

MỘT GIẢI PHÁP NÂNG CAO HIỆU NĂNG HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ DỰA TRÊN DỮ LIỆU RSS VỚI SỰ HỖ TRỢ CỦA BỀ MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH

A SOLUTION FOR ENHANCING THE PERFORMANCE OF RSS-BASED RIS-ASSISTED INDOOR POSITIONING SYSTEMS

Nguyễn Đức Khôi¹, Nguyễn Lê Cường²,
Phan Thị Cẩm Trang³, Hoàng Mạnh Kha^{1,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.150>

TÓM TẮT

Bề mặt phản xạ thông minh (RIS) với khả năng định hình lại tín hiệu vô tuyến có tiềm năng ứng dụng để nâng cao hiệu năng cho hệ thống định vị trong nhà. Các công trình về định vị trong nhà gần đây đã tập trung đề xuất các giải pháp tối ưu hóa cấu hình pha của RIS nhằm hỗ trợ quá trình định vị, kết quả nhiều công trình đã chứng minh độ chính xác định vị đạt được ở mức decimet trong môi trường trong nhà. Bài báo này đề xuất một cơ chế tự hiệu chỉnh tham số trong quá trình tối ưu hóa cấu hình pha của RIS nhằm cải thiện độ chính xác định vị. Kết quả mô phỏng cho thấy giải pháp đề xuất đạt độ chính xác định vị cao hơn so với công trình nghiên cứu gần đây trong hầu hết các kịch bản với thời gian tính toán tăng nhẹ.

Từ khóa: Bề mặt phản xạ thông minh (RIS), định vị trong nhà, tối ưu hóa pha, tự hiệu chỉnh tham số.

ABSTRACT

Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS), with their capability to reconfigure radio signals, have shown great potential for enhancing the performance of indoor positioning systems. Recent studies on indoor positioning have primarily focused on proposing RIS phase optimization schemes to support the positioning process, and the results of many studies have demonstrated decimeter-level localization accuracy in indoor environments. This paper proposes an adaptive mechanism during the RIS phase optimization process to enhance localization accuracy. Simulation results demonstrate that the proposed approach achieves superior localization accuracy compared with recent studies in most scenarios, while incurring a slight increase in computational time.

Keywords: Reconfigurable Intelligent Surfaces, indoor positioning, phase shift optimization, parameter auto-tuning.

¹Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Trường Đại học Điện lực

³Trường Đại học Xây dựng Hà Nội

*Email: khahoang@hauai.edu.vn

Ngày nhận bài: 15/3/2026

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 15/6/2026

Ngày chấp nhận đăng: 29/6/2026

1. GIỚI THIỆU

Định vị trong nhà đang đóng vai trò ngày càng quan trọng trong nhiều ứng dụng hiện đại, từ chỉ đường trong sân bay, trung tâm thương mại, bệnh viện đến các hệ thống Internet vạn vật (IoT) công nghiệp, robot tự hành

và các dịch vụ dựa trên vị trí trong các tòa nhà thông minh [1-3]. Mặc dù hệ thống định vị vệ tinh (GPS) hoạt động hiệu quả ngoài trời, tín hiệu GPS bị suy hao mạnh khi xuyên qua tường và mái che, dẫn đến hiệu quả định vị thấp trong môi trường trong nhà. Vì vậy, các giải pháp

định vị trong nhà sử dụng các tín hiệu vô tuyến sẵn có như Wi-Fi, Bluetooth, sóng siêu âm, tín hiệu băng siêu rộng,... trong đó kỹ thuật chỉ thị cường độ tín hiệu nhận được (RSS) được sử dụng phổ biến vì chi phí thấp [2, 3].

Các phương pháp định vị trong nhà truyền thống thường tiếp cận theo ba hướng: (i) Kỹ thuật dấu vân tay, trong đó một bản đồ RSS hoặc thông tin trạng thái kênh (CSI) được xây dựng ngoại tuyến tại các vị trí tham chiếu, sau đó vị trí trực tuyến được ước lượng bằng cách so khớp tín hiệu đo được với cơ sở dữ liệu thông qua các mô hình học máy [1-4]; (ii) Phương pháp tam biên/tam giác dựa trên các thông số như thời gian đến (ToA), sai lệch thời gian đến (TDoA), góc đến (AoA),... đạt độ chính xác cao trong điều kiện có đường truyền thẳng nhưng cần đồng bộ thời gian chính xác và bị ảnh hưởng nặng bởi đa đường [1-4]; và (iii) Giải pháp kết hợp thông tin di chuyển của đối tượng với các phép đo RSS/CSI để cải thiện phân phối xác suất hậu nghiệm trên không gian định vị [5, 6]. Mặc dù các phương pháp này đã đạt được nhiều thành tựu, độ chính xác trong môi trường thực tế vẫn bị giới hạn bởi fading đa đường và nhiễu.

Gần đây, sự xuất hiện của bề mặt phản xạ thông minh (RIS) đã mở ra một hướng tiếp cận mới cho bài toán định vị trong nhà. Khác với các giải pháp truyền thống chỉ tận dụng môi trường truyền sóng có sẵn, RIS cho phép định hình lại môi trường thông qua việc điều chỉnh pha của các phần tử phản xạ trên bề mặt của nó. Đặc tính này khiến RIS trở thành một công nghệ quan trọng cho các hệ thống truyền thông và cảm biến thế hệ tiếp theo [7, 8]. Đối với bài toán định vị, RIS cung cấp hai lợi thế quan trọng: (i) tăng đáng kể tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) tại vị trí người dùng, qua đó giảm phương sai của các phép đo RSS; (ii) tạo ra các bản đồ vô tuyến (radio map) đa dạng dưới các cấu hình RIS khác nhau, cung cấp lượng thông tin lớn hơn cho bài toán định vị so với phép đo RSS đơn lẻ trong môi trường không có RIS.

