

## LOCAL-AREA URBAN RADIO-PERFORMANCE MAP ESTIMATION IN BLOCKAGE-PRONE ENVIRONMENTS FROM SPARSE MEASUREMENTS

Nguyen Tuan Duong<sup>1</sup>, Nguyen Ngoc Bao<sup>1</sup>, Nguyen Thi Thanh Tra<sup>1</sup>, Hoang Trong Minh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Thang Long University, <sup>2</sup>Posts and Telecommunications Institute of Technology

| ARTICLE INFO                                    | ABSTRACT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Received:</b> 29/4/2026                      | Local-area coverage planning around a base station requires radio-performance maps rather than only line-of-sight/non-line-of-sight labels. This study asks how errors in propagation-state estimation affect path-loss, signal-to-noise-ratio, and data-rate maps under a limited measurement budget. A three-layer evaluation pipeline is constructed for blockage-prone urban areas: a geometric layer generates reference propagation states, sparse samples are processed by a k-nearest-neighbor estimator and a k-nearest-neighbor maximum-a-posteriori estimator, and the inferred labels are connected to a standardized channel model to obtain radio-performance maps. In the single test scene, the maximum-a-posteriori estimator increases label accuracy from 88.64% to 95.45%, reduces path-loss mean absolute error from 1.83 dB to 0.63 dB, and reduces rate mean absolute error from 6.08 Mbps to 2.10 Mbps. Across 100 Monte Carlo runs, it improves average accuracy from 85.85% to 89.41% and reduces rate-map error from 8.64 Mbps to 6.02 Mbps. The results show that estimator quality should be validated at the radio-performance layer, because label errors near blockage boundaries directly distort the operational coverage map. |
| <b>Revised:</b> 04/6/2026                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>Published:</b> 04/6/2026                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| <b>KEYWORDS</b>                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Local-area urban radio map                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Sparse measurements                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Line-of-sight and non-line-of-sight propagation |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Blockage-aware mapping                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Path-loss map                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

## ƯỚC LƯỢNG BẢN ĐỒ HIỆU NĂNG VÔ TUYẾN CỤC BỘ TRONG MÔI TRƯỜNG ĐÔ THỊ CÓ VẬT CẢN TỪ MẪU ĐO THỪA

Nguyễn Tuấn Dương<sup>1</sup>, Nguyễn Ngọc Bảo<sup>1</sup>, Nguyễn Thị Thanh Trà<sup>1</sup>, Hoàng Trọng Minh<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Thăng Long, <sup>2</sup>Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

| THÔNG TIN BÀI BÁO                 | TÓM TẮT                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ngày nhận bài:</b> 29/4/2026   | Bài toán quy hoạch phủ sóng cục bộ quanh một trạm gốc cần bản đồ hiệu năng vô tuyến, thay vì chỉ cần nhãn nhìn thẳng hoặc không nhìn thẳng. Nghiên cứu này đặt câu hỏi sai số ở lớp ước lượng trạng thái truyền sóng làm méo bản đồ suy hao đường truyền, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ dữ liệu ở mức nào khi ngân sách đo bị giới hạn. Bài báo xây dựng một quy trình đánh giá ba lớp cho môi trường đô thị có vật cản: lớp hình học sinh nhãn trạng thái truyền sóng chuẩn, lớp mẫu đo thừa dùng bộ ước lượng k láng giềng gần nhất và bộ ước lượng cực đại hậu nghiệm dựa trên lân cận k, sau đó lớp mô hình kênh chuẩn hóa tạo bản đồ hiệu năng vô tuyến. Trong kịch bản thử nghiệm, bộ ước lượng cực đại hậu nghiệm tăng độ chính xác từ 88,64% lên 95,45%, giảm sai số tuyệt đối trung bình của suy hao từ 1,83 dB xuống 0,63 dB và giảm sai số tốc độ từ 6,08 Mbps xuống 2,10 Mbps. Với 100 lần mô phỏng Monte Carlo, phương pháp này tăng độ chính xác trung bình từ 85,85% lên 89,41% và giảm sai số bản đồ tốc độ từ 8,64 Mbps xuống 6,02 Mbps. Kết quả cho thấy chất lượng bộ ước lượng cần được kiểm chứng trực tiếp ở lớp bản đồ hiệu năng, vì lỗi nhãn quanh biên bóng che có thể làm sai lệch quyết định quy hoạch vùng phủ. |
| <b>Ngày hoàn thiện:</b> 04/6/2026 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>Ngày đăng:</b> 04/6/2026       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| <b>TỪ KHÓA</b>                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Bản đồ hiệu năng vô tuyến cục bộ  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Mẫu đo thừa                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Nhìn thẳng và không nhìn thẳng    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Môi trường đô thị có vật cản      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Suy hao đường truyền              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.15602>

\* Corresponding author. Email: hoangtrongminh@ptit.edu.vn

## 1. Giới thiệu

Trong quy hoạch phủ sóng cục bộ quanh một trạm gốc, đầu ra cần thiết cho vận hành mạng không chỉ là nhân hình học của liên kết, mà là bản đồ suy hao đường truyền, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ dữ liệu theo vị trí. Các nghiên cứu về bản đồ vô tuyến đã mô tả bài toán này như một dạng bản đồ phổ từ dữ liệu đo phân bố trong không gian, trong khi các khảo sát gần đây cho thấy yêu cầu lập bản đồ ngày càng chuyển từ nội suy tín hiệu sang các đại lượng có ý nghĩa vận hành [1], [2]. Nút thất kỹ thuật nằm ở chỗ ngân sách đo trong một khu vực đô thị thường hữu hạn, còn trạng thái truyền sóng thay đổi đột ngột quanh biên vật cản.

