

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

TRƯƠNG QUANG PHÚC

NGHIÊN CỨU MẠNG THÔNG TIN VÔ TUYẾN QUA KÊNH
TRUYỀN VỚI CÁC BỀ MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 08/2025

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

TRƯỜNG QUANG PHÚC

NGHIÊN CỨU MẠNG THÔNG TIN VÔ TUYẾN QUA KÊNH
TRUYỀN VỚI CÁC BỀ MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH
NGÀNH: KỸ THUẬT ĐIỆN TỬ - 9520103

Người hướng dẫn khoa học 1: PGS. TS Phan Văn Ca

Người hướng dẫn khoa học 2: GS. TS Dương Quang Trung

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Tp. Hồ Chí Minh, tháng 08/2025

MỤC LỤC

QUYẾT ĐỊNH GIAO ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU SINH.....	iv
LÝ LỊCH CÁ NHÂN	v
LỜI CAM ĐOAN	vi
TÓM TẮT LUẬN ÁN.....	vii
ABSTRACT	ix
LỜI CẢM ƠN.....	xi
DANH MỤC HÌNH.....	xii
DANH MỤC BẢNG.....	xiv
DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT.....	xv
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC.....	xviii
CHƯƠNG 1.....	1
TỔNG QUAN	1
1.1 Giới thiệu	1
1.2 Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước.....	3
1.3 Mục tiêu nghiên cứu	8
1.4 Nhiệm vụ nghiên cứu.....	9
1.5 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu	9
1.6 Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu.....	10
1.7 Ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu.....	10
1.8 Cấu trúc của luận án	11
Chương 2.....	13

CO SỞ LÝ THUYẾT	13
2.1 Mặt phản xạ thông minh RIS	13
2.2 Các hướng nghiên cứu và ứng dụng của mặt phản xạ thông minh RIS ...	22
2.3 Bài toán tối ưu lỗi.....	24
2.3.1 Tập lỗi.....	24
2.3.2 Hàm lỗi	25
2.3.3 Một số bài toán tối ưu lỗi.....	26
2.4 Các dạng bài toán lập trình tối ưu	26
2.5 Một số bài toán tối ưu trong thông tin vô tuyến	28
2.5.1 Phân tích hiệu năng của mô hình thông tin vô tuyến với RIS	29
2.5.2 Kỹ thuật kết hợp định dạng búp sóng chủ động và thụ động.....	31
2.6 Truyền thông vô tuyến với sự hỗ trợ của máy bay không người lái UAV	35
2.7 Điện toán biên di động MEC	36
2.8 Kết luận chương.....	38
Chương 3.....	39
TỐI ƯU THÔNG LƯỢNG MẠNG DI ĐỘNG CÓ SỰ HỖ TRỢ CỦA MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH.....	39
3.1 Giới thiệu	40
3.2 Mô hình hệ thống mạng thông tin di động có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh	41
3.2.1 Kênh truyền vô tuyến và thông lượng thông tin	43
3.2.2 Bài toán tối ưu tổng thông lượng mạng	46

3.3	Bài toán kết hợp tối ưu tổng thông lượng mạng.....	47
3.3.1	Tối ưu hệ số phân bổ công suất tại trạm phát gốc BS	47
3.3.2	Tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ của RIS.....	49
3.3.3	Thuật toán tối ưu lặp	52
3.4	Kết quả mô phỏng và thảo luận	53
3.4.1.	Sự hội tụ của thuật toán đề xuất	54
3.4.2.	Tổng thông lượng mạng cực đại	55
3.4.3.	Thông lượng mạng của người dùng trong điều kiện xấu nhất	59
3.4.4.	Thảo luận	62
3.5	Kết luận chương.....	64
Chương 4.....	67	
TỐI ƯU PHÂN BỐ CÔNG SUẤT VÀ GIẢM TẢI TÍNH TOÁN TRONG HỆ THỐNG MEC VỚI SỰ HỖ TRỢ CỦA UAV-RIS		67
4.1	Giới thiệu	68
4.2	Mô hình hệ thống MEC kết hợp UAV-RIS.....	69
4.2.1	Mô hình hệ thống đề xuất.....	69
4.2.2	Mô hình kênh truyền	71
4.2.3	Mô hình tín hiệu thu và thông lượng hệ thống.....	73
4.2.4	Mô hình giảm tải tác vụ	75
4.2.4.1	Tính toán cục bộ.....	75
4.2.4.2	Giảm tải tính toán sang MBS	75
4.2.5	Quỹ đạo bay của UAV phân nhóm người dùng	76

4.3	Tối ưu độ trễ dựa trên bài toán phân bổ tài nguyên và tối ưu giảm tải tính toán	78
4.3.1	Tối ưu phân bổ công suất	79
4.3.2	Tối ưu hệ số dịch pha	82
4.3.3	Tối ưu giảm tải quá trình tính toán	85
4.4	Sự hội tụ và độ phức tạp tính toán của phương pháp đề xuất	87
4.5	Kết quả mô phỏng	88
4.6	Kết luận	100
Chương 5		102
KẾT LUẬN		102
5.1	Kết luận	102
5.2	Hướng phát triển	103
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ		105
PHỤ LỤC		106
TÀI LIỆU THAM KHẢO		107

