

GIẢI PHÁP MỚI CHO ĐỊNH VỊ VÔ TUYẾN TRONG NHÀ SỬ DỤNG ANTEN THÔNG MINH

A NOVEL SOLUTION FOR INDOOR WIRELESS LOCALIZATION USING SMART ANTENNAS

Nguyễn Trì¹, Bùi Thị Duyên^{2*},
Nguyễn Ngọc Trung³

DOI: <https://doi.org/10.57001/huinh5804.2025.281>

TÓM TẮT

Bài báo trình bày về một đề xuất mới cho hệ thống định vị đối tượng trong nhà sử dụng anten thông minh. Hệ thống định vị vô tuyến sử dụng một trạm vô tuyến tích hợp anten thông minh gồm 7 bức sóng. Phương pháp ước lượng đối tượng trong hệ thống dựa trên dấu vân tay. Bài báo đề xuất khảo sát công suất phát của trạm sao cho hệ thống có thể giảm bớt nhiễu đa đường mang lại độ chính xác cao cho hệ thống định vị. Hệ thống được triển khai thực nghiệm trong phòng có diện tích $6m \times 6,5m \times 3,5m$ và đạt sai số nhỏ tới 0,35m.

Từ khóa: Định vị trong nhà, anten thông minh, dấu vân tay.

ABSTRACT

This paper proposes a novel indoor localization system that employs a smart antenna. The system integrates a single anchor with a smart antenna array consisting of seven fixed directional beams. The object estimation method is based on fingerprinting. The paper suggests investigating the transmit power of the base station to reduce multipath interference, thereby improving the accuracy of the localization system. The system was experimentally deployed in a room $6m \times 6.5m \times 3.5m$. Experimental results demonstrate that the proposed system achieves a mean localization error as low as 0.35 m.

Keywords: Indoor localization system, smart antenna, fingerprinting.

¹Viện Tự động hóa Kỹ thuật Quân sự, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự

²Khoa Điều khiển & Tự động hóa, Trường Đại học Điện lực

³Phòng Tổ chức cán bộ, Trường Đại học Điện lực

*Email: duyenbt@epu.edu.vn

Ngày nhận bài: 10/4/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 24/6/2025

Ngày chấp nhận đăng: 28/7/2025

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Công nghệ định vị trong nhà ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong các môi trường hẹp như nhà kho, nhà

máy, bệnh viện, siêu thị, bảo tàng, thư viện... để hỗ trợ robot và thiết bị thông minh xác định vị trí, dẫn đường và thực hiện nhiệm vụ tự động [2]. Tại bệnh viện, định vị giúp theo dõi bệnh nhân, định vị bác sĩ, y tá, thiết bị y tế nhằm nâng cao hiệu quả chăm sóc và xử lý khẩn cấp [3]. Trong thương mại, định vị hỗ trợ quản lý hàng hóa, xác định vị trí khách hàng để cá nhân hóa quảng cáo. Ở các không gian công cộng, công nghệ này giúp người già, người khuyết tật, trẻ em dễ dàng tìm đường. Từ những năm 2000, định vị trong nhà còn được nghiên cứu để tìm kiếm vật dụng cá nhân như chìa khóa, kính, thú cưng [5]. Trước nhu cầu lớn, nhiều tập đoàn như Apple, Google, Microsoft, Fujitsu và các viện nghiên cứu như NICT (Nhật Bản) đã tích cực đầu tư phát triển lĩnh vực này [5].

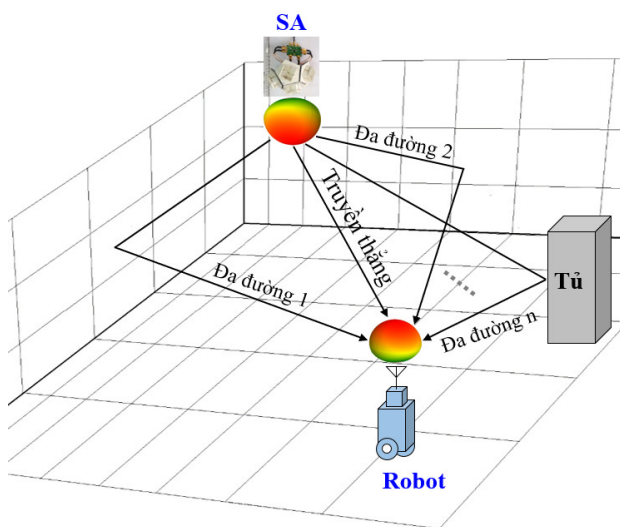
Theo IDTechEx, từ 2014 đến 2024, hệ thống định vị trong nhà trên thiết bị di động và định vị thời gian thực được ứng dụng rộng rãi, trong đó lĩnh vực y tế chiếm 61%, còn lại là công nghiệp, nông nghiệp, logistics, quân sự, giáo dục,... [6]. Giai đoạn 2017 - 2022 được dự báo là thời kỳ bùng nổ của các dịch vụ định vị trong lĩnh vực IoT, với sự tham gia của nhiều tập đoàn lớn như Cisco, Google, Apple, Microsoft, IBM, Qualcomm, Oracle, AT&T... Theo Briteyellow, thị trường phần mềm định vị trong nhà có thể tăng trưởng +42% vào năm 2022. Medium cho biết số người dùng thiết bị tích hợp định vị đã tăng từ 123 tỷ lượt (2013) lên 242 tỷ lượt vào năm 2018 [7].

Định vị trong nhà dựa trên sóng vô tuyến là công nghệ được ưu tiên phát triển nhờ sự phổ biến của các thiết bị thu - phát RF tích hợp trong các thiết bị điện tử, đặc biệt trong nhà thông minh, thành phố thông minh và các không gian công cộng. Sóng vô tuyến có ưu điểm là khả năng xuyên vật cản tốt và hiện diện rộng nhờ hạ tầng truyền thông không dây ngày càng phát triển [1].