Về lớp vật lý, che khuất làm liên kết chuyển giữa điều kiện nhìn thẳng và không nhìn thẳng, kéo theo sự thay đổi mạnh của nhánh suy hao và tốc độ khả dụng [3]. Mô hình kênh 3GPP TR 38.901 cũng chuẩn hóa riêng hai nhánh suy hao cho điều kiện nhìn thẳng và không nhìn thẳng trong dải tần từ 0,5 đến 100 GHz [4]. Vì vậy, nếu bản đồ hiệu năng chỉ được dựng theo khoảng cách hoặc nếu trạng thái truyền sóng chỉ được xem như một nhãn phân loại độc lập, sai số gần biên bóng che có thể lan trực tiếp sang bản đồ suy hao và bản đồ tốc độ.

Để giải quyết bài toán ước lượng trạng thái truyền sóng từ các kịch bản hình học chứa vật cản. Các tác giả [5] đã xây dựng các bộ ước lượng LOS/NLOS cho hệ thống tế bào milimét có vật cản, trong đó thông tin tiên nghiệm hình học hỗ trợ quyết định cục bộ khi số điểm đo còn hạn chế. Bên cạnh đó, nhóm tác giả trong [6] sử dụng bản đồ tầm nhìn thẳng cho lựa chọn chuyển tiếp chủ động trong hệ thống xe kết nối, qua đó cho thấy bản đồ trạng thái truyền sóng có giá trị ở tầng điều khiển hệ thống. Tuy nhiên, các nghiên cứu này đã giải quyết tốt lớp trạng thái truyền sóng, nhưng chưa đo trực tiếp độ méo của bản đồ hiệu năng vô tuyến.

Một hướng nghiên cứu khác để giải quyết thách thức trên là đi trực tiếp vào lập bản đồ vô tuyến từ dữ liệu thừa. Romero và Kim [1] hệ thống hóa ước lượng bản đồ vô tuyến như bài toán bản đồ phổ dựa trên dữ liệu, trong đó đầu ra có thể là công suất thu, suy hao hoặc các hệ số kênh. Các tác giả trong [7] khai thác mô hình học sâu để ước lượng bản đồ môi trường vô tuyến từ các phép đo thừa, trong khi Shrestha và cộng sự [8] xem việc chọn vị trí đo bằng thiết bị bay không người lái như một bài toán khảo sát phổ chủ động. Các công trình này đi thẳng vào đại lượng đầu ra, nhưng bỏ qua việc tách riêng phần sai số do nhầm trạng thái truyền sóng.

Các nghiên cứu gần đây tiếp tục mở rộng bài toán theo hướng dữ liệu và không gian khảo sát lớn hơn. Yapar và cộng sự [9] tổng kết bài toán dự báo bản đồ suy hao trong cuộc thi Pathloss Radio Map Prediction, nhấn mạnh vai trò của dữ liệu không đầy đủ và mô hình hóa theo môi trường. Chen và cộng sự [10] nghiên cứu bản đồ vô tuyến ba chiều trong đô thị từ phép đo thừa, trong đó chi phí đo và mật độ mẫu là ràng buộc chính. Các kết quả này củng cố nhu cầu lập bản đồ hiệu năng từ dữ liệu thừa, nhưng vẫn để lại câu hỏi mở về cơ chế lan truyền sai số từ nhãn truyền sóng sang bản đồ hiệu năng.

Từ các hướng nghiên cứu trên, chúng tôi xác định được khoảng trống nghiên cứu như sau. Các công trình về LOS/NLOS làm rõ cách suy ra trạng thái truyền sóng nhưng chưa đo trực tiếp sai lệch ở lớp suy hao và tốc độ. Các công trình về bản đồ vô tuyến làm tốt ở đầu ra cuối nhưng thường chưa chỉ ra phần sai số nào đến từ việc chọn sai nhánh truyền sóng. Do đó, cần một quy trình đánh giá nổi được lớp hình học, lớp ước lượng trạng thái truyền sóng và lớp hiệu năng vô tuyến trong cùng một chuỗi xử lý.

Bài báo này giải quyết câu hỏi đó trong kịch bản vô tuyến cục bộ ngoài trời có vật cản. Quy trình được xây dựng theo ba lớp: lớp hình học sinh nhân chuẩn, lớp ước lượng từ mẫu đo thừa suy ra bản đồ trạng thái truyền sóng, và lớp mô hình kênh chuẩn hóa chuyển nhãn đó thành bản đồ suy hao đường truyền, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ. Cách đặt bài toán này cho phép đánh giá bộ ước lượng bằng độ méo của bản đồ hiệu năng, thay vì chỉ bằng độ chính xác nhãn.

Bảng 1 định vị kỹ thuật của nghiên cứu so với ba nhóm công trình gần nhất: ước lượng trạng thái truyền sóng, ước lượng bản đồ vô tuyến từ dữ liệu thừa và phân tích phủ sóng theo mô hình

kênh chuẩn. Sự khác biệt chính của nghiên cứu này là khép kín đường lan truyền sai số từ trạng thái truyền sóng sang các đại lượng vận hành của liên kết vô tuyến.

Mục đích của nghiên cứu là kiểm chứng xem một cải thiện ở lớp LOS/NLOS có chuyển thành cải thiện đo được ở bản đồ suy hao và bản đồ tốc độ hay không. Các kết quả mô phỏng cho thấy bộ ước lượng cực đại hậu nghiệm dựa trên lân cận  $k$  (kNMAP) giữ lợi thế so với  $k$  láng giềng gần nhất (kNN), đặc biệt khi số điểm đo còn thưa và biên bóng che chi phối mạnh quyết định liên kết.