QUYẾT ĐỊNH GIAO ĐỀ TÀI NGHIÊN CỨU SINH

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT
THÀNH PHỐ HỒ CHÍ MINH

Số: 257/QĐ-DHSPKT

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM
Độc lập – Tự do – Hạnh phúc

Tp. Hồ Chí Minh, ngày 02 tháng 02 năm 2021

QUYẾT ĐỊNH

Về việc giao đề tài luận án và người hướng dẫn NCS khóa 2020 - 2023

HIỆU TRƯỞNG TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM KỸ THUẬT TP. HỒ CHÍ MINH

Căn cứ Luật Giáo dục đại học ngày 18/6/2012 và Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật Giáo dục đại học ngày 19/11/2018;

Căn cứ Nghị định 99/2019/NĐ-CP ngày 30/12/2019 của Chính phủ Quy định chi tiết và hướng dẫn thi hành một số điều của Luật sửa đổi, bổ sung một số điều của Luật giáo dục đại học;

Căn cứ Quyết định số 937/QĐ-TTg ngày 30/6/2017 của Thủ tướng Chính phủ về việc phê duyệt đề án thí điểm đổi mới cơ chế hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh;

Căn cứ Nghị quyết số 11/NQ-HĐT ngày 08/01/2021 của Hội đồng trường ban hành Quy chế tổ chức và hoạt động của Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM;

Căn cứ Thông tư số 08/2017/TT-BGDĐT ngày 04/4/2017 của Bộ Giáo dục và Đào tạo về việc Ban hành Quy chế tuyển sinh và đào tạo trình độ tiến sĩ;

Theo nhu cầu công tác và khả năng cán bộ;

Theo đề nghị của Trường khoa/Viện quản ngành và Trường phòng Đào tạo,

QUYẾT ĐỊNH:

Điều 1. Giao đề tài luận án tiến sĩ và người hướng dẫn cho:

Nghiên cứu sinh : *Trương Quang Phúc*

Ngành : *Kỹ thuật điện tử*

Khoá: 2020 – 2023

Tên luận án : *Nghiên cứu mạng thông tin vô tuyến qua kênh truyền với các bề mặt phản xạ thông minh*

Người HD thứ nhất (HD chính) : *PGS.TS. Phan Văn Ca*

Người HD thứ hai : *TS. Dương Quang Trung*

Thời gian thực hiện : *01/6/2020 đến 31/5/2023*

Điều 2. Giao cho Phòng Đào tạo quản lý, thực hiện theo đúng Quy chế đào tạo trình độ tiến sĩ của Bộ Giáo dục & Đào tạo và Nhà trường đã ban hành.

Điều 3. Trường các đơn vị, phòng Đào tạo, các Khoa/Viện quản ngành tiến sĩ và các Ông (Bà) có tên tại Điều 1 chịu trách nhiệm thi hành quyết định này.

Quyết định có hiệu lực kể từ ngày ký.

Nơi nhận:

- BGH (để biết);
- Như điều 2, 3;
- Lưu: VT, ĐT (4b).



LÝ LỊCH CÁ NHÂN

I. Thông tin cá nhân

Họ và tên: TRƯỜNG QUANG PHÚC Giới tính: Nam

Ngày sinh: 30/11/1988 Nơi sinh: Tp. Cần Thơ

II. Quá trình đào tạo

Từ năm 2006 đến năm 2011:	Sinh viên Khoa Điện – Điện tử, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM
Từ năm 2012 đến năm 2014:	Học viên cao học Khoa Điện – Điện tử, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM
Từ năm 2019 đến năm 2024:	Nghiên cứu sinh Khoa Điện – Điện tử, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM

III. Quá trình công tác

Từ năm 2012- nay: Giảng viên Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong Luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tp. Hồ Chí Minh, ngày tháng năm 2025

(Ký tên và ghi rõ họ tên)

NCS. Trương Quang Phúc

TÓM TẮT LUẬN ÁN

Mặt phản xạ thông minh có thể cấu hình lại (RIS) là một mảng nhân tạo gồm nhiều phần tử phản xạ, trong đó mỗi phần tử có thể điều chỉnh được các đặc tính điện từ của sóng tới. Trong thời gian gần đây, RIS được xem là một trong những công nghệ then chốt được ứng dụng trong mạng không dây thế hệ thứ 6 (6G). Bên cạnh đó, mạng không dây 6G sẽ tăng cường các đặc tính tiềm năng hiện có của mạng không dây thông thường. Đặc biệt, các chỉ số hiệu năng chính của mạng không dây 6G đã được liên minh viễn thông quốc tế (ITU) thông qua vào năm 2023, tập trung vào việc tối đa hóa tốc độ dữ liệu, giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng và độ trễ hệ thống, tăng cường vùng phủ sóng của mạng, cải thiện trải nghiệm người dùng, ...v.v. Từ những vấn đề trên, luận án này xem xét tích hợp RIS để cải thiện hiệu suất đường xuống của mạng di động tế bào đơn ngõ vào đơn ngõ ra (SISO) và hệ thống điện toán biên di động (MEC) được tích hợp trong một trạm gốc nhiều ngõ vào nhiều ngõ ra (MIMO) cỡ lớn, phục vụ nhiều nhóm người dùng với sự hỗ trợ của máy bay không người lái (UAV) được trang bị RIS.