Theo khảo sát của Christian Esposito [8] các công nghệ định vị dựa trên RF chiếm 66% thị phần (Wifi 24%,

Bluetooth 17%, Zigbee 8%, RFID 7%, UHF 4%, kết hợp 6%), vượt trội so với hồng ngoại (9%), UWB (6%), GPS (4%), công nghệ ảnh và từ trường (1%). Các hệ thống định vị trong nhà thường tận dụng hạ tầng sẵn có như Wifi, Bluetooth, RFID, Zigbee, UWB [9-11]. Để tăng độ chính xác, chúng thường được kết hợp với các cảm biến như con quay hồi chuyển, cảm biến từ, gia tốc, bước chân, hướng và la bàn [12].

Các hệ thống định vị trong nhà thường sử dụng các tham số như cường độ tín hiệu nhận được (RSS), thời gian đến (ToA), độ lệch thời gian đến (TDoA) và góc đến (AoA). Trong đó, ToA và TDoA cho độ chính xác cao, ít bị ảnh hưởng bởi tín hiệu đa đường, nhưng đòi hỏi thiết bị chuyên dụng như đồng bộ thu-phát, băng thông rộng và độ phân giải thời gian cao, dẫn đến chi phí triển khai lớn [17-21]. Ngược lại, RSS và AoA có ưu điểm là đơn giản, dễ triển khai với thiết bị phổ thông. Các thiết bị vô tuyến hiện nay thường tích hợp sẵn chức năng đo RSS/RSSI, còn AoA yêu cầu anten định hướng hoặc anten thông minh để phân biệt góc đến. Kết hợp RSS và AoA giúp nâng cao độ chính xác định vị: (1) Anten thông minh với vùng phủ nhỏ tăng độ phân giải góc (AoA); (2) Phương pháp fingerprinting dựa trên RSS là giải pháp hiệu quả trong môi trường phức tạp.



Hình 1. Truyền nhận tín hiệu vô tuyến trong môi trường trong nhà

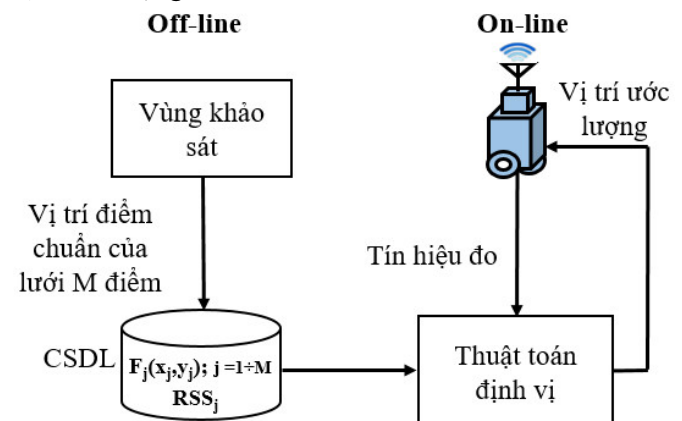
Trong môi trường trong nhà, tín hiệu vô tuyến thường chịu ảnh hưởng mạnh bởi hiện tượng đa đường, gồm các thành phần phản xạ, khúc xạ và nhiễu xạ như minh họa ở hình 1. Tín hiệu truyền thẳng thường mạnh nhất, trong khi các tín hiệu đa đường yếu hơn và dễ bị lẫn với nhiễu nền. Khi giảm công suất phát xuống mức giới hạn, các thành phần đa đường có thể bị triệt tiêu, giúp thu được tín hiệu chủ yếu từ đường truyền thẳng. Trên cơ sở đó, bài báo đề xuất một hướng tiếp cận mới: khảo sát ảnh hưởng của

công suất phát tới độ chính xác định vị. Thông qua kích bản thử nghiệm và phân tích thực nghiệm, bài báo cho thấy độ chính xác của hệ thống định vị có mối tương quan trực tiếp với mức công suất phát của bộ phát vô tuyến.

2. PHƯƠNG PHÁP ĐỊNH VỊ DỰA TRÊN PHÂN TÍCH MẪU

Việc mô hình hóa chính xác quá trình truyền sóng trong môi trường trong nhà là thách thức do sự tồn tại của nhiều loại nhiễu vô tuyến. Phương pháp fingerprinting được đánh giá cao nhờ khả năng định vị chính xác mà không yêu cầu phần cứng chuyên dụng. Phương pháp này tận dụng các thiết bị phổ biến như access point, router, NICs, hoặc điện thoại thông minh và dựa trên các tham số như cường độ tín hiệu RSS, địa chỉ MAC, và SSID. Fingerprinting có thể được kết hợp với các tham số định vị khác như ToA, TDoA hoặc AoA nhằm nâng cao hiệu suất và độ chính xác của hệ thống.

Triển khai hệ thống dựa trên fingerprinting được chia làm 2 giai đoạn [19] như hình 2: giai đoạn thu thập và huấn luyện (training, off-line) và giai đoạn tính toán ước lượng vị trí đối tượng (online) [19, 20].



Hình 2. Hệ định vị theo phương pháp fingerprinting

(1) - Giai đoạn huấn luyện, thu thập dữ liệu (training, off-line):

- Tạo lưới điểm chuẩn để thu thập cơ sở dữ liệu (CSDL) ứng với một hệ tọa độ ban đầu. Lưới điểm chuẩn (Reference Point-RP) càng dày cho độ chính xác càng cao, tuy nhiên đánh đổi là thời gian công sức thu thập dữ liệu nhiều, khối lượng tính toán lớn và mất thời gian.