**Bảng 1.** So sánh định vị kỹ thuật giữa các hướng nghiên cứu liên quan và bài báo này

| Hướng nghiên cứu                                              | Đầu ra chính                                                      | Điểm đã giải quyết                                                               | Điểm còn thiếu                                       |
|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Ước lượng trạng thái truyền sóng từ hình học vật cản [5], [6] | Nhân trạng thái truyền sóng                                       | Khai thác tốt thông tin tiên nghiệm hình học                                     | Chưa đo trực tiếp độ méo của bản đồ hiệu năng        |
| Ước lượng bản đồ vô tuyến từ dữ liệu thưa [1], [2], [7]-[10]  | Bản đồ công suất thu hoặc suy hao                                 | Đi thẳng vào đại lượng vận hành                                                  | Ít tách riêng vai trò của lỗi trạng thái truyền sóng |
| Phân tích phủ sóng theo mô hình kênh chuẩn [3], [4]           | Vùng phủ và tốc độ lý thuyết                                      | Làm rõ tác động vật lý của che khuất                                             | Thường giả thiết trạng thái truyền sóng đã biết      |
| Nghiên cứu này                                                | Bản đồ suy hao đường truyền, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ | Khép kín đường lan truyền sai số từ trạng thái truyền sóng sang bản đồ hiệu năng | Đánh giá trực tiếp độ méo ở lớp hiệu năng            |

## 2. Phương pháp nghiên cứu

Xét một trạm gốc đặt tại gốc tọa độ của miền khảo sát hình tròn  $A = \{x \in \mathbb{R}^2 : \|x\|_2 \leq R\}$ . Miền này biểu diễn khu vực cục bộ cần được dựng bản đồ hiệu năng. Môi trường đô thị được mô hình hóa bởi tập vật cản  $O = \{O_b\}$ . Với một vị trí người dùng  $x$ , nhãn chuẩn  $y^*(x)$  nhận giá trị 1 nếu đoạn nối từ trạm gốc đến  $x$  không cắt vật cản nào và nhận giá trị 0 trong trường hợp ngược lại. Nhãn này là thuộc tính hình học của cảnh và được dùng làm chuẩn đối chiếu cho toàn bộ phần sau.

Trong thực tế, hệ thống không quan sát được đầy đủ  $y^*(x)$  trên toàn miền mà chỉ có một tập mẫu đo thưa  $D = \{(x_n, y_n^*)\}$ . Từ tập mẫu này, bài toán trung tâm là suy ra bản đồ trạng thái truyền sóng trên lưới truy vấn  $G = \{g_m\}$ . Sau đó, mỗi nhãn trên lưới được nối với mô hình suy hao theo 3GPP để tạo ra bản đồ suy hao đường truyền, công suất thu, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ [4].

$$PL^{(A)}(g_m) = \hat{y}_{A(g_m)} * PL_{LOS}(d_m) + [1 - \hat{y}_{A(g_m)}] * PL_{NLOS}(d_m) \quad (1)$$

Phương trình (1) là cầu nối từ lớp trạng thái truyền sóng sang lớp hiệu năng. Nếu bộ ước lượng đòi hỏi nhãn tại một điểm, nhánh suy hao dùng ở điểm đó cũng đổi theo.

$$P_{rx}(g_m) = P_t + G_{ant} - PL(g_m) \quad (2)$$

$$\gamma(g_m) = 10^{\left[\frac{P_{rx}(g_m) - N_{dBm}}{10}\right]} \quad (3)$$

$$R(g_m) = B \log_2[1 + \gamma(g_m)] \quad (4)$$

Ba biểu thức (2)–(4) chuyển lỗi trạng thái truyền sóng thành sai lệch của suy hao đường truyền, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ. Đây là phần bắt buộc nếu muốn đánh giá bộ ước lượng theo nghĩa hệ thống thay vì chỉ theo nghĩa phân loại.

Với bộ ước lượng  $k$  láng giềng gần nhất, nhãn của mỗi điểm truy vấn được chọn theo đa số trong  $K$  mẫu gần nhất. Phương pháp này đơn giản, dễ tái lập và chỉ khai thác cấu trúc cục bộ của tập đo. Trong khi đó, bộ ước lượng cực đại hậu nghiệm dựa trên lân cận  $k$  dùng thêm thông tin tiên nghiệm về mật độ và kích thước vật cản. Vì vậy, với cùng một tập đo cục bộ, nếu một cấu hình nhãn phù hợp hơn với hình học che khuất của môi trường thì kNMAP sẽ nghiêng về cấu hình đó thay vì bỏ phiếu thuần túy như  $k$ -NN. Trong triển khai mô phỏng, thành phần tiên nghiệm của kNMAP được xây dựng từ thống kê hình học của tập vật cản trong miền khảo sát,

bao gồm mật độ che khuất cục bộ và kích thước footprint trong vùng lân cận điểm truy vấn. Về vai trò thuật toán, ưu tiên này điều chỉnh xác suất hậu nghiệm của nhãn LOS/NLOS: vùng có mật độ vật cản cao làm tăng trọng số của nhãn NLOS, còn vùng trống hoặc ít giao cắt làm tăng trọng số của nhãn LOS. Vì vậy, kNMAP vẫn sử dụng cùng tập mẫu lân cận như kNN nhưng thay quyết định đa số thuần túy bằng quyết định có điều kiện theo thông tin hình học của môi trường.