Đầu tiên, luận án xem xét một mô hình truyền thông không dây có sự hỗ trợ của RIS, trong đó nhiều RIS được triển khai để hỗ trợ đường xuống cho các nhóm người dùng khác nhau. Đối với mô hình đề xuất này, bài toán tối ưu được xây dựng với mục tiêu tối đa tổng thông lượng mạng với các ràng buộc về công suất tiêu thụ tại trạm gốc và chất lượng dịch vụ (QoS), việc xem xét ràng buộc QoS sẽ làm bài toán trở nên phức tạp hơn, cụ thể là việc phải duy trì QoS trong trường hợp xấu nhất. Bài toán đề xuất tối đa tổng thông lượng mạng là không lồi do hàm mục tiêu có dạng lô-ga-rít. Vì vậy, phương pháp xấp xỉ và biến đổi bất đẳng thức lô-ga-rít được sử dụng để biến đổi hàm mục tiêu về dạng lồi. Lúc này, bài toán đề xuất được chia thành hai bài toán con tối ưu theo từng biến khác nhau. Bài toán thứ nhất, điều khiển công suất với các giá trị hệ số dịch pha được cố định, do bài toán tối ưu có dạng lồi, sẽ dễ dàng tìm được lời giải nhờ vào các công cụ hỗ trợ CVX. Mặt khác, bài toán con thứ hai phương pháp tìm kiếm hệ

số dịch pha được đề xuất để giải quyết bài toán không lời nhằm tìm ra các hệ số dịch pha tối ưu của các phần tử phản xạ. Rõ ràng, phương pháp tối ưu tổng thông lượng của hệ thống được đề xuất tốt hơn hơn hẳn các phương pháp khác khi xem xét tổng thông lượng hệ thống trong trường hợp xấu nhất với điều kiện ràng buộc chất lượng dịch vụ QoS.

Thứ hai, luận án đề xuất một bài toán tối ưu cho hệ thống MEC, được đặt trong một trạm gốc MIMO (MBS) cỡ lớn, được hỗ trợ bởi UAV mang theo RIS có khả năng bay trong vùng phủ sóng của mạng. Đối với hệ thống đề xuất này, bài toán tối ưu nhằm mục tiêu giảm thiểu tổng độ trễ của hệ thống được đề xuất, dựa trên tối ưu phân bổ công suất của từng người dùng, liên kết người dùng, cấu hình dịch pha của các phần tử phản xạ RIS và phân bổ tài nguyên tính toán tại MBS theo các ràng buộc về tài nguyên tính toán và yêu cầu QoS của MBS. Để giải quyết bài toán này, thuật toán lặp đã được thiết kế để giải quyết một cách hiệu quả bài toán tối ưu được đề xuất bằng cách áp dụng một số phương pháp xấp xỉ và bất đẳng thức, theo đường di chuyển và phương pháp giảm tọa độ khối (BCD). Ngoài ra, để xác định quỹ đạo bay của UAV dựa trên mật độ người dùng mặt đất cũng được đề xuất trong luận án. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp được đề xuất có hiệu quả vượt trội hơn hẳn các phương pháp hiện có.

Chính vì vậy, tích hợp RIS có thể cải thiện hiệu suất mạng trong kịch bản đầu tiên của mạng không dây di động đường xuống SISO và tăng cường phạm vi phủ sóng của mạng truyền thông không dây trong kịch bản thứ hai của hệ thống truyền thông MEC có sự hỗ trợ của UAV-RIS. Để đảm bảo các yêu cầu về chất lượng dịch vụ (QoS) của người dùng, tổng thông lượng mạng và tổng độ trễ mạng đã được tối ưu hóa trong kịch bản đầu tiên và kịch bản thứ hai. Hơn nữa, ngay cả khi xem xét trong trường hợp xấu nhất (worst-case) của kịch bản truyền thông đề xuất, các phương pháp đề xuất vẫn chứng minh hiệu suất tốt hơn khi so sánh với các phương pháp thông thường.

ABSTRACT

Reconfiguration Intelligent Surface (RIS) is a man-made array composed of a large number of reflecting elements, wherein each element can adjust the electromagnetic properties of incident waves. Recently, RIS has been promising the key technology enabling the sixth generation (6G) wireless networks. Particularly, 6G wireless networks will enhance the potential properties of the conventional wireless networks. Moreover, the key performance indicators for 6G have been approved by the International Telecommunication Union (ITU) in 2023, which focused on maximizing the data rates, reducing both the energy consumption and the latency, enhancing the coverage of networks, improving the user experience, and so on. Motivated by the mentioned above, this dissertation investigated how the integration of RIS can the network performances of Single Input Single Output (SISO) downlink cellular wireless networks and Mobile Edge Computing (MEC) system hosted within a massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) base station, serving groups of users with the assistance of RIS-equipped Unmanned Aerial Vehicle (UAV), respectively.