Bảng 1. Các tham số định vị off-line của phương pháp dấu vân tay

Vị trí của M điểm chuẩn	Thông tin RSS của N trạm
$F_1(x_1, y_1)$	$RSS_1 = \{\overline{RSS_{1,F1}}, \overline{RSS_{2,F1}}, \dots, \overline{RSS_{N,F1}}\}$
$F_2(x_2, y_2)$	$RSS_2 = \{\overline{RSS_{1,F2}}, \overline{RSS_{2,F2}}, \dots, \overline{RSS_{N,F2}}\}$
...	...

$F_j(x_j, y_j)$	$RSS_j = \{\overline{rss_{1,Fj}}, \overline{rss_{2,Fj}}, \dots, \overline{rss_{N,Fj}}\}$
...	...
$F_M(x_M, y_M)$	$RSS_M = \{\overline{rss_{1,F_M}}, \overline{rss_{2,F_M}}, \dots, \overline{rss_{N,F_M}}\}$

- Thu thập tham số vị trí RSS hay RSSI. Càng nhiều mẫu cho mỗi điểm chuẩn thì độ chính xác càng cao, như vậy là thời gian và tính toán nhiều. Giá trị $\overline{rss_{N,F_M}}$ là giá trị cường độ RSS trung bình từ các mẫu đã đo.

- Có thể lọc hoặc hiệu chỉnh các tham số đo, tạo CSDL chuẩn hóa. Tập dữ liệu trên mỗi điểm chuẩn gồm thông tin tọa độ và giá trị RSS ứng với các trạm đã biết trước do đó chúng còn gọi là bản đồ sóng vô tuyến [21].

(2) - Giai đoạn tính toán, ước lượng vị trí đối tượng (on-line):

Dựa trên tham số vị trí đối tượng đo được RSS/RSSI theo thời gian thực đo được $RSS_T = \{rss_1, rss_2, \dots, rss_i, \dots, rss_N\}$, sử dụng các phương pháp, thuật toán để ước lượng vị trí đối tượng. Việc phân tích, ước lượng tìm ra vị trí đối tượng có nhiều phương pháp, thuật toán khác nhau [22], có thể phân chia thành ba hướng tiếp cận như: tiền định (Deterministic), xác suất thống kê (Probabilistic), nhận dạng mẫu (Pattern Recognition Techniques). Trong bài báo này tác giả đề xuất hướng tiền định để triển khai thử nghiệm.

Bản chất của quá trình này là ước lượng vị trí thông qua việc lựa chọn điểm chuẩn (Reference Point-RP) đã biết trước và gần đối tượng, nghĩa là giá trị RSS đo được gần với giá trị RSS của điểm chuẩn trong CSDL. Để ước lượng tăng độ chính xác, chỉ lựa chọn K điểm gần đối tượng gọi là điểm gần nhất (Nearest Neighbor_NN) hoặc gọi là K hàng xóm gần nhất [23-25].

Tham số liên quan đến vị trí đối tượng thường được xác định bởi các vec-tơ độ lệch hay thường gọi là khoảng cách, độ lệch ở đây là hiệu của RSS đo trong giai đoạn trực tuyến và RSS sẵn có của các điểm chuẩn. Xác định khoảng cách đó có nhiều phương pháp xác định khác nhau, tuy nhiên khoảng cách Euclidean và Sorensen hay được sử dụng vì tính hiệu quả về tính toán cũng như độ chính xác, chúng lần lượt được xác định như công thức (1) và (2) [26-28] để xác định K điểm lân cận.

$$D_j = \sqrt{\sum_{i=1}^N (rss_i - \overline{rss_{i,j}})^2}; \text{ với:} \quad (1)$$

Euclidean: $i = 1 \div N, j = 1 \div M$

(N: số trạm, M: số điểm chuẩn)

$$D_j = \frac{\sum_{i=1}^N |rss_i - \overline{rss_{i,j}}|}{\sum_{i=1}^N |rss_i + \overline{rss_{i,j}}|} \quad (2)$$

với: $i = 1 \div N, j = 1 \div M$

Từ K điểm lân cận dùng các thuật toán khác nhau để ước lượng vị trí như: tìm trọng số của các điểm lân cận dựa trên khoảng cách Euclidean (3) (K nearest neighbour-WKNN), tìm trọng tâm dựa trên tổng bình phương khoảng cách nhỏ nhất (minimizes the sum of square-MSoS) theo (4) hay phương pháp khoảng cách Minkowski (7) với $k = 2$. Các giá trị gamma σ^2 được khảo sát ứng với $\sigma^2 = 5, 10$ và 25 (Gama5, Gama10 và Gama25).

Khoảng cách nhỏ nhất sẽ là vị trí cần ước lượng với $K = 1$, nếu lấy $K \neq 1$ khi đó vị trí sẽ được ước tính bằng các phương pháp tìm trọng tâm của K điểm như: trung bình tọa độ coi K điểm như nhau công thức (3), bình phương khoảng cách nhỏ nhất như công thức (4).