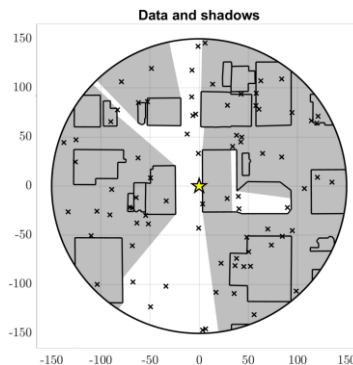
$$Acc^A = \left( \frac{1}{N_{mesh}} \right) \sum_m I\{\hat{y}_{A(g_m)} = y^*(g_m)\} \quad (5)$$

$$MAE_M^A = \left( \frac{1}{N_{mesh}} \right) \sum_m |M^{(A)}(g_m) - M^{(GT)}(g_m)| \quad (6)$$

Trong đó, chỉ tiêu Acc đo độ chính xác ở lớp nhãn, còn MAE đo trực tiếp mức méo mà bộ ước lượng gây ra cho bản đồ hiệu năng. Điểm mới của bài báo nằm ở chỗ không suy luận tắt từ Acc sang bản đồ hiệu năng, mà đo trực tiếp ở lớp hiệu năng vô tuyến.

### 2.1. Thiết lập mô phỏng và dữ liệu

Cấu hình cơ sở được thiết lập với bán kính khảo sát 150 m, số điểm đo 80, số lân cận 3, lưới truy vấn 12 điểm mỗi chiều, tần số mang 2,0 GHz, băng thông 10 MHz, công suất phát 30 dBm, độ lợi tổng hợp 5 dBi, hệ số tạp âm 9 dB và 100 lần mô phỏng Monte Carlo. Ngưỡng nhiễu nền tương đương là -94,98 dBm, còn khoảng cách gãy của mô hình suy hao là 320 m. Môi trường vật cản được xây dựng từ bộ dữ liệu Building Footprints của Thành phố Chicago [11]; đây là nguồn dữ liệu hình học công trình công khai đã được dùng trong các nghiên cứu xử lý và phân tích hình thái không gian đô thị [12]. Hình 1 minh họa miền khảo sát, các điểm đo thưa và vùng bóng do vật cản tạo ra, trong khi Bảng 2 trình bày các tham số mô phỏng chính.



Hình 1. Bản đồ mô phỏng với các điểm đo thưa và vùng bóng do vật cản tạo ra

Bảng 2. Cấu hình mô phỏng

| Tham số                     | Giá trị                                  |
|-----------------------------|------------------------------------------|
| Bán kính vùng khảo sát      | 150 m                                    |
| Số điểm đo                  | 80                                       |
| Số lân cận                  | 3                                        |
| Số điểm lưới mỗi chiều      | 12                                       |
| Tần số mang                 | 2,0 GHz                                  |
| Băng thông                  | 10 MHz                                   |
| Công suất phát              | 30 dBm                                   |
| Độ lợi tổng hợp             | 5 dBi                                    |
| Hệ số tạp âm                | 9 dB                                     |
| Nhiều nền                   | -94,98 dBm                               |
| Khoảng cách gãy             | 320 m                                    |
| Môi trường vật cản          | Dữ liệu Chicago Building Footprints [11] |
| Số lần mô phỏng Monte Carlo | 100                                      |

Trong mô phỏng này, tần số 2,0 GHz và băng thông 10 MHz được chọn để kiểm tra chuỗi xử lý ở một cấu hình cơ sở có thể tái tạo. Mô hình không giả thiết trạng thái truyền sóng đã biết trên toàn miền; thay vào đó, nhãn LOS/NLOS được ước lượng từ mẫu đo thừa rồi mới được nối với mô hình suy hao theo 3GPP [4]. Cách thiết lập này làm rõ tác động của sai số nhãn lên bản đồ suy hao, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ. Trong phạm vi bài báo, dữ liệu footprint đô thị từ tập mẫu (Chicago Building Footprints) được dùng như một bộ dữ liệu hình học công khai để bảo đảm khả năng tái lập.

## 2.2. Môi trường mô phỏng và cấu hình thực thi

Các mô phỏng được thực hiện offline trên cùng một môi trường tính toán cho toàn bộ các cấu hình so sánh. Ở mỗi lần chạy Monte Carlo, hệ thống giữ nguyên miền khảo sát, tập vật cản và các tham số kênh trong Bảng 2, sau đó lấy mẫu thừa, ước lượng bản đồ trạng thái truyền sóng và suy ra các bản đồ hiệu năng theo cùng một chuỗi xử lý. Do bài toán chỉ gồm kiểm tra giao cắt hình học, tìm lân cận, suy luận nhãn và tính các biểu thức suy hao, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ, chi phí tính toán chủ yếu phụ thuộc vào số điểm đo, độ phân giải lưới, số vật cản và số lần lặp Monte Carlo. Bảng 3 trình bày môi trường mô phỏng và cấu hình thực thi nhằm hỗ trợ tái tạo kết quả.

**Bảng 3.** Môi trường mô phỏng và cấu hình thực thi

| Nội dung             | Giá trị                                                  |
|----------------------|----------------------------------------------------------|
| Hệ điều hành         | Windows 11 64-bit                                        |
| Bộ xử lý trung tâm   | AMD Ryzen 5 5600H                                        |
| Bộ nhớ trong         | 8 GB                                                     |
| Bộ xử lý đồ họa      | Không sử dụng GPU                                        |
| Ngôn ngữ mô phỏng    | MATLAB R2024a                                            |
| Thư viện chính       | Built-in MATLAB; Statistics and Machine Learning Toolbox |
| Hạt giống ngẫu nhiên | Cố định bằng hàm rng trong MATLAB                        |
| Thời gian chạy       | Khoảng 4 giờ cho 100 lần chạy Monte Carlo                |
| Tập dữ liệu vật cản  | Chicago.Downtown.BuildingStats.mat                       |

