

Ước lượng kênh truyền trong hệ thống đa robot sử dụng SDR

Đỗ Hải Sơn*, Nguyễn Hữu Hưng*, Phạm Duy Hưng†, Trần Thị Thúy Quỳnh†

* Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

† Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Công nghệ - Đại học Quốc gia Hà Nội

Email: dohaison1998@vnu.edu.vn, nguyenuhuuhung032@gmail.com, {hungpd, quynhttt}@vnu.edu.vn

Tóm tắt—Nghiên cứu này tập trung xây dựng một hệ thống thực nghiệm ước lượng kênh truyền phục vụ truyền thông trong hệ thống đa robot di động sử dụng các thiết bị vô tuyến định nghĩa mềm (SDR - Software Define Radio). Hệ thống gồm 2 robot di động được lập trình cho 2 tình huống robot đứng yên và robot di động theo quỹ đạo cho trước. Hệ thống truyền thông được thực hiện thông qua điều chế da sóng mang trực giao OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) nhằm làm giảm ảnh hưởng của môi trường đa đường trong nhà. Hiệu năng của hệ thống được đánh giá thông qua tỷ lệ lỗi bit BER (Bit Error Rate). Các kết nối liên quan đến chuyển động của robot và phần truyền thông được thực hiện tương ứng thông qua Raspberry Pi và BladeRF x115. Kỹ thuật bình phương tối thiểu LS (Least Squares) được thực hiện để ước lượng kênh với tỷ lệ lỗi bit khoảng 10^{-2} .

Từ khóa—Channel estimation, Mobile robot, SDR, GNU Radio.

I. GIỚI THIỆU

Mạng truyền thông trong các hệ thống đa robot đang là chủ đề được quan tâm hiện nay [1] do gắn liền với cách mạng công nghiệp 4.0. Trong các mạng này, mỗi robot thường yêu cầu có các bộ truyền phát vô tuyến để giao tiếp với các robot khác trong mạng hoặc máy chủ điều khiển từ bên ngoài. Tuy nhiên, trong các điều kiện môi trường phức tạp như cùu hộ thảm họa [2], các robot cỡ nhỏ sẽ gặp phải khó khăn khi phải ước lượng kênh truyền vô tuyến để thiết lập tuyến truyền thông an toàn. Do đó, nhiều phương pháp trên lý thuyết nhằm ước lượng kênh truyền cho các robot cỡ nhỏ đã được đề xuất [3], [4]. Tuy nhiên, các nghiên cứu thực nghiệm trên lĩnh vực này còn khá mới hoặc các sản phẩm thương mại thường sử dụng các linh kiện có sẵn tương tự như các thiết bị di động thông minh khác như bộ thu phát WiFi hay Bluetooth trên điện thoại di động.

Trong mười năm gần đây, các thiết bị SDR (Software defined radio, vô tuyến định nghĩa bằng phần mềm) được sử dụng nhiều cho mục đích kiểm nghiệm các thuật toán trong viễn thông [5], do tính linh hoạt và đa dạng trong các thư viện xử lý tín hiệu có sẵn trên phần mềm GNU Radio [6]. Từ kết quả trong nghiên cứu trước đây của nhóm [7], các thiết bị SDR có khả năng triển khai trên các robot cỡ nhỏ với nguồn điện độc lập được cấp từ pin ngay trên robot. Trong nghiên cứu này, một hệ thống thử nghiệm gồm hai robot cỡ nhỏ được điều khiển bằng Raspberry Pi 3 [8], mỗi robot lắp một thiết bị SDR (BladeRF x115 [9]) để thực hiện việc thu phát và ước lượng kênh truyền thời gian thực. Hệ thu phát sử dụng điều chế

OFDM (Orthogonal Frequency-division Multiplexing, ghép kênh phân chia theo tần số trực giao) trong nghiên cứu này sử dụng mã nguồn có tên SDR4All tương tự như chuẩn WiFi 802.11 được phát triển bởi [5], [10], [11]. Mã nguồn mở này sử dụng bộ cân bằng ZF (Zero forcing, ép về không) để ước lượng kênh truyền vô tuyến. Trong bài báo này, chúng tôi không thay đổi thuật toán LS của SDR4All mà tập trung vào xem xét hiệu năng của giải thuật đơn giản này trên các robot trong các điều kiện khác nhau. Các thông số được đưa ra bao gồm khoảng cách giữa hai robot, tỷ lệ công suất tín hiệu trên công suất tạp âm SNR (Signal Noise Ratio), và hiệu năng của hệ thống được đánh giá thông qua tỷ lệ lỗi bit BER (Bit Error Rate).