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \left(\sum_{j=1}^K \frac{x_j}{K}, \sum_{j=1}^K \frac{y_j}{K} \right) \quad (3)$$

$$(\hat{x}, \hat{y}) = \operatorname{argmin} \sum_{j=1}^K [(\hat{x} - x_j)^2 + (\hat{y} - y_j)^2] \quad (4)$$

Trong K điểm lân cận, có những điểm gần đối tượng (khoảng cách nhỏ), có những điểm xa đối tượng (khoảng cách lớn). Do đó, thêm trọng số cho các điểm gần hơn sẽ mang lại vị trí ước lượng tốt hơn hay giảm sai số vị trí. Trường hợp này gọi là phương pháp KNN có trọng số hay WKNN (Weight K Nearest Neighbor). Một trong các cách tính trọng số có thể căn cứ vào khoảng cách tìm được ở trên và được xác định theo công thức (5), từ đó ước lượng vị trí đối tượng theo công thức (6).

$$w_j = \frac{1/D_j}{\sum_{j=1}^K (1/D_j)}, j = 1, 2, 3 \dots K \quad (5)$$

$$(\hat{x}, \hat{y}) = w_j \cdot (x_j, y_j) \quad (6)$$

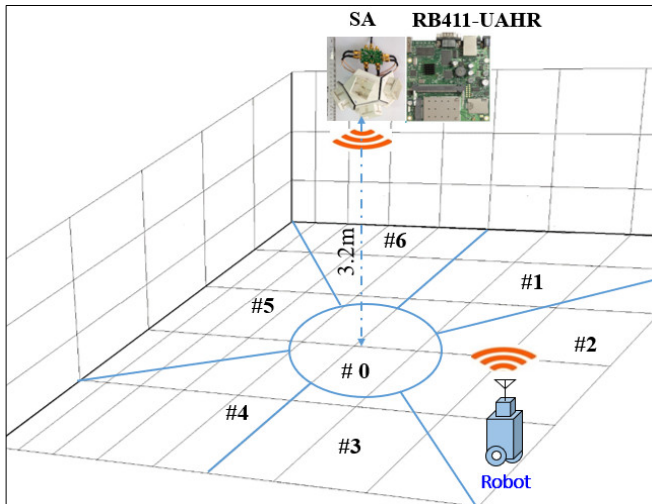
$$w_i = \exp\left(\frac{-\|x - x_i\|_k}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

Tham số $K = 1$ thường không đạt được độ chính xác tốt nhất, K sẽ biến đổi theo mẫu và theo kịch bản, do vậy K được lựa chọn theo thực nghiệm để sai số định vị là nhỏ nhất [29]. Hoặc K được khảo sát theo phân bố sai số và được chọn ứng với sai số nhỏ nhất hoặc sai số nhỏ và K nhỏ để giảm quá trình tính toán cho hệ thống [27]. Phương pháp WKNN chiếm ưu thế với số trạm nhỏ, rời

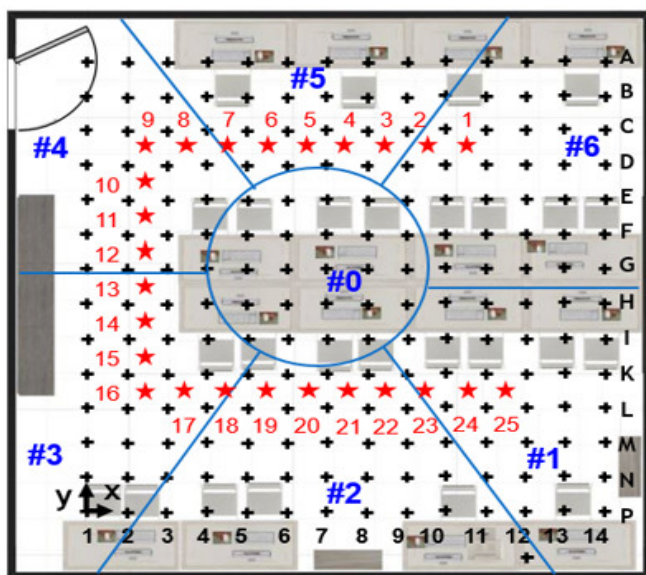
rạc, RADAR là hệ thống nổi tiếng đã sử dụng phương pháp này [24, 30].