Một số công trình đã ứng dụng RIS cho bài toán định vị trong nhà. Công trình [9] đã đánh giá toàn diện về định vị có sự hỗ trợ của RIS, làm rõ các cơ hội và thách thức khi ứng dụng RIS trong định vị. Một giải pháp khác khai thác mạng nơ-ron sâu để học ánh xạ từ tổ hợp thông tin gồm tín hiệu nhận và hệ số phản xạ của RIS tới vị trí, sau đó sử dụng thuật toán tối ưu bầy đàn để nâng cao độ chính xác định vị [10]. Công trình [11] trình bày giải pháp sử dụng RIS để tối đa hóa độ phân giải không gian, qua đó tăng độ chính xác định vị cho bài toán định vị thụ động Wi-Fi một người dùng và mở rộng cho đa người dùng. Tác giả của MetaLoc [12] đã đề xuất giải pháp nâng cao độ chính

xác định vị dựa trên lý thuyết xác suất để kết hợp suy luận Bayes với tối ưu hóa cấu hình pha của RIS.

MetaLoc đề xuất một giao thức định vị Bayes hai pha trong đó điểm truy cập (AP) và RIS phối hợp đo RSS qua nhiều chu kỳ để dần thu hẹp phân phối xác suất hậu nghiệm tại các khối ứng viên (khối chứa đối tượng cần định vị) trong không gian định vị. Tại mỗi chu kỳ, bài toán tối ưu cấu hình pha của RIS được thực hiện bằng giải thuật tối ưu độ dịch pha (PSO) rời rạc nhằm giảm thiểu kỳ vọng sai số định vị dưới xác suất hậu nghiệm hiện tại. Để giảm độ phức tạp tính toán của PSO khi số khối N lớn, các tác giả đã đề xuất một cơ chế tăng tốc, theo đó hàm tổn thất chỉ được đánh giá trên N_{max} khối có xác suất hậu nghiệm cao nhất với $N_{max} = 5$ cố định. Kết quả trong [12] cho thấy, MetaLoc đạt sai số định vị mức decimet ngay cả khi có sự hiện diện của nhiễu khá lớn, vượt trội so với các giải pháp không dùng RIS.

Tuy nhiên, MetaLoc còn một số hạn chế chưa được giải quyết: (i) tham số tăng tốc N_{max} cố định trong toàn bộ quá trình tinh chỉnh. Điều này không tối ưu vì ở các chu kỳ đầu, xác suất hậu nghiệm chưa tập trung, việc chỉ chọn cố định số khối có xác suất cao nhất có thể bỏ lỡ khối thực, trong khi ở các chu kỳ cuối, xác suất hậu nghiệm đã rất tập trung và việc duy trì số khối lớn như ở những chu kỳ đầu là không cần thiết; và (ii) số chu kỳ tinh chỉnh K được đặt cố định ngay cả khi xác suất hậu nghiệm đã hội tụ sớm hơn. Trong nhiều tình huống, khối MAP đã ổn định từ chu kỳ thứ hai hoặc thứ ba; các chu kỳ tiếp theo không cải thiện độ chính xác mà chỉ kéo dài thời gian đo và thời gian tính toán.

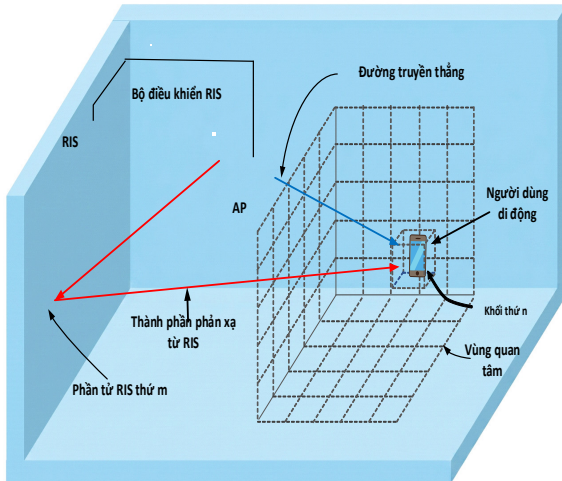
Bài báo này đề xuất giải pháp AdaMetaLoc, một cải tiến của MetaLoc nhằm khắc phục hai hạn chế nêu trên bằng cách: (1) đề xuất giải pháp tự hiệu chỉnh tham số cho $N_{max}(k)$ dựa trên entropy chuẩn hóa của xác suất hậu nghiệm tại chu kỳ thứ k ; (2) đề xuất tiêu chí dừng sớm dựa trên tính ổn định của khối MAP, dừng pha định vị tinh khi khối có argmax của xác suất hậu nghiệm không thay đổi trong S_{stable} chu kỳ liên tiếp. Bài báo cũng đánh giá toàn diện giải pháp đề xuất qua mô phỏng trên ba không gian định vị có độ lớn khác nhau ($N = 125$, $N = 1000$, $N = 3375$), phân tích tính ổn định của giải pháp theo độ lớn của nhiễu.

2. HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ TRONG NHÀ CÓ SỰ HỖ TRỢ CỦA RIS

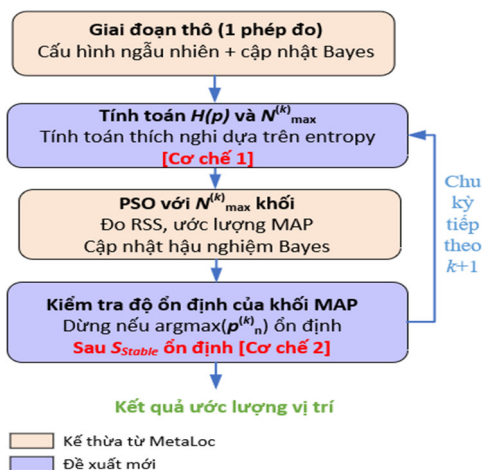
2.1. Mô hình hệ thống và giải pháp đề xuất

Xét một hệ thống định vị trong nhà gồm một AP, một bề mặt RIS có M phần tử phản xạ rời rạc, và một vùng chứa

người dùng cần xác định vị trí (Space of Interest - SOI) như hình 1. SOI được chia thành N khối lập phương kích thước nhỏ; mục tiêu là xác định khối chứa thiết bị cần định vị. AP truyền tín hiệu pilot, người dùng đo RSS, và RIS được điều khiển để tối ưu hóa thông tin hỗ trợ định vị trong các phép đo.



Mô hình hệ thống



Giải pháp đề xuất (AdaMetaLoc)

Hình 1. Mô hình hệ thống và giải pháp đề xuất AdaMetaLoc

Mỗi phần tử của RIS có thể được cấu hình tới C trạng thái pha rời rạc, ký hiệu $c_m \in \{1, \dots, C\}$ cho phần tử thứ m . Vector cấu hình $\mathbf{c} = (c_1, \dots, c_M)$ xác định hệ số phản xạ phức của RIS, qua đó xác định kênh tổng hợp giữa AP và mỗi điểm trong SOI. RSS trung bình tại khối thứ n dưới cấu hình $\mathbf{c}$, ký hiệu $\mu_n(\mathbf{c})$, được tính từ kênh truyền theo (3) của [12]. Thực tế, RSS đo được $s_n(\mathbf{c}) = \mu_n(\mathbf{c}) + \varepsilon$, với ε là nhiễu có độ lệch chuẩn σ (dB).

Để người đọc tiện theo dõi, chúng tôi giới thiệu tóm tắt về giao thức MetaLoc làm nền tảng cho đề xuất của bài báo. MetaLoc sử dụng cơ chế suy luận Bayes hai pha

trong đó vị trí người dùng được mô hình hóa như một biến ngẫu nhiên rời rạc trên N khối và phân phối xác suất hậu nghiệm trên không gian này được cập nhật lặp lại sau mỗi phép đo RSS.

Pha 1 (pha định vị thô): Có nhiệm vụ khởi tạo xác suất tiên nghiệm từ một phân phối đều. Cụ thể, AP áp dụng một cấu hình pha $\mathbf{c}_0$ được lựa chọn ngẫu nhiên, người dùng đo RSS một lần và gửi thông tin về AP. AP cập nhật xác suất hậu nghiệm từ xác suất tiên nghiệm phân bố đều bằng quy tắc Bayes. Pha này có chi phí tính toán rất thấp nhưng kết quả thu được là một xác suất hậu nghiệm còn chưa tập trung.

Pha 2 (pha định vị tinh): Thực hiện K chu kỳ tinh chỉnh để giảm sai số định vị. Tại mỗi chu kỳ $k = 1, 2, \dots, K$, AP giải bài toán tối ưu cấu hình pha:

$$\mathbf{c}_k^* = \underset{\mathbf{c}}{\operatorname{argmin}} I_a(\mathbf{c}) \quad (1)$$

trong đó, $I_a(\mathbf{c})$ là hàm tổn thất xấp xỉ kỳ vọng sai số định vị theo công thức (16) trong [12], phản ánh hiệu quả của cấu hình $\mathbf{c}$ trong việc phân biệt các khối có xác suất hậu nghiệm cao. Sau khi xác định $\mathbf{c}_k^*$, AP áp dụng cấu hình này, người dùng đo RSS được giá trị s_k và AP cập nhật xác suất hậu nghiệm theo quy tắc Bayes:

$$p_n^k \propto p_n^{k-1} N(s_k; \mu_n(\mathbf{c}_k^*); \sigma^2), \forall n = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Sau K chu kỳ, ước lượng cuối cùng được xác định theo quy tắc MAP: $\hat{n} = \operatorname{argmax}_n p_n^{(K)}$. Bài toán tối ưu (1) được

MetaLoc giải bằng giải thuật PSO (Phase Shift Optimization) rời rạc gồm hai thành phần: Thành phần thứ nhất là LMVS (Local Minimum Vector Search), một thuật toán tìm kiếm cục bộ, tại mỗi bước duyệt $2M$ cấu hình lân cận (mỗi phần tử RIS được dịch ± 1 trạng thái pha) và chọn cấu hình có I_a thấp nhất, lặp lại đến khi không cải thiện thêm. Thành phần thứ hai là tìm kiếm toàn cục dựa trên phương pháp giảm dốc cục đại từ một tập các điểm cực tiểu cục bộ.