Các đóng góp chính của bài báo gồm: xây dựng các khôi trên GNU Radio dùng để mô phỏng kênh truyền vô tuyến và tính hệ số BER; đánh giá chất lượng của ước lượng kênh truyền trong hệ thống đa robot thông qua mô phỏng và kiểm nghiệm thực tế.

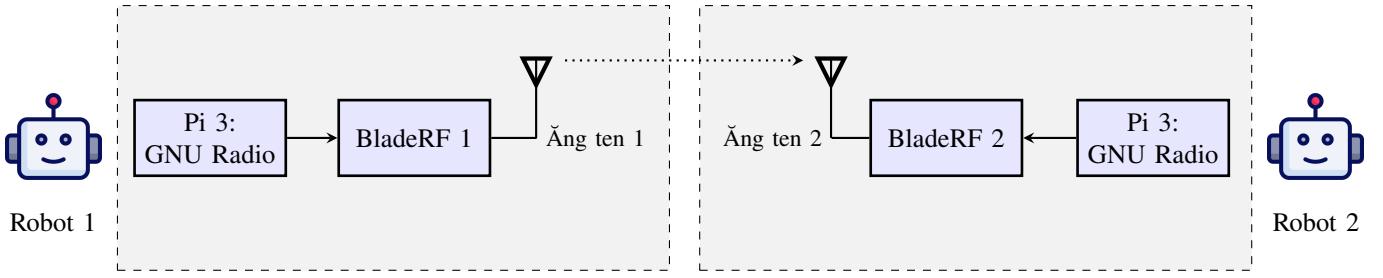
Các nội dung của bài báo được tổ chức như sau: phần II trình bày về mô hình hệ thống, sơ lược về lý thuyết sử dụng cho ước lượng kênh truyền trong bộ công cụ SDR4All. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm được biểu diễn trong phần III. Kết luận của bài báo được đưa ra trong phần IV.

II. ƯỚC LƯỢNG KÊNH TRUYỀN TRONG SDR4ALL

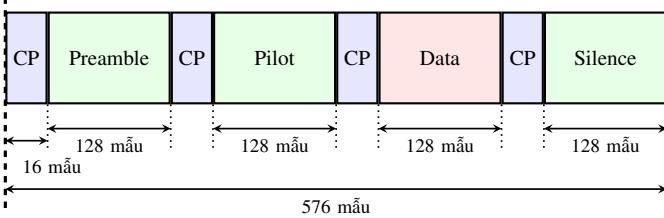
Phần này trình bày về mô hình truyền nhận sử dụng mã nguồn SDR4All. Trong đó bao gồm cấu trúc của các khung OFDM được truyền nhận và giải thuật của bộ cân bằng ZF được sử dụng.

A. Mô hình hệ thống

Xét mô hình hệ thống gồm hai robot đơn ăng-ten thu phát như trên hình 1 sử dụng điều chế OFDM theo mã nguồn SDR4All. Trong đó, mỗi robot bao gồm các thành phần điều khiển, chuyển động, một máy tính cỡ nhỏ là Raspberry Pi 3 và một BladeRF x115. Raspberry Pi chịu trách nhiệm điều khiển robot và chạy GNU Radio để gửi và nhận dữ liệu từ BladeRF x115. Tất cả các linh kiện trên robot di động đều được cấp nguồn bằng một pin gắn ngoài ngay trên robot. Lý thuyết về việc truyền nhận OFDM đã được biết đến rộng rãi [12] nên trong bài báo này, chúng tôi sẽ không nhắc lại mà tập trung vào giới thiệu tổ chức khung OFDM của mã nguồn SDR4All như trên hình 2 [13]. Khung dữ liệu OFDM được tạo ra bao gồm 4 thành phần chính: Preamble, Pilot, Data,



Hình 1: Mô hình hệ thống thực nghiệm ước lượng kênh truyền cho robot sử dụng SDR.



