

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP.HCM**

NGUYỄN THỊ YẾN LINH

**NGHIÊN CỨU GIAO THỨC TRUYỀN GÓI TIN NGẮN CÓ ĐỘ TIN
CẬY CAO VÀ ĐỘ TRỄ THẤP TRONG TRUYỀN THÔNG CỘNG TÁC**

Chuyên ngành: Kỹ thuật điện tử
Mã số chuyên ngành: 9520203

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2025

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM**

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS. Phạm Ngọc Sơn

Người hướng dẫn khoa học 2: GS. TS. Võ Nguyễn Quốc Bảo

Luận án đã được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở họp tại
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM
vào ngày 26 tháng 10 năm 2024

MỞ ĐẦU

Lý do chọn đề tài

Cho đến nay, các dịch vụ của Internet vạn vật (IoT), bao gồm: công nghệ tự động hóa, hệ thống vận tải thông minh, Internet xúc giác, cũng như thực tế ảo (VR) và thực tế tăng cường (AR) đang phát triển nhanh chóng. Công nghệ mạng không dây thế hệ thứ năm (5G) và các phiên bản tiên tiến hơn, bao gồm 5.5G và 6G, mở ra cánh cửa cho sự hội nhập sâu rộng của con người vào thế giới IoT và một xã hội siêu kết nối. Trong bối cảnh công nghệ mạng và truyền thông mới nổi, ba dịch vụ chính sẽ có những tiến bộ đột phá bao gồm: giao tiếp máy với máy (mMTC), băng thông rộng di động cải tiến (eMBB), và giao tiếp độ tin cậy cao cùng độ trễ thấp (uRLLCs). Hiện nay, việc phát triển dịch vụ uRLLCs, với đặc điểm là độ tin cậy cao và trễ thấp, đang trở thành ưu tiên chính trong các ngành kỹ thuật và công nghiệp. Truyền thông uRLLCs yêu cầu độ tin cậy cao đến 99.999% và độ trễ ngắn dưới 1ms, nhằm đáp ứng các tiêu chuẩn cao về chất lượng dịch vụ (QoS).

Hiện nay, truyền thông gói tin ngắn (SPC) được xem là phương thức giao tiếp chính để cải thiện dịch vụ uRLLCs trong mạng 5G và các thế hệ mạng tương lai. Bên cạnh đó, mạng cộng tác đã được chứng minh là giải pháp hứa hẹn trong việc cải thiện độ tin cậy cho hầu hết các hệ thống mạng hiện tại, cũng như trong việc phát triển các mạng thế hệ mới, mang lại nhiều lợi ích như tăng cường hiệu quả công suất kênh truyền, độ tin cậy và mở rộng phạm vi phủ sóng. Do đó, việc nghiên cứu SPC kết hợp mạng cộng tác là hướng nghiên cứu tiềm năng để thực hiện hệ thống uRLLCs trong mạng thế hệ mới 5G. Tuy nhiên, đến nay, các nghiên cứu về SPC trong mạng cộng tác chủ yếu tập trung vào việc cải thiện độ tin cậy mà chưa đồng thời đạt được yêu cầu về độ tin cậy và thời gian trễ.

Trên các cơ sở đã nói trên, Luận án “Nghiên cứu giao thức truyền gói tin ngắn có độ tin cậy cao và độ trễ thấp trong truyền thông cộng tác” nhằm đề xuất các giao thức mới, sử dụng kỹ thuật tiên tiến ở lớp vật lý để giải quyết cả hai vấn đề độ tin cậy và độ trễ trong SPC, định hướng tới việc cải thiện dịch vụ uRLLCs.

Mục tiêu nghiên cứu

Luận án tập trung vào hai mục tiêu chính được xác định rõ như sau:

- Mục tiêu thứ nhất tập trung vào việc xây dựng một mô hình SPC trong mạng truyền thông cộng tác, và thực hiện tối ưu hiệu năng của hệ thống nhằm đáp ứng các yêu cầu của hệ thống uRLLCs trong chuẩn mạng thế hệ mới.
- Mục tiêu thứ hai nghiên cứu và áp dụng các phương pháp và kỹ thuật tiên tiến để cải thiện độ tin cậy và giảm thiểu độ trễ, cụ thể là áp dụng các kỹ thuật như mặt phản xạ thông minh (IRS), phương pháp đa truy nhập phi trực giao, và các kỹ thuật học sâu (DL).

Nhiệm vụ nghiên cứu

Luận án thực hiện bốn nhiệm vụ chính như sau:

- Nhiệm vụ 1: Xây dựng và đánh giá hiệu năng của mô hình SPC trong mạng chuyển tiếp hai chặng.
- Nhiệm vụ 2: Tối ưu hiệu năng SPC trong mạng chuyển tiếp hai chặng để đáp ứng yêu cầu của hệ thống uRLLCs.
- Nhiệm vụ 3: Phân tích hiệu năng của hệ thống SPC sử dụng IRS để nâng cao độ tin cậy và giảm độ trễ trong mạng cộng tác.
- Nhiệm vụ 4: Ước lượng công suất phân bổ nguồn phát cho hệ thống SPC thông qua ứng dụng kỹ thuật DL, nhằm tuân thủ các tiêu chí của hệ thống uRLLCs.

Phạm vi nghiên cứu

Luận án chủ yếu nghiên cứu SPC trong truyền thông cộng tác, mạng chuyển tiếp hai chặng và mạng đa truy nhập phi trực giao.

Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

- Hướng tiếp cận: dựa trên phân tích các nghiên cứu về SPC trong mạng thế hệ mới, NCS đã so sánh, đánh giá kết quả và phương pháp, nhận diện vấn đề còn tồn tại và đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo cho Luận án.
- Phương pháp nghiên cứu:

Luận án sử dụng các phương pháp nghiên cứu như sau:

- Phương pháp phân tích và so sánh: Nghiên cứu sinh (NCS) phân tích và so sánh các nghiên cứu về SPC, từ đó đề xuất các mô hình mới để đáp ứng mục tiêu nghiên cứu cụ thể của Luận án.
- NCS áp dụng phân tích thống kê, bao gồm phân tích tín hiệu, toán giải tích, xác suất và toán tối ưu, để đánh giá hiệu năng và tối ưu hóa các hệ thống đề xuất.
- Phương pháp mô phỏng Monte Carlo được dùng để xác minh kết quả phân tích lý thuyết.
- NCS so sánh hiệu năng của mô hình hệ thống đề xuất với các hệ thống hiện hành, nhằm chứng minh ưu thế của mô hình mới.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu

- Ý nghĩa khoa học của Luận án đóng góp cho khoa học các giải pháp mới, và các kết quả tiên tiến về SPC như sau:
 - Luận án cung cấp giải pháp mới cho SPC trong mạng chuyển tiếp hai chặng nhằm cải thiện độ tin cậy và giảm trễ, bằng cách: i) Khai thác độ phân tập không gian với các kỹ thuật lựa chọn an ten phát (TAS), lựa chọn nút chuyển tiếp một phần (PRS), và tỉ số kết hợp cực đại (MRC); ii) Tối ưu công suất phát và vị trí nút chuyển tiếp.
 - Luận án này đề xuất giải pháp sử dụng IRS thay thế cho nút chuyển tiếp DF trong hệ thống SPC, giúp cải thiện đáng kể hiệu năng hệ thống.
 - Luận án đầu tiên đề xuất sự kết hợp của kỹ thuật định dạng sóng và IRS trong NOMA để cải thiện độ tin cậy của SPC, và sử dụng DL để giải quyết yêu cầu về độ trễ thấp và xử lý nhanh trong mạng tương lai, tập trung vào dự đoán BLER, thông lượng, độ trễ, và công suất phân bổ nguồn phát.
- Ý nghĩa thực tiễn của Luận án
 - Mô hình đầu tiên cho SPC trong mạng chuyển tiếp hai chặng được tối ưu hóa cho 5G, với các tính năng như công suất nguồn phát thấp, vùng phủ sóng hạn chế, khoảng cách truyền ngắn, và nhiều đồng kênh cao, cung cấp nền tảng cho nghiên cứu và thiết kế mạng MIMO tiếp theo cho SPC.