Giải pháp đề xuất AdaMetaLoc có hai khối thể hiện cải tiến của bài báo này so với MetaLoc. Cụ thể, sau pha định vị thô, AdaMetaLoc thực hiện hai bước tự hiệu chỉnh tham số tại mỗi chu kỳ k : (i) Cơ chế 1: tính entropy chuẩn hóa của xác suất hậu nghiệm và xác định $N_{\max}^{(k)}$ thích nghi; (ii) Cơ chế 2: kiểm tra tính ổn định của khối sử dụng MAP sau PSO để quyết định có dừng sớm hay không.

2.2. Cơ chế 1: Tự động hiệu chỉnh $N_{\max}$ thích nghi theo entropy

Trong MetaLoc, $N_{\max}$ được đặt cố định, lựa chọn này đại diện cho một sự đánh đổi giữa tốc độ thực thi và độ

chính xác định vị: nếu N_{max} quá nhỏ, N_{max} khối có xác suất hậu nghiệm lớn nhất có thể không chứa khối thực ở các chu kỳ đầu; nếu N_{max} quá lớn, mỗi chu kỳ định vị tính tốn chi phí tính toán hơn (chi phí bậc hai theo N_{max}) nên PSO chậm hơn.

Bài báo này đề xuất cơ chế tự động hiệu chỉnh tham số N_{max} cho mỗi chu kỳ: chu kỳ 1 cần N_{max} lớn để đảm bảo tính vững khi xác suất hậu nghiệm chưa tập trung, trong khi ở các chu kỳ tiếp theo có thể chỉ cần N_{max} nhỏ vì xác suất hậu nghiệm đã tập trung. Qua đó N_{max} thích nghi với mức độ tập trung của xác suất hậu nghiệm thông qua entropy chuẩn hóa. Entropy chuẩn hóa của xác suất hậu nghiệm tại chu kỳ k được tính như (3):

$$\tilde{H}(p^{(k)}) = \frac{-\sum_n p_n^{(k)} \log p_n^{(k)}}{\log N} \in [0, 1] \quad (3)$$

Từ (3) ta thấy $\tilde{H} \approx 1$ khi xác suất hậu nghiệm là phân phối đều; $\tilde{H} \rightarrow 0$ khi xác suất hậu nghiệm tập trung vào một khối. Giá trị thích nghi $N_{max}^{(k)}$ được xác định như sau:

$$N_{max}^{(k)} = \min \left(\max \left(\left\lceil c_{ent} \exp(\tilde{H}(p^{(k-1)} \log N) \right\rceil, N_{min} \right), N_{max, cap} \right) \quad (4)$$

với c_{ent} là hằng số tỉ lệ, N_{min} và $N_{max, cap}$ lần lượt là các giá trị giới hạn dưới và trên. Công thức (4) thể hiện rằng: khi $\tilde{H} \approx 1$, $\exp(\tilde{H} \log N) \rightarrow N$, áp dụng (4) ta có $N_{max}^{(k)} = N_{max, cap}$; khi $\tilde{H} \rightarrow 0$, $\exp(\tilde{H} \log N) \rightarrow 1$, và $N_{max}^{(k)} \rightarrow N_{min}$. Do đó, N_{max} giảm tự động khi xác suất hậu nghiệm tập trung.

2.3. Cơ chế 2: Dừng sớm dựa trên tính ổn định của khối MAP

MetaLoc áp dụng cố định K chu kỳ tính chỉnh. Trong nhiều tình huống, xác suất hậu nghiệm đã hội tụ vào một khối duy nhất từ chu kỳ thứ 2 hoặc thứ 3, khi đó các chu kỳ tiếp theo chỉ dẫn đến tăng thời gian tính toán mà không tăng độ chính xác. Để khắc phục, bài báo này đề xuất một tiêu chí dừng sớm dựa trên tính ổn định của khối MAP. Định nghĩa khối MAP tại chu kỳ k :

$$\hat{n}^{(k)} = \operatorname{argmax}_n p_n^{(k)} \quad (5)$$

Tiêu chí dừng: nếu $\hat{n}^{(k)} = \hat{n}^{(k-1)} = \dots = \hat{n}^{(k-S_{stable})}$ trong $(S_{stable} + 1)$ chu kỳ liên tiếp thì khối MAP đã ổn định, khi đó kết thúc pha định vị tinh và $\hat{n}^{(k)}$ là ước lượng cuối cùng. Tham số S_{stable} kiểm soát sự đánh đổi giữa tốc độ và độ chính xác định vị: S_{stable} nhỏ cho dừng sớm hơn nhưng có nguy cơ dừng nhầm khi xác suất hậu nghiệm chưa thực sự hội tụ, ngược lại S_{stable} lớn cho độ chính xác cao hơn nhưng thời gian tính toán lớn hơn.

2.4. Giải pháp AdaMetaLoc

Giải pháp AdaMetaLoc tích hợp hai cơ chế trên để cải tiến giải pháp của MetaLoc. Quá trình bắt đầu bằng pha định vị thô: AP áp dụng một cấu hình ngẫu nhiên, người dùng đo RSS một lần, AP cập nhật xác suất hậu nghiệm từ xác suất tiên nghiệm phân bố đều. Sau đó, vòng lặp định vị tinh tối đa K_{cap} chu kỳ thực hiện: (1) tính entropy của xác suất hậu nghiệm hiện tại, xác định $N_{max}^{(k)}$ theo công thức (4); (2) chạy PSO trên $N_{max}^{(k)}$ khối có xác suất hậu nghiệm lớn nhất; (3) áp dụng cấu hình tối ưu, đo RSS, cập nhật xác suất hậu nghiệm bằng Bayes; (4) kiểm tra tiêu chí dừng MAP, nếu thỏa mãn thì kết thúc, ngược lại tiếp tục.