Hình 2: Minh họa cấu trúc một khung OFDM của mã nguồn SDR4All.

và Silence, được truyền liên tục theo thời gian. Preamble, Pilot, và Silence là các thành phần không mang thông tin, có tác dụng lấp lót là đồng bộ hệ thống phát, ước lượng kênh truyền, và ước lượng tỷ số SNR. Với N_{fft} là độ dài FFT hay số lượng sóng mang con khi điều chế OFDM và N_{Occ} [14] là số sóng mang con được sử dụng, biểu diễn của Preamble ($\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{N_{Occ} \times 1}$) tại thời điểm n như sau:

$$\mathbf{g} = [g_1[n], g_2[n], \dots, g_{N_{Occ}}[n]]^\top, \quad (1)$$

với các giá trị $g[n]$ được định nghĩa trong [15]. Thành phần Pilot được chèn vào khung OFDM theo kiểu Block-type [16] tức được chèn vào toàn bộ các tần số ở các khe thời gian xác định. Các thành phần Pilot, Data, và Silence lần lượt có kích thước $\mathbf{p} \in \mathbb{C}^{N_{Occ} \times 1}$, $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{N_{Occ} \times N_d}$, $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{N_{Occ} \times 1}$, với N_d là độ dài véc-tơ dữ liệu truyền đi, và được biểu diễn như sau:

$$\mathbf{p} = [p_1[n], p_2[n], \dots, p_{N_{Occ}}[n]]^\top. \quad (2)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_1[n] & \dots & d_1[n + N_d] \\ d_2[n] & \dots & d_2[n + N_d] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{N_{Occ}}[n] & \dots & d_{N_{Occ}}[n + N_d] \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$\mathbf{z} = [z_1[n], z_2[n], \dots, z_{N_{Occ}}[n]]^\top. \quad (4)$$

Một khung OFDM chỉ chứa 4 thành phần kể trên có kích thước $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{N_{Occ} \times (3+N_d)}$.

$$\mathbf{S} = [\mathbf{g} | \mathbf{p} | \mathbf{D} | \mathbf{z}], \quad (5)$$

Để đơn giản hóa ký hiệu, các sóng mang con trống (N_l) ở hai phía trái phải của phổ chưa được đề cập. Trên thực tế, $2N_l \times (3+N_d)$ sóng mang con sẽ được chèn vào để tạo thành

khung OFDM có kích thước $(N_{Occ} + 2N_l) \times (3 + N_d)$ như minh họa trên hình 2. Sau các khối IFFT và chuẩn hóa năng lượng, cả bốn thành phần kể trên sẽ được chèn thêm thành phần CP (Cyclic prefix, tiền tố lặp) bằng cách sao chép N_{CP} mẫu cuối cùng mỗi luồng song song rồi chèn lên đầu để tạo thành khoảng bảo vệ. Kích thước cuối cùng của khung OFDM được robot truyền đi như trên hình 2 là $(N_{Occ} + 2N_l + N_{CP}) \times (3 + N_d)$.

B. Bộ cân bằng kênh ZF

Ở phía robot thu, sau khi nhận được dữ liệu phát bị méo khi lan truyền trong không gian, các bước như đồng bộ, chuyển đổi nối tiếp thành song song, loại bỏ CP, và FFT được thực hiện để tách được dữ liệu nhận thành dạng các khung OFDM như bên phát. Chi tiết các bước này có thể xem tại [11], [13]. Ma trận của khung OFDM nhận được bên thu là:

$$\hat{\mathbf{S}} = [\hat{\mathbf{g}} | \hat{\mathbf{p}} | \hat{\mathbf{D}} | \hat{\mathbf{z}}]. \quad (6)$$

Dựa vào thành phần $\hat{\mathbf{p}}$, bộ cân bằng ZF ước lượng ra ảnh hưởng của kênh truyền đến các ký hiệu pilot biết trước qua đó đảo ngược quá trình này để khôi phục các tín hiệu dữ liệu \mathbf{D} . Trước hết, ảnh hưởng của kênh truyền ($\hat{\mathbf{h}} \in \mathbb{C}^{N_{Occ} \times 1}$) sử dụng phương pháp LS (Least square, bình phương tối thiểu) như dưới đây:

$$\hat{h}[k] = \frac{\hat{p}[k]}{p[k]}, \quad 1 \leq k \leq N_{Occ}, \quad (7)$$

từ đó, ma trận kênh cân bằng ZF $\hat{\mathbf{H}}_{est} \in \mathbb{C}^{N_{Occ} \times N_{Occ}}$ được ước lượng là:

$$\hat{\mathbf{H}}_{est} = \text{diag}\left(\left[\frac{1}{\hat{h}_1}, \frac{1}{\hat{h}_2}, \dots, \frac{1}{\hat{h}_{N_{Occ}}}\right]\right), \quad (8)$$

sau khi có ma trận $\hat{\mathbf{H}}_{est}$, có thể khôi phục lại dữ liệu gửi đi như sau:

$$\hat{\mathbf{D}}_{est} = \hat{\mathbf{H}}_{est} \hat{\mathbf{D}}. \quad (9)$$

Ngoài ước lượng tín hiệu bên phát, tỷ số SNR cũng được mã nguồn SDR4All tính toán sử dụng thành phần Preamble và Silence như sau:

$$SNR = 10 \log \left(\frac{\sum_{k=N_l}^{k=N_l+N_{Occ}} |\hat{g}_k|^2}{\sum_{k=N_l+N_{Occ}}^{k=2N_l+N_{Occ}} |\hat{z}_k|^2} \right). \quad (10)$$

Các bước còn lại như chuyển đổi luồng song song thành nối tiếp và giải ánh xạ chòm sao để khôi phục các bit gửi đi xem tại [13].

III. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THỰC NGHIỆM

Trong phần này, các bước thiết lập mô phỏng và thực nghiệm sẽ được trình bày. Sau đó, các kết quả được đưa ra cùng với đánh giá về hiệu năng của hệ thống trong các kịch bản thử nghiệm khác nhau.

A. Kết quả mô phỏng

1) *Thiết lập mô phỏng:* Từ lý thuyết đã trình bày ở mục II, trước hết, một mô phỏng trên MatLab được triển khai dựa trên [12]. Trong đó, kênh truyền (thành phần đa đường) sẽ được mô hình hóa dưới dạng một bộ lọc FIR (đáp ứng xung hữu hạn) có độ dài bằng 2 như sau:

$$\mathbf{h} = [0, 8 + 0, 9i; 0, 6 + 0, 7i]. \quad (11)$$

Đối với mô phỏng trên GNU Radio, bài báo này sử dụng phiên bản GNU Radio 3.7.11¹. Mã nguồn SDR4All được sử dụng để xây dựng một bộ thu phát sử dụng OFDM hoàn chỉnh. Ảnh hưởng của kênh truyền tương tự như mô phỏng bằng MatLab kể trên và là một khối được chúng tôi xây dựng có tên “FIR Channel”.

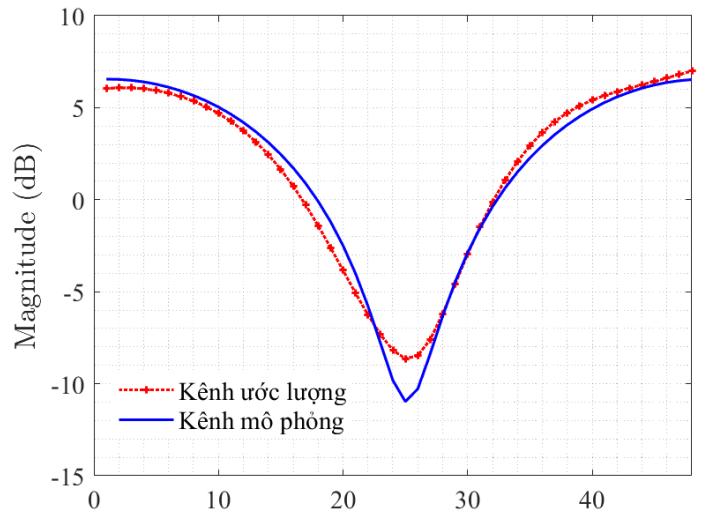
2) *Kết quả:* Trước hết, xem xét hình dạng của đáp ứng kênh truyền được ước lượng như trên hình 3. Từ hình 3a, có thể nhận xét rằng bộ cân bằng ZF có thể ước lượng khá chính xác đáp ứng kênh truyền được mô phỏng (\mathbf{h}). Tuy nhiên ở các vị trí có độ sâu lớn (suy hao), ví dụ sóng mang con ở vị trí 25 theo mô phỏng, vẫn còn có sự sai khác giữa kênh mô phỏng và ước lượng. Với GNU Radio và SDR4All như trên hình 3b, khi kéo SNR lên cao, khoảng 30 dB, về hình dạng của đáp ứng kênh truyền vẫn được đảm bảo, tuy nhiên về biên độ có sự sai khác khá lớn. Điều này xảy ra do bản thân mã nguồn SDR4All đã thêm một khối chuẩn hóa năng lượng (“Power Scaling”) trước khi thực hiện ước lượng kênh truyền.