3. CẤU HÌNH HỆ THỐNG ĐỊNH VỊ SỬ DỤNG ANTEN THÔNG MINH

3.1. Cấu hình hệ thống định vị đề xuất



Hình 3. Kịch bản của hệ định vị tại C1-413 Đại học Bách khoa Hà Nội



Hình 4. Lưới 196 điểm chuẩn và 25 điểm thử trong hệ định vị

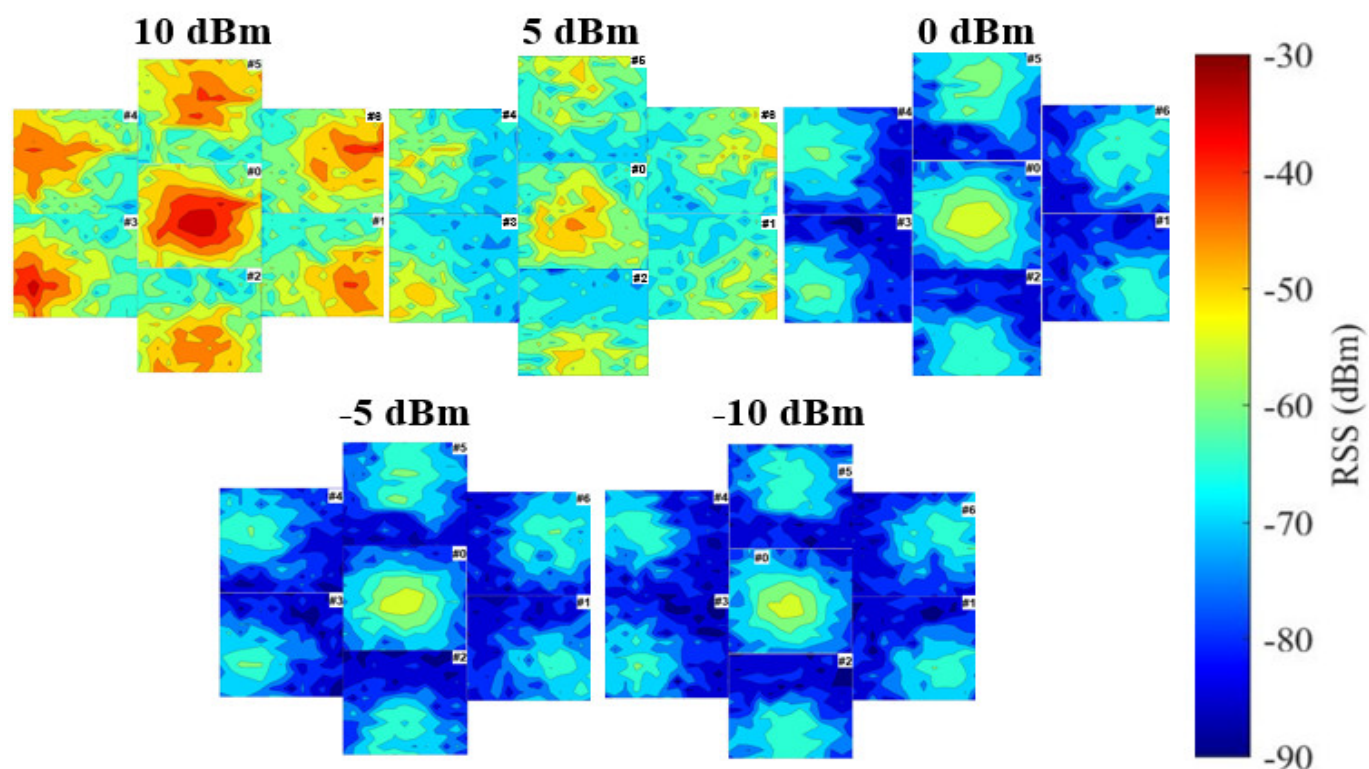
Hệ thống được lắp đặt thử nghiệm tại phòng 413 nhà C1 Trường Đại học Bách khoa Hà Nội như hình 3, hệ thống sử dụng anten thông minh đã được nhóm tác giả đề xuất trong [31], được lắp đặt trên trần của phòng thí nghiệm nối với bộ RB411-UAHR và nối với máy tính chủ. Phương pháp dựa trên CSDL của 196 điểm trong lưới và 25 điểm thử như hình 4. Mỗi điểm lấy 30 mẫu ứng với 7 búp của anten thông minh SA, như vậy CSDL gồm tập dữ liệu RSS của 196 điểm $\times$ (30 mẫu $\times$ 7 búp). Trong mục này, phương

pháp fingerprinting được áp dụng theo hướng tiền định, đối tượng được tích hợp anten phân cực tròn TDAA (Three-dimensional Dipole Antenna Array). Đối tượng được tích hợp anten TDAA phân cực tròn rộng, làm khả năng thu là tốt nhất trong điều kiện môi trường phức tạp: nhiều đồ trong phòng, người qua lại liên tục và có những thay đổi biến động.

3.2. Kịch bản thử nghiệm hệ thống định vị với công suất phát của trạm khác nhau

Trong kịch bản này, hệ số tăng ích của SA là 9,8dBi được đặt trên trần của phòng C1-413 với kích thước 6 $\times$ 6,5 $\times$ 3,5m³ như hình 3, khoảng cách xa nhất từ trạm đến góc phòng là 6m. Theo công thức Friis [32] với trường hợp không xét tổn hao, với khoảng cách 6m, muốn công suất nhận được -40dBm thì công suất phát của trạm ở mức 5dBm. Nếu không xét đến ảnh hưởng của các tín hiệu đa đường, đối tượng thuộc vùng nào sẽ nhận được RSS mạnh ở vùng đó tương ứng với búp phát tín hiệu của SA. Nếu năng lượng bị phân tán không theo vùng sẽ rất khó xác định vị trí đối tượng hay dẫn đến sai số lớn trong xác định vị trí. Để đánh giá sơ bộ hệ thống, có thể quan sát phân bố mật độ năng lượng thu được khi trạm phát tín hiệu. Tiến hành đo cường độ sóng vô tuyến RSS tại các vị trí của 196 điểm chuẩn, mỗi điểm đo 30 mẫu để tạo CSDL. Trong mục này sẽ khảo sát việc thay đổi công suất phát của trạm ở các mức công suất: 10dBm, 5dBm, 0dBm, -5dBm, -10dBm nhau nhằm khảo sát ảnh hưởng của công suất phát đến mật độ năng lượng sóng điện từ và độ chính xác của hệ định vị.

