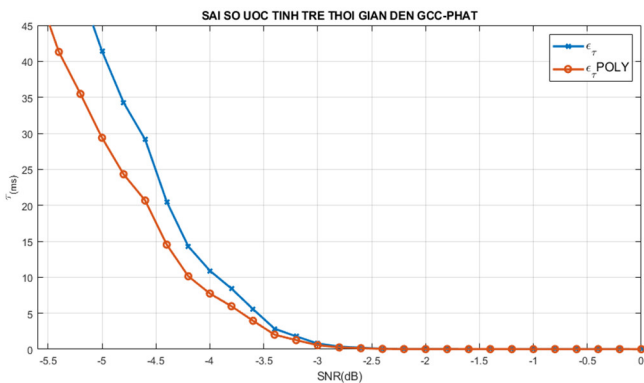
Có thể tính toán giá trị xấp xỉ tại điểm cần nội suy bằng cách tích hợp tất cả các giá trị y đã biết và hàm Lagrange tương ứng theo công thức dưới đây [5]:

$$P(x) = \sum_{i=0}^n y_i L_i(x) \tag{9}$$

Trong đó:  $P(x)$  là đa thức tại điểm  $x$  cần nội suy  
 $n$  là số điểm dữ liệu đã biết  
 $y_i$  là giá trị dữ liệu tại điểm đã biết  $x_i$

$L_i(x)$  là hàm Lagrange thứ  $i$  và được tính bằng công thức

$$L_i(x) = \prod_{j=0, j \neq i}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \tag{10}$$



Hình 5. Sai số ước tính khác biệt thời gian đến sử dụng nội suy đa thức

Trên hình 5 thể hiện sai số ước tính khác biệt thời gian đến khi sử dụng phương pháp nội suy đa thức so sánh với phương pháp GCC-PHAT nguyên bản, trong đó hệ số nội suy bằng 4, có thể nhận thấy sai số ước tính khác biệt thời gian đến của phương pháp nội suy đa thức đã được cải thiện so với phương pháp nguyên bản. Tuy nhiên, sử dụng một đa thức sẽ không thể hiện hết được các tính chất của hàm số cần nội suy, bên cạnh đó việc sử dụng đa thức Lagrange có thể dẫn đến hiện tượng nổi sóng, hoặc quá khớp. Do đó, có thể sử dụng phương pháp nội suy spline để khắc phục những yếu điểm trên.

So sánh với nội suy đa thức, nội suy spline có nhiều ưu điểm, phương pháp này chia dữ liệu thành các đoạn nhỏ và xây dựng các đa thức bậc thấp trên mỗi đoạn. Những đa thức này được gọi là spline đoạn, và chúng được thiết kế để tạo ra một đường cong mượt mà và liền mạch qua tất cả các điểm dữ liệu đã biết. Điều này tạo ra một xấp xỉ chính xác

hơn và mượt mà hơn so với các phương pháp như nội suy tuyến tính, hay nội suy đa thức. Nội suy spline thường dùng các đa thức bậc 3 để xây dựng đoạn nối giữa các điểm dữ liệu theo công thức sau [5]:

$$S_i(x) = a_i + b_i.(x - x_i) + c_i.(x - x_i)^2 + d_i.(x - x_i)^3 \tag{11}$$

Trong đó:

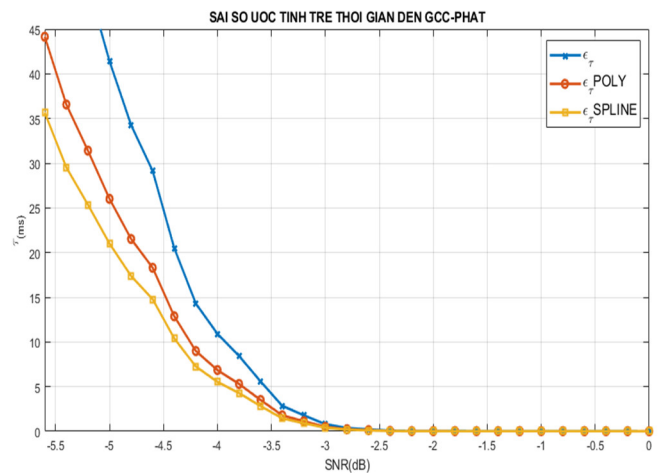
$S_i(x)$  là đa thức spline tại đoạn thứ  $i$

$x_i$  là vị trí điểm dữ liệu cần nội suy

$a_i, b_i, c_i, d_i$  là các hệ số đa thức cần tìm trong đoạn thứ  $i$

Trên hình 6 thể hiện sai số ước tính khác biệt thời gian đến so sánh giữa phương pháp GCC-PHAT nguyên bản và hai phương pháp nội suy, nội suy đa thức và nội suy spline. Trong 03 phương pháp kể trên, nội suy spline có sai số ước tính nhỏ nhất, cải thiện rõ rệt so với phương pháp nguyên bản và nội suy đa thức.