Tiếp đến, xem xét hiệu năng của bộ cân bằng ZF với các mức SNR khác nhau như trên hình 4. Để nhận thấy, với mô phỏng MatLab dựa trên lý thuyết, đường BER có thể xuất phát từ các mức SNR rất thấp như -10 dB và đạt đến không có sai số tại SNR ở ngưỡng 16 dB. Mô phỏng GNU Radio sử dụng SDR4All gần với thực tế hơn, phải đến khi SNR lớn hơn 2 dB, bên thu mới nhận dạng và tách được tín hiệu của bên phát khối nền nhiễu. Xét về độ chính xác, rõ ràng SDR4All thấp hơn đáng kể so với lý thuyết và chỉ đạt tiệm cận $BER \approx 10^{-2}$ tại các ngưỡng SNR lớn hơn 20 dB. Cần lưu ý rằng, các tỷ lệ BER trên từ SDR4All chưa bao gồm các khối mã kênh (Channel coding) để sửa lỗi.

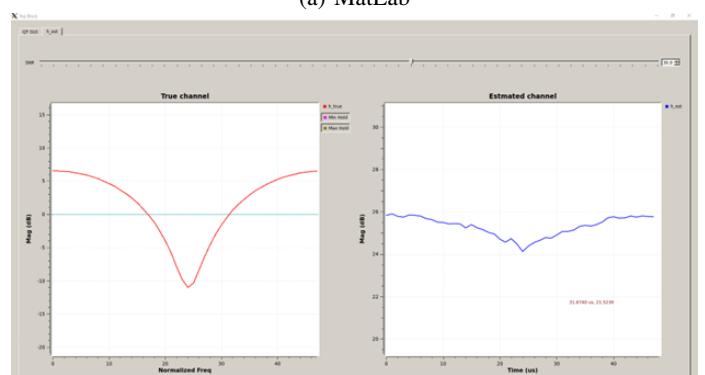
B. Kết quả thực nghiệm

1) *Thiết lập thí nghiệm:* Hai robot cỡ nhỏ sử dụng BladeRF để truyền tín hiệu được thiết lập như trên hình 5. Các thông số chạy thực nghiệm như trên bảng I. Điều kiện thực nghiệm là tầng 7 nhà E3, Trường Đại học Công nghệ - ĐHQGHN, bố trí hệ thống ở ba vị trí khác nhau để đưa ra kết quả trung bình của việc ước lượng kênh truyền. Các giá trị BER được

¹https://github.com/DoHaiSon/SDR_NC/blob/master/Documents/Readme.pdf

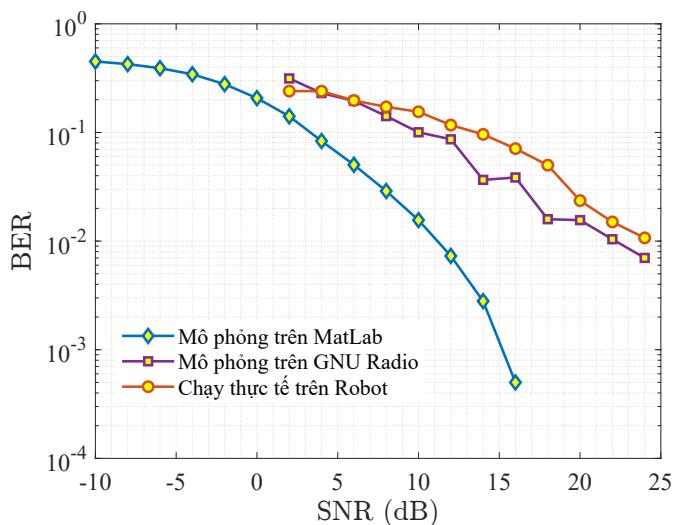


(a) MatLab

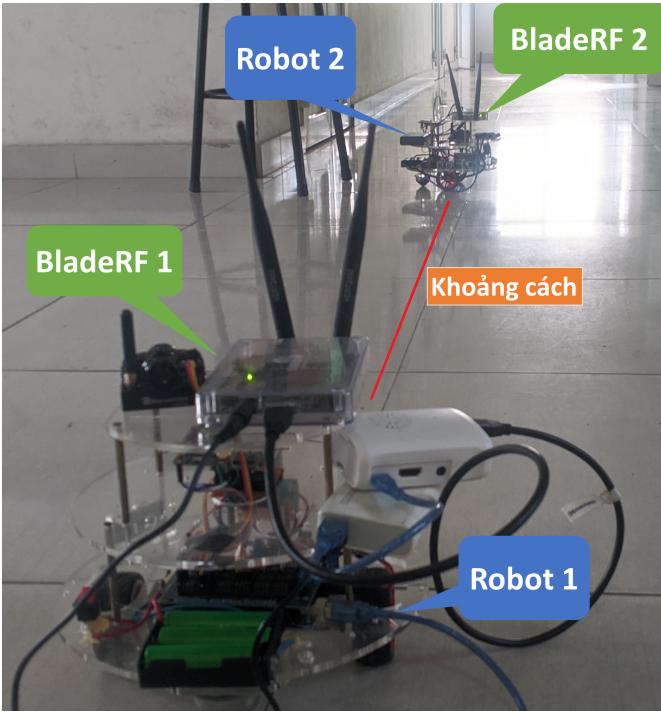


(b) GNU Radio

Hình 3: Kết quả mô phỏng ước lượng kênh truyền trên MatLab và GNU Radio.