Firstly, the dissertation considered a RIS-aided wireless communication scenario where different RISs are deployed in order to provide downlink service to a group of users. For such scenario, an optimization problem was formulated aimed at maximizing the total network throughput under the power consumption and quality-of-service (QoS) constraints. Due to the non-convexity nature of the proposed problem, the original optimization problem has been divided into two subproblems. The first one, for power control with fixed phase shift values, is a convex problem that can be easily solved. Subsequently, a phase shift searching procedure to solve the non-convex problem of RIS phase shift optimization has been adopted. To this end, the proposed joint optimization method outperforms in maximizing total network throughput and the worst-case mobile unit throughput compared to conventional methods.

Secondly, the dissertation proposed a novel optimization framework for a MEC system, hosted within a massive MIMO Base Station (MBS), assisted by the usage of a RIS-equipped UAV able to fly within the coverage area. For such a system, an optimization was formulated aimed at minimizing the system latency by jointly optimizing the power allocation of each user, user association, phase shift configuration of RIS reflecting elements, and computing resource allocation at the MBS subject to the MBS's computing resource constraints and QoS requirements. To tackle this problem, an iterative algorithm was designed to efficiently solve the proposed optimization problem by applying some approximation and inequalities, path following, and Block Coordinate Descent (BCD) methods. An algorithm for determining the UAV trajectory based on the density of ground users is also provided. The simulation results show that the proposed method outperforms the benchmark strategies indicating the effectiveness of the proposed method.

As a result, the integration of RIS can improve the network performances in the first scenario of the SISO downlink cellular wireless networks and enhance the coverage of the wireless communication networks in the second scenario UAV-RIS assisted MEC system. To ensure the Quality of Service (QoS) requirements of users, the total network throughput and the total network latency have been optimized in the first scenario and the second scenario, respectively. Furthermore, even in worst-case of communication scenario, the proposed methods demonstrate superior performance when compared with the conventional scheme. Moreover, the proposed methods from this dissertation will be the strong foundation for the future works to enhance the key performance indicators of the 6G wireless networks.

LỜI CẢM ƠN

Lời đầu tiên, nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn tập thể hướng dẫn Thầy **PGS. TS Phan Văn Ca** và Thầy **GS. TS Dương Quang Trung** đã tận tình hướng dẫn và từng bước định hướng để em có thể tiếp cận được với phương pháp nghiên cứu khoa học, các công cụ phục vụ cho việc nghiên cứu, cách thức phân loại các hội nghị và tạp chí chuyên ngành hẹp. Hơn nữa, Thầy hướng dẫn đã chia sẻ nhiều kiến thức quý báu trong lĩnh vực nghiên cứu, cũng như phương pháp làm việc khoa học.

Bên cạnh đó, nghiên cứu sinh xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM, Khoa Điện – Điện tử, và Bộ môn Kỹ thuật Máy tính – Viễn thông đã tạo điều kiện tốt nhất để tôi có thể tham gia chương trình nghiên cứu sinh và sắp xếp thời gian để thực hiện đề tài.

Hơn nữa, tôi xin gửi lời cảm ơn đến những người anh, người đồng nghiệp đã luôn đồng hành, động viên, đóng góp ý kiến, và hỗ trợ tôi trong suốt quá trình nghiên cứu và công bố quốc tế gồm: TS. Đỗ Duy Tân – Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp. HCM, TS. Võ Nguyên Sơn – Đại học Duy Tân, TS. Antonino Masaracchia – Đại học Queens Belfast, Vương Quốc Anh.

Sau cùng, xin cảm ơn gia đình đã luôn động viên và luôn là nguồn động lực to lớn để tôi có thể dành thời gian và tâm trí để thực hiện nghiên cứu một cách tốt nhất.