Dựa trên kết quả này có thể đánh giá được hiệu quả của giải pháp được đề xuất sử dụng kỹ thuật nội suy để nâng cao độ chính xác ước tính khác biệt thời gian đến, là cơ sở cho việc sử dụng phương pháp này trên các dữ liệu thu được trong môi trường thực tế.



Hình 6. Sai số ước tính khác biệt thời gian đến sử dụng nội suy spline

### 3.3. Một số kết quả thực nghiệm của giải pháp

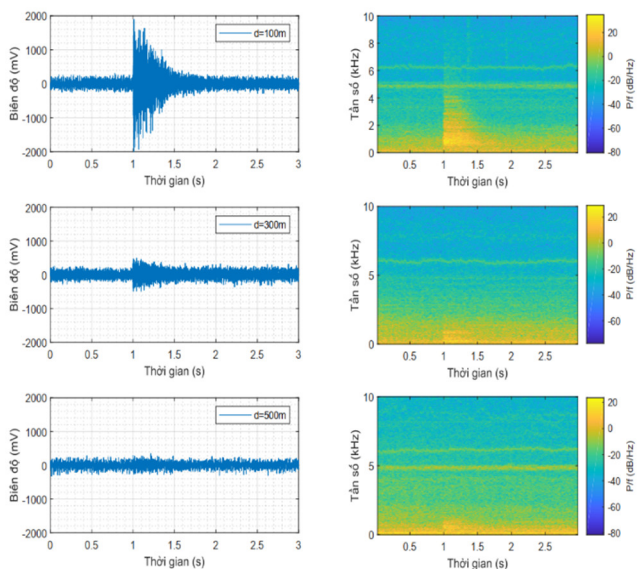
Để đánh giá hiệu quả của của giải pháp được đề xuất, một hệ 08 cảm biến âm thanh INMP401 của hãng InvenSense được sử dụng để thu nhận tín hiệu âm thanh trong môi trường thực tế, đây là loại cảm biến âm thanh sử dụng công nghệ vi cơ điện tử (Micro-Electro-Mechanical Systems - MEMS) có độ nhạy cao, kích thước nhỏ gọn. Những cảm biến này được bố trí bố trí trên hai hình hình tứ diện đều lồng nhau có độ dài cạnh 1m như trên hình 7, việc bố trí các cảm biến nằm trên tứ diện đều giúp tín hiệu thu được đồng đều trên các hướng tới [3].

Nguồn âm thanh cần định vị được tạo giả thông qua một loa nén công suất 30W, trong đó âm thanh cần định vị là tiếng nổ đầu nòng của súng AK47. Khoảng cách từ nguồn phát tới cụm cảm biến sẽ được thay đổi trong quá trình thử nghiệm. Tín hiệu âm thanh sẽ được 08 cảm biến thu lại và lưu trữ đồng thời với tần số lấy mẫu  $f_s = 8\text{kHz}$ , đây là tín hiệu đầu vào, sẵn sàng cho các bước xử lý tín hiệu tiếp theo.



Hình 7. Cụm cảm biến thu tín hiệu âm thanh

Hình 8 thể hiện hình dạng tín hiệu giảm đồ tần số/thời gian của tín hiệu thu được trên các cảm biến ở các cự ly khác nhau. Có thể nhận thấy ảnh hưởng cự ly lên tín hiệu thu được tương đối rõ ràng, tại cự ly nhỏ hơn 300m hình ảnh tín hiệu là tương đối rõ ràng và phân biệt với nền, mức độ năng lượng tương ứng với tần số âm thanh có thể nhận thấy tương đối rõ. Tuy nhiên khi cự ly lớn hơn 300m việc phân biệt tín hiệu và tạp âm tương đối khó khăn, phổ năng lượng tín hiệu cũng bị hòa lẫn vào năng lượng của tạp âm. Điều này tương ứng với khi cự ly định vị tăng tỉ số SNR của tín hiệu thu được trên các cảm biến suy giảm.