Hình 4: BER thu được thông qua mô phỏng MatLab, GNU Radio, và chạy thực tế trên BladeRF.



Hình 5: Hình ảnh hệ thống thực nghiệm gồm hai robot và hai BladeRF.

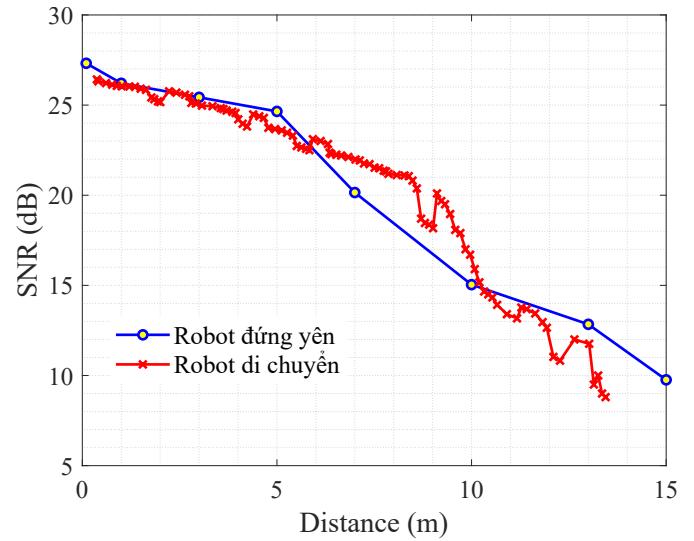
Bảng I: Các tham số của hệ thống thực nghiệm ước lượng kênh truyền cho robot sử dụng SDR

Thông số	Giá trị
Tần số sóng mang	$f_c = 2,515 \text{ GHz}$
Loại điều chế	BPSK (Binary phase shift keying)
Chuỗi dữ liệu truyền đi	[1, 2, ..., 20]
Độ dài FFT	$N_{fft} = 128$
Số sóng mang con được sử dụng	$N_{Occ} = 48$
Kiểu chèn Pilot	Block-type
Độ dài tiên tố vòng	$N_{CP} = 16$

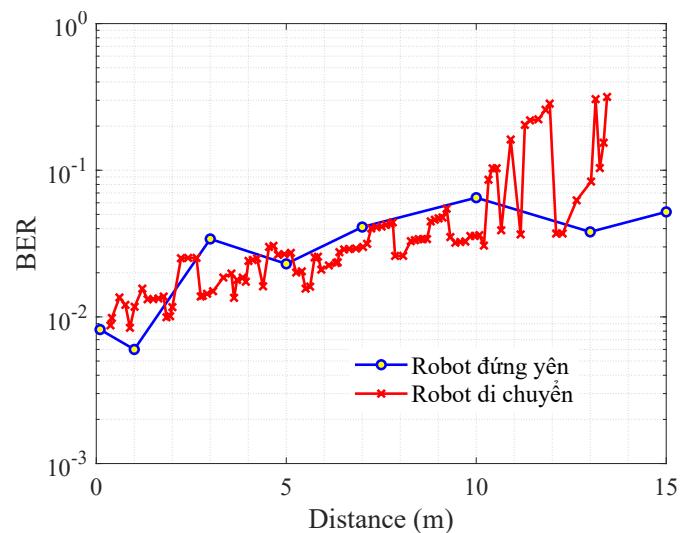
tính trung bình và thu thập sau mỗi 100.000 bit được giải điều chế.

2) *Kết quả:* Trước hết, xem xét độ chính xác của việc ước lượng kênh truyền khi sử dụng các thiết bị BladeRF thực so sánh với mô phỏng trên MatLab và GNU Radio. Kết quả như trên hình 4, khi đặt hai BladeRF đứng yên, trong điều kiện không có vật cản ở giữa, tỷ lệ lỗi bit thu được cao hơn so với mô phỏng MatLab và cả GNU Radio. Về hình dạng đường BER khá tương đồng với mô phỏng trên GNU Radio do sử dụng chung lưu đồ trên GNU Radio, tuy nhiên điều kiện kênh truyền thực sẽ phức tạp hơn so với bộ lọc FIR mô phỏng h dẫn đến tỷ lệ lỗi bit cao hơn. Tương tự như GNU Radio, các BladeRF cũng yêu cầu SNR đạt đến một ngưỡng SNR nhất định để phát hiện và tách được tín hiệu nguồn khỏi nhiễu, theo thực nghiệm, ở khoảng 2-4 dB.