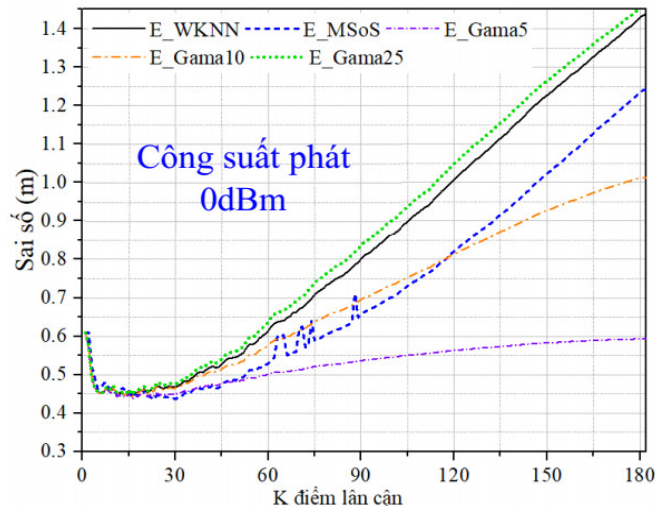
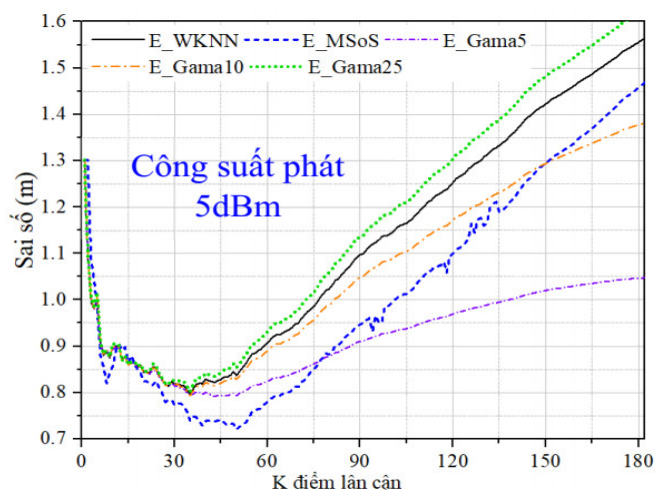
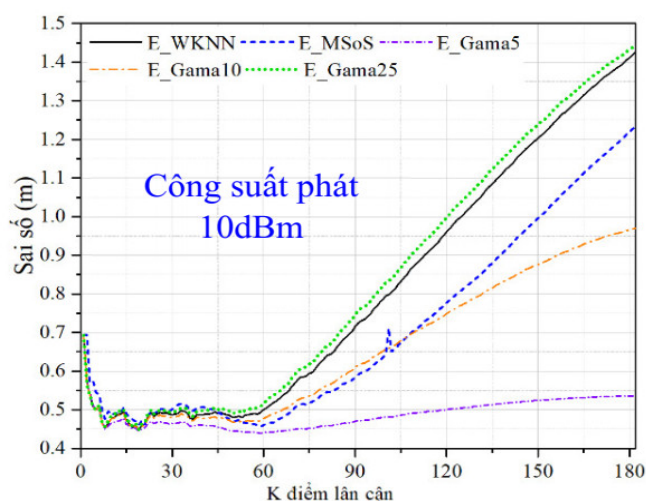
Mật độ năng lượng thực nghiệm đo được cho từng trường hợp trên được thể hiện trong hình 5. Từ hình 5 nhận thấy rõ nét như sau: (1) Khi công suất phát càng lớn thì mật độ RSS càng cao, khi công suất phát giảm đến -10dBm theo công thức Friis với khoảng cách 6m năng lượng thu được là -54dBm. Tuy nhiên thực tế có nhiều điểm RSS thu được trong dải từ -80dBm đến -90dBm gần với nền nhiễu của trường điện từ. Không những thế, khi xét cả 7 vùng, nhiều miền rơi vào vùng chết (đối tượng không nhận được tín hiệu từ bất kỳ búp nào của trạm). (2) Khi trạm phát 0dBm thì 7 vùng tín hiệu được phân biệt một cách rõ nét nhất, giao của các vùng với nhau không tồn tại vùng chết nào trong toàn miền khảo sát. Từ đó có thể kết luận sơ bộ với công suất phát 0dBm sẽ là công suất dự đoán có thể mang lại kết quả định vị tốt cho hệ đề xuất. Để kiểm chứng điều này có mang lại độ chính xác cao hay không cho hệ thống định vị, mục tiếp theo sẽ có kết quả ước lượng cho các kịch bản này dựa trên phương pháp fingerprinting.

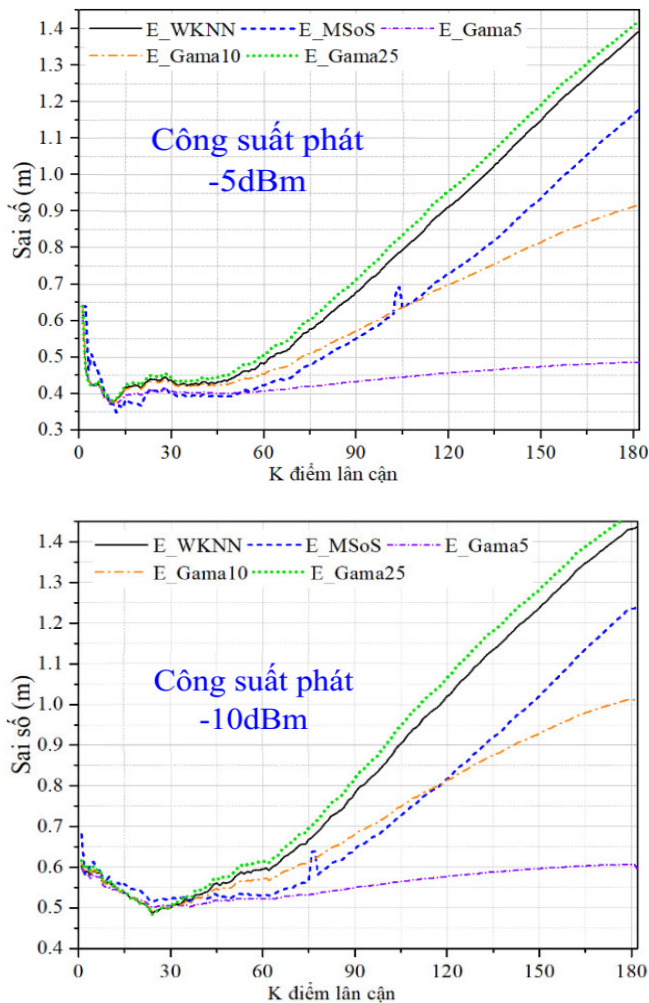


Hình 5. Mật độ RSS thu được ứng với công suất phát khác nhau

3.3. Kết quả ước lượng vị trí đối tượng dựa trên phương pháp dấu vân tay

Khi công suất phát được lựa chọn trong dải từ -10dBm đến 10dBm, cụ thể với các trường hợp: +10dBm, +5dBm, 0dBm, -5dBm, -10dBm. Nhóm tác giả cũng tiến hành đầy đủ các giai đoạn ngoại tuyến và trực tuyến đối với từng trường hợp của công suất phát như: thu thập CSDL của 196 điểm, đo tín hiệu của 25 điểm thử. Sau khi sử dụng phương pháp fingerprinting với các cách tiếp cận tiên định để nhận dạng mẫu. Đồng thời khảo sát K điểm lân cận cho từng trường hợp cụ thể nhận được kết quả như hình 6.