- Mô hình SPC sử dụng IRS rất quan trọng trong mạng chuyển tiếp và NOMA, hiệu quả cho 5G và mạng tương lai, đặc biệt ở môi trường truyền sóng khó như đô thị, đồi núi, với năng lượng nguồn phát hạn chế và vùng phủ sóng nhỏ.
- Luận án đã được công bố trên tạp chí quốc tế Web of Science như Journal of Communications and Networks (Q1) và Institution of Engineering and Technology Communications (Q2), hội nghị quốc tế RIVF 2023, hội nghị quốc tế ATC 2024 và trên Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin và Truyền thông quốc gia. Đóng góp này cung cấp tài liệu tham khảo quý giá cho nhà nghiên cứu và tổ chức trong lĩnh vực công nghệ mạng không dây.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

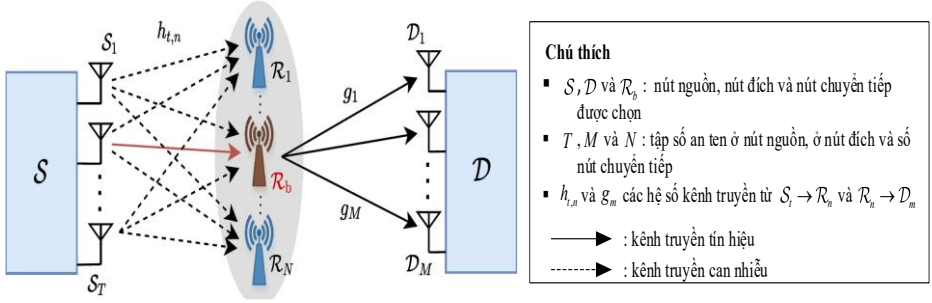
Chương 1 trình bày tổng quan những vấn đề có liên quan đến giao tiếp gói tin ngắn trong mạng cộng tác. Những vấn đề này được đánh giá và phân tích dựa trên nghiên cứu từ các công trình quốc tế và trong nước liên quan trong những năm gần đây. Từ đó, Nghiên cứu sinh đã xác định các khía cạnh còn tồn tại, tiềm năng phát triển và đồng thời đề xuất ba mô hình nghiên cứu từ Chương 3 đến Chương 5.

CHƯƠNG 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Chương 2 trình bày cơ sở lý thuyết tổng quan về giao tiếp gói tin ngắn và truyền thông cộng tác. Cụ thể, nội dung mô tả cấu trúc của gói tin ngắn, phân tích số liệu đánh giá hiệu năng của giao tiếp gói tin ngắn và trình bày các mô hình cơ bản trong truyền thông cộng tác. Hơn nữa, Chương này đi sâu vào phân tích ưu và nhược điểm của giao tiếp gói tin ngắn và truyền thông cộng tác trong các hệ thống uRLLCs. Ngoài ra, Chương 2 cũng đề cập đến các lý thuyết cơ bản liên quan đến các kỹ thuật cải tiến như mặt phản xạ thông minh, đa truy nhập phi trực giao và học sâu.

CHƯƠNG 3 TỐI ƯU HIỆU NĂNG HỆ THỐNG TRUYỀN THÔNG TIN GÓI NGẮN TRONG MẠNG CHUYỂN TIẾP HAI CHẶNG

Chương 3 đề xuất mô hình truyền gói tin ngắn trong mạng giải mã và chuyển tiếp hai chặng, kết hợp các giao thức như lựa chọn an ten phát TAS, lựa chọn nút chuyển tiếp một phần PRS và tỉ số kết hợp cực đại MRC, được minh họa như Hình 3.1 .



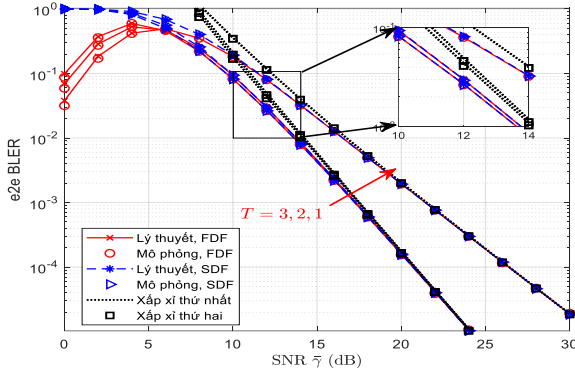
Hình 3.1: Mô hình mạng DF hai chặng với các kỹ thuật TAS/PRS/MRC trong SPC.

Nguyên lý hoạt động: Mô hình hệ thống hoạt động dựa trên cơ chế phân chia thời gian cho đa truy nhập với hai khe thời gian liên tiếp qua các nút R_n . Trong khe thời gian thứ nhất, nút S sẽ truyền tín hiệu đến các nút R_n , trong đó hệ thống sử dụng đồng thời các kỹ thuật TAS và PRS. Theo nguyên tắc TAS, hệ thống chỉ chọn một an ten phát tối ưu của nút nguồn để thực hiện quá trình truyền. Tiếp theo, trong khe thời gian thứ hai, R_b được chọn sẽ thu nhận tín hiệu từ nút S , tiếp theo đó, R_b sẽ tiến hành xử lý và chuyển tiếp tín hiệu này đến nút D bằng phương pháp DF. Để hiệu quả và độ tin cậy cho việc nhận tín hiệu, nút D triển khai giao thức MRC.

Hiệu năng hệ thống được phân tích và đánh giá dựa vào các thông số: tỉ lệ lỗi khối, độ trễ và thông lượng. Biểu thức toán học cho các thông số này được đưa ra dưới dạng tường minh và được kiểm chứng thông qua phương pháp mô phỏng Monte Carlo. Kết quả mô phỏng được trình bày, gồm phần đánh giá và phần tối ưu hiệu năng hệ thống với các tham số mô phỏng được thiết lập với số bit truyền

tin là $\beta = 256$ bits và chiều dài của khối tin là $k = 256$ CUs, tổng khoảng cách truyền tin $D = 10$, hệ số suy hao kênh truyền $\eta = 3$.

Phân đánh giá hiệu năng hệ thống: Hiệu năng toàn trình của hệ thống sử dụng giao thức chuyển tiếp cố định (FDF) cải thiện hơn chuyển tiếp lựa chọn (SDF) với mọi giá trị tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu trung bình (SNR) $\bar{\gamma}$ ở Hình 3.2. Do đó, kỹ thuật FDF được chọn để khảo sát trong các hình vẽ ở phần sau.