Tiếp đến, chúng tôi xem xét mối tương quan giữa khoảng cách giữa hai robot và tỷ lệ SNR trong hai trường hợp: (i), robot đứng yên tại 8 khoảng cách khác nhau (0,1, 1, 3, 5, 7, 10, 13, và 15 mét); (ii), robot di chuyển với vận tốc 0,3 m/s và



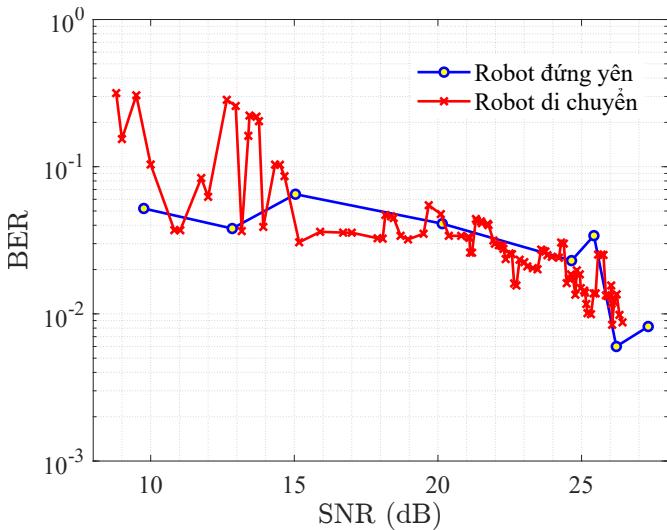
Hình 6: Sự thay đổi của SNR theo khoảng cách giữa hai robot.



Hình 7: Sự thay đổi của BER theo khoảng cách giữa hai robot.

thu thập dữ liệu liên tục. Kết quả thu được như trên hình 6 cho thấy sự suy giảm nhanh chóng của giá trị SNR khi khoảng cách giữa hai robot tăng dần. Độ dốc của đường SNR ở cả hai trạng thái đều khá giống nhau, dù vẫn có những sự không ổn định nhất định với dữ liệu được thu thập khi robot di chuyển. Đặc biệt, khi khoảng cách lớn hơn 13 mét, robot thu không nhận được giá trị SNR hay robot thu không phát hiện ra tín hiệu bên phát ẩn trong nền nhiễu.

Do tỷ số SNR thay đổi lớn theo khoảng cách, do vậy độ chính xác của việc ước lượng kênh truyền và tỷ lệ sai số bit cũng bị ảnh hưởng. Kết quả thu được trên hình 7 cho thấy BER cũng tăng dần khi khoảng cách ra tăng. Với trạng thái robot tĩnh, ở khoảng cách 1 mét, sai số nhỏ nhất đạt $6 * 10^{-3}$ và $5 * 10^{-2}$ với khoảng cách 15 mét. Đây là chênh lệch lớn, tỷ lệ sai số bit tăng lên hơn 8 lần khi khoảng cách tăng từ 1 lên 15 mét. Khi robot di chuyển, ở các khoảng cách nhỏ hơn 10 mét, BER vẫn bám sát với sai số khi robot tĩnh. Tuy



Hình 8: Sự thay đổi của BER theo tỷ lệ SNR.

nhiên với các khoảng cách lớn, độ không ổn định tăng, dẫn đến BER có thể tăng đến 0,3 hay thậm chí không thể nhận dạng tín hiệu phát ở khoảng cách 13 mét trở lên.

Cuối cùng, xem xét mối tương quan giữa tỷ số SNR và tỷ lệ sai bit của bộ nhận dạng ZF trong mã nguồn SDR4All. Kết quả thu thập trên hình 8 cho thấy sự phụ thuộc lớn của BER vào SNR. Có thể nhận xét, với mã nguồn SDR4All, tỷ lệ SNR nên ở ngưỡng 10 dB trở lên để hệ thống có thể hoạt động. Kết quả thực nghiệm này có thể gợi ý cho việc lựa chọn dải truyền thông (communication range) an toàn trong hệ thống đa robot và các ngưỡng tham chiếu cho các nghiên cứu tiếp theo về điều chế thích nghi để cải thiện hiệu suất của mã nguồn SDR4All.