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

3.1. Tham số mô phỏng

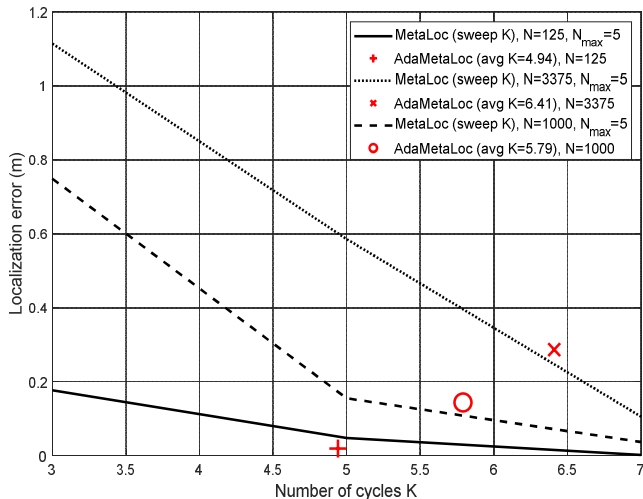
Để đánh giá toàn diện AdaMetaLoc so với MetaLoc, bài báo này sử dụng các tham số mô phỏng được lấy theo MetaLoc [12] để đảm bảo so sánh công bằng, chi tiết như thông tin trong bảng 1. Kết quả được lấy trung bình trên 100 phiên Monte Carlo ($N_{MC} = 100$).

Bảng 1. Tham số mô phỏng chính

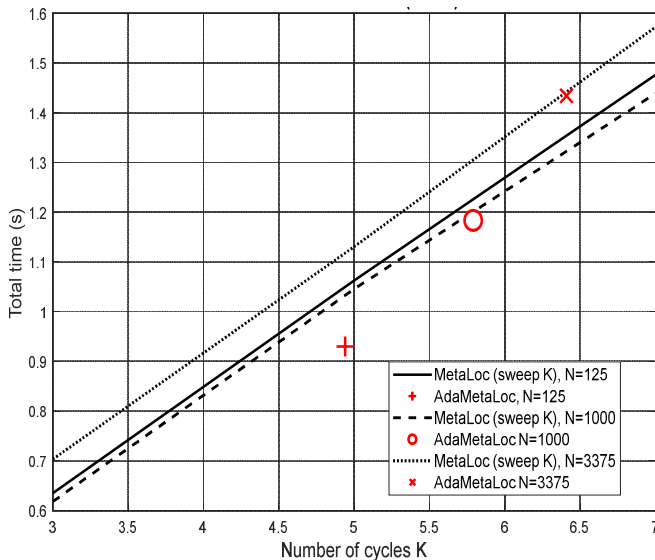
Tham số	Mô tả	Giá trị
f_c	Tần số sóng mang	2,4GHz
S_t	Công suất phát AP	30dBm
M	Số phần tử RIS	64
C	Số trạng thái pha	4
σ	Shadowing std	2 - 6dB
d	Khoảng cách AP-SOI	1,5m
N	Số khối trong SOI	125; 1000; 3375
Z_b, Z_u	Tham số PSO	2; 5
N_{max} (baseline)	Tham số tăng tốc MetaLoc	5
$c_{ent}, N_{min}, N_{max, cap}$	Tham số AdaMetaLoc	0,5; 2; 10
S_{stable}, K_{cap}	Tham số dừng sớm AdaMetaLoc	2; 7

3.2. Thời gian và độ chính xác theo số chu kỳ K

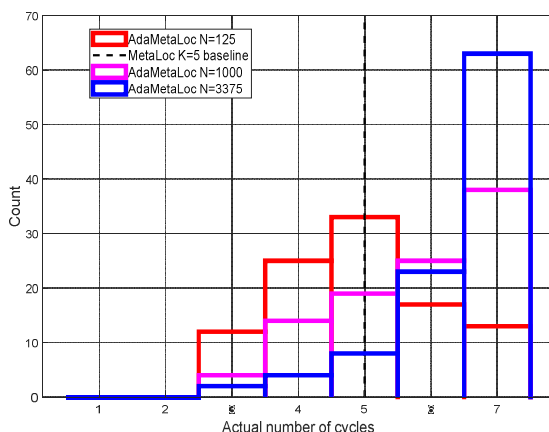
Hình 2 thể hiện sai số định vị l_e theo số chu kỳ K . MetaLoc được vẽ với 3 điểm tương ứng $K \in \{3, 5, 7\}$; AdaMetaLoc được vẽ là một điểm duy nhất ở (K_{avg}, l_e) với K_{avg} là số chu kỳ trung bình thực tế đã chạy. Hình 3 hiển thị tổng thời gian tính toán theo cùng cấu hình. Hình 4 thể hiện phân phối K thực tế của AdaMetaLoc dưới dạng histogram, có thể so sánh trực tiếp với mức $K = 5$ được vẽ làm đường tham chiếu.