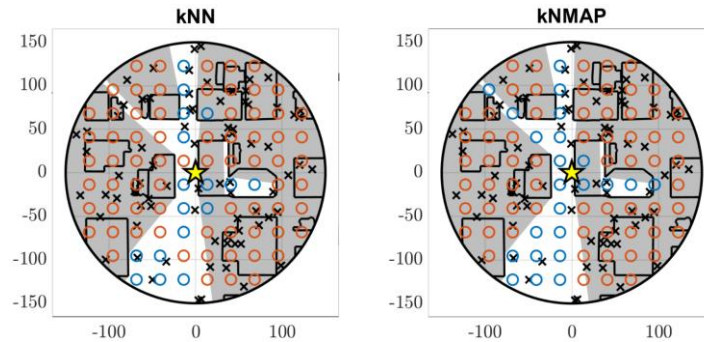
Để bảo đảm so sánh công bằng, các bộ ước lượng được chạy trên cùng tập mẫu đo trong từng lần lặp Monte Carlo; sự khác biệt giữa các phương pháp chỉ nằm ở quy tắc suy luận nhãn trạng thái truyền sóng. Các kết quả trung bình được tính sau khi hoàn tất toàn bộ số lần lặp, còn độ lệch chuẩn phản ánh độ dao động do vị trí mẫu đo thừa và cấu trúc che khuất cục bộ. Cách tổ chức này giúp tách riêng sai lệch do môi trường truyền sóng và sai lệch do bộ ước lượng. Thực tế thời gian mô phỏng (4 giờ) là thời gian của prototype MATLAB chưa tối ưu hóa trên CPU, không sử dụng GPU; giá trị này bao gồm kiểm tra giao cắt hình học, tìm lân cận, suy luận nhãn, tính suy hao SNR, và lặp lại 100 lần thử ngẫu nhiên Monte Carlo. Hạt giống ngẫu nhiên được lấy từ hàm *rng* (trong Matlab) để các tập mẫu thừa và kết quả trung bình có thể được tái lập trong cùng cấu hình mô phỏng.

## 3. Kết quả nghiên cứu và thảo luận

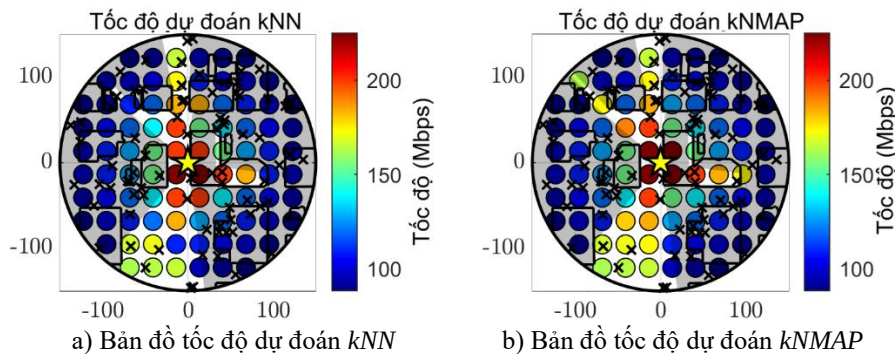
### 3.1. Kịch bản thử nghiệm

Kịch bản thử nghiệm được thiết lập để kiểm tra biên bóng che và sai lệch của bản đồ hiệu năng đường xuống. Trong Hình 2, bộ ước lượng kNN đạt độ chính xác 88,64%, trong khi bộ ước lượng cực đại hậu nghiệm kNMAP đạt 95,45%. Chênh lệch 6,81 điểm phần trăm chủ yếu xuất hiện quanh biên bóng che, tức là những vị trí mà quyết định sai làm liên kết đôi nhánh suy hao. Khi đo trực tiếp trên bản đồ hiệu năng ở Hình 3, sai số tuyệt đối trung bình của suy hao đường truyền giảm từ 1,83 dB xuống 0,63 dB, còn sai số tuyệt đối trung bình của tốc độ giảm từ 6,08 Mbps xuống 2,10 Mbps. Quan sát này cho thấy thông tin tiên nghiệm hình học có ích vì nó giữ đúng nhánh suy hao tại các điểm nhảy theo không gian; do đó, đánh giá ở lớp đường xuống là cần thiết thay vì chỉ suy luận từ độ chính xác phân loại. Các giá trị tính toán trên được trích xuất

từ một lần chạy mô phỏng minh họa nhằm trực quan hóa Hình 2 và Hình 3 và không đại diện cho kết quả trung bình Monte Carlo.