Hình 6. Sai số trung bình theo K điểm lân cận của thuật toán WKNN

Nhận thấy rằng với K trong dải từ 8 ÷ 35 nhận được sai số định vị nhỏ nhất (nhỏ hơn 0,9m) cho mọi trường hợp công suất phát và các thuật toán khác nhau. Khi tối ưu hóa K bằng thực nghiệm sai số nhỏ nhất có thể đạt tới 0,35m với K = 12 trong trường hợp trạm phát 0dBm, chi tiết được thể hiện trên bảng 2. Với kết quả sai số trung bình 0,35m, độ chính xác cao hơn với 0,72m trong trường hợp công suất trạm phát là 5dBm đã được tác giả công bố trước đó [31].

Bảng 2. Sai số trung bình của hệ thống trong các trường hợp (mm)

Thuật toán trọng tâm	Công suất phát				
	10dBm	5dBm	0dBm	-5dBm	-10dBm
E_WKNN	0,45 (K=19)	0,79 (K=35)	0,38 (K=12)	0,444 (K=16)	0,484 (K=25)
E_MSoS	0,46 (K=19)	0,72 (K=50)	0,35 (K=12)	0,435 (K=23)	0,514 (K=25)
E_Gama5	0,44 (K=19)	0,79 (K=35)	0,37 (K=12)	0,438 (K=16)	0,501 (K=25)

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất hệ thống định vị vô tuyến trong nhà sử dụng anten thông minh với 7 búp sóng cố định. Bài báo cũng đã phân tích phương pháp fingerprinting là một trong những phương pháp phổ biến được đánh giá mang lại độ chính xác cao nhất. Nội dung chính tác giả đề xuất giải pháp mới là khảo sát tín hiệu trạm phát vô tuyến để có thể loại bỏ nhiễu đa đường của hệ thống định vị với môi trường trong nhà phức tạp. Kết quả thực nghiệm cho thấy giải pháp đã chọn công suất phát 0dBm thì hệ thống đạt độ chính xác cao vượt trội với sai số trung bình xuống tới 0,35m trong không gian định vị là phòng thí nghiệm 6m×6,5m×3,5m tại phòng 413 nhà C1 Đại học Bách khoa Hà Nội. Việc đạt được sai số định vị trong nhà ở mức 0,35 mét bằng công nghệ Wi-Fi cho thấy một bước tiến đáng kể vượt xa độ chính xác thông thường của các hệ thống Wi-Fi truyền thống. Độ chính xác này tiệm cận với các công nghệ định vị chính xác cao như UWB, trong khi vẫn tận dụng được hạ tầng Wi-Fi sẵn có, từ đó mang lại giải pháp hiệu quả về chi phí và khả năng mở rộng. Kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng rộng rãi trong các lĩnh vực đòi hỏi định vị chính xác dưới mét, như dẫn đường tự động, giám sát tài sản và môi trường thông minh. Các nghiên cứu tiếp theo sẽ tập trung vào nâng cao độ ổn định trong điều kiện môi trường biến động và tối ưu hóa thuật toán xử lý tín hiệu nhằm đảm bảo hiệu suất ổn định trong triển khai thực tế.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. K. Pahlavan, P. Krishnamurthy, *Principles of wireless access and localization*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc, 2013.
- [2]. P. Jensfelt, *Approaches to mobile robot localization in indoor environments*. Royal Institute of Technology, Switzerland, 2001.
- [3]. A. H. Ismail, H. Kitagawa, R. Tasaki, K. Terashima, "WiFi RSS fingerprint database construction for mobile robot indoor positioning system," in *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Budapest, Hungary: IEEE, 001561–001566, 2016. doi: 10.1109/SMC.2016.7844461.
- [4]. © ELEDIA Research Center, *ELEDIA Wireless Indoor Localization*. ELEDIA WaLK. [Online]. Available: <http://www.eledia.org/showcase/walk/>
- [5]. Jose Fermoso, *Nokia's Location Sensor concept 'keychain' to lead hybrid location-based services*. [Online]. Available: <https://www.wired.com/2009/02/nokias-location/>
- [6]. P. Harrop, *Mobile phone indoor positioning systems create \$10bn market*. [Online]. Available: <https://www.idtechex.com/research/articles/mobile-phone-indoor-positioning-systems-create-10bn-market-00006207.asp>

- [7]. 7 Examples of Location-Based Services Apps. [Online]. Available: https://medium.com/@the_manifest/7-examples-of-location-based-services-apps-82b8be3bdcac
- [8]. C. Esposito, M. Ficco, "Deployment of RSS-Based Indoor Positioning Systems," *Int. J. Wirel. Inf. Netw.*, 18, 4, 224–242, 2011. doi: 10.1007/s10776-011-0131-7.
- [9]. A. Yassin, et al., "Recent Advances in Indoor Localization: A Survey on Theoretical Approaches and Applications," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 1-1, 2017. doi: 10.1109/COMST.2016.2632427.
- [10]. S. Doiphode, J. W. Bakal, M. Gedam, "Survey of Indoor Positioning Measurements, Methods and Techniques," *Int. J. Comput. Appl.*, 140, 7, 1–4, 2016.
- [11]. P. Davidson, R. Piche, "A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 19, 2, 1347–1370, 2017. doi: 10.1109/COMST.2016.2637663.
- [12]. Y. Shi, et al., "Design of a Hybrid Indoor Location System Based on Multi-Sensor Fusion for Robot Navigation," *Sensors*, 18, 10, 3581, 2018. doi: 10.3390/s18103581.
- [13]. G. Mao, B. Fidan, Eds., *Localization algorithms and strategies for wireless sensor networks*. Hershey, PA: Information Science Reference, 2009.
- [14]. F. Zafari, A. Gkelias, K. K. Leung, "A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies," *Cornell Univ. Libr.*, 2017. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1709.01015>
- [15]. W. Sakpere, M. Adeyeye Oshin, N. B. Mlitwa, "A State-of-the-Art Survey of Indoor Positioning and Navigation Systems and Technologies," *South Afr. Comput. J.*, 29, 3, 2017. doi: 10.18489/sacj.v29i3.452.
- [16]. A. A. Khudhair, S. Q. Jabbar, M. Qasim Sulttan, D. Wang, "Wireless Indoor Localization Systems and Techniques: Survey and Comparative Study," *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 3, 2, 392, 2016. doi: 10.11591/ijeecs.v3.i2.pp392-409.
- [17]. Bai Y., Wu S., Wu H., Zhang K., "Overview of RFID-Based Indoor Positioning Technology," in *Proceedings of the Geospatial Science_2*, Melbourne, Australia: RMIT University, 1–10, 2012. [Online]. Available: <https://researchbank.rmit.edu.au/view/rmit:20622>
- [18]. X. Li, Z. D. Deng, L. T. Rauchenstein, T. J. Carlson, "Contributed Review: Source-localization algorithms and applications using time of arrival and time difference of arrival measurements," *Rev. Sci. Instrum.*, 87, 4, 041502, 2016. doi: 10.1063/1.4947001.
- [19]. S. He, S.H. G. Chan, "Wi-Fi Fingerprint-Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons," *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 18, 1, 466–490, 2016. doi: 10.1109/COMST.2015.2464084.
- [20]. C. Basri, A. El Khadimi, "Survey on indoor localization system and recent advances of WIFI fingerprinting technique," in *2016 5th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, Marrakech, Morocco: IEEE, 253–259, 2016. doi: 10.1109/ICMCS.2016.7905633.
- [21]. Ville Honkavirta, Tommi Peral A., Simo Ali-Loytty, Robert Piche, "A Comparative Survey of WLAN Location Fingerprinting Methods," in *Proc. of the 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2009 (WPNC'09)*, Tampere University of Technology, Finland, 243–251, 2009.
- [22]. A. Khalajmehrabadi, N. Gatsis, D. Akopian, "Modern WLAN Fingerprinting Indoor Positioning Methods and Deployment Challenges," *ArXiv161005424 Cs*, Accessed: Feb. 26, 2017. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1610.05424>
- [23]. Rong-Hong Jan, Yung Rong Lee, "An indoor geolocation system for wireless LANs," in *2003 International Conference on Parallel Processing Workshops, 2003. Proceedings.*, Kaohsiung, Taiwan: IEEE Comput. Soc, 229–34, 2003. doi: 10.1109/ICPPW.2003.1240350.
- [24]. P. Bahl, V. N. Padmanabhan, "RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system," in *Proceedings IEEE INFOCOM 2000. Conference on Computer Communications. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (Cat. No.00CH37064)*, Tel Aviv, Israel, 75–784 vol. 2, 2000. doi: 10.1109/INFCOM.2000.832252.
- [25]. A. Smailagic, D. Kogan, "Location sensing and privacy in a context-aware computing environment," *IEEE Wirel. Commun.*, 9, 5, 10–17, 2002. doi: 10.1109/MWC.2002.1043849.
- [26]. I. Lee, M. Kwak, D. Han, "A Dynamic k-Nearest Neighbor Method for WLAN-Based Positioning Systems," *J. Comput. Inf. Syst.*, 56, 4, 295–300, 2016. doi: 10.1080/08874417.2016.1164000.
- [27]. A. Ault, X. Zhong, E. J. Coyle, "K-Nearest-Neighbor Analysis of Received Signal Strength Distance Estimation Across Environments," in *Proceedings of First workshop on Wireless Network Measurements (WinMee)*, Trentino, Italy: IEEE, 1–6, 2005.
- [28]. W. Chen, W. Wang, Q. Li, Q. Chang, H. Hou, "A Crowd-Sourcing Indoor Localization Algorithm via Optical Camera on a Smartphone Assisted by Wi-Fi Fingerprint RSSI," *Sensors*, 16, 3, 410, 2016. doi: 10.3390/s16030410.
- [29]. L. M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau, A. P. Patil, "LANDMARC: indoor location sensing using active RFID," in *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, (PerCom 2003)*, Fort Worth, TX, USA: IEEE Comput. Soc, 2407–415, 2003. doi: 10.1109/PERCOM.2003.1192765.
- [30]. X. Luo, W. J. O'Brien, C. L. Julien, "Comparative evaluation of Received Signal-Strength Index (RSSI) based indoor localization techniques for construction jobsites," *Adv. Eng. Inform.*, 25, 2, 355–363, 2011. doi: 10.1016/j.aei.2010.09.003.
- [31]. T. D. Bui, H. S. Vu, Q. C. Nguyen, M. T. Le, "Smart antenna with circular polarization for high accuracy indoor localization system," *J. Electromagn. Waves Appl.*, 36, 7, 994–1007, 2022. doi: 10.1080/09205071.2021.1997650.
- [32]. H. T. Friis, "A Note on a Simple Transmission Formula," in *Proc. IRE*, 34, 5, 254–256, 1946. doi: 10.1109/JRPROC.1946.234568.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Tri¹, Bui Thi Duyen², Nguyen Ngoc Trung³

¹Institute of Military Automation Engineering, Academy of Military Science and Technology, Vietnam

²Faculty of Control and Automation, Electric Power University, Vietnam

³Head of Department of Personnel and Organization, Electric Power University, Vietnam