Tp. HCM, ngày tháng năm 2025

Trương Quang Phúc

DANH MỤC HÌNH

Hình 2. 1 Cấu trúc của RIS và mạch tương đương của các phần tử phản xạ	14
Hình 2. 2 Ứng dụng RIS trong hệ thống thông tin vô tuyến.....	16
Hình 2. 3 Mô hình kênh truyền vô tuyến gồm hai tia LoS và NLoS	20
Hình 2. 4 Nguyên lý làm việc của mặt phản xạ theo định luật Snell.....	21
Hình 2. 5 RIS ứng dụng trong mạng truyền thông vô tuyến.....	23
Hình 2. 6 Đồ thị minh họa tập lỗi và tập không lỗi.....	25
Hình 2. 7 Đồ thị hàm lỗi.....	25
Hình 2. 8 Mô hình mạng truyền thông gồm nhiều máy phát và máy thu	28
Hình 2. 9 Mô hình hệ thống so sánh trường hợp sử dụng RIS và Relay.	30
Hình 2. 10 RIS hỗ trợ hệ thống truyền thông trường hợp có vật cản.....	31
Hình 2. 11 Hệ thống truyền thông đa người dùng có sự hỗ trợ của RIS	35
Hình 3. 1 Mô hình mạng tế bào với sự hỗ trợ của bề mặt phản xạ thông minh RIS	42
Hình 3. 2 Sự hội tụ của thuật toán đề xuất	55
Hình 3. 3 Tổng thông lượng mạng trường hợp $M=4$, $K=20$ và $N=200$	56
Hình 3. 4 Tổng thông lượng mạng trường hợp $M=8$, $K=30$ và $N=200$	57
Hình 3.5 Tổng thông lượng mạng với số phần tử phản xạ của RIS thay đổi $N = [100:300]$, $M = 8$, $K = 30$, $P_{0max} = 46 \text{ dBm}$	58
Hình 3. 6 Tổng thông lượng mạng đạt được trong trường hợp số lượng RIS khác nhau $M = 4$, $M = 12$, $M = 20$	59
Hình 3. 7 Thông lượng trong trường hợp xấu nhất với $M = 8$, $K = 30$, $N = 200$	60
Hình 3. 8 Thông lượng người dùng trong trường hợp xấu nhất với số lượng phần tử phản xạ thay đổi từ 100 đến 300 phần tử	61
Hình 3. 9 Thông lượng người dùng trong trường hợp xấu nhất với số lượng RIS lần lượt $M = 4$, $M = 12$, $M = 20$	62

Hình 4. 1 Mô hình đề xuất kết hợp UAV và RIS trong hệ thống MEC.....	70
Hình 4. 2 Độ hội tụ của phương pháp đề xuất khi số người dùng K thay đổi	92
Hình 4. 3: Tổng độ trễ mạng với các mô hình phân bổ tài nguyên khác nhau $\mathcal{Fm}, \ell$, với $K = 80, \zeta_{max} = 30 \text{ Giga cycles/s}$	93
Hình 4. 4: Tổng độ trễ mạng trong trường hợp xấu nhất theo các mô hình phân bổ tài nguyên khác nhau $\mathcal{Fm}, \ell$, với $K = 80, \zeta_{max} = 30 \text{ Giga cycles/s}$	94
Hình 4. 5 Tổng độ trễ mạng theo các mô hình phân bổ tài nguyên khác nhau với giá trị ζ_{max} thay đổi $K = 80, \mathcal{Fm}, \ell = 600 \text{ cycles/bit}$	96
Hình 4. 6 Tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất với $K = 80, \mathcal{Fm}, \ell = 600 \text{ cycles/bit}$ và giá trị ζ_{max} thay đổi.....	97

DANH MỤC BẢNG

Bảng 3. 1 Thuật toán tối ưu hệ số điều khiển công suất	48
Bảng 3. 2 Thuật toán tối ưu hệ số dịch pha.....	51
Bảng 3. 3 Thông số sử dụng trong mô phỏng	54
Bảng 3. 4 So sánh hiệu quả phương pháp đề xuất với các nghiên cứu khác	63
Bảng 4. 1: Đường bay ngắn nhất của UAV	76
Bảng 4. 2: Tối ưu phân bổ công suất	81
Bảng 4. 3: Tối ưu hệ số dịch pha	84
Bảng 4. 4: Các thông số sử dụng mô phỏng	90
Bảng 4. 5 So sánh độ hội tụ của phương pháp đề xuất và một số kết quả nghiên cứu khác	99

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

Viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
5G	Fifth Generation	Thế hệ thứ 5
6G	Sixth Generation	Thế hệ thứ 6
ADMM	Alternating Direction Method of Multipliers	Nhân theo hướng luân phiên
AF	Amplify-and-Forward	Khuếch đại và chuyển tiếp
AP	Access Point	Điểm truy cập
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Nhiều Gauss trắng cộng
BCD	Block Coordinate Descent	Giảm tọa độ khối
BER	Bit Error Rate	Tốc độ lỗi bit
BS	Base Station	Trạm gốc
CDF	Cumulative Distribution Function	Hàm phân phối tích lũy
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh
DF	Decode-and-Forward	Giải mã và chuyển tiếp
DRL	Deep Reinforce Learning	Học sâu tang cường
EE	Energy Efficiency	Hiệu quả năng lượng
EM	Electromagnetic	Điện từ
EP-OPH	Equal Power Allocation - Optimal Phase Shift	Phân bổ công suất bằng nhau – pha tối ưu
EP-RPH	Equal Power Allocation -Random Phase Shift	Phân bổ công suất bằng nhau – pha ngẫu nhiên
FET	Field-Effect Transistor	Transistor hiệu ứng trường
FL	Federated Learning	Học liên kết
FPGA	Field-Programmable Gate Array	Mảng cổng lập trình được