Hình 2. Sai số định vị l_e theo số chu kỳ K



Hình 3. Tổng thời gian tính toán theo K



Hình 4. Phân phối số chu kỳ thực tế K của AdaMetaLoc

Kết quả trình bày trong bảng 2 cho thấy: Đối với $N = 125$, AdaMetaLoc đạt số chu kỳ trung bình là 4,94 (xấp xỉ $K = 5$) với độ chính xác định vị cao hơn; do giới hạn N

nhỏ, lợi thế về độ chính xác tuyệt đối khá nhỏ (đạt xấp xỉ 3mm), tuy nhiên độ chính xác tương đối được cải thiện là 60% (0,0191m so với 0,0479m); thời gian thực thi của giải pháp đề xuất cũng được cải thiện nhỏ trong kịch bản này (0,930s so với 1,062s), thời gian được cải thiện mặc dù $N_{avg} \approx 5$ là do có nhiều lần định vị có $K < 5$ dẫn đến thời gian thực thi ngắn hơn so với MetaLoc có $N_{max} = 5$ và $K = 5$ cố định. Đối với các kịch bản $N = \{1000, 3375\}$, ưu điểm của AdaMetaLoc vẫn được duy trì với N_{max} thích nghi giúp tránh được trường hợp 5 khối có xác suất hậu nghiệm lớn nhất không chứa khối thực, điều xảy ra thường xuyên khi N lớn. Cụ thể, với $N = 3375$, MetaLoc với $K = 5$ đạt $l_e = 0,5853\text{mm}$ trong khi AdaMetaLoc đạt $l_e = 0,2866\text{m}$, cải thiện độ chính xác định vị khoảng 51% với số chu kỳ trung bình $K_{avg} = 6,41$, điều này thể hiện $K = 5$ không đủ cho không gian này. Hình 4 (đồ thị màu xanh dương) thể hiện AdaMetaLoc có rất nhiều lần định vị cần tới $K = K_{cap} = 7$ cho thấy bài toán này đòi hỏi nhiều chu kỳ hơn để hội tụ. Có thể thấy AdaMetaLoc có khả năng tự động tùy chỉnh N_{max} và K để cân bằng giữa độ chính xác định vị và thời gian thực thi.

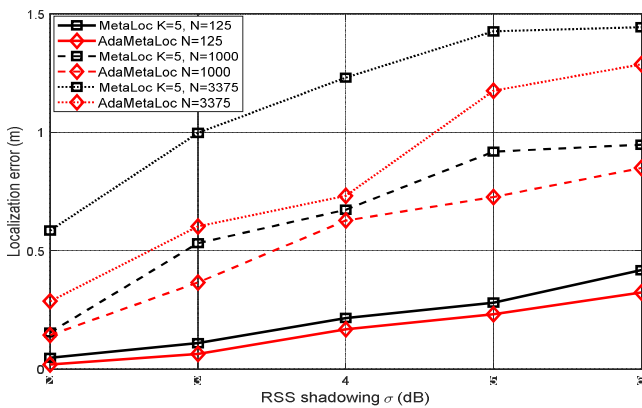
Bảng 2. Kết quả mô phỏng chi tiết thời gian và độ chính xác theo số chu kỳ K

N	Phương pháp	avg K	l_e (m)	Time (s)
125	MetaLoc $K = 3$	3	0,1765	0,635
125	MetaLoc $K = 5$	5	0,0479	1,062
125	MetaLoc $K = 7$	7	0,002	1,475
125	AdaMetaLoc	4,94	0,0191	0,93
1000	MetaLoc $K = 3$	3	0,7488	0,618
1000	MetaLoc $K = 5$	5	0,1548	1,046
1000	MetaLoc $K = 7$	7	0,0368	1,438
1000	AdaMetaLoc	5,79	0,1438	1,183
3375	MetaLoc $K = 3$	3	1,1137	0,703
3375	MetaLoc $K = 5$	5	0,5853	1,13
3375	MetaLoc $K = 7$	7	0,1054	1,572
3375	AdaMetaLoc	6,41	0,2866	1,434

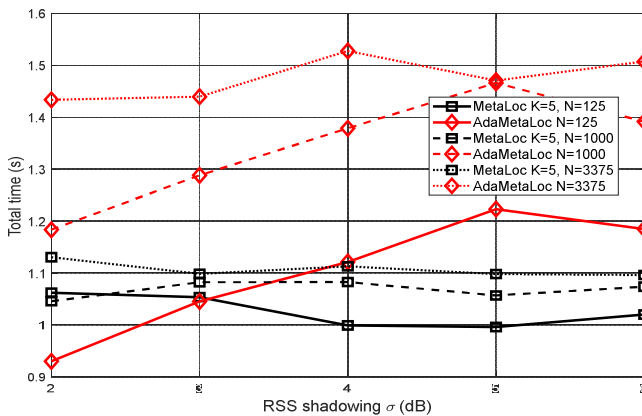
3.3. Đánh giá hiệu năng theo các mức nhiễu

Hình 5 và 6 lần lượt thể hiện sai số định vị và tổng thời gian tính toán khi $\sigma \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$ dB. Khi σ tăng, xác suất hậu nghiệm khó hội tụ hơn do nhiễu lớn làm mất sự khác biệt RSS giữa các khối; do đó, entropy giảm chậm hơn, $N_{max}^{(k)}$ duy trì ở mức cao hơn, khiến cho tiêu chí dừng sớm ít được kích hoạt.