Hình 8. Tín hiệu âm thanh thu được tại các cự ly khác nhau

Kết quả ước tính khác biệt thời gian đến trên bộ dữ liệu thu được giữa các cảm biến (từ  $\tau_{12}$  đến  $\tau_{18}$ ) trong điều kiện thực tế so sánh giữa phương pháp GCC-PHAT nguyên bản và các kỹ thuật nội suy đa thức và nội suy spline được thể hiện trên các bảng 1 và 2 tương ứng với các cự ly định vị 100m và 500m.

Bảng 1. Sai số hiệu thời gian đến tại cự ly 100m

$\epsilon_r$ (ms)	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$
GCC-PHAT (ms)	0,053	0,055	0,051	0,053	0,056	0,058	0,056
Nội suy đa thức (ms)	0,047	0,041	0,042	0,044	0,047	0,046	0,048
Nội suy spline (ms)	0,038	0,039	0,037	0,034	0,041	0,035	0,040

Có thể nhận thấy việc sử dụng thuật toán nội suy cho phép nâng cao độ chính xác ước tính hiệu thời gian đến trung bình tại so với thuật toán GCC-PHAT truyền thống, đặc biệt khi cự ly tới nguồn âm xa điều này càng được thể hiện rõ ràng hơn.

Bảng 2. Sai số hiệu thời gian đến tại cự ly 500m

$\epsilon_r$ (ms)	$\tau_{12}$	$\tau_{13}$	$\tau_{14}$	$\tau_{15}$	$\tau_{16}$	$\tau_{17}$	$\tau_{18}$
GCC-PHAT (ms)	1,526	1,438	1,481	1,541	1,45	1,585	1,471
Nội suy đa thức (ms)	0,424	0,422	0,416	0,428	0,424	0,421	0,427
Nội suy spline (ms)	0,318	0,333	0,308	0,319	0,311	0,301	0,312

So sánh với giải pháp sử dụng nội suy đa thức, nội suy spline cho độ chính xác cao hơn, có được điều này là do việc chia nhỏ các vùng dữ liệu để nội suy, mà không sử dụng một hà số trong toàn bộ dữ liệu, từ đó giảm ảnh hưởng của các hiện tượng nhiễu sóng và quá khớp.

#### 4. KẾT LUẬN

Bằng cách phân tích cơ sở lý thuyết và mô phỏng trên Matlab, kết hợp với dữ liệu thu thập được trong điều kiện thực tế đã cho thấy hiệu quả của giải pháp nội suy hàm số  $r_{x \times 2}$  trong việc nâng cao độ chính xác ước lượng khác biệt thời gian tới tại các cặp cảm biến, qua đó nâng cao độ chính xác định vị nguồn âm sử dụng nguyên lý TDOA. Kết quả mô phỏng cũng cho thấy giải pháp nội suy spline có hiệu quả cao hơn nội suy đa thức, đây là một giải pháp mang lại hiệu quả cao trong các bài toán ước tính khác biệt thời gian tới. Giải pháp đề xuất có làm độ phức tạp tính toán tăng lên tuy nhiên số lượng phép tính tăng thêm là không đáng kể khi so sánh với việc nâng cao tần số lấy mẫu tín hiệu, qua đó vẫn đảm bảo được tính thời gian thực của hệ thống.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tran Cong Thin, Bui Ngoc My, Nguyen Huy Hoang, Pham Van Hoa, 2021. *Improving quality of time delay estimation in sound source localization using TDOA method*. Journal of Military Science and Technology, Special issue, November.
- [2]. A. Cabasson, O. Meste, 2008. *Time Delay Estimation: A New Insight Into the Woody's Method*. in IEEE Signal Processing Letters, vol. 15, pp. 573-576, doi: 10.1109/LSP.2008.2001558.
- [3]. Antonio Canclini, 2015. *A robust and low-complexity source localization algorithm for asynchronous distributed microphone networks*. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech and Language Processing (TASLP), Vol. 23, No.10, pp. 1563–1575.
- [4]. Yiteng Huang, Jacob Benesty, Jingdong Chen, 2008. *Time Delay Estimation and Source Localization*. Springer Handbook of Speech Processing, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1043-1063.
- [5]. Hoffman Joe D, Steven Frankel, 2018. *Numerical Methods for Engineers and Scientists*. CRC Press.
- [6]. C. Knapp, G. Carter, 1976. *The generalized correlation method for estimation of time delay*. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 24, No.4, pp. 320–327.

#### AUTHOR INFORMATION

**Tran Cong Thin**

Institute of Electronics, Academy of Military Science and Technology, Vietnam