IV. KẾT LUẬN

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đã xây dựng mô hình thực nghiệm hệ thống truyền thông đa robot sử dụng SDR. Trước hết, chúng tôi giới thiệu sơ lược về phương pháp ước lượng kênh truyền ZF được sử dụng cho OFDM. Sau đó, nhiều kịch bản mô phỏng và thực nghiệm được đưa ra để kiểm chứng khả năng nhận dạng kênh truyền của hai robot khi đứng yên và di chuyển liên tục. Kết quả được đưa ra trong bài báo chứng minh tính khả thi của việc ứng dụng các thiết bị SDR vào các nghiên cứu về mạng đa robot trong tương lai cũng như tiết lộ một số đặc điểm của bộ nhận dạng trong mã nguồn SDR4All. Trong tương lai, chúng tôi sẽ xem xét tăng thêm số robot hoạt động trong mạng cũng như phát triển thêm các bộ cân bằng khác cho mã nguồn SDR4All phục vụ cho các mục đích nghiên cứu, giảng dạy.

Các lưu đồ trên GNU Radio đã được sử dụng trong bài báo, các khôi được chúng tôi xây dựng và ví dụ có thể tham khảo tại:

https://github.com/DoHaiSon/SDR_NC/tree/BER

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tiến hành trong khuôn khổ đề tài QG.21.26 “Giải pháp chống, chịu nhiều duy trì mạng đa robot

trong môi trường động” của ĐHQGHN.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] K.-C. Chen, S.-C. Lin, J.-H. Hsiao, C.-H. Liu, A. F. Molisch, and G. P. Fettweis, “Wireless networked multirobot systems in smart factories,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 4, pp. 468–494, 2021.
- [2] A. Girma, N. Bahadori, M. Sarkar, T. G. Tadewos, M. R. Behnia, M. N. Mahmoud, A. Karimoddini, and A. Homaifar, “IoT-enabled autonomous system collaboration for disaster-area management,” *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 7, no. 5, pp. 1249–1262, 2020.
- [3] W. Burgard, O. Brock, and C. Stachniss, *An Experimental Study of Exploiting Multipath Fading for Robot Communications*. MIT Press, 2008, pp. 289–296.
- [4] X. Gao, X. Mu, W. Yi, and Y. Liu, “Intelligent trajectory design for ris-noma aided multi-robot communications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, early access, 2023.
- [5] T. T. Quynh, N. K. Hoang, N. V. Ly, and et. al., “Network coding with multimedia transmission and cognitive networking: An implementation based on software-defined radio,” *REV Journal on Electronics and Communications*, vol. 10, no. 3–4, 2020.
- [6] GNU Radio. [Online]. Available: www.gnuradio.org
- [7] D. H. Son and T. T. T. Quynh, “Đồng bộ nhiều sdr trong thực thi thuật toán ước lượng hướng sóng đèn music,” in *Hội nghị Quốc gia lần thứ XXIV về Điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin*, 2021.
- [8] Raspberry Pi 3 Model B. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- [9] BladeRF x115 - Nuand. [Online]. Available: www.nuand.com
- [10] SDR4All. [Online]. Available: https://github.com/avitech-vnu/SDR_NC/
- [11] E. Baştug, “Study of vandermonde frequency division multiplexing on software defined radio platform,” Ph.D. dissertation, CentraleSupélec, 2012.
- [12] Y. S. Cho, J. Kim, W. Y. Yang, and C. G. Kang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB*. John Wiley & Sons, 2010.
- [13] T. T. T. Quynh, N. K. Hoang, N. V. Ly, D. H. Son, and N. L. Trung, “Thiết lập nền tảng sdr cho hệ thống ofdm,” in *Truyền thông chuyển tiếp hai chiều: Lý thuyết và Thực nghiệm*, N. L. Trung, V. N. Q. Bảo, and T. T. T. Quynh, Eds. Nhà xuất bản Đại học Quốc gia Hà Nội, Jul. 2022, ch. 9, pp. 145–228 (preprint).
- [14] Y. Wu, S. Attallah, and J. W. M. Bergmans, “On the optimality of the null subcarrier placement for blind carrier offset estimation in ofdm systems,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 2109–2115, 2009.
- [15] T. Schmidl and D. Cox, “Robust frequency and timing synchronization for ofdm,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 45, no. 12, pp. 1613–1621, 1997.
- [16] A. Ladaycia, A. Mokraoui, K. Abed-Meraim, and A. Belouchrani, “Performance bounds analysis for semi-blind channel estimation in mimo-ofdm communications systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 9, pp. 5925–5938, Sept. 2017.