GPS	Global Positioning System	Hệ thống định vị toàn cầu
I.I.D	Independent and Identically Distributed	Độc lập và phân phối đồng nhất
IoT	Internet Of Things	Vạn vật kết nối internet
IoV	Internet Of Vehicles	Xe cộ kết nối internet
IRS	Intelligent Reflecting Surface	Mặt phản xạ thông minh
ITU	International Telecommunication Union	Liên minh viễn thông quốc tế
LIS	Large Intelligent Surface	Bề mặt thông minh cỡ lớn
LoS	Line of Sight	Đường truyền thẳng
MBS	MIMO Base Station	Trạm cơ sở lớn
MEC	Mobile Edge Computing	Tính toán biên di động
MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems	Hệ thống vi cơ điện tử
MIMO	Multi-Input Multi-Output	Đa ngõ vào – đa ngõ ra
MISO	Multiple-Input Single-Output	Đa ngõ vào – đơn ngõ ra
MMF	Max - Min Fairness	Cực đại – cực tiểu công bằng
NLoS	Non-Line of Sight	Tầm nhìn không trực tiếp
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access	Đa truy cập phi trực giao
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	Đa truy cập phân chia theo tần số trực giao
OP-OPH	Optimal Power Allocation - Optimal Phase Shift	Tối ưu phân bổ công suất – Tối ưu dịch pha
OP-RPH	Optimal Power Allocation -Random Phase Shift	Tối ưu phân bổ công suất – pha ngẫu nhiên
PDF	Probability Distribution Function	Hàm mật độ xác suất
QCQP	Quadratically Constrained Quadratic Program	Lập trình bậc hai ràng buộc bậc hai

QoS	Quality of Service	Chất lượng dịch vụ
SCA	Successive Convex Approximation	Xấp xỉ lồi liên tiếp
SDP	Semidefinite Programming	Lập trình bán xác định
SDR	Semidefinite Relaxation	Nới lỏng bán xác định
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu và can nhiễu
SISO	Single -Input Single-Output	Đơn ngõ vào – đơn ngõ ra
SNR	Signal to Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu
TDMA	Time-division Multiple Access	Đa truy cập phân chia theo thời gian
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Phương tiện bay không người lái
UDN	Ultra-Dense Network	Mạng siêu dày đặc
UE	User Equipment	Trang bị người dùng
WSR	Weighted Sum Rate	Trọng số tổng tốc độ

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Ý nghĩa
$ \cdot $	Giá trị tuyệt đối
$\ \cdot\ $	Chuẩn của ma trận
$\mathbf{a}$	Véc tơ $\mathbf{a}$
$\mathbf{A}$	Ma trận $\mathbf{A}$
$\mathbf{I}$	Ma trận đơn vị
$\mathbf{A} \succcurlyeq \mathbf{0}$	Ma trận bán xác định dương $\mathbf{A}$
$\mathbf{A}^T$	Chuyển vị ma trận
$\mathbf{A}^H$	Chuyển vị Hermitian ma trận
$\text{tr}(\cdot)$	Phép trace ma trận
$\text{diag}(a_1, a_2, \dots, a_n)$	Ma trận đường chéo
$\mathbb{C}^{n \times m}$	Ma trận phức $n \times m$
$\text{rank}(\mathbf{A})$	Hạng của ma trận
$\mathcal{O}$	Độ phức tạp tính toán
$\mathbb{E}[\cdot]$	Phép kỳ vọng
$\text{dom } f$	Tập xác định của hàm f
$\text{Prob}(\cdot)$	Xác suất
$x \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_x^2)$	Giá trị phức của đại lượng ngẫu nhiên phân phối Gaussian trung bình 0 và phương sai σ^2

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN

Nội dung chương bao gồm giới thiệu tổng quan về thực trạng chung của mạng thông tin vô tuyến, và các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến mặt phản xạ thông minh, mục tiêu và nội dung nghiên cứu, nhiệm vụ nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu.

1.1 Giới thiệu

Sự phát triển tất yếu của công nghệ truyền thông không dây trải qua nhiều thế hệ khác nhau từ hệ thống thông tin di động 1G, 2G, 3G, 4G, không dừng lại ở đó công nghệ 5G đang trong quá trình hoàn thiện và được thương mại hóa ở một số nước trên thế giới. Hệ thống thông tin di động 5G là chìa khóa để mở ra cánh cửa mạng kết nối vạn vật IoT, để đáp ứng được các yêu cầu khắt khe về tốc độ, băng thông và số lượng người dùng rất lớn. Rõ ràng, số lượng người dùng và thiết bị trong mạng kết nối vạn vật tăng liên tục, theo số liệu báo cáo vào tháng 02 năm 2019 của Cisco thì số lượng các thiết bị được kết nối vào mạng có thể đạt 28,5 tỉ thiết bị vào năm 2022 [1]. Mặt khác, với mục tiêu tăng dung lượng mạng của truyền thông không dây lên 1000 lần nhằm đáp ứng số lượng ít nhất là 1 tỷ thiết bị được kết nối trong mạng không dây 5G, để đạt được các mục tiêu đặt ra các công nghệ nền tảng, chủ chốt được tập trung nghiên cứu và phát triển như mạng siêu dày đặc (UDN) kỹ thuật MIMO cỡ lớn (Massive MIMO), sóng mi-li-mét (mmWave). Thực tế, việc triển khai các hệ thống cần xem xét đánh giá đến độ phức tạp của hệ thống và chi phí lắp đặt, cũng như vận hành, ví dụ khi triển khai mạng UDN các trạm cơ sở BS hoặc các điểm truy cập AP làm tăng chi phí mạng và bên cạnh đó, với số lượng trạm quá nhiều càng làm vấn đề can nhiễu trở nên trầm trọng hơn. Ngoài ra, vấn đề xây dựng một mạng trực

(backhaul) có thể đáp ứng việc xây dựng và mở rộng UDN là khó khăn cần phải xem xét đến khi triển khai thực tế.