**Hình 2.** Bản đồ trạng thái truyền sóng dự đoán: (a) bộ ước lượng kNN; (b) bộ ước lượng kNMAP trong một lần chạy đơn

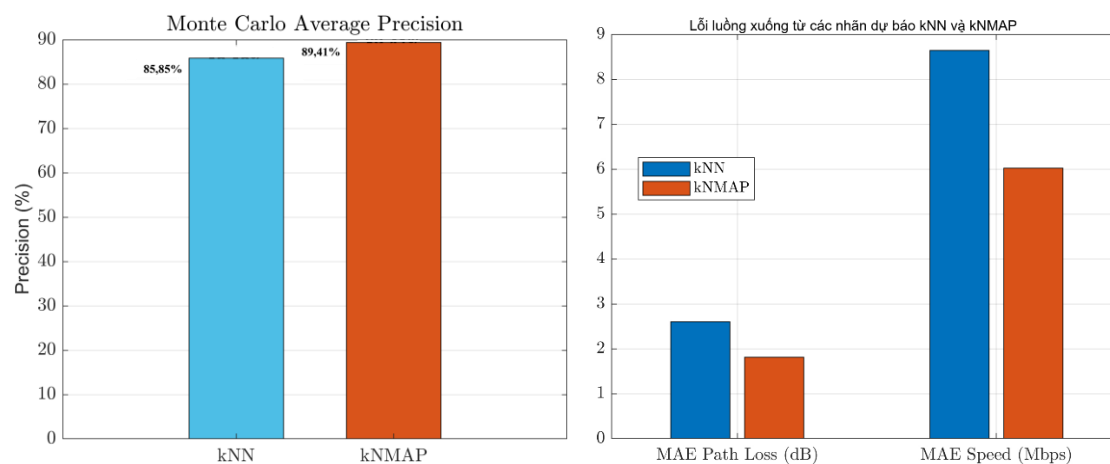


**Hình 3.** Bản đồ tốc độ suy ra từ trạng thái truyền sóng dự đoán: (a) kNN; (b) kNMAP trong một lần chạy đơn

### 3.2. Kết quả trung bình theo mô phỏng Monte Carlo

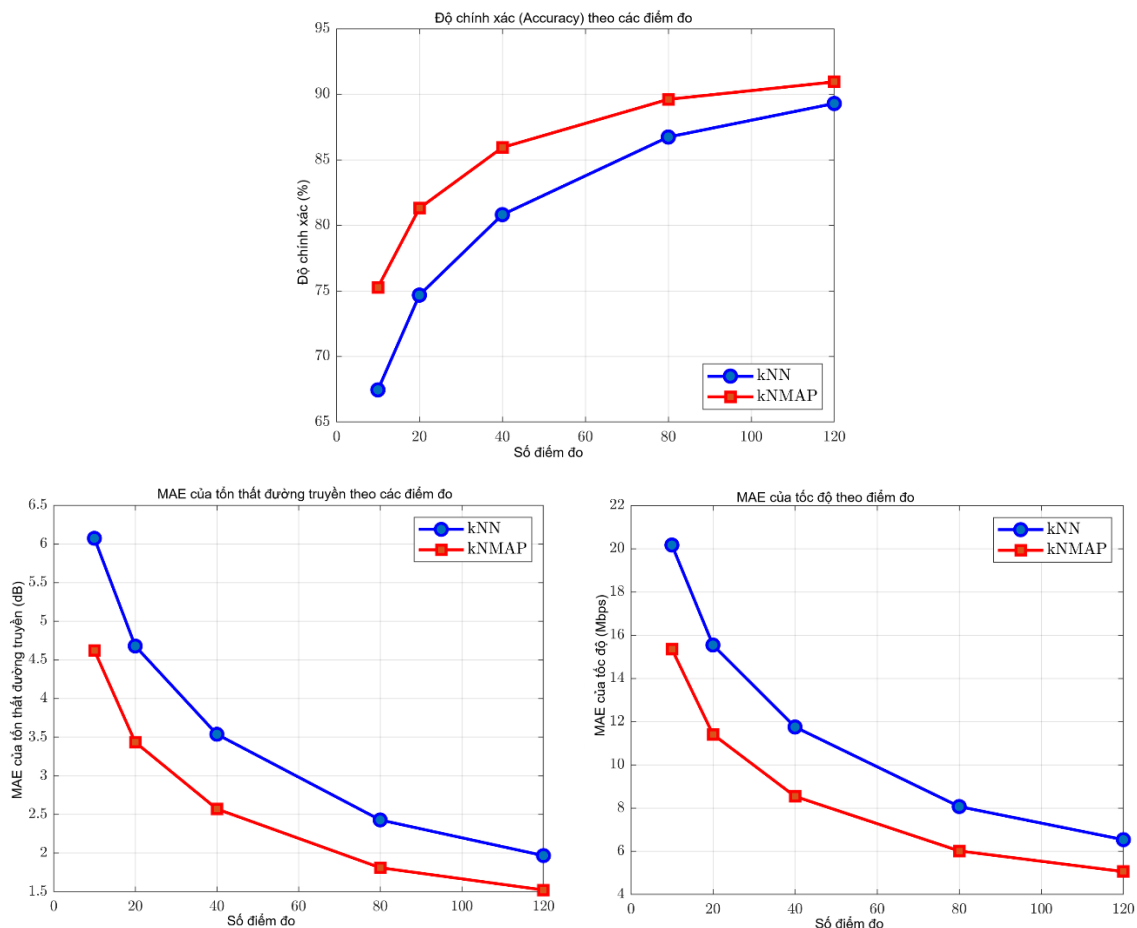
Khi lặp 100 lần mô phỏng Monte Carlo, xu hướng trên vẫn giữ ổn định như thể hiện trong Hình 4. Độ chính xác trung bình của bộ ước lượng kNN là 85,85% với độ lệch chuẩn 4,31%, trong khi kNMAP đạt 89,41% với độ lệch chuẩn 3,95%. So với kNN, kNMAP giảm sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ suy hao đường truyền từ 2,60 dB xuống 1,81 dB và giảm sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ tốc độ từ 8,64 Mbps xuống 6,02 Mbps. Mức tăng 3,56 điểm phần trăm về độ chính xác không quá lớn nếu chỉ nhìn ở lớp nhẵn, nhưng nó tạo ra mức giảm đo được ở lớp hiệu năng. Điều này cho thấy quy trình lập bản đồ cần bám vào điều kiện truyền sóng thực tế, nhất là tại các vùng đồi nhánh LOS/NLOS. Với 100 lần chạy độc lập, khoảng tin cậy 95% xấp xỉ của độ chính xác trung bình là  $85,85 \pm 0,84\%$  đối với kNN và  $89,41 \pm 0,77\%$  đối với kNMAP. Các khoảng tin cậy này được sử dụng để kiểm chứng mức cải thiện ở lớp nhẵn có độ ổn định thống kê.