Hình 5 cho thấy AdaMetaLoc duy trì lợi thế về độ chính xác trên toàn bộ dải $\sigma \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$ dB ở cả ba cấu hình N . Cụ thể trên $N = 125$ (nét liền), khoảng cách giữa hai đường cong gần như không đổi: AdaMetaLoc nằm dưới MetaLoc $K = 5$ với độ chênh 30 - 40% xuyên suốt dải khảo sát. Đây là minh chứng cho thấy hai cơ chế tự hiệu chỉnh tham số của bài báo không phụ thuộc vào mức độ nhiễu cụ thể, chúng phản ứng với độ tập trung của xác suất hậu nghiệm, một đại lượng nội tại của thuật toán. Trên $N = 1000$ (nét đứt) và $N = 3375$ (nét chấm), AdaMetaLoc cũng luôn đạt độ chính xác định vị cao hơn, đặc biệt với trường hợp $N = 3375$. Kết quả trong hình 5 cũng khẳng định cả AdaMetaLoc và MetaLoc đều đạt độ chính xác định vị tiệm cận khi không gian lớn dần và nhiễu tăng dần.



Hình 5. Sai số định vị l_e theo σ



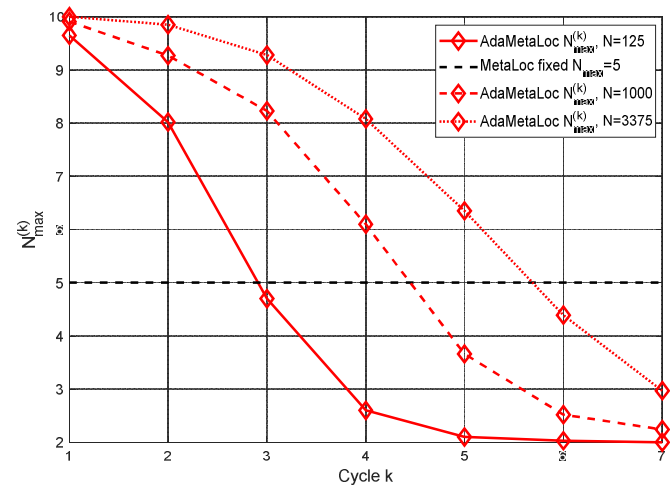
Hình 6. Tổng thời gian theo σ

Hình 6 thể hiện thời gian thực thi của AdaMetaLoc tăng theo σ trong khi MetaLoc với $N_{max} = 5$ và $K = 5$ có thời gian thực thi gần như không đổi. Khi $N = 125$ (nét liền), tại $\sigma = 2$ dB, AdaMetaLoc nhanh hơn MetaLoc, nhưng khi $\sigma \geq 3$ dB, AdaMetaLoc chậm dần và vượt MetaLoc. Trên $N = 1000$ (nét đứt) và $N = 3375$ (nét chấm), AdaMetaLoc luôn chậm hơn trong toàn bộ dải σ . Nguyên nhân của hiện tượng này được giải thích trong tiểu mục 3.4. Do đó, AdaMetaLoc cần thời gian tính toán lớn hơn để đạt độ

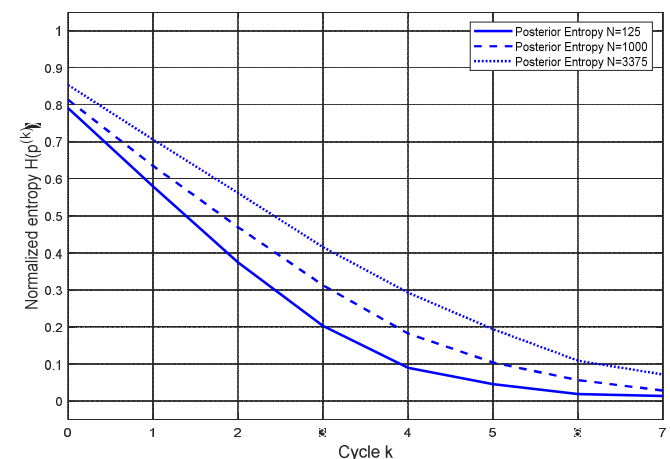
chính xác cao hơn, đây là đánh đổi chính của giải pháp đề xuất.

3.4. Giám sát $N_{max}^{(k)}$ và entropy chuẩn hóa

Hình 7 và 8 lần lượt thể hiện quỹ đạo trung bình của $N_{max}^{(k)}$ và entropy chuẩn hóa theo từng chu kỳ. Quỹ đạo của $N_{max}^{(k)}$ trong hình 7 cho thấy hành vi mong muốn của giải pháp đề xuất ở cả ba cấu hình. N_{max} lớn ở các chu kỳ đầu và giảm dần khi ở các chu kỳ kế tiếp, đồng thời tốc độ giảm của N_{max} phụ thuộc vào độ lớn của N (N càng nhỏ thì N_{max} giảm càng nhanh). Kết quả này phản ánh trực tiếp độ phức tạp của bài toán: SOI lớn hơn cần nhiều chu kỳ cập nhật Bayes hơn để xác suất hậu nghiệm tập trung.