Bên cạnh đó, các công nghệ lớp vật lý 5G cho thấy khả năng thích nghi tốt với sự thay đổi không gian và thời gian của môi trường vô tuyến. Như chúng ta đã biết, môi trường vô tuyến được định nghĩa là một tập hợp các đối tượng (objects) làm thay đổi đáng kể sự lan truyền của sóng điện từ (EM) giữa các thiết bị truyền thông [2]. Sự thay đổi của sóng điện từ lan truyền có thể là suy giảm hoặc tán xạ nhưng sự thay đổi này là không thể tính toán và kiểm soát được trừ những trường hợp đơn giản hoặc được xem xét lý tưởng. Chính việc không kiểm soát môi trường truyền dẫn khiến cho hiệu quả của việc truyền thông bị giảm đáng kể. Rõ ràng, sự suy giảm tín hiệu làm giới hạn bán kính giữa các node trong mạng, hiện tượng đa đường làm ảnh hưởng đến chất lượng và công suất của tín hiệu nhận được, đặc biệt sự suy giảm tín hiệu là vấn đề đáng được xem xét khi triển khai truyền thông sóng mi-li-mét sắp tới (mmWave). Chính vì vậy, việc xem xét tác động vào môi trường truyền không dây để thay đổi các đặc tính theo hướng có lợi cho hiệu năng của hệ thống là một vấn đề đáng quan tâm [3] [4].

Trong mạng truyền thông vô tuyến hợp tác, để cải thiện hiệu năng các kỹ thuật giải mã – chuyển tiếp (DF) và kỹ thuật khuếch đại – chuyển tiếp (AF) được sử dụng để xử lý tín hiệu nhận được. Trong đó, các bộ chuyển tiếp tích cực sẽ khuếch đại tín hiệu nhận được trước khi truyền lại một tín hiệu được khuếch đại [5]. Tuy nhiên, trong kỹ thuật AF được thực hiện đơn giản nhưng quá trình thực hiện là khuếch đại luôn cả nhiễu trong tín hiệu tại các relay sau đó tiếp tục truyền. Bên cạnh đó, các kỹ thuật AF và DF xử lý tín hiệu một cách chủ động (actively) nên sẽ không tránh khỏi việc tiêu tốn năng lượng khi đánh giá hiệu năng của toàn hệ thống.

Các nghiên cứu trong khoảng thời gian gần, chủ yếu tập trung vào xem xét và đề xuất các giải pháp khắc phục các vấn đề hạn chế khi triển khai thực tế các hệ thống.

Bên cạnh đó, các nghiên cứu về môi trường vô tuyến thông minh sử dụng các mặt phản xạ thông minh hay các mặt phản xạ cấu hình được (RIS) đang được nghiên cứu đề xuất nhiều mô hình với các ưu điểm nổi bật khi so sánh với môi trường vô tuyến hiện tại và các kỹ thuật AF hay DF.

1.2 Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước

1.2.1 Tình hình nghiên cứu trong nước

Nhóm nghiên cứu Nguyễn Thanh Tùng, Nguyễn Thị Thanh Bình, và Vũ Chiến Thắng (Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – Đại học Thái Nguyên) đã cung cấp trong [6] các thông tin cơ bản về mặt phản xạ thông minh bao gồm cấu tạo, nguyên lý hoạt động, và các ưu điểm vượt trội của mặt phản xạ thông minh ứng dụng trong hệ thống thông tin vô tuyến. Hơn nữa, nhóm nghiên cứu còn đề xuất đầy đủ hai mươi sáu hướng nghiên cứu tiềm năng của mặt phản xạ thông minh trong các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ 5G, và 6G. Tương tự, trong [7] Nguyễn Xuân Kiên, Nguyễn Thanh Tùng, và Bùi Phương Thảo đã nghiên cứu và tổng hợp các mô hình suy hao của kênh truyền vô tuyến có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh dựa trên các đặc tính chung về nguyên lý phản xạ ánh sáng, điện từ của mặt phản xạ thông minh. Bên cạnh đó, các khảo sát về nguyên lý hoạt động và ứng dụng của mặt phản xạ thông minh trong di động sau 5G và 6G còn được thực hiện bởi các nhóm nghiên cứu của Vũ Thị Nguyệt (Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông – Đại học Thái Nguyên), và nhóm nghiên cứu của Văn Phú Tuấn, Lê Thị Anh, và Phạm Thanh Duy (Trường Đại học Đông Á, Phòng thí nghiệm trọng điểm an toàn thông tin, và Trường đại học Tôn Đức Thắng) trong [8] [9]. Tuy nhiên, các nghiên cứu tập trung vào nguyên lý hoạt động, khảo sát những công bố ngoài nước liên quan đến mặt phản xạ thông minh. Các nhóm nghiên cứu trên chưa phân tích một mô hình truyền thông vô tuyến có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh.