Ở lớp vật lý của môi trường, thống kê theo nhãn chuẩn trong Bảng 4 cho thấy khác biệt rõ giữa vùng nhìn thẳng và vùng không nhìn thẳng. Tốc độ trung bình vùng LOS đạt 183,27 Mbps, trong khi vùng NLOS chỉ đạt 106,78 Mbps, tương ứng mức sụt giảm khoảng 41,7% (giá trị tốc độ trên đây được tính theo công thức Shannon, không phải thông lượng triển khai sau khi xét điều chế, mã hóa, lập lịch, tín hiệu điều khiển và overhead giao thức). Đồng thời, suy hao đường truyền ở vùng NLOS cao hơn vùng LOS trung bình 22,62 dB. Kết quả này cho thấy NLOS không phải là một nhãn hình thức, mà là trạng thái quyết định nhánh suy hao và do đó quyết định bản đồ hiệu năng. Các giá trị đo này chỉ dùng để so sánh tương đối giữa hai điều kiện truyền sóng trong cùng mô hình.



Hình 4. Kết quả trung bình theo 100 lần mô phỏng Monte Carlo: (a) độ chính xác phân loại trung bình; (b) lỗi luồng xuống từ các nhân dự báo theo suy hao đường truyền và tốc độ

### 3.3. Ảnh hưởng của số điểm đo



Hình 5. Ảnh hưởng của số điểm đo đến chất lượng ước lượng: (a) độ chính xác; (b) sai lệch tuyệt đối trung bình của suy hao đường truyền; (c) sai lệch tuyệt đối trung bình của tốc độ

Thí nghiệm trong Hình 5 và Bảng 5 đánh giá ảnh hưởng của số điểm đo. Khi tăng số điểm đo từ 10 lên 120, độ chính xác của cả hai phương pháp đều tăng, nhưng lợi ích biên giảm dần sau

khoảng 80 điểm. Cụ thể, khoảng cách giữa kNMAP và kNN giảm từ 7,82 điểm phần trăm tại 10 điểm đo xuống còn 1,64 điểm phần trăm tại 120 điểm đo. Xu hướng tương tự xuất hiện ở sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ suy hao đường truyền và bản đồ tốc độ. Khi mẫu đo còn thưa, thông tin tiên nghiệm hình học giúp khôi phục tốt hơn cấu trúc che khuất ở vùng chưa được quan sát; khi tập đo đã đủ dày, cấu trúc lân cận của dữ liệu đã mang nhiều thông tin hơn nên lợi ích bổ sung của tiên nghiệm hình học giảm. Trong cấu hình hiện tại, 80 điểm đo là một mốc vận hành hợp lý: dưới mốc này, tăng điểm đo hoặc dùng tiên nghiệm đều tạo ra lợi ích rõ; vượt mốc này, lợi ích cận biên giảm dần. Riêng hàng ứng với 80 điểm đo trong Bảng 5 đã được đồng bộ với cấu hình cơ sở và kết quả trung bình Monte Carlo trong Bảng 4. Vì vậy, các giá trị tại hàng này phản ánh trung bình của 100 lần chạy.

**Bảng 4.** Tóm tắt kết quả theo kịch bản minh họa, trung bình Monte Carlo và tham số kênh

| Chỉ tiêu                                                                  | Giá trị       |
|---------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <i>A. Kết quả của kịch bản minh họa một lần chạy</i>                      |               |
| Độ chính xác k-NN ở kịch bản minh họa một lần chạy                        | 88,64%        |
| Độ chính xác kNMAP ở kịch bản minh họa một lần chạy                       | 95,45%        |
| Sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ suy hao ở kịch bản minh họa, k-NN  | 1,83 dB       |
| Sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ suy hao ở kịch bản minh họa, kNMAP | 0,63 dB       |
| Sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ tốc độ ở kịch bản minh họa, k-NN   | 6,08 Mbps     |
| Sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ tốc độ ở kịch bản minh họa, kNMAP  | 2,10 Mbps     |
| <i>B. Kết quả trung bình theo 100 lần mô phỏng Monte Carlo</i>            |               |
| Độ chính xác k-NN trung bình Monte Carlo                                  | 85,85 ± 4,31% |
| Độ chính xác kNMAP trung bình Monte Carlo                                 | 89,41 ± 3,95% |
| Sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ suy hao, k-NN                      | 2,60 dB       |
| Sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ suy hao, kNMAP                     | 1,81 dB       |
| Sai số tuyệt đối trung bình của bản đồ tốc độ, k-NN                       | 8,64 Mbps     |
| <i>C. Tham số kênh theo nhãn chuẩn LOS/NLOS</i>                           |               |
| Tốc độ trung bình vùng LOS                                                | 183,27 Mbps   |
| Tốc độ trung bình vùng NLOS                                               | 106,78 Mbps   |
| Sụt giảm tốc độ vùng NLOS so với LOS                                      | 41,7%         |
| Suy hao đường truyền NLOS cao hơn LOS                                     | 22,62 dB      |

**Bảng 5.** Kết quả theo số điểm đo

| Số điểm đo | k-NN (%) | kNMAP (%) | Chênh lệch (điểm %) | MAE suy hao k-NN (dB) | MAE suy hao kNMAP (dB) | MAE tốc độ k-NN (Mbps) | MAE tốc độ kNMAP (Mbps) |
|------------|----------|-----------|---------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 10         | 67,45    | 75,27     | 7,82                | 6,07                  | 4,62                   | 20,17                  | 15,35                   |
| 20         | 74,68    | 81,31     | 6,63                | 4,68                  | 3,44                   | 15,54                  | 11,41                   |
| 40         | 80,82    | 85,94     | 5,12                | 3,54                  | 2,57                   | 11,75                  | 8,54                    |
| 80         | 85,85    | 89,41     | 3,56                | 2,60                  | 1,81                   | 8,64                   | 6,02                    |
| 120        | 89,30    | 90,94     | 1,64                | 1,97                  | 1,52                   | 6,54                   | 5,06                    |