Hình 7. Quỹ đạo trung bình của $N_{max}^{(k)}$ qua các chu kỳ



Hình 8. Quỹ đạo trung bình của entropy chuẩn hóa $\tilde{H}$ qua các chu kỳ

Hình 8 hỗ trợ giải thích cho hình 7. Entropy chuẩn hóa $\tilde{H}$ ban đầu gần 1 (do phân bố xác suất hậu nghiệm chưa tập trung), giảm dần qua các chu kỳ và tiến tới 0 khi xác suất hậu nghiệm tập trung. Tốc độ giảm là khác nhau cho mỗi N : với $N = 125$ (nét liền), $\tilde{H}$ chỉ còn xấp xỉ 0,1 sau 3 chu

kỳ; với $N = 1000$ (nét đứt), cần 5 chu kỳ; với $N = 3375$ (nét chấm), ngay cả sau 7 chu kỳ $\tilde{H}$ vẫn còn xấp xỉ 0,15. Sự tương quan chặt chẽ giữa $\tilde{H}$ và 8 xác nhận tính đúng đắn của Cơ chế 1: $N_{\max}^{(k)}$ thực sự được điều khiển bởi entropy của xác suất hậu nghiệm, quy luật giảm này phản ánh chính xác quá trình hội tụ của thuật toán Bayes.

Một quan sát quan trọng từ các hình trên là Cơ chế 1 không thay thế Cơ chế 2 mà hai cơ chế bổ sung cho nhau theo các cách khác nhau. Cơ chế 1 tối ưu thời gian tính toán mỗi chu kỳ thông qua việc giảm $N_{\max}$ trong khi Cơ chế 2 giảm tổng số chu kỳ. Trong các bài toán đơn giản (N nhỏ, σ thấp), Cơ chế 2 đóng vai trò chủ đạo, dừng sớm thường xảy ra ở chu kỳ $3 \div 4$. Trong các bài toán phức tạp (N lớn, σ cao), Cơ chế 2 ít được kích hoạt nhưng Cơ chế 1 vẫn tiếp tục có hiệu quả thông qua việc duy trì $N_{\max}$ thấp ở các chu kỳ cuối khi xác suất hậu nghiệm đã tập trung.

4. KẾT LUẬN

Bài báo trình bày đề xuất AdaMetaLoc, một cải tiến của giải pháp MetaLoc bằng cách kết hợp giải pháp tự động hiệu chỉnh tham số $N_{\max}$ dựa trên entropy xác suất hậu nghiệm và tiêu chí dừng sớm dựa trên tính ổn định của khối MAP. Kết quả mô phỏng qua đa dạng các kịch bản đã chứng minh rằng AdaMetaLoc đạt độ chính xác định vị cải thiện khoảng 30 - 60% so với MetaLoc khi cố định $N_{\max} = 5$ và $K = 5$ trong hầu hết các kịch bản mô phỏng với sự đánh đổi là thời gian tính toán tăng nhẹ (khoảng 5%, 26%, 33% tương ứng với $N = 125$, $N = 1000$, $N = 3375$). Kết quả này khẳng định hiệu quả của cơ chế tự hiệu chỉnh tham số được đề xuất trong việc cân bằng giữa độ chính xác định vị và thời gian tính toán.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. R. Mautz, *Indoor positioning technologies*. Habilitation thesis, ETH Zurich, 2012.
- [2]. F. Zafari, A. Gkelias, K. K. Leung, "A survey of indoor localization systems and technologies," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21, 3, 2568-2599, 2019.
- [3]. H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee, J. Liu, "Survey of wireless indoor positioning techniques and systems," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37, 6, 1067-1080, 2007.
- [4]. D. Dardari, P. Closas, P. M. Djurić, "Indoor Tracking: Theory, Methods, and Technologies," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64, 4, 1263-1278, 2015.

[5]. S. He, S.H. G. Chan, L. Yu, N. Liu, "Maxlfd: Joint Maximum Likelihood Localization Fusing Fingerprints and Mutual Distances," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 18, 3, 602-617, 2019.

[6]. M. K. Hoang, J. Schmalenstroee, C. Drueke, D. H. Tran Vu, R. Haeb-Umbach, "A hidden Markov model for indoor user tracking based on WiFi fingerprinting and step detection," in *21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013)*, Marrakech, Morocco, 1-5, 2013.

[7]. M. Di Renzom et al., "Smart radio environments empowered by reconfigurable intelligent surfaces: How it works, state of research, and the road ahead," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38, 11, 2450-2525, 2020.

[8]. Q. Wu, R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network," *IEEE Communications Magazine*, 58, 1, 106-112, 2020.

[9]. H. Wymeersch, J. He, B. Denis, A. Clemente, M. Juntti, "Radio localization and mapping with reconfigurable intelligent surfaces: Challenges, opportunities, and research directions," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15, 4, 52-61, 2020.

[10]. R. A. Aguiar, N. Paulino, L. M. Pessoa, "A deep learning approach in RIS-based indoor localization," in *2024 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*, Antwerp, Belgium, 523-528, 2024.

[11]. G. Zhang, D. Zhang, Y. He, J. Chen, F. Zhou, Y. Chen, "Multi-person passive WiFi indoor localization with intelligent reflecting surface," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 22, 10, 6534-6546, 2023.

[12]. H. Zhang, H. Zhang, B. Di, K. Bian, Z. Han, L. Song, "MetaLocalization: Reconfigurable intelligent surface aided multi-user wireless indoor localization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 20, no. 12, 7743-7757, 2021. doi: 10.1109/TWC.2021.3087354.

AUTHORS INFORMATION

Duc Khoi Nguyen¹, Le Cuong Nguyen², Thi Cam Trang Phan³,
Manh Kha Hoang¹

¹School of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi University of Industry, Vietnam

²Electric Power University, Vietnam

³Hanoi University of Civil Engineering, Vietnam