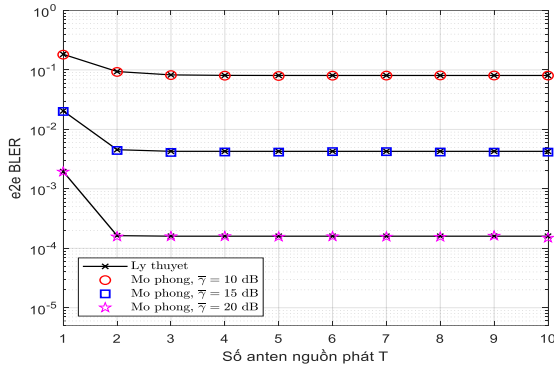


Hình 3.2: e2e BLER của SDF và FDF thay đổi theo SNR $\bar{\gamma}$ với $N=2$ và $M=3$

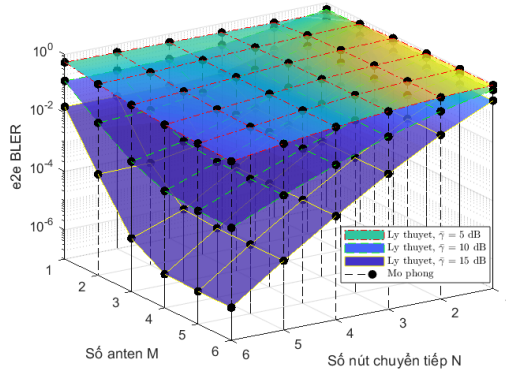
Hình 3.3 xét ảnh hưởng của T vào tỉ lệ lỗi khối toàn trình của hệ thống (e2e BLER) của phương pháp FDF, trong đó $N=2$, $M=3$ và $\bar{\gamma}=10, 15, 20$ dB. Quan sát hình, chúng ta thấy rõ e2e BLER càng giảm khi $\bar{\gamma}$ càng tăng và không đổi khi $T \geq 2$. Do đó, $T=2$ là một lựa chọn hiệu quả để cải thiện hiệu năng và tiết kiệm chi thiết lập hệ thống.

Hình 3.4 chứng minh e2e BLER phụ thuộc vào số nút N và số anten M ở nút đích trong không gian ba chiều. Cụ thể, hiệu năng càng cải thiện khi tăng $\bar{\gamma}$, N và M . Do đó, điều này làm nổi bật tầm quan trọng của việc thiết kế số nút N và số anten một cách chính xác sao cho hiệu năng được cải thiện như dự kiến và đồng thời chi phí lắp đặt được giảm xuống. Cụ thể, e2e BLER $\approx 10^{-5}$ ở $\bar{\gamma}=15$ dB và $T=2$, số nút chuyển tiếp và số anten có thể chọn $M=3$ và $N=4$

. Do vậy, chúng ta cũng chọn giá trị $M=3$ và $N=4$ cho các mô phỏng từ Hình 3.5 trở đi.

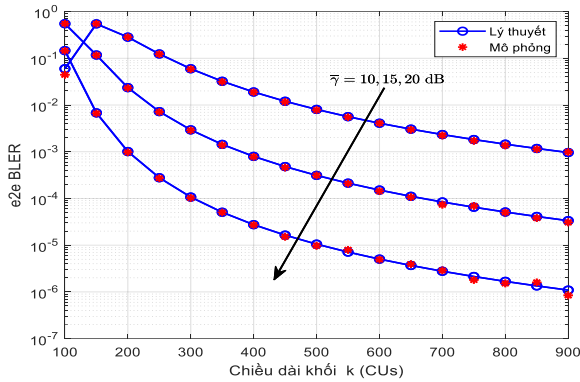


Hình 3.3: Sự ảnh hưởng e2e BLER vào số an ten nguồn phát T với $N=2$ và $M=3$



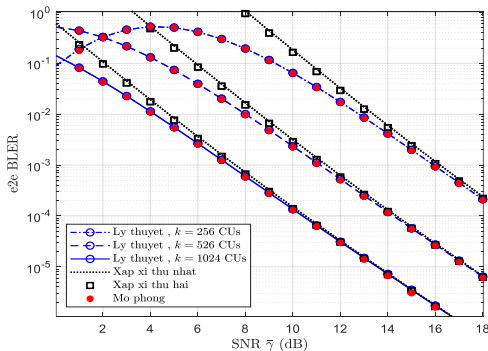
Hình 3.4: e2e BLER theo số nút N và số an ten M với ba trường hợp $\bar{\gamma} = 10, 15$ dB và 20dB.

Trong Hình 3.5, hiệu năng hệ thống được cải thiện bằng cách tăng $\bar{\gamma}$ và chiều dài khối k . Tuy nhiên, chiều dài khối lớn cũng gây ra độ trễ toàn trình cao hơn, như được mô tả trong Hình 3.7.

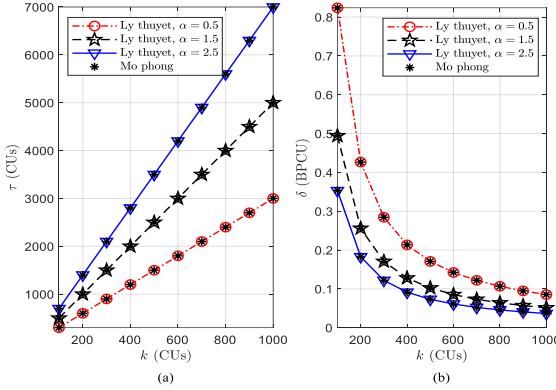


Hình 3.5: e2e BLER theo độ dài khối tin k với ba trường hợp $\bar{\gamma} = 10, 15$ dB và 20dB.

Do đó, khi cải thiện hiệu năng dựa vào việc tăng $\bar{\gamma}$ hay tăng chiều dài khối cần phải thận trọng. Ví dụ, đối với $\bar{\gamma} = 20$ dB, để đảm bảo yêu cầu về độ tin cậy theo yêu cầu $BLER \approx 10^{-5}$ có thể chọn chiều dài khối 450 CUs. Hình 3.6 khẳng định các đường cong của kết quả lý thuyết và đường mô phỏng hội tụ với các đường tiệm cận ở vùng $\bar{\gamma}$ cao. Hơn nữa, đường tiệm cận thứ hai (áp dụng tích phân Riemann) hoàn toàn khớp với đường tiệm cận thứ nhất (áp dụng vô cùng bé tương đương). Do vậy, phương pháp xấp xỉ thứ hai được coi là một cách đánh giá hiệu quả cho phương pháp xấp xỉ thứ nhất, đồng thời chúng ta có thể dựa vào phương pháp này để đơn giản hóa độ phức tạp khi tính toán e2e BLER hệ thống SPC.



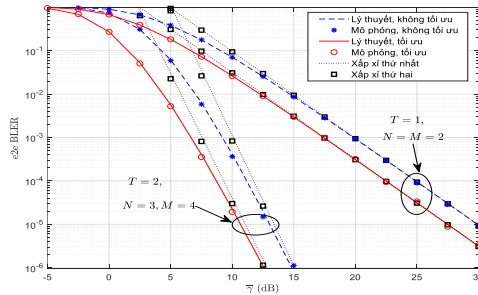
Hình 3.6: Sự phụ thuộc e2e BLER gần đúng và tiệm cận vào $\bar{\gamma}$ trong các trường hợp $k = 256, 512$ CUs và 1024 CUs .



Hình 3.7: Độ trễ và thông lượng toàn trình theo chiều dài khối k ở $\bar{\gamma} = 20$ dB với các trường hợp $\alpha = 0.5, 1.5$ và 2.5 .

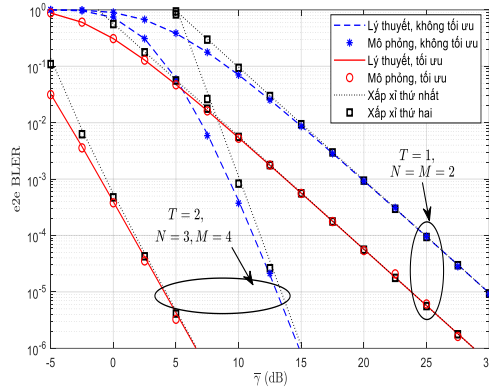
Phản tối ưu hiệu năng: Chúng ta thiết lập tham số cho cấu hình không tối ưu công suất với công suất $P_S = P_{R_b} = 0.5P_0$ và cấu hình không tối ưu vị trí với khoảng cách $d_1 = d_2 = 0.5D$ cho các trường hợp tổng quát với $T=2$, $N=3$ và $M=4$ và trường hợp đặc biệt với $T=1$, $N=M=2$.