Các kết quả mô phỏng cho thấy rõ hai điểm kỹ thuật. Thứ nhất, trong bài toán phủ sóng cục bộ ngoài trời, cải thiện ở lớp trạng thái truyền sóng chỉ có ý nghĩa vận hành khi nó làm bản đồ suy hao đường truyền và bản đồ tốc độ bám tốt hơn theo không gian. Thứ hai, lợi ích của thông tin tiên nghiệm hình học mạnh nhất khi số điểm đo còn thưa; khi số điểm đo tăng đủ cao, bài toán chuyển dần từ thiếu thông tin hình học sang lợi ích cận biên thấp của chi phí đo bổ sung. Vì vậy, sai số của bài toán lập bản đồ hiệu năng vô tuyến cục bộ từ mẫu đo thưa cần được đánh giá ở cả lớp nhãn và lớp hiệu năng. Các mô hình Random Forest, SVM hoặc mô hình học sâu sẽ là bài toán mở với các thiết kế đặc trưng, chia tập huấn luyện/kiểm tra và lưu kết quả trong phát triển tiếp theo.

#### 4. Kết luận

Bài báo đã xây dựng một khung lập bản đồ hiệu năng vô tuyến cục bộ trong môi trường đô thị có vật cản từ mẫu đo thừa. Khung này kết nối trực tiếp nhân LOS/NLOS với mô hình kênh chuẩn hóa để tạo bản đồ suy hao đường truyền, tỷ số tín hiệu trên tạp âm và tốc độ. Kết quả mô phỏng cho thấy kNMAP giữ lợi thế so với kNN ở cả lớp phân loại và lớp hiệu năng: độ chính xác trung bình tăng từ 85,85% lên 89,41%, trong khi sai số bản đồ tốc độ giảm từ 8,64 Mbps xuống 6,02 Mbps. Kết quả quan trọng hơn là giá trị của bộ ước lượng không nên kết luận từ độ chính xác nhân đơn thuần, mà phải được xét theo mức méo mà nó gây ra cho bản đồ hiệu năng vô tuyến. Điều này phù hợp với các tác vụ quy hoạch phủ sóng quanh một trạm gốc, thiết kế chiến dịch đo thừa và đánh giá nhanh vùng bóng che trong môi trường đô thị. Hướng nghiên cứu tiếp theo là mở rộng sang dải tần cao hơn, mô hình vật cản giàu hơn và lớp hiệu năng có xét giao thoa đa tế bào. Trong các bước tiếp theo, khung đánh giá này cần được kiểm chứng thêm trên dữ liệu footprint đô thị Việt Nam, các cấu hình băng thông/tần số sát hơn với triển khai thực tế và các bộ ước lượng học máy như Random Forest hoặc SVM để tách riêng lợi ích của dự báo hình học khỏi lợi ích của mô hình phân loại mạnh hơn.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] D. Romero and S.-J. Kim, "Radio Map Estimation: A Data-Driven Approach to Spectrum Cartography," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 39, no. 6, pp. 53-72, Nov. 2022, doi: 10.1109/MSP.2022.3200175.
- [2] B. Feng, M. Zheng, W. Liang, and L. Zhang, "A Recent Survey on Radio Map Estimation Methods for Wireless Networks," *Electronics*, vol. 14, no. 8, 2025, Art. no. 1564, doi: 10.3390/electronics14081564.
- [3] T. Bai and R. W. Heath Jr., "Coverage and Rate Analysis for Millimeter-Wave Cellular Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 2, pp. 1100-1114, Feb. 2015, doi: 10.1109/TWC.2014.2364267.
- [4] 3GPP, "Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz," TR 38.901, Release 19, 2026. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/dynareport/38901.htm>. [Accessed Apr. 29, 2026].
- [5] T. Ortega, A. Pascual-Iserte, and O. Muñoz, "LOS/NLOS Estimators for Millimeter-Wave Cellular Systems With Blockages," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 1, pp. 121-125, Jan. 2022, doi: 10.1109/LWC.2021.3122090.
- [6] F. Linsalata, S. Mura, M. Mizmizi, M. Magarini, P. Wang, M. N. Khormuji, A. Perotti, and U. Spagnolini, "LoS-Map Construction for Proactive Relay of Opportunity Selection in 6G V2X Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 3, pp. 3864-3878, Mar. 2023, doi: 10.1109/TVT.2022.3217966.
- [7] A. Chaves-Villota and C. A. Viteri-Mera, "DeepREM: Deep-Learning-Based Radio Environment Map Estimation From Sparse Measurements," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 48697-48714, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3277248.
- [8] R. Shrestha, D. Romero, and S. P. Chepuri, "Spectrum Surveying: Active Radio Map Estimation With Autonomous UAVs," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 627-641, Jan. 2023, doi: 10.1109/TWC.2022.3197087.
- [9] Ç. Yapar, F. Jaensch, R. Levie, G. Kutyniok, and G. Caire, "Overview of the First Pathloss Radio Map Prediction Challenge," *IEEE Open Journal of Signal Processing*, vol. 5, pp. 948-963, 2024, doi: 10.1109/OJSP.2024.3419563.
- [10] X. Chen, X. Zhong, Z. Zhang, L. Dai, and S. Zhou, "High-Efficiency Urban 3D Radio Map Estimation Based on Sparse Measurements," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 74, no. 12, pp. 16488-16493, 2025, doi: 10.1109/TVT.2025.3573595.
- [11] City of Chicago, "Building Footprints," Chicago Data Portal, 2025. [Online]. Available: <https://data.cityofchicago.org/buildings/building-footprints-current/hz9b-7nh8>. [Accessed Apr. 29, 2026].
- [12] W. C. Jochem and A. J. Tatem, "Tools for Mapping Multi-Scale Settlement Patterns of Building Footprints: An Introduction to the R Package foot," *PLoS ONE*, vol. 16, no. 2, 2021, Art. no. e0247535, doi: 10.1371/journal.pone.0247535.