Đặc biệt, hiệu năng của mạng thông tin vô tuyến có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh được phân tích và đánh giá trong các công trình nghiên cứu của các nhóm tác giả Trần Trung Duy (Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông cơ sở Tp. HCM), Từ Lâm Thanh (Trường Đại học Tôn Đức Thắng) và cộng sự (Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông cơ sở Tp. HCM), nhóm của tác giả Hồ Văn Khương và cộng sự (Trường Đại học Bách khoa Tp. HCM). Cụ thể, trong [10] các tác giả đã xem xét sự hỗ trợ của RIS trong mô hình hệ thống truyền thông tán xạ ngược xung quanh (AmBC), một trong những công nghệ nổi bật đang thu hút được sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu trên thế giới nhờ vào khả năng đáp ứng các yêu cầu cấp thiết về vấn đề hiệu quả phổ và hiệu quả năng lượng của mạng thông tin vô tuyến. Trong đó, mô hình kênh truyền được giả sử là kênh Nakagami- m , hàm mật độ xác suất (PDF), và hàm phân bố xác suất tích lũy (CDF) được phân tích từ mô hình mạng đề xuất. Ngoài ra, nhóm tác giả đã đánh giá tỉ số tín hiệu trên nhiễu tức thời tương đương từ đầu đến cuối (e2e), cùng với xác suất dừng (OP), và tỉ lệ lỗi bit trung bình (ASER) sử dụng phương pháp Monte-Carlo. Tuy nhiên, kết quả nghiên cứu chưa xem xét đến trường hợp đa người dùng, và trường hợp người dùng tồn tại trên đường truyền trực tiếp.

Mặt khác, trong [11] tác giả Trần Trung Duy và cộng sự đã định nghĩa giao thức truyền thông, dựa trên việc ứng dụng mặt phản xạ thông minh cho truyền thông gói tin ngắn trong mạng vô tuyến nhận thức. Trong hệ thống đề xuất, mặt phản xạ thông minh sẽ điều chỉnh pha để pha tích lũy thu được bằng 0 tại trạm thứ cấp để tăng tỉ số tín hiệu trên nhiễu đầu cuối. Đặc biệt, công suất phát của nguồn thứ cấp được tối ưu mục đích tăng hiệu năng, và thỏa mãn các hạn chế về phần cứng, các ràng buộc về các can nhiễu. Kết quả mô phỏng và phân tích cho thấy hiệu suất của hệ thống đề xuất có thể được nâng cao hơn bằng cách tăng số lượng IRS, tăng chiều dài của khối, giảm số lượng của bộ thu sơ cấp, hoặc gửi đi ít bit thông tin hơn.

Bên cạnh đó, nhóm nghiên cứu Hà Hoàng Kha và cộng sự đã đề xuất ứng dụng của mặt phản xạ thông minh trong hệ thống chuyển tiếp năng lượng và thông tin vô tuyến liên tục (SWIPT) trong [12] [13]. Cụ thể, trong [12] tác giả đã đề xuất mô hình ứng dụng mặt phản xạ thông minh trong hệ thống vô tuyến nhận thức nhằm tăng cường hiệu quả phổ và hiệu quả năng lượng của hệ thống. Bài toán cực đại hiệu quả năng lượng của hệ thống MIMO SWIPT hỗ trợ nhiều người dùng trong điều kiện thu hoạch năng lượng phi tuyến và trạng thái kênh không hoàn hảo được xây dựng với các ràng buộc phải thiết kế đồng thời các ma trận tiền mã hóa tại trạm gốc thứ cấp, ma trận dịch pha của IRS, và các hệ số phân chia công suất thu hoạch năng lượng tại người dùng. Thách thức đặt ra trong việc giải bài toán tối ưu do các hàm mục tiêu là các hàm không lồi, đòi hỏi tác giả phải sử dụng các phương pháp biến đổi, sau đó sử dụng thuật toán tối ưu luân phiên và Dinkelbach để tìm ra các giá trị tối ưu. Mặt khác, trong [13], các tác giả đã tối ưu tốc độ dữ liệu và năng lượng thu thập tại người trong hệ thống MIMO SWIPT đa người dùng có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh với các ràng buộc bao gồm công suất cực đại tại trạm gốc, chất lượng dịch vụ QoS, và năng lượng thu thập tối thiểu tại mỗi người dùng.

1.2.2 Tình hình nghiên cứu ngoài nước

Mặt phản xạ thông minh RIS là một trong những công nghệ then chốt được xem xét ứng dụng trong mạng thông tin 6G, chính vì vậy RIS thu hút sự quan tâm của nhