

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

Dương Ngọc Sơn

**CÁC THUẬT TOÁN ĐỊNH VỊ KHÔNG DÂY CHO CÁC DỊCH VỤ
DỰA TRÊN VỊ TRÍ**

Ngành đào tạo: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số: 9520208

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

Hà Nội – 2025

Công trình được hoàn thành tại: Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học: PSG.TS. Đinh Thị Thái Mai (CBHD chính) và PSG.TS. Lâm Sinh Công (CBHD phụ)

Phản biện: PGS.TS. Hoàng Mạnh Kha

.....

Phản biện: PGS.TS. Lê Nhật Thăng

.....

Phản biện: PGS.TS. Lê Minh Thùy

.....

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng cấp Đại học Quốc gia chấm luận án tiến sĩ họp tại Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

vào hồi giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Thông tin - Thư viện, Đại học Quốc gia Hà Nội

Chương 1

Giới thiệu luận án

1.1 Động lực nghiên cứu

Một số hệ thống định vị phổ biến, ví dụ như GPS, hoạt động tốt trong môi trường ngoài trời ít vật cản nhưng phải đối mặt với những thách thức đáng kể với môi trường trong nhà và môi trường ngoài trời có nhiều vật cản do sự suy giảm tín hiệu và hiệu ứng đa đường. Vì vậy, việc tìm kiếm các giải pháp định vị cho hai loại môi trường này là hết sức cần thiết.

1.2 Các nghiên cứu liên quan

1.3 Vấn đề nghiên cứu

Vấn đề nghiên cứu là tìm ra các thuật toán hoặc phương pháp định vị hoặc hỗ trợ định vị cho môi trường không có GPS, bao gồm định vị trong nhà và định vị ngoài trời. Mục tiêu hướng đến của các thuật toán hoặc phương pháp là tính thực nghiệm.

- Định vị trong nhà với phép đo RSS
- Định vị ngoài trời với phép đo TOA, AOD và AOA

1.4 Đóng góp của luận án

Đóng góp của luận án là các giải pháp làm cho định vị liên mạch trở thành hiện thực. Nó có thể chia thành 2 đóng góp chính:

1. Các thuật toán định vị trong nhà sử dụng đèn hiệu BLE

- Một chiến lược đặt đèn hiệu hỗ trợ hệ thống định vị trong nhà sử dụng cảm biến điện thoại di động và RSS từ đèn hiệu BLE.
 - Một hệ thống định vị trong nhà sử dụng đèn hiệu BLE giúp cân bằng được ưu và nhược điểm của các phương pháp tiếp cận: sử dụng khoảng cách và không sử dụng khoảng cách.
2. Các thuật toán ước lượng kênh hỗ trợ định vị ngoài trời trong dụng hệ thống MIMO mmWave
- 01 phương pháp ước lượng kênh thô dựa trên thuật toán OMP không xem xét sự ảnh hưởng lẫn nhau giữa các đường dẫn.
 - 01 phương pháp ước lượng kênh thô dựa trên thuật toán StOMP không xem xét sự ảnh hưởng lẫn nhau giữa các đường dẫn.
 - 01 phương pháp ước lượng kênh thô dựa trên thuật toán OMP có xem xét sự ảnh hưởng lẫn nhau giữa các đường dẫn.
 - 01 phương pháp tinh chỉnh các tham số thô

Chương 2

Nền tảng cơ bản

2.1 Các công nghệ định vị không dây

2.1.1 Wi-fi

Một trong những ưu điểm chính của công nghệ Wi-Fi là các điểm truy cập Wi-Fi được triển khai ở khắp mọi nơi trong các tòa nhà. Phương pháp sử dụng bản đồ cường độ tín hiệu (FP) được coi là phương pháp hiệu quả nhất để xác định vị trí của một đối tượng trong môi trường trong nhà.

2.1.2 Bluetooth năng lượng thấp (BLE)

Nó có những tính năng độc đáo mà không công nghệ nào có thể cung cấp cho việc định vị trong nhà, chẳng hạn như kích thước nhỏ, hiệu suất năng lượng cao, chi phí thấp và ít bị ảnh hưởng bởi nhiễu. Với iBeacon, người ta có thể sử dụng RSS để xác định vị trí người dùng thông qua cả hai phương pháp dựa trên và không dựa trên khoảng cách (FP).

2.1.3 Ultra Wideband (UWB)

Băng siêu rộng (UWB), nằm trong chuẩn IEEE 802.15.6, là một công nghệ không dây giúp truyền dữ liệu theo từng khối (burst) trong thời gian cực ngắn. Nó hoạt động trong dải tần số từ 3.1 GHz đến 10.6 GHz với băng thông rộng (trên 500 MHz). UWB được thiết kế để truyền dữ liệu trong phạm vi ngắn và tiêu thụ điện năng thấp. Những đặc điểm này làm cho UWB phù hợp cho việc định vị và theo dõi đối tượng trong khoảng cách ngắn.

2.1.4 Sóng mi-li-mét trong hệ thống mạng 5G (mmWave)

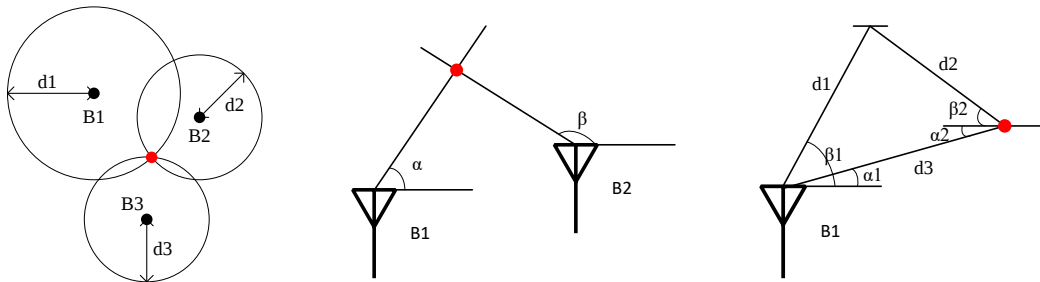
Phân băng thông rộng của dải sóng mmWave cho phép khoảng thời gian giữa 2 lần lấy mẫu ngắn, từ đó giúp cải thiện độ chính xác của các phép đo khoảng cách dựa vào thời gian truyền giữa máy thu và máy phát. Kết hợp với hệ thống ăng-ten nhiều phần tử, hệ thống MIMO mmWave có thể tạo ra những búp sóng có độ rộng rất nhỏ, từ đó nâng cao độ chính xác cho các phép đo góc.

2.2 Các phép đo của hệ thống định vị không dây

Vị trí của một nút mục tiêu (máy thu) có thể được xác định bằng cách sử dụng tín hiệu phát ra từ các nút tham chiếu (máy phát) có vị trí biết trước.

Phép đo	Thông tin	Ưu điểm	Nhược điểm
TOA	Khoảng cách	- Độ chính xác cao	- Hoạt động kém trong môi trường NLOS - Yêu cầu đồng bộ đồng hồ giữa máy thu và máy phát
TDOA	Khoảng cách	- Độ chính xác cao - Chỉ yêu cầu đồng bộ giữa các nút tham chiếu	- Hoạt động kém trong môi trường NLOS
DOA	Góc	- Yêu cầu ít nút tham chiếu - Không yêu cầu đồng bộ	- Độ chính xác trung bình
RSS	Khoảng cách	- Đơn giản - Không yêu cầu đồng bộ	- Cần mảng ăng-ten thông minh - Hoạt động kém trong môi trường NLOS

Bảng 2.1: So sánh các phép đo được sử dụng phổ biến trong bài toán định vị



Hình 2.1: Từ trái qua phải: Kỹ thuật sử dụng khoảng cách, kỹ thuật sử dụng góc, kỹ thuật sử dụng kết hợp thời gian và góc.

2.2.1 TOA

TOA là khoảng thời gian tín hiệu đi từ nút tham chiếu tới nút mục tiêu. Để có được thông tin TOA chính xác, nút mục tiêu và nút tham chiếu phải được đồng bộ chính xác về mốc thời gian. Người ta sẽ không cần đồng bộ nếu sử dụng phép đo TOA 2 chiều, tức RTT (Round Trip Time).

2.2.2 TDOA

Lấy TOA của một nút tham chiếu đến nút mục tiêu làm tham chiếu, TDOA là phép đo sự khác biệt về thời gian đến của những nguồn tham chiếu còn lại với TOA này. Như vậy, để hệ thống hoạt động chính xác, người ra chỉ cần đồng bộ mốc thời gian giữa các điểm tham chiếu với nhau. Điều này làm cho hệ thống sử dụng TDOA có tính thực nghiệm cao hơn TOA vì việc đồng bộ giữa các nút tham chiếu là dễ dàng hơn đồng bộ giữa nút tham chiếu và nút mục tiêu.

2.2.3 RSS

RSS là phép đo năng lượng của tín hiệu quan sát được trên nút đích, phụ thuộc vào khoảng cách tới nút tham chiếu và suy hao theo hàm mũ.

2.2.4 DOA

DOA là góc tới của tín hiệu quan sát tại nút mục tiêu. Từ 2 nút tham chiếu, chúng ta có thể vẽ ra 2 đường thẳng, mỗi đường thẳng đi qua 1 nút tham chiếu với góc tương ứng quan sát được trên nút mục tiêu. Vị trí giao nhau của 2 đường thẳng chính là vị trí ước lượng của nút mục tiêu. Mặc dù hệ thống sử dụng DOA không yêu cầu đồng bộ về mặt thời gian nhưng các thiết bị trong hệ thống này phải trang bị ăng-ten thông minh để ước lượng góc đến của các nguồn tín hiệu.

2.3 Các thuật toán định vị phổ biến

Về cơ bản, các phương pháp định vị có thể chia thành hai loại là định vị có tham số (parametric) và định vị không tham số (non-parametric). Định vị có tham số sử dụng các phép đo thời gian truyền của tín hiệu (TOA, TDOA) và góc của tín hiệu (AOD, AOA) để tính ra vị trí người dùng thông qua các thuật toán định vị tuyến tính (Linear Least Square) hoặc phi tuyến tính (Non-Linear Least Square, Newton-Raphson, Maximum Likelihood, v.v). Định vị không tham số cố gắng ước lượng trực tiếp vị trí người dùng thông qua việc khớp tín hiệu hiện tại với một bản đồ vô tuyến được đo đạc trước đó

Chương 3

Định vị với phép đo RSS trong hệ thống định vị trong nhà sử dụng Bluetooth

3.1 Phép đo RSS

3.1.1 Cường độ tín hiệu (RSS)

RSS là một trong những phép đo có tính ứng dụng nhất cho hệ thống định vị [?]. Theo cách đầy đủ nhất, RSS được mô hình hóa theo mô hình thời gian - không gian $\rho(t, \mathbf{s})$ thông qua công thức [?]

$$\rho(t, \mathbf{s}) = \mathcal{F}(P_{\mathbf{rx}}(t, \mathbf{s})), \quad (3.1)$$

trong đó $\mathbf{s} \subset \mathbb{R}^2$ là một khu vực trong không gian 2 chiều, $P_{\mathbf{rx}}(t, \mathbf{s})$ là cường độ tín hiệu quan sát được trên máy thu và $\mathcal{F}(\cdot)$ là một hàm chuyển đổi $P_{\mathbf{rx}}(t, \mathbf{s})$ sang RSS. Để đơn giản, người ta coi $\mathcal{F}(P_{\mathbf{rx}}(t, \mathbf{s})) = P_{\mathbf{rx}}(t, \mathbf{s})$ với

$$P_{\mathbf{rx}}(t, \mathbf{s}) = \Gamma(d) + \Upsilon(\mathbf{s}) + a(t). \quad (3.2)$$

Khi có thống kê đầy đủ, công suất tín hiệu trung bình được tính bởi

$$\bar{P}_{\mathbf{rx}}(t, \mathbf{s}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T P_{\mathbf{rx}}(t, \mathbf{s}) dt = \Gamma(d) + \Upsilon(\mathbf{s}). \quad (3.3)$$

Điều này ngụ ý rằng thành phần pha-đỉnh nhanh có thể được loại bỏ thông qua các bộ lọc như bộ lọc trung bình hoặc bộ lọc Kalman. Sự không chắc chắn được thể hiện bởi

$$\begin{cases} \mathcal{R}_i = \Gamma_i \pm \sigma_{\mathcal{R},i} \\ \sigma_{\mathcal{R},i} = f(|\Gamma_i|) \end{cases}, \quad (3.4)$$

trong đó, $\mathcal{R} \sim \mathcal{N}(\Gamma, \sigma_{\mathcal{R}}^2)$ biểu diễn cho giá trị RSS tức thời. Γ và $\sigma_{\mathcal{R}}$ lần lượt là giá trị RSS trung bình và độ lệch chuẩn của nó. $f(\cdot)$ là một hàm phụ thuộc vào Γ . Kết quả của μ và σ được tổng hợp trong Bảng 3.1. Sử dụng kết quả có trong Bảng 3.1 và phép hồi quy tuyến tính, luận án thấy rằng có thể

Khoảng cách (m)	Giá trị RSS trung bình (Γ hay μ (dBm))	Độ lệch chuẩn (σ)
1	-60.6125	0.7706
3	-65.9138	1.2096
5	-71.5942	2.181
7	-74.0263	3.2523

Bảng 3.1: RSS trung bình và độ không chắc chắn của nó ở những khoảng cách khác nhau.

sử dụng phương trình

$$\sigma_i = 0.1752|\Gamma_i| - 10.067 \quad (3.5)$$

để tính toán độ tin cậy của một giá trị RSS.

3.1.2 Chuyển đổi từ RSS sang khoảng cách.

Mô hình chuyển đổi từ RSS sang khoảng cách được mô tả bằng phương trình tuyến tính ba đoạn như sau

$$\Gamma(d) = \begin{cases} -5.11d - 58.814, & 0 \leq d < 1.63 \\ -2.182d - 63.58, & 1.63 \leq d < 4.05 \\ -0.8d - 69.177, & 4.05 \leq d < 10 \end{cases} \quad (3.6)$$

Từ kết quả này, một chiến lược thích ứng sẽ được áp dụng cho RSS đầu vào. Các mô hình này được cho bởi Bảng 3.2.

Bảng 3.2: Mô hình tính toán khoảng cách cho mỗi khoảng RSSI.

Khoảng RSS	Mô hình chuyển đổi từ RSS sang khoảng cách
-67.13 to -60	$\Gamma = -5.11d - 58.814$
-72.42 to -67.13	$\Gamma = -2.182d - 63.58$
-80 to -72.42	$\Gamma = -0.8d - 69.177$

3.2 Định vị trong nhà với cách triển khai đèn hiệu BLE và chiến lược hiệu chỉnh vị trí cho các loại môi trường trong nhà khác nhau

3.2.1 Chiến lược đặt đèn hiệu đề xuất

Trong chương này, bằng chứng minh hình học, luận án xác định được chiến lược triển khai tốt nhất là triển khai theo hình dạng tam giác đều với khoảng cách giữa 2 beacon liên kế là $3\sqrt{3}$ m.

3.2.2 Kết quả và thảo luận

3.2.2.1 Đánh giá độ chính xác của hệ thống

Sai số trung bình của PDR, LS đề xuất và vị trí tổng hợp lần lượt là 1,23 m, 0,98 m và 0,8 m. Sự kết hợp của LS và PDR được thực hiện 350 lần trên toàn bộ quãng đường di chuyển, bao gồm 704 bước và giúp cải thiện độ chính xác thêm 18,37%.

3.2.2.2 Hiệu năng của hệ thống khi thay đổi số đèn hiệu.

Độ chính xác định vị tăng lên khi số lượng đèn hiệu tăng lên. Hệ thống có độ chính xác cao nhất là 0,75 m với 11 đèn hiệu và thấp nhất là 1,1 m với 7 đèn hiệu BLE. Điều này xảy ra vì càng có nhiều đèn hiệu, luận án càng có được nhiều điểm khắc phục. Luận án cũng nhận thấy rằng sự thay đổi về độ chính xác giữa các trường hợp là không đáng kể khi số lượng đèn hiệu tăng lên. Điều này cho thấy rằng thuật toán có thể có một hệ thống rẽ tiền với độ chính xác gần như tương đương.

3.3 Xem xét sự hỗ trợ của học máy trong vấn đề định vị trong nhà

3.3.1 Hệ thống đề xuất

Trong chương này, luận án đề xuất một giải pháp định vị trong nhà sử dụng công nghệ BLE với phép đo RSS. Các thành phần trong hệ thống bao gồm Hệ thống con sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo đa lớp như một chiến lược lựa chọn đèn hiệu. Hệ thống con sử dụng LS có trọng số cải tiến.

3.3.1.1 Hệ thống con sử dụng mạng nơ-ron nhân tạo đa lớp.

Chức năng của mạng này là phân loại xem dữ liệu mới quan sát được thuộc vào khu vực con nào, nói cách khác, xác định vị trí thô của người dùng trong không gian hai chiều.

3.3.1.2 Chiến lược chọn đèn hiệu BLE tin cậy

Đầu tiên, các mạng ANN-MLP cung cấp mô hình để ước lượng khu vực thô mà nút đích đang thuộc về. Sau đó, kiến thức về khu vực thô hiện tại sẽ chỉ ra đâu là đèn hiệu BLE ở gần khu vực đó. Tất nhiên, thông tin này phải được cung cấp trước và được lưu trong cơ sở dữ liệu.

3.3.1.3 Hệ thống con sử dụng LS

Ước tính có trọng số của $\mathbf{x}_{LS}$ có thể được biểu diễn bởi

$$\mathbf{x}_{WLS} = (\mathbf{A}^\top \mathbf{S}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^\top \mathbf{S}^{-1} \mathbf{b} \quad (3.7)$$

Ma trận trọng số $\mathbf{S}$ là

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \sigma_{d_1}^2 + \sigma_{d_2}^2 & \sigma_{d_1}^2 & \cdots & \sigma_{d_1}^2 \\ \sigma_{d_1}^2 & \sigma_{d_1}^2 + \sigma_{d_3}^2 & \cdots & \sigma_{d_1}^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{d_1}^2 & \sigma_{d_1}^2 & \cdots & \sigma_{d_1}^2 + \sigma_{d_N}^2 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Các giá trị $\sigma_{d_i}^2$ của ma trận hiệp phương sai $\mathbf{S}$ sau đó có thể được tính bởi

$$\sigma_{d_i}^2 = \mathbb{E}(d_i^4) - (\mathbb{E}(d_i^2))^2 \quad (3.9)$$

3.3.2 Kết quả và thảo luận

3.3.2.1 Khả năng xác định khu vực con chỉ sử dụng mạng NN

Kết quả cho thấy hầu hết các khu vực con đều được nhận dạng với tỉ lệ thành công cao (xác suất trên 86%). Ngoại lệ chỉ xảy ra với khu vực con thứ hai khi mà ô này chỉ có xác suất nhận dạng chính xác là 51,5%. Tuy nhiên, khi nhìn vào sự khác biệt giữa nó và khu vực bị nhầm lẫn, chúng ta có thể thấy đây là điều chấp nhận được vì nó chỉ bị nhầm lẫn với các ô ở cạnh (ô thứ nhất và ô thứ ba), tức có sai số không đáng kể. Độ chính xác trung bình của nhãn bằng 89,52%. 10% lỗi có thể được giải thích bởi nhiễu có trong môi trường, bao gồm ảnh hưởng của các thiết bị không dây và sự hiện diện của người đi lại quanh khu vực thí nghiệm.

3.3.2.2 Ước lượng tình không sử dụng hỗ trợ của mạng NN

Trong phần này, độ chính xác của phương pháp đề xuất được so sánh với các phương pháp ước lượng cổ điển không sử dụng NN. Các phương pháp dùng để so sánh bao gồm LS và LS có trọng số thông thường, viết tắt là CWLS. Kết quả cho thấy rằng độ chính xác của 3 phương pháp là tương đương

nhau với sai số trung bình khoảng 1.35 m. Sai số lần lượt của phương pháp đề xuất, C-WLS và LS là 1.24, 1.39 và 1.44. Như vậy, phương pháp đề xuất làm tốt hơn 14% so với C-WLS và 10% so với C-WLS về mặt lý thuyết. Nhìn chung, các phương pháp đều cho kết quả gần như giống nhau, tức có sai số dưới 4 m với xác suất 90 %. Trong số 3 phương pháp, LS cho độ chính xác thấp nhất với sai số trung bình khoảng 2.2 m. Điều đáng chú ý là CWLS và phương pháp WLS đề xuất có độ chính xác gần như giống nhau với sai số trung bình khoảng 2 m.

3.3.2.3 Ước lượng tình sử dụng NN

Kết quả cho thấy ước tính hầu như tập trung vào các ô mà chúng thuộc về. Phương pháp WLS đề xuất vượt trội hơn cả LS và CWLS ở 5 chỉ số đánh giá, với mức trung bình cải thiện là 32%. Điều này cũng dễ hiểu vì phương pháp NN và WLS được đề xuất sẽ loại bỏ các báo hiệu ở xa và đồng thời tận dụng được toàn bộ thông tin, bao gồm cả giá trị trung bình và phương sai của RSS, thay vì chỉ sử dụng khoảng cách trung bình như CWLS.

Chương 4

Định vị với các phép đo TOA, AOA, AOD trong hệ thống mmWave MIMO

4.1 Giới thiệu

Với sự tiến bộ trong công nghệ truyền thông không dây, bài toán xác định vị trí mục tiêu trong mạng di động đã thu hút được sự chú ý đáng kể, đặc biệt kể từ khi hệ thống 4G ra đời với những loại hình dịch vụ mới, ví dụ như thực tế tăng cường, trò chơi dựa trên vị trí, chăm sóc sức khỏe và quảng cáo dựa trên vị trí. Với thế hệ mạng di động tiếp theo (5G và sau 5G), chúng ta đang ngày càng thấy dần dịch vụ dựa trên vị trí đã tự khẳng định mình là một phần không thể thiếu trong mạng di động.

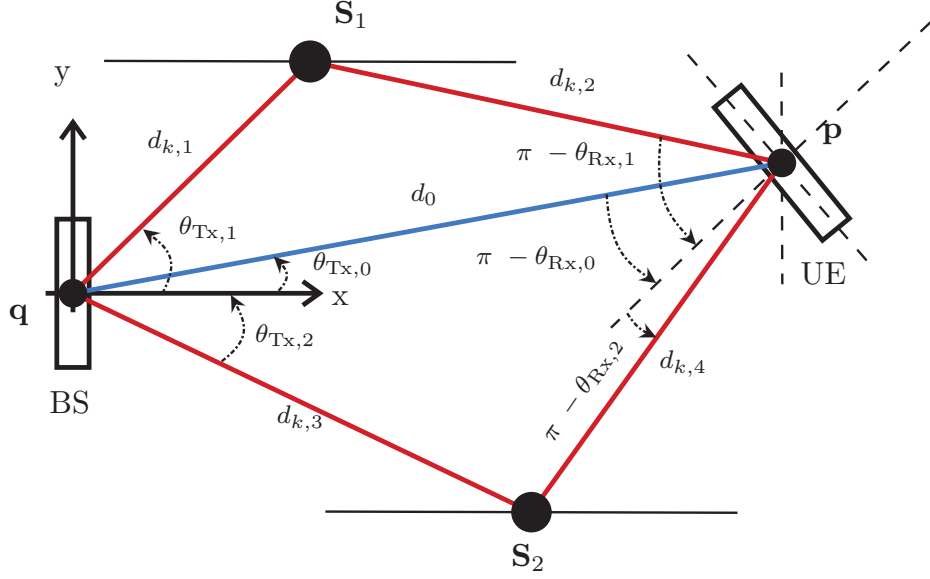
4.2 Định vị dựa trên các tham số kênh MIMO mmWave

4.2.1 Mô hình kênh MIMO mmWave

Luận án xem xét mô hình kênh truyền hoạt động trên N sóng mang con. Kênh giữa trạm gốc (BS) và thiết bị người dùng (UE) là kênh đa đường, có thể được biểu diễn bằng mô hình Saleh-Valenzuela với K đường dẫn. Mô hình hình học của kênh trong không gian 2 chiều được minh họa bởi Hình 4.1.

4.3 Các thuật toán ước lượng thưa họ OMP truyền thống

Để trích xuất các tham số định vị, người ta phải ước tính một vectơ kênh thưa $\mathbf{h}$ trong hệ thống $\mathbf{y} = \mathbf{\Omega}\mathbf{h} + \mathbf{n}$, trong đó $\mathbf{\Omega}$ và $\mathbf{y}$ là những đại lượng đã biết, đại diện cho ma trận cảm nhận và tín hiệu



Hình 4.1: Mô hình hình học bao gồm ba đường dẫn, một đường LOS (màu xanh) và hai đường NLOS (màu đỏ).

nhận được. Bài toán ước lượng thưa được cho bởi

$$\hat{\mathbf{h}} = \min_{\mathbf{h}} \|\mathbf{h}\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \|\mathbf{y} - \mathbf{\Omega}\mathbf{h}\|_2^2 < \epsilon, \quad (4.1)$$

trong đó ϵ là sai số dừng. Đây được coi là bài toán ngược và có thể giải quyết bằng các phương pháp ước lượng thưa họ OMP.

4.3.1 Thuật toán OMP

Thuật toán OMP được tóm tắt bằng Thuật toán 1.

4.3.2 Thuật toán StOMP

Thuật toán StOMP được tóm tắt bằng Thuật toán 2.

Algorithm 1: Thuật toán OMP

Đầu vào: Tín hiệu nhận được: $\mathbf{y}$,

Ma trận cảm nhận: $\mathbf{\Omega} = [\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \dots, \boldsymbol{\omega}_M]$,

Độ thưa tín hiệu: S và Sai số dừng: ϵ .

Khởi tạo: Biến đếm $k = 0$, Tập hỗ trợ $I_s = \emptyset$, phần dư $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$

```
1 while  $\|\mathbf{r}_k\|_2 \geq \epsilon$  hoặc  $k \leq S$  do
2     1.  $k = k + 1$ ;
3     2. Chọn cột sao cho:  $j = \arg \max_j |\langle \mathbf{r}_{k-1}, \boldsymbol{\Omega}_j \rangle|$ ;
4     3. Cập nhật chỉ số  $I_s = I_{s-1} \cup j$ ;
5     4. Cập nhật tập hỗ trợ  $\mathbf{\Omega}_{I_s} = \{\boldsymbol{\Omega}_i\}_{i \in I_s}$ ;
6     5. Ước lượng LS:  $\mathbf{h}_s = (\mathbf{\Omega}_{I_s}^T \mathbf{\Omega}_{I_s})^{-1} (\mathbf{\Omega}_{I_s}^T \mathbf{y})$ ;
7     6. Cập nhật phần dư:  $\mathbf{r}_s = \mathbf{y} - \mathbf{\Omega}_{I_s} \mathbf{h}_s$ ;
8 end
```

Đầu ra : $I_s, \mathbf{h}_s$.

4.4 Phương pháp ước lượng thô không xét đến tương quan giữa các đường dẫn: Cách tiếp cận dựa trên thuật toán StOMP phân tán

4.4.1 Phương pháp đề xuất

4.4.1.1 Thuật toán StOMP phân tán

Trong chương này, luận án chỉnh sửa thuật toán StOMP để nó trở nên phù hợp trong bài toán phân tán, gọi là DStOMP.

4.4.1.2 Thuật toán xác định độ thưa của tín hiệu

Sau DStOMP, luận án thu được một tập hợp là các hỗ trợ với số lượng các hỗ trợ thường lớn hơn độ thưa của kênh truyền. Tác giả đề xuất một phương pháp để loại bỏ các hỗ trợ không cần thiết theo Thuật toán sau.

4.4.2 Kết quả và thảo luận

SOMP vượt trội hơn phương pháp đề xuất ở phạm vi SNR thấp (-10 đến 0 dB) vì SOMP là phương pháp đòi hỏi kiến thức trước về độ thưa thớt tín hiệu, đây là một lợi thế về mặt thông tin so với

Algorithm 2: Thuật toán StOMP

- 1 **Đầu vào:** $\mathbf{y}$, $\mathbf{\Omega}$, số vòng lặp K , ϵ .
- 2 **Khởi tạo:** bộ đếm vòng lặp $k = 1$, tập hỗ trợ $I_k = \emptyset$, phần dư $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$
- 3 **Vòng lặp chính:** Lặp đến khi $\|\mathbf{r}_k\|_2 \leq \epsilon$ hoặc $k = K$
 1. Chuẩn hóa ma trận sensing: $\mathbf{\Omega}_i = \frac{\mathbf{\Omega}_i}{\|\mathbf{\Omega}_i\|_2}$ với $\mathbf{\Omega}_i$ là cột thứ i của $\mathbf{\Omega}$
 2. Tính tương quan: $c_k = \mathbf{\Omega}^T \mathbf{r}_{s-1}$
 3. Chọn cột lớn hơn ngưỡng cho trước: $J_k = \{j : |c_k(j)| > t_k \sigma_k\}$
 4. Cập nhật tập hỗ trợ: $I_k = I_{k-1} \cup J_k$
 5. Áp dụng LS cho các cột vừa tìm được: $\hat{\mathbf{h}} = \left(\mathbf{\Omega}_{I_k}^T \mathbf{\Omega}_{I_k} \right)^{-1} \mathbf{\Omega}_{I_k}^T \mathbf{y}$
 6. Cập nhật phần dư: $\mathbf{r}_k = \mathbf{r}_{s-1} - \mathbf{\Omega}_{I_k} \hat{\mathbf{h}}$
 7. Cập nhật bộ đếm vòng lặp: $k = k + 1$

Đầu ra: tập hỗ trợ I_k , độ lợi kênh $\hat{h}$.

phương pháp được đề xuất.

4.5 Phương pháp ước lượng thô có xét đến tương quan giữa các đường dẫn

4.5.1 Phương pháp đề xuất

Kết quả của OMP truyền thống khi tính toán độ tương quan giữa các cột trong ma trận cảm nhận và phần dư là sự chồng chất của nhiều đường dẫn. Do đó, chúng ta cần phân tách sự đóng góp của mỗi đường dẫn ra từ tín hiệu quan sát được. Thuật toán 5 giúp giải quyết vấn đề này

4.5.2 Kết quả và thảo luận

4.5.2.1 PSR dưới điều kiện giá trị liên kết tương hỗ nhỏ

Quan sát được xu hướng giảm chung về PSR đối với cả hai phương pháp OMP khi tăng số lượng góc ảo. Mặc dù tăng số lượng góc ảo có thể làm giảm sai số lượng tử hóa nhưng nó gián tiếp làm tăng giá trị μ - một điều không mong muốn đối với ma trận cảm nhận trong bài toán ước lượng thưa. Hơn

Algorithm 3: Các sử dụng phương pháp Silhouette đề xuất cho thuật toán DStOMP.

Input: Các hỗ trợ với tọa độ của chúng: $\mathbf{X}$

Khởi tạo: Biến đếm (số cụm dùng để thử): $k = 2$, Số lượng cụm tối đa cần kiểm tra: K , Độ rộng thùy chính trong miền góc (Giả sử $G_t = G_r$): r .

```
1 for  $k = 2 \rightarrow K$  do
2   1. Thực hiện thuật toán phân cụm k-means:  $[\mathbf{i}, \mathbf{C}] = \text{kmeans}(\mathbf{X}, k)$ ;
3   Kiểm tra bán kính của mỗi cụm
4   for  $j = 1 \rightarrow k$  do
5     2. Trích xuất các hỗ trợ thuộc cụm thứ  $j$ -th:  $\mathbf{p} = \mathbf{X}(j == \mathbf{i}, :)$ ;
6     3. Tính toán khoảng cách từ các điểm dữ liệu tới tâm cụm:  $\mathbf{d} = \|\mathbf{p} - \mathbf{C}(j, :)\|_2^2$ ;
7     if  $\max(\mathbf{d}) > r$  then
8       4. Tăng số lượng cụm lên 1:  $k = k + 1$ ;
9       5. Thực hiện thuật toán phân cụm k-means với giá trị  $k$  mới:  $[\mathbf{i}, \mathbf{C}] = \text{kmeans}(\mathbf{X}, k)$ ;
10      break;
11    end
12  end
13  6. Tính toán giá trị silhouette:  $\mathbf{s} = \text{silhouette}(\mathbf{X}, \mathbf{i})$ ;
14  7. Tính toán giá trị silhouette trung bình:  $\mathbf{c}(k - 1) = \text{mean}(\mathbf{s})$ ;
15 end
16 8. Tìm ra số lượng cụm tối ưu (tương với giá trị silhouette lớn nhất):  $[:, \hat{k}] = \max(\mathbf{c})$ ;
17 9. Tìm các hỗ trợ thỏa mãn các điều kiện ràng buộc nhất định;
18 10. Thực hiện LS để ước lượng lại độ lợi kênh cho các hỗ trợ tìm được ở bước trước đó;
```

Đầu ra : Kênh ước lượng được.

Algorithm 4: Phương pháp OMP có xem xét ảnh hưởng giữa các đường dẫn

Đầu vào: Tín hiệu nhận được: $\mathbf{y}$,

Ma trận cảm nhận: $\mathbf{\Omega} = [\boldsymbol{\omega}_1, \boldsymbol{\omega}_2, \dots, \boldsymbol{\omega}_{G_t G_r}]$,

Độ thưa: L và Sai số dừng: ϵ .

Khởi tạo: Biến đếm $t = 0$, tập hỗ trợ $I_s = \emptyset$, phần dư $\mathbf{r}_0 = \mathbf{y}$

1 1. Tính độ tương quan giữa các cột của $\mathbf{\Omega}$ và tín hiệu nhận được: $\mathcal{C}_k = |\langle \boldsymbol{\omega}_k, \mathbf{y} \rangle|$;

2 2. Ước lượng chỉ số của AOA thông qua (??) với điều kiện kèm theo:

$$[\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_L] = \max(\mathbf{v}, L);$$

3 3. Tạo ra tập hợp chứa các chỉ số của các hỗ trợ tiềm năng: $\mathcal{S} = [\mathcal{S}_{\theta_1}, \mathcal{S}_{\theta_2}, \dots, \mathcal{S}_{\theta_L}]$;

4 **while** $\|\mathbf{r}_k\|_2 \geq \epsilon$ **or** $t \leq L$ **do**

5 4. $t = t + 1$;

6 5. Tính toán độ tương quan giữa các cột của ma trận cảm nhận trong $\mathbf{\Omega}$ và phần dư:

$$\mathcal{C}_k = |\langle \boldsymbol{\omega}_k, \mathbf{r} \rangle|;$$

7 6. Thực hiện phân tách các thành phần con theo mỗi cụm G_t giá trị $\mathcal{C}_k$ sử dụng (??) và xây dựng $\tilde{\mathcal{C}}_k$;

8 7. Chọn cột : $k = \arg \max_k \tilde{\mathcal{C}}_k$ với $k \in \mathcal{S}_{\theta_i}$;

9 8. Cập nhật danh sách hỗ trợ tiềm năng: $\mathcal{S} = \mathcal{S} \setminus \mathcal{S}_{\theta_i}$;

10 9. Cập nhật tập hỗ trợ $I_s = I_s \cup k$;

11 10. Ước lượng độ lợi kênh: $\mathbf{h}_s = (\mathbf{\Omega}_{I_s}^H \mathbf{\Omega}_{I_s})^{-1} (\mathbf{\Omega}_{I_s}^H \mathbf{y})$;

12 11. Trừ đóng góp của hỗ trợ tìm được ra khỏi tín hiệu: $\mathbf{r}_s = \mathbf{y} - \mathbf{\Omega}_{I_s} \mathbf{h}_s$;

13 **end**

Đầu ra : $I_s, \mathbf{h}_s$.

nữa, việc tăng số lượng góc ảo còn làm cho kích thước của bài toán trở nên lớn hơn, gây tốn nhiều tài nguyên tính toán hơn. Về xác suất xác định đúng tập hỗ trợ (PSR), phương pháp đề xuất có hiệu năng tốt hơn phương pháp OMP truyền thống. Sự cải thiện này cũng thay đổi tùy vào số lượng góc ảo và mức SNR. Trong trường hợp $G_r = 2N_r$, thuật toán OMP đề xuất có độ chính xác PSR cao hơn OMP truyền thống ở dải SNR thấp (từ -10 đến 5 dB) và cùng độ chính xác PSR với phương pháp này ở dải SNR cao (từ 5 đến 20dB). Về mặt trực quan, sự cải thiện này là không đáng kể, nhưng nó có ý nghĩa về mặt thực nghiệm vì SNR của kênh mmWave không phải lúc nào cũng cao vì tính chất của mmWave là suy hao mạnh. Sự khác biệt giữa hai phương pháp có thể được quan sát rõ ràng hơn trong trường hợp $G_r = 4N_r$. Tùy thuộc vào mức SNR, thuật toán OMP đề xuất cho mức độ cải thiện khác nhau, từ 10% đến 25% so với OMP truyền thống.

4.5.2.2 PSR dưới điều kiện thay đổi về chỉ số liên kết tương hỗ

Về tổng thể, độ chính xác về PSR của cả hai phương pháp đều giảm khi giá trị liên kết tương hỗ tăng. Với trường hợp $G_r = 4N_r$, độ chính xác PSR của cả hai phương pháp đều kém hơn trường hợp có $G_r = 2N_r$ vì chúng có chung ràng buộc về năng lượng, nhưng trường hợp thứ hai có số lượng góc ảo lớn hơn, hay μ lớn hơn. Trong kịch bản đầu tiên, sự cải thiện giữa phương pháp OMP đề xuất và OMP truyền thống dần thu hẹp khi μ tăng lên. Sự cải thiện về mặt PSR của phương pháp OMP đề xuất thậm chí còn biến mất ở mức μ cao nhất tại các ngưỡng SNR cao. Trong kịch bản thứ hai, mặc dù xu hướng này vẫn xảy ra, giống như kịch bản thứ nhất, khi SNR tăng lên, chúng ta vẫn có thể thấy sự cải thiện của phương pháp đề xuất. Ở mức 5 dB, mức cải thiện giảm dần từ 22% xuống 10% và cuối cùng là 4% tương ứng với giá trị liên kết tương hỗ thấp, trung bình và cao. Từ các kết quả trên, luận án kết luận rằng phương pháp đề xuất mạnh hơn OMP tiêu chuẩn trong trường hợp ma trận cảm biến có độ kết hợp lẫn nhau ở mức thấp và trung bình. Cải tiến này đặc biệt hữu ích trong các tình huống có nhiều hạn chế về đường truyền thẳng.

4.5.2.3 Đánh giá MSE của các phương pháp đề xuất

Nhìn chung, phương pháp OMP đề xuất vượt trội hơn OMP thông thường trong cả hai trường hợp của G_r . Ngoài ra, MSE của tất cả các mô phỏng có xu hướng bão hòa khi SNR tăng trong khoảng từ 10 đến 20 dB.

4.6 Phương pháp ước lượng tinh

4.6.1 Phương pháp đề xuất

Gọi $\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_0, \boldsymbol{\eta}_1, \dots, \boldsymbol{\eta}_{K-1}]^\top$ là tập hợp chứa tất cả các tham số của các đường dẫn và gọi $\hat{\boldsymbol{\eta}}^{(i)}$ là ước lượng của $\boldsymbol{\eta}$ tại bước ước lượng thứ i . Hàm mất mát theo đường dẫn thứ k có dạng:

$$Q(\boldsymbol{\eta}_k | \hat{\boldsymbol{\eta}}^{(i)}) = \|\tilde{\mathbf{y}} - \sum_{l \neq k, l=0}^{K-1} \tilde{\boldsymbol{\Omega}} \hat{\mathbf{h}}_l^{(i)} - \tilde{\boldsymbol{\Omega}} \hat{\mathbf{h}}_k\|_2^2 \quad (4.2)$$

Nhận thấy toàn bộ cơ sở hầu như không thay đổi trong quá trình ước lượng ngoại trừ cơ sở được tạo bởi giá trị AOA và AOD đang được tinh chỉnh nên luận án chỉ sử dụng AOA và AOD tìm được ở mỗi bước để xây dựng cơ sở mới như sau

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}^{(i)}[n] \triangleq \left(\mathbf{u}_{\text{Tx}}^H(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{Tx},k}^{(i)}) \mathbf{F}^{(g)}[n] \mathbf{x}^{(g)}[n] \right)^\top \otimes \mathbf{u}_{\text{Rx}}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{Rx},k}^{(i)}) \quad (4.3)$$

$\mathbf{u}_{\text{Rx}}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{Rx},k}^{(i)})$ được định nghĩa bởi

$$\mathbf{u}_{\text{Rx}}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{Rx},k}^{(i)}) = \left[1, e^{-j\pi \sin(\hat{\theta}_{\text{Rx},k}^{(i)})}, \dots, e^{-j\pi(N-1) \sin(\hat{\theta}_{\text{Rx},k}^{(i)})} \right]^\top \quad (4.4)$$

$\mathbf{u}_{\text{Tx}}(\hat{\boldsymbol{\theta}}_{\text{Tx},k}^{(i)})$ được định nghĩa tương tự bằng cách thay thế Rx bởi Tx. Theo cách này, luận án giảm được kích thước bài toán từ $N_r N_s N \times N_b N_b N$ xuống còn $N_r N_s N \times N$ và dễ dàng ước lượng hệ số kênh, $\hat{\mathbf{h}}_k^{(i)} = [\hat{h}_k^{(i)}[0], \hat{h}_k^{(i)}[1], \dots, \hat{h}_k^{(i)}[N-1]]^\top$, thông qua LS

$$\hat{\mathbf{h}}_k^{(i)} = \left(\left(\boldsymbol{\omega}^{(i)} \right)^H \boldsymbol{\omega}^{(i)} \right)^{-1} \left(\boldsymbol{\omega}^{(i)} \right)^H \left(\tilde{\mathbf{y}} - \sum_{l \neq k, l=0}^K \tilde{\boldsymbol{\omega}} \hat{\mathbf{h}}_l^{(i)} \right). \quad (4.5)$$

Sau đó, luận án cập nhật lại ma trận cảm nhận bằng cách thay thế nguyên tử ở bước khởi tạo bằng nguyên tử có AOA và AOD được hiệu chỉnh và ước lượng lại kênh trực tiếp bằng thuật toán DSC-SOMP. Phương pháp đề xuất được tóm tắt trong Thuật toán 7.

4.6.2 Kết quả và thảo luận

luận án xem xét kênh truyền giữa UE và BS trong không gian 2 chiều bao gồm 1 đường LOS và 1 đường NLOS. Hệ thống sử dụng 10 sóng mang con với tần số trung tâm bằng 60 GHz và băng thông bằng 100 MHz. Số lượng ăng-ten ở cả máy thu và máy phát đều là 32. Vị trí của BS được coi là biết trước với tọa độ bằng $\mathbf{q} = [0, 0]^\top$. Vị trí của điểm phản xạ và UE được coi là không biết trước, lần lượt nằm ở tọa độ $\mathbf{p} = [4, 0]^\top$ và $\mathbf{s} = [2, 2]^\top$. Để đơn giản, số liệu thống kê kênh cho LOS và NLOS là như nhau và độ suy hao chỉ phụ thuộc vào khoảng cách. Phương pháp sử dụng thuật toán Newton

Algorithm 5: Thuật toán tinh chỉnh tham số thô sử dụng tìm kiếm vàng và suy giảm tuần tự cho 2 đường dẫn (1 LOS và 1 NLOS), mỗi đường dẫn gồm 4 tham số

Đầu vào: Chỉ số của đường dẫn: $k = 0 \rightarrow 1$; Chỉ số của tham số: $p = 1 \rightarrow 4$;

Giá trị thô khởi tạo:

$$\hat{\boldsymbol{\eta}}^{(0)} = [\hat{\boldsymbol{\eta}}_0^{(0)}, \hat{\boldsymbol{\eta}}_1^{(0)}]^\top = [\hat{\eta}_{0,p}^{(0)}, \hat{\eta}_{1,p}^{(0)}]^\top = \underbrace{[\hat{\theta}_{\text{Rx},0}^{(0)}, \hat{\theta}_{\text{Tx},0}^{(0)}, \hat{\tau}_0^{(0)}, \hat{h}_0^{(0)}]}_{\text{LOS}}, \underbrace{[\hat{\theta}_{\text{Rx},1}^{(0)}, \hat{\theta}_{\text{Tx},1}^{(0)}, \hat{\tau}_1^{(0)}, \hat{h}_1^{(0)}]}_{\text{NLOS}}]^\top;$$

Tín hiệu nhận được: $\mathbf{y}$; Ma trận cảm nhận: $\tilde{\mathbf{\Omega}}$;

Sai số dừng: ε_p ; Khoảng tìm kiếm: γ_p ;

Tỉ lệ vàng: $\varphi = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$; Số vòng lặp tối đa: M ;

Đầu ra : Tham số được tinh chỉnh: $\hat{\boldsymbol{\eta}}^{(M)}$

```

1  for  $i = 1 \rightarrow M$  do
2      for  $k = 0 \rightarrow 1$  do
3          for  $p = 1 \rightarrow 4$  do
4               $\hat{\eta}_{k,p,1}^{(i)} = \hat{\eta}_{k,p}^{(i)} - \gamma_p$ ;  $\hat{\eta}_{k,p,2}^{(i)} = \hat{\eta}_{k,p}^{(i)} + \gamma_p$ ;  $\Delta_p = |\hat{\eta}_{k,p,1}^{(i)} - \hat{\eta}_{k,p,2}^{(i)}|$ ;
5              while  $\Delta_p > \varepsilon_p$  do
6                   $d_k = \varphi \times (\hat{\eta}_{k,p,2}^{(i)} - \hat{\eta}_{k,p,1}^{(i)})$ ;
7                   $x_{k,p,1} = \hat{\eta}_{k,p,1}^{(i)} + d_p$ ;  $x_{k,p,2} = \hat{\eta}_{k,p,2}^{(i)} - d_p$ ;
8                   $\Delta_p = x_{k,p,1} - x_{k,p,2}$ ;
9                  if  $Q_{k,p}(x_{k,p,1}) > Q_{k,p}(x_{k,p,2})$  then
10                      $\hat{\eta}_{k,p,2}^{(i)} = x_{k,p,1}$ ;
11                 else
12                      $\hat{\eta}_{k,p,1}^{(i)} = x_{k,p,2}$ ;
13                 end
14             end
15              $\hat{\eta}_{k,p}^{(i+1)} = 0.5 \times (x_{k,p,1} + x_{k,p,2})$ ;
16         end
17     end
18 end

```

Algorithm 6: Thuật toán ước lượng tinh đề xuất

Đầu vào: Tín hiệu nhận được: $\mathbf{\check{y}}$; Ma trận cảm nhận: $\check{\mathbf{\Omega}}$; Số vòng lặp tối đa: M , Độ thừa của kênh: K ; Các tham số thô: $\hat{\mathbf{\eta}}^{(0)}$; Kênh thô: $\hat{\mathbf{h}}_k^{(0)}$

Đầu ra : $\hat{\mathbf{\eta}}^{(M+1)}$

```
1  $\hat{\mathbf{H}}^{(0)} = \text{reshape} \left( \hat{\mathbf{h}}^{(0)}, [N_b \times N_b] \right);$ 
2 for  $k = 0 \rightarrow K - 1$  do
3    $[\mathbf{r}_k, \mathbf{c}_k] = \text{find}(|\hat{\mathbf{H}}^{(0)}| \neq 0);$ 
4 end
5 // Tinh chỉnh sử dụng phương pháp tìm kiếm dựa trên tỉ lệ vàng;
6 for  $i = 1, \dots, M$  do
7   Cập nhật tuần tự giá trị:  $\check{\mathbf{y}} - \sum_{l \neq k, l=0}^K \check{\mathbf{\Omega}} \hat{\mathbf{h}}_l^{(i)};$ 
8   for  $k = 0, \dots, K - 1$  do
9      $\hat{\theta}_{\text{Tx},k}^{(i)} = \text{GOLDEN SEARCH}(\hat{\theta}_{\text{Tx},k}^{(i-1)}, \check{\mathbf{\Omega}});$ 
10     $\hat{\theta}_{\text{Rx},k}^{(i)} = \text{GOLDEN SEARCH}(\hat{\theta}_{\text{Rx},k}^{(i-1)}, \check{\mathbf{\Omega}});$ 
11    Xây dựng cơ sở mới sử dụng (4.3);
12    Đánh giá (4.5) để tối thiểu (4.2);
13     $|\hat{h}_k^{(i)}| = \frac{1}{N} |\hat{\mathbf{h}}_k^{(i)}|; \hat{\tau}_k^{(i)} = -\frac{1}{N-1} \left( \angle \left( \hat{\mathbf{h}}_k^{(i)} \right) \right) \times \frac{NT_s}{2\pi};$ 
14   end
15 end
16 // Cập nhật lại ma trận cảm biến với cơ sở mới;
17 for  $k = 0, \dots, K - 1$  do
18    $\mathbf{U}_{\text{Tx}}(:, \mathbf{c}_k) = \mathbf{u}_{\text{Tx}} \left( \hat{\theta}_{\text{Tx},k}^{(M)} \right); \mathbf{U}_{\text{Rx}}(:, \mathbf{r}_k) = \mathbf{u}_{\text{Rx}} \left( \hat{\theta}_{\text{Rx},k}^{(M)} \right);$ 
19 end
20  $\mathbf{\Omega}[n] = \left( \mathbf{U}_{\text{Tx}}^H \mathbf{F}^{(g)}[n] \mathbf{x}^{(g)}[n] \right)^T \otimes \mathbf{U}_{\text{Rx}}; \check{\mathbf{\Omega}} = \text{blkdiag}\{\mathbf{\Omega}[0], \dots, \mathbf{\Omega}[N-1]\};$ 
21 // Ước lượng lại kênh với ma trận cảm nhận mới;
22  $\hat{\mathbf{h}}^{(M+1)} = \text{DCS-SOMP}(\check{\mathbf{y}}, \check{\mathbf{\Omega}}, K);$ 
23 for  $k = 0, \dots, K - 1$  do
24    $|\hat{h}_k^{(M+1)}| = \frac{1}{N} |\hat{\mathbf{h}}_k^{(M+1)}|; \hat{\tau}_k^{(M+1)} = -\frac{1}{N} \left( \angle \left( \hat{\mathbf{h}}_k^{(M+1)} \right) \right) \times \frac{NT_s}{2\pi};$ 
25 end
```

cho bước tinh chỉnh được chọn làm phương pháp tiêu chuẩn. Độ phức tạp và độ chính xác về mặt thuật toán của vị trí và hướng của UE là các tiêu chí dùng để đánh giá hiệu suất của phương pháp đề xuất với phương pháp tiêu chuẩn.

4.6.2.1 Đánh giá về độ chính xác và khả năng hội tụ của các phương pháp

Luận án thấy rằng tất cả các tham số, bất kể phương pháp nào, đều hội tụ về một giá trị nhất định. Cả ba phương pháp đều cho khả năng hội tụ chính xác đối với tham số AOA và AOD. Trong khi đó, TOA của phương pháp đề xuất không hội tụ về giá trị chính xác của nó. Lý do là TOA và độ lợi kênh chỉ được ước tính dựa trên cơ sở không đầy đủ, tức ước lượng chỉ dựa trên $(\hat{\omega}[n])$. Đây chính là điểm khác biệt, giúp thuật toán có độ phức tạp thấp hơn các thuật toán sử dụng cơ sở đầy đủ. Luận án làm được việc này vì kênh truyền trong miền góc được coi là thừa nên cơ sở tương ứng với giá trị khác không của ma trận kênh có thể dùng để xấp xỉ cho toàn bộ hệ thống. Do đó, chỉ có giá trị AOA và AOD là hội tụ tới giá trị chính xác của chúng. Khoảng thời gian hội tụ ổn định của phương pháp đề xuất là sau 6 đến 8 lần lặp. Trong khi đó, các phương pháp chỉ sử dụng tìm kiếm theo tỷ lệ vàng và phương pháp Newton đều hội tụ với tốc độ lần lượt là 10 và 20 lần lặp. Kết quả cho thấy độ chính xác của cả hai chỉ số định vị đều tăng theo SNR. Hai phương pháp sử dụng tìm kiếm theo tỷ lệ vàng có hiệu suất tương tự nhau và gần tương đương với độ chính xác của phương pháp Newton.

Chương 5

Kết luận và hướng nghiên cứu trong tương lai

5.1 Kết luận

Trong luận án đã đề xuất các thuật toán định vị hoặc hỗ trợ định vị cho các hệ thống định vị cục bộ. Từ các thuật toán cơ bản, luận án đã phát triển chúng theo hướng có thể giải quyết các vấn đề còn tồn tại trong các hệ thống định vị. Các thuật toán đề xuất, qua mô phỏng hoặc thí nghiệm thực tế, đều chứng minh được tính hiệu quả của chúng. Các thuật toán này đều có tính thực nghiệm cao, giúp hiện thực hóa định vị liên mạch và là nền tảng để phát triển các dịch vụ dựa trên vị trí như dẫn đường, theo dõi sức khỏe, giao thông thông minh, tiếp thị, v.v.

5.2 Hướng phát triển tương lai

1. Đối với RSS: Khi các thuật toán định vị đã được nghiên cứu rất kỹ lưỡng, quy hoạch đèn hiệu là một trong những công việc còn lại giúp hệ thống định vị đạt độ chính xác cao đồng thời giảm được chi phí triển khai. Do mối quan hệ phức tạp giữa vị trí của các đèn hiệu và chất lượng của thuật toán định vị nên việc phân tích hiệu năng chung của hệ định vị dựa trên cấu hình không gian của các đèn hiệu cho một thuật toán cụ thể là một vấn đề khó khăn. Vì vậy, các kỹ thuật học máy sẽ trở nên hữu ích trong những tình huống này.
2. Đối với các phương pháp ước lượng tham số kênh hỗ trợ định vị:
 - Các bài toán ước lượng kênh họ OMP được coi là những thuật toán tối ưu không lỗi. Mặc dù đơn giản nhưng chúng có độ phức tạp tương đối cao khi số lượng phần tử ở mỗi bên thu

và phát tăng lên. Để giải quyết vấn đề này, luận án cần xem xét thêm các phương pháp ước lượng thưa dành riêng cho các bài toán cho chiều dữ liệu lớn. Như đã trình bày ở phía trên, tác giả tin rằng bài toán ước lượng kênh thưa có những đặc điểm mà không bài toán nào có. Lợi dụng những đặc điểm đó, tác giả có thể kết hợp hoặc cải tiến các phương pháp có sẵn để đề xuất những phương pháp có độ hiệu quả hơn các phương pháp có sẵn.

- Các nghiên cứu gần đây đã chứng minh rằng chiến lược chia lưới không đồng đều sẽ tạo ra một ma trận cảm nhận có giá trị liên kết tương hỗ nhỏ hơn chiến lược chia lưới đồng đều. Vì ma trận cảm nhận có giá trị liên kết tương hỗ nhỏ luôn là đích đến của bài toán ước lượng thưa, tác giả sẽ xem xét vấn đề thiết kế ma trận cảm nhận trong bài toán ước lượng kênh thưa trong tương lai. Các phương pháp thiết kế có thể kể đến như bổ đề Johnson–Lindenstrauss, quá trình Gram-Schmidt, phân tích QR, v.v.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. [CT1] Thai-Mai Dinh-Thi, Ngoc-Son Duong, Quoc-Tuan Nguyen, "Developing a Novel Real-Time Indoor Positioning System Based on BLE Beacons and Smartphone Sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 20, pp. 23055-23068, Oct. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3106019. (ISI/SCIE-Q1)
2. [CT2] Ngoc-Son Duong, Thanh-Phuc Nguyen, Quoc-Tuan Nguyen, Thai-Mai Dinh Thi, "Improving indoor positioning system using weighted linear least square and neural network," *International Journal of Sensor Networks*, vol. 41, no. 2, pp. 67-77, Mar. 2023, doi: 10.1504/IJS-NET.2023.129632. (ISI/SCIE-Q3)
3. [CT3] Ngoc-Son Duong, Lan-Nhi Vu Thi, Phuong-Dung Chu Thi, Sinh-Cong Lam, Thai-Mai Dinh Thi "A novel Distributed Stagewise Orthogonal Matching Pursuit algorithm for mmWave MIMO channel estimation," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2024, doi: 10.1587/transfun.2024EAL2064. (ISI/SCIE-Q4)
4. [CT4] Ngoc-Son Duong, Quoc-Tuan Nguyen, Thai-Mai Dinh-Thi, "OMP-Based Channel Estimation With Dynamic Grid for mmWave MIMO Positioning Systems," *IEEE Communications Letters*, vol. 27, no. 10, pp. 2623-2627, Oct. 2023, doi: 10.1109/LCOMM.2023.3303453. (ISI/SCIE-Q1)
5. [CT5] Ngoc-Son Duong, Thu-Trang Nguyen, Lan-Nhi Vu Thi, Sinh-Cong Lam, Thai-Mai Dinh-Thi, "An improved OMP-based mmWave channel estimation for MIMO systems," *The 3rd International Conference on Advances in Information and Communication Technology*, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-80943-9_97
6. [CT6] Ngoc-Son Duong, Quoc-Tuan Nguyen, Khac-Hoang Ngo, Thai-Mai Dinh-Thi, "Sparse Bayesian Learning with Atom Refinement for mmWave MIMO Channel Estimation," in *Proc. IEEE Statistical Signal Processing Workshop (SSP)*, 2023, doi: 10.1109/SSP53291.2023.10208044.
7. [CT7] Ngoc-Son Duong, Quoc-Tuan Nguyen, Thai-Mai Dinh-Thi, "mmWave Channel Estimation for Location-based Application in 5G MIMO systems," in *Proc. 2022 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Hong Kong, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/TENCON55691.2022.9977818.
8. [CT8] Ngoc-Son Duong, Ngoc-Thuy Nguyen, Phuong-Dung Chu-Thi, Quoc-Tuan Nguyen and Thai-Mai Dinh-Thi, "Cải thiện độ chính xác của hệ thống định vị trong nhà dựa trên phân tích

lỗi truyền lan", *Hội thảo Quốc gia lần thứ XXIV về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin*, Hanoi, 2021