Hình 3.8 cho thấy rằng hiệu năng trường hợp tối ưu công suất cao hơn đáng kể so với trường hợp không tối ưu ở mọi giá trị $\bar{\gamma}$ cho tình huống tổng quát và đặc biệt với $BLER \approx 10^{-5}$ độ lợi mảng (đoạn chênh lệch SNR giữa đường tối ưu và không tối ưu) đạt được là 2.5 dB .



Hình 3.8: $e2e$ BLER theo SNR trung bình giữa trường hợp tối ưu và không tối ưu công suất.

Trong Hình 3.9, hiệu năng trong trường hợp tối ưu vị trí vượt trội hơn hẳn trường hợp không tối ưu. Với $BLER \approx 10^{-5}$, độ lợi mảng thu được là 6.25dB và 9.5dB, tương ứng.

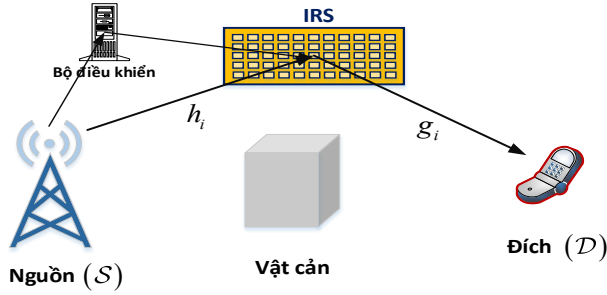


Hình 3.9: $e2e$ BLER theo SNR trung bình trong tình huống giữa tối ưu và không tối ưu vị trí.

Các kết quả của Chương 3 cho thấy ảnh hưởng của hiệu năng hệ thống vào SNR, số nút chuyển tiếp tiếp, số an ten nút đích và chiều dài khối tin. Cụ thể, hiệu năng hệ thống cải thiện khi tăng SNR (tức công suất nguồn phát), số nút chuyển tiếp, số an ten nút nhận và chiều dài khối tin. Tuy nhiên, trong quá trình thiết kế hệ thống cần cân nhắc như sau: (1) tăng nguồn phát quá nhiều sẽ gây nhiễu lên người dùng khác trong mạng; 2) chọn số nút chuyển tiếp và số an ten nút đích phù hợp dựa vào độ lợi phân tập của hệ thống; 3) tăng chiều dài khối sẽ ảnh hưởng đến độ trễ. Ngoài ra, hệ thống được thiết lập ở chế độ tối ưu giúp cải thiện hiệu năng mạng. Kết quả của Chương 3 được minh chứng trong kết quả công bố [A-1] của NCS.

CHƯƠNG 4 PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG HỆ THỐNG TRUYỀN THÔNG TIN GÓI NGẮN TRONG MẠNG CHUYỂN TIẾP SỬ DỤNG MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH

Chương 4 đề xuất mô hình hệ thống SPC qua mặt IRS được minh họa như Hình 4.1.



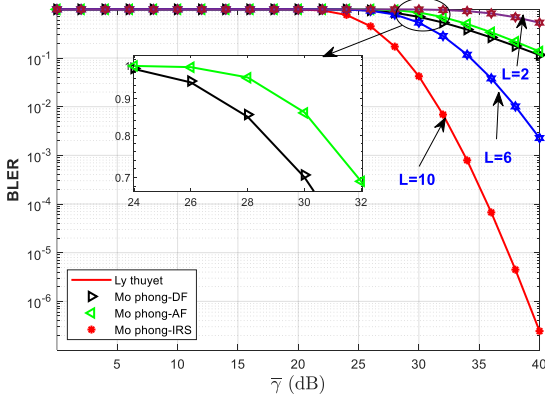
Hình 4.1: Mô hình SPC được trợ giúp của IRS.

Trong hệ thống này, nút nguồn (S) dùng một anten để truyền tín hiệu đến nút đích (D) dưới sự trợ giúp của tấm IRS. Hệ thống không xét kênh truyền trực tiếp giữa S và D do vật cản xung quanh như tòa nhà, cây xanh. Kênh truyền giữa S và D là kênh fading Rayleigh bán tĩnh phẳng. Hơn nữa, IRS có khả năng phối hợp và trao đổi thông tin trạng thái kênh (CSI) từ cả hai nút S và D qua bộ điều khiển không dây.

Hiệu năng của hệ thống SPC qua IRS được phân tích, đánh giá qua tham số BLER và độ lợi phân tập hệ thống. Đồng thời, hiệu năng hệ thống đề xuất được so sánh đối chiếu với hệ thống SPC qua nút chuyển tiếp $\mathcal{R}$.

Kết quả mô phỏng được thực hiện với các thông số mô phỏng giống nhau cho cả hai hệ thống SPC qua IRS và $\mathcal{R}$ như sau: số dữ liệu truyền tin là $\beta = 256$ bits; độ dài khối tin $k = 200$ CUs; khoảng cách truyền chuẩn hóa là $D = 1$; khoảng cách của các kênh truyền $d_1 = d_2$ (IRS và $\mathcal{R}$ được đặt giữa S và D); công suất phát bằng nhau. Mô hình suy hao đường truyền đơn giản giữa nguồn phát và nguồn nhận, $PL = PL_0 (d/d_0)^{-\eta}$ trong đó $PL_0 = -30$ dB là suy hao công suất tại khoảng cách tham chiếu $d_0 = 1$ m, và hệ số suy giảm đường truyền $\eta = 3$.

Hình 4.3 minh họa rằng BLER của hệ thống qua IRS cải thiện đáng kể hơn (giảm nhanh hơn) so với hệ thống FDF và AF, khi xét $L = 6$ và $L = 10$. Đặc biệt, khi tăng giá trị của L thì BLER càng giảm, tức là hiệu năng cải thiện.

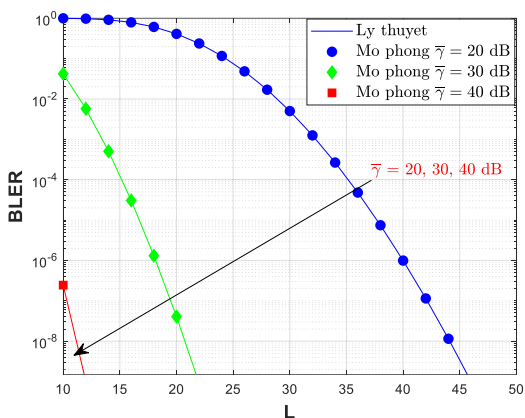


Hình 4.3: BLER giữa hai mô hình SPC qua IRS và qua $\mathcal{R}$ với

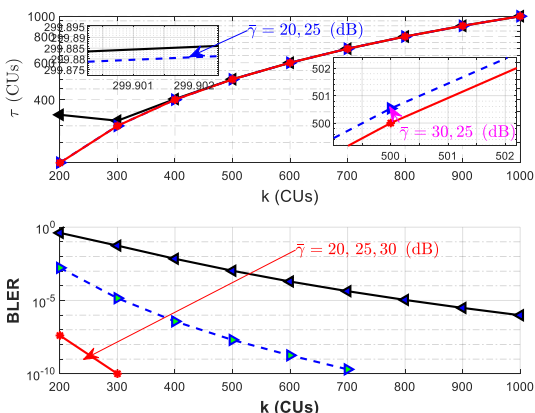
$L=2$, $L=6$ và $L=10$, tương ứng.

Quan sát Hình 4.4, chúng ta rõ ràng nhận thấy rằng sự tăng của cả hai tham số L và $\bar{\gamma}$, BLER giảm đáng kể. Tuy nhiên, khi $\bar{\gamma}$ tăng, công suất của nguồn phát cũng tăng theo, dẫn đến can nhiễu cũng sẽ tăng. Vì vậy, để cải thiện hiệu năng của hệ thống với nguồn công suất giữ nguyên, có thể xem xét việc tăng các phân tử phản xạ L của IRS để đạt được mức BLER như mong muốn.

Cuối cùng, Hình 4.5 phân tích sự tác động của độ dài gói tin k lên BLER và độ trễ (τ) của hệ thống SPC sử dụng IRS với các giá trị tăng của $\bar{\gamma}$ lần lượt như 20dB, 25dB, 30dB. Độ trễ τ được định nghĩa là thời gian nguồn phát truyền thành công tín hiệu đến nguồn nhận $\frac{k}{1 - \epsilon_{\text{IRS}}^{\text{IRS}}}$. Quan sát hình ta thấy rõ một sự đánh đổi giữa độ tin cậy và độ trễ trong hệ thống SPC sử dụng IRS. Cụ thể, k và $\bar{\gamma}$ đều có tác động tích cực đến độ tin cậy, thể hiện qua việc giảm mạnh BLER. Tuy nhiên, khi k tăng độ trễ τ cũng tăng tỉ lệ thuận với độ dài gói tin, dẫn đến thời gian truyền tin lớn hơn. Ở mức $\bar{\gamma} = 30\text{dB}$, BLER giảm xuống giá trị cực thấp 10^{-10} khi $k \geq 300$. Điều này chứng minh rằng hệ thống đạt được độ tin cậy rất cao khi công suất tín hiệu lớn và gói tin dài. Tuy nhiên, việc độ trễ tăng theo k đòi hỏi phải cân nhắc kỹ lưỡng trong thiết kế để đáp ứng yêu cầu cụ thể của các ứng dụng.



Hình 4.4: BLER theo số yếu tố phản xạ L trong hệ thống SPC qua IRS.



Hình 4.5 Sự ảnh hưởng BLER và độ trễ vào độ dài gói tin k trong hệ thống SPC qua IRS.

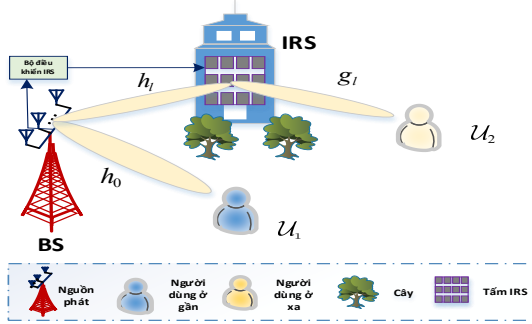
Kết quả từ Chương 4 cho thấy, hiệu năng của hệ thống SPC khi được hỗ trợ bởi IRS đã cải thiện đáng kể, đồng thời cũng đạt được độ phân tập cao hơn so với hệ thống FDF qua các nút chuyển tiếp. Hơn nữa, chúng ta nhận thấy rằng, để nâng cao hiệu năng của hệ thống đề xuất, việc tăng cường các yếu tố phản xạ trong IRS trong quá trình thiết kế là một biện pháp hiệu quả. Nội dung của

Chương 4 là kết quả của các bài báo, được đăng trên tạp chí Khoa học và Công nghệ Thông tin và Truyền thông (JSTIC) ([B-1], [B-2]).

CHƯƠNG 5. THIẾT KẾ HỆ THỐNG TRUYỀN THÔNG TIN GÓI NGẮN TRONG MẠNG ĐA TRUY NHẬP PHI TRỰC GIAO SỬ DỤNG MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH

Chương 5 đề xuất mô hình SPC hỗ trợ bởi IRS trong mạng đa truy nhập phi trực giao (NOMA), trong đó, nguồn phát sóng (BS) với N anten, sử dụng

NOMA để truyền tín hiệu đồng thời cho hai người dùng đơn anten ở gần $\mathcal{U}_1$ và xa $\mathcal{U}_2$, được minh họa như Hình 5.1. Một tấm IRS, với L các phần tử phản xạ thụ động, được dùng để tăng cường chất lượng tín hiệu cho người dùng xa $\mathcal{U}_2$. BS áp dụng kỹ thuật chùm tia để tối ưu hóa truyền tín hiệu đến $\mathcal{U}_1$. Đường truyền trực tiếp từ BS đến người dùng $\mathcal{U}_1$ bị chặn do vật cản như cây và tòa nhà. Hệ thống sử dụng kênh fading Rayleigh độc lập và đồng nhất với suy hao tín hiệu giống nhau.

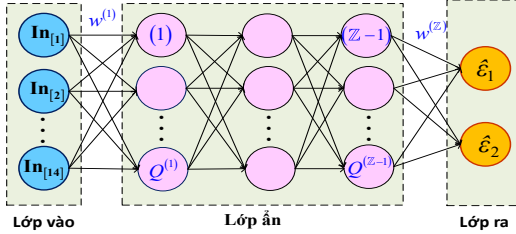


Hình 5.1: Mô hình hệ thống mạng NOMA-IRS.

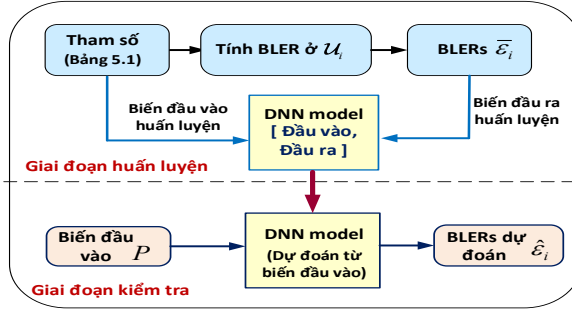
Hiệu năng tại các người dùng trong mạng của mô hình đề xuất được đánh giá qua các tham số như BLER, độ trễ và độ tin cậy. Ngoài ra, Chương 5 đề xuất mô hình mạng nơ ron sâu (DNN) để dự đoán BLER và công suất phân bổ cho hệ thống, được mô tả chi tiết trong Hình 5.2 và Hình 5.4.

Mô hình DNN được cấu thành từ một lớp đầu vào, $\mathbb{Z}-1$ các lớp ẩn, và một lớp đầu ra như Hình 5.2. Trong lớp đầu vào, có 14 nơ ron, trong đó mỗi nơ ron

tương ứng với một giá trị tham số đầu vào được cung cấp trong **Error! Reference source not found.** Mỗi $\mathbb{Z}-1$ lớp ẩn chứa $Q^{(z)}$ nơ ron với $z=1,...,\mathbb{Z}-1$ và sử dụng hàm Sigmoid làm hàm kích hoạt. Tương tự, mô hình DNN cho sự đoán công suất, như minh họa trong Hình 5.4, bao gồm một lớp đầu vào (chứa một nơ ron $\bar{\varepsilon}_i$), $\mathbb{Z}^*-1$ lớp ẩn với $Q^{(z^*)}$ nơ ron trên mỗi lớp với $z^*=1,...,\mathbb{Z}^*-1$ và một lớp đầu ra (chứa một nơ ron đầu ra $\hat{P}_i$), thông qua quá trình huấn luyện và kiểm thử.



Hình 5.2: Mô hình DNN cho dự đoán BLER tại $\mathcal{U}_i$, $i = \{1, 2\}$.



Hình 5.3: Giai đoạn huấn luyện và kiểm tra của mạng DNN.

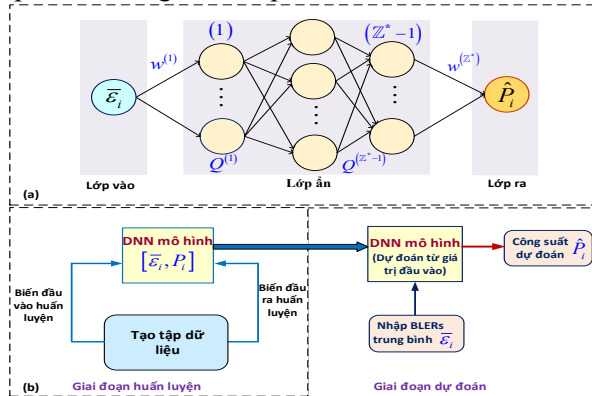
Mạng DNN phân ra hai giai đoạn: huấn luyện và dự đoán, được mô tả trong Hình 5.3. Giai đoạn huấn luyện sử dụng thuật toán Levenberg–Marquardt để tối ưu hóa tham số mô hình thông qua học ngoại tuyến từ một bộ dữ liệu. Sau huấn luyện, mạng DNN sẵn sàng cho giai đoạn dự đoán trực tuyến với dữ liệu mới.

Kết quả mô phỏng được thực hiện với các tham số mô phỏng như Bảng 5.1. Về mô phỏng DNN, các tham số huấn luyện được minh họa như trong Bảng 5.2.

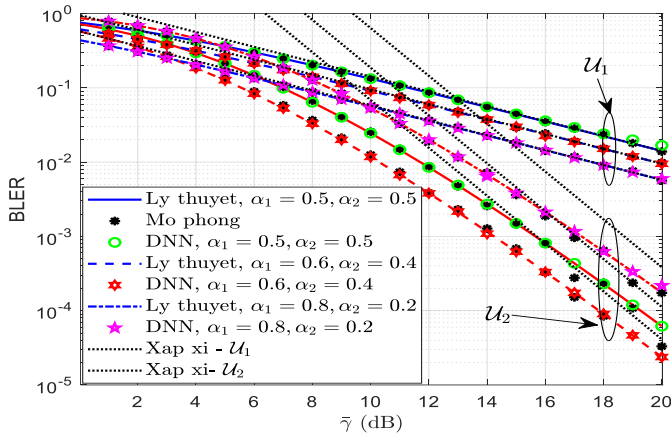
Bảng 5.1 Tham số mô phỏng BLER.

Số thứ tự	Tham số	Giá trị
1	G_1	1
2	G_2	0.1
3	$\bar{\gamma}$	[0dB, 20dB]
4	N	2
5	α_1	[0.5; 0.6; 0.8]
6	α_2	[0.5; 0.4; 0.2]
7	L	4
8	k	512(CUs)
9	ν	2
10	β_1	256bits
11	β_2	256bits
12	d_1	1
13	d_2	1
14	d_0	1

Đầu tiên, Hình 5.5 thấy rằng BLER của $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$ giảm trong khoảng $\bar{\gamma}$ ở mức trung bình và cao theo các hệ số phân bổ công suất α_1 và α_2 của $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$. Đặc biệt, BLER ở $\mathcal{U}_2$ luôn thấp hơn BLER ở $\mathcal{U}_1$, tức là hiệu năng ở $\mathcal{U}_2$ cải thiện hơn mặc dù phân bổ công suất thấp hơn.



Hình 5.4: Mô hình DNN cho dự đoán công suất tại $\mathcal{U}_i$, $i = \{1, 2\}$.



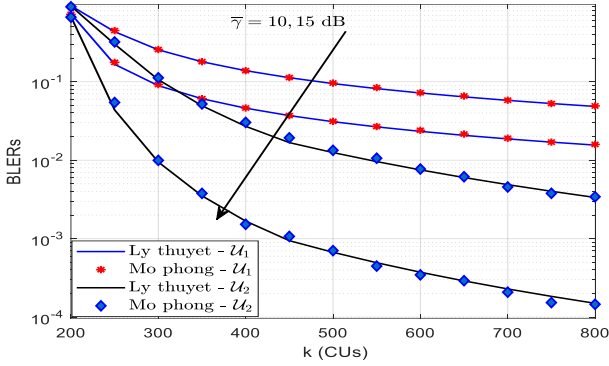
Hình 5.5: Sự tác động của SNR trung bình lên BLER tại $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$ với ba trường hợp hệ số $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$, $\alpha_1 = 0.6$, $\alpha_2 = 0.4$ và $\alpha_1 = 0.8$, $\alpha_2 = 0.2$.

Từ Hình 5.5, chúng ta quan sát thấy kết quả dự đoán bằng DNN (đường hình sao) trùng khớp với các đường kết quả phân tích và kết quả mô phỏng ở mọi giá trị $\bar{\gamma}$ tại $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$. Điều này là bước đầu cho chúng ta thấy lợi ích của DNN so với phương pháp mô phỏng, và sự cải tiến của DNN được minh chứng rõ qua Hình 5.9 và Bảng 5.3. Chúng ta chọn hệ số phân bổ tối ưu $\alpha_1 = 0.6$ và $\alpha_2 = 0.4$ cho tất cả mô phỏng ở các Hình 5.6 về sau.

Bảng 5.2: Tham số huấn luyện DNN cho dự đoán BLER.

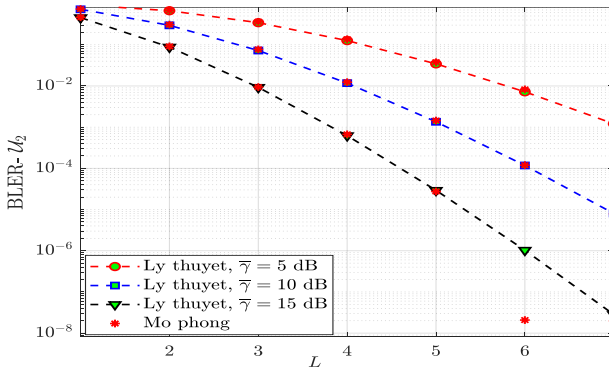
Tham số huấn luyện	Giá trị
Số lớp ẩn	4 lớp
Số nơ ron trong các lớp ẩn	100 nơ ron
Tốc độ học	10^{-3}
Hàm kích hoạt	Sigmoid
Epoch cho giai đoạn huấn luyện	k 1000 epochs

Hình 5.6 cho thấy BLER ở cả $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$ càng giảm khi k và $\bar{\gamma}$ càng tăng. Đặc biệt, hiệu năng của $\mathcal{U}_2$ cải thiện hơn so với hiệu năng của $\mathcal{U}_1$, mặc dù hệ số phân bổ công suất của $\mathcal{U}_2$ thấp hơn. Điều này chứng tỏ hiệu quả của IRS, tức số yếu tố phản xạ càng lớn thì BLER ở $\mathcal{U}_2$ càng nhỏ qua Hình 5.7.



Hình 5.6: Sự tác động của k lên BLER tại $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$ với $\alpha_1 = 0.6$ và $\alpha_2 = 0.4$.

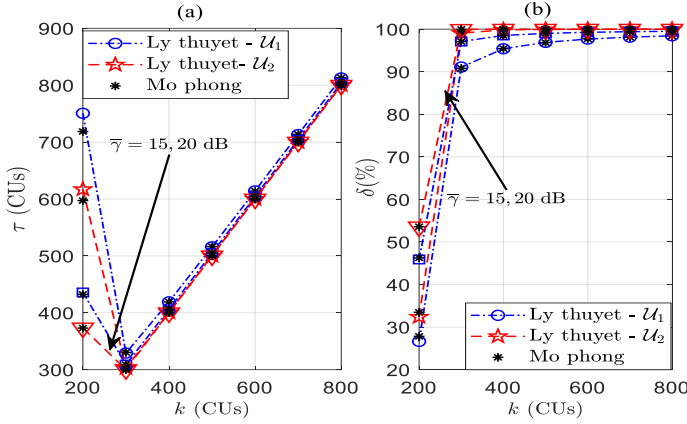
Tuy nhiên, chúng ta cũng cần xem xét đến sự đánh đổi giữa k lớn và độ trễ lớn qua Hình 5.8. Ví dụ, để đảm bảo yêu cầu dịch vụ uRLLCs BLER của $\mathcal{U}_2$ phải đạt $\leq 10^{-5}$ với $\bar{\gamma} = 20$ dB, chiều dài khối k được chọn là 600 CUs.



Hình 5.7: Sự tác động của L lên BLER tại $\mathcal{U}_2$ với ba trường hợp $\bar{\gamma} = 5$ dB, $\bar{\gamma} = 10$ dB và $\bar{\gamma} = 15$ dB.

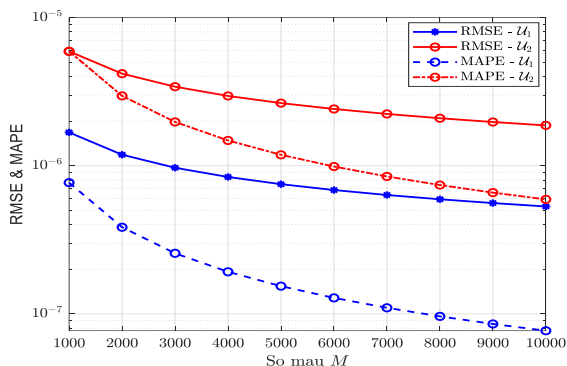
Hình 5.8 cho thấy rằng độ trễ và độ tin cậy của $\mathcal{U}_2$ cải thiện hơn so với $\mathcal{U}_1$ tất cả trường hợp của $\bar{\gamma}$. Chúng ta để ý rằng khi k tăng dẫn đến độ trễ cũng tăng

lên tương ứng ở cả $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$. Đặc biệt, ở $k=300\text{CUs}$, độ trễ của cả hai người dùng đạt giá trị tốt nhất và độ tin cậy gần như bão hòa khi $k=400\text{CUs}$, ví dụ ở $\mathcal{U}_2$ độ trễ $\tau=300\text{CUs}$ với $\bar{\gamma}=20\text{dB}$.

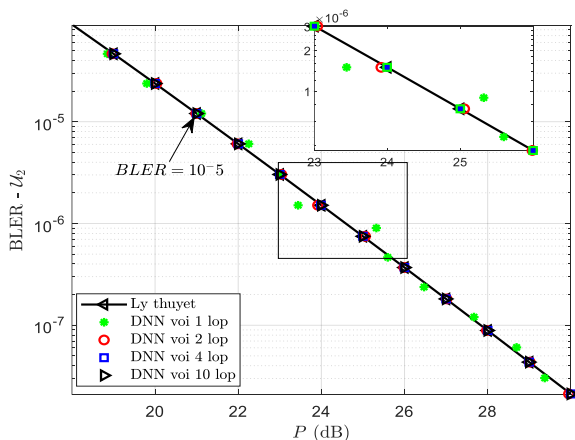


Hình 5.8: Ảnh hưởng độ trễ và độ tin cậy lên k tại $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$ với trường hợp $\bar{\gamma}=15\text{dB}$ và $\bar{\gamma}=20\text{dB}$.

Hình 5.9 minh họa hiệu quả của mô hình DNN dựa trên số lượng mẫu kiểm tra. Khi số mẫu tăng lên, kết quả thu được càng chính xác. So với phương pháp lý thuyết và mô phỏng Monte Carlo truyền thống, thời gian dự đoán kết quả bằng DNN ngắn hơn đáng kể, điều này được thể hiện rõ trong Bảng 5.3, với thời gian dự đoán tại $\mathcal{U}_1$ và $\mathcal{U}_2$ lần lượt là 0.002797 (s) và 0.002962 (s) Hình 5.10 cho thấy kết quả dự đoán với số lớp nhỏ hơn không chính xác bằng kết quả ở 2 lớp ẩn trở lên. Điều này dẫn đến sai số RMSE và sai số MAPE càng thấp hơn trong kết quả dự đoán của công suất P như trong Hình 5.11.



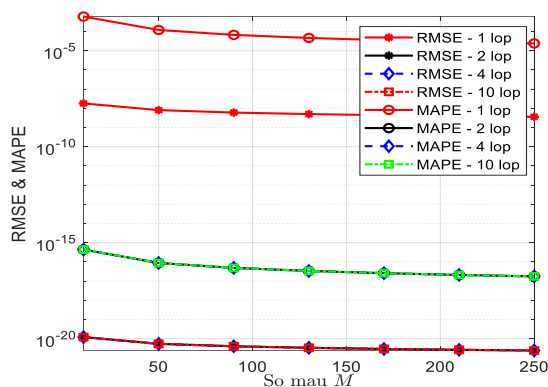
Hình 5.9: RMSE và MAPE so với số lượng mẫu kiểm tra.



Hình 5.10: BLER so với công suất phân bổ tại $\mathcal{U}_2$ với các lớp khác nhau.

Hơn nữa, chúng ta cần cân trọng khi tăng số lớp ẩn vì số lớp ẩn tăng sẽ dẫn đến việc tăng thời gian thực thi hệ thống như đã minh họa trong Bảng 5.4. Do đó, để đảm bảo thời gian thực hiện của hệ thống ngắn, chúng ta sẽ lựa chọn 4 lớp làm lớp ẩn tối ưu cho mô hình DNN.

Từ Hình 5.10, chúng ta quan sát được rằng đối với $BLER \approx 10^{-5}$, công suất được phân bổ khoảng 21 dB. Điều này có nghĩa là công suất phát cho $\mathcal{U}_2$ và $\mathcal{U}_1$ lần lượt là 8.4 dB và 12.6 dB, tương ứng.



Hình 5.11: Ảnh hưởng RMSE và MAPE của DNN vào số lớp ẩn và số mẫu.

Bảng 5.4: Thời gian thực thi của mạng DNN, RMSE và MAPE theo số lớp ẩn khác nhau.

Trường hợp	Thời gian thực hiện (giây)	RMSE	MAPLE
DNN1 Lớp	0.007380	$1.805.10^{-8}$	$6.033.10^{-5}$
DNN 2 Lớp	0.007694	$1.204.10^{-20}$	$4.389.10^{-16}$
DNN 4 Lớp	0.01024	$1.204.10^{-20}$	$4.389.10^{-16}$
DNN 10 Lớp	0.010244	$1.204.10^{-20}$	$4.389.10^{-16}$

Kết quả từ Chương 5 đã minh chứng rằng BLER của người dùng xa (được hỗ trợ bởi IRS) giảm đáng kể so với BLER của người dùng gần, dù có sự phân bố công suất lớn hơn. Ngoài ra, kết quả mô phỏng cũng chỉ ra sự hiệu quả của mô hình DNN trong việc dự đoán, cả về độ tin cậy và thời gian thực thi mạng, so với các phương pháp phân tích số và mô phỏng Monte Carlo. Đáng chú ý hơn, phương pháp học sâu dựa trên DNN đã chứng minh khả năng giải quyết cả hai vấn đề: dự đoán BLER (bài toán thuận) và tối ưu hóa BLER để tìm ra công suất nguồn phát của hệ thống một cách hiệu quả (bài toán nghịch).

Nội dung của Chương 5 đã được công nhận thông qua bài báo được xuất bản trong tạp chí IET Communication, thuộc danh mục SCIE (Q2) ([A-2]).

CHƯƠNG 6: KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

6.1 Kết luận của Luận án

Luận án đã đạt mục tiêu khoa học đề ra theo đề cương, với các đóng góp chính như sau:

- Luận án đề xuất mô hình SPC trong mạng DF hai chặng trên kênh fading Rayleigh với các đóng góp mới như sau: (1) Hệ thống FDF nâng cao hiệu năng so với SDF với tất cả giá trị công suất được phân bổ của nguồn; (2) Hiệu năng của hệ thống FDF cải thiện khi tăng số an ten tại nguồn và đích, số nút chuyển tiếp, độ dài khối tin và công suất phát ; (3) Độ lợi phân tập không gian của hệ thống được tính bằng giá trị nhỏ nhất giữa tích số an ten ở nguồn và số nút chuyển tiếp với số an ten ở đích. Điều này quan trọng cho thiết kế hệ thống, tăng độ tin cậy và giảm chi phí triển khai; (4) Xác định được công suất phát tối ưu và vị trí nút chuyển tiếp tối ưu cho trường hợp tổng quát, điều này cải thiện đáng kể hiệu năng khi triển khai mạng thực tế.
- Luận án cũng giới thiệu mô hình SPC trong mạng chuyển tiếp có hỗ trợ của IRS. Kết quả của mô hình hệ thống này cho thấy rằng so với FDF, hệ thống SPC qua IRS đạt được độ phân tập và hiệu năng tốt hơn. Điều này mang nghĩa quan trọng trong thiết kế và triển khai mạng mới, cho phép thay thế nút chuyển tiếp bằng IRS để cải thiện QoS và mở rộng phạm vi phủ sóng với chi phí thấp hơn.
- Luận án đã thiết kế hệ thống SPC trong mạng NOMA có hỗ trợ của IRS. Điểm mới trong thiết kế của mô hình này là nguồn phát sử dụng kỹ thuật định dạng sóng nhằm tối ưu hiệu năng truyền tín hiệu đến các người dùng mong muốn. Hơn nữa, hệ thống cũng đã đề xuất các phương pháp mới để tính BLER, độ trễ và độ tin cậy. Đặc biệt, hệ thống đề xuất mạng DNN dựa trên DL để dự đoán hiệu năng và công suất phân bổ nguồn phát một cách chính xác, tốc độ và đơn giản tính toán so với các phương pháp hiện có. Nói cách khác, dựa vào DL, chúng ta có thể tiên dự đoán các thông số như công suất, độ trễ hay thông lượng của hệ thống,

tuân thủ các hạn chế về BLER theo yêu cầu uRLLCs, qua đó giảm thiểu chi phí khi thiết kế và triển khai mạng thực tiễn.

6.2 Kiến nghị hướng nghiên cứu tiếp theo

Trong thời gian tới, NCS sẽ tiếp tục đề xuất cải tiến cho mạng đảm bảo tiêu chuẩn uRLLCs và nâng cao chất lượng cho hệ thống mạng tương lai. Các định hướng nghiên cứu tiếp theo như sau:

- Mở rộng SPC trong mạng NOMA phục vụ đa người dùng phân bố ngẫu nhiên.
- Nghiên cứu mật vừa phản xạ vừa truyền qua STAR-IRS thay thế IRS nhằm nâng cao vùng phủ sóng, tăng cường tối đa khả năng phục vụ đa người dùng trong hệ thống mạng. Kết quả của hướng nghiên cứu này là công trình [C-1] thuộc danh mục công trình của NCS.
- Xem xét hệ thống SPC qua các kênh truyền fading tổng quát khác như kênh Nakagami-m và Rician.
- Nghiên cứu phương pháp học tăng cường nhằm giải quyết bài toán tối ưu hiệu năng hệ thống đáp ứng được dịch vụ uRLLCs cải tiến cho các hệ thống mạng tương lai như 6G. Kết quả của hướng nghiên cứu này là công trình [C-2] thuộc danh mục công trình của NCS.
- Thiết kế hệ thống SPC được hỗ trợ bởi hệ nhiều trạm IRS nhằm hỗ trợ truyền tín hiệu ở nơi địa hình khó khăn như vùng đô thị lớn.
- Ngoài ra, nghiên cứu hệ thống SPC sử dụng sóng milimet (mmWave) nhằm cải thiện về độ trễ và nâng cao tốc độ truyền dữ liệu cho các hệ thống mạng tương lai.
- Hơn nữa, NCS xem xét phương pháp đa truy nhập phân chia tốc độ (RSMA) trong SPC nhằm tối ưu tốc độ truyền, hỗ trợ đa kết nối, giảm độ trễ và đặc biệt thực thi hệ thống mạng giảm phức tạp hơn phương pháp NOMA.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

A. Tạp chí Quốc tế

[A-1]. **N. T. Y. Linh**, T. Ngo Hoang, P. N. Son, and V. N. Q. Bao, "Dual-hop Relaying Networks for Short-Packet URLLCs: Performance analysis and Optimization," *Journal of Communications and Networks*, vol. 24, no. 4, pp. 408-418, Aug. 2022, doi: 10.23919/JCN.2022.000020. **(SCIE-Q1)**

[A-2]. **N. T. Y. Linh**, P. N. Son, and V. N. Q. Bao, "Intelligent reflecting surface-assisted beamforming-NOMA networks for short-packet communications: Performance analysis and deep learning approach," *IET Communications*, vol. 17, no. 16, pp. 1940-1954, Aug. 2023, doi: 10.1049/cmu2.12667. **(SCIE-Q2)**

B. Tạp chí trong nước

[B-1] **N. T. Y. Linh**, N. H. Tu, and V. N. Q. Bao, "Đánh Giá Hiệu Năng Mạng Chuyển Tiếp Từng Phần Với Đa An ten Thu Trong Truyền Thông Gói Tin Ngắn," *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, vol. 1, no. 4A, pp. 53-61, Dec. 2020.

[B-2]. **N. T. Y. Linh**, V. N. Q. Bao, Pham Ngoc Son, "Phân Tích Độ Lợi Phân Tập Cho Mạng Chuyển Tiếp Qua Mặt Phản Xạ Thông Minh Và Nút Chuyển Tiếp Trong Truyền Thông Gói Tin Ngắn," *Journal of Science and Technology on Information and Communications (JSTIC)*, vol. 1, no. 4B, pp. 56-64, Dec. 2021.

[B-3] **N. T. Y. Linh**, V. N. Q. Bao, Pham Ngoc Son, "Dự Đoán Công Suất Tối Ưu Nguồn Phát Của Hệ Thống Truyền Gói Tin Ngắn Qua Mặt Phản Xạ Thông Minh Bằng Kỹ Thuật Học Sâu," *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, vol. 1, no. 1A, pp. 11-18, Apr. 2023.

C. Kỹ yếu hội nghị quốc tế

[C-1] **N. T. Y. Linh**, P. N. Son, and V. N. Q. Bao, "Performance Evaluation of Simultaneously Transmitting and Reflecting Intelligent Reflecting Surface - Assisted NOMA Networks for Short-Packet Communications," in *2023 RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies (RIVF)*, 2023, pp. 194-199, doi: 10.1109/RIVF60135.2023.10471771.

[C-2] **N. T. Y. Linh**, P. N. Son, and V. N. Q. Bao, "Power allocation for the STAR-RIS-NOMA Short Packet communication system using Deep Reinforcement Learning," in *2024 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2024, pp. 215-220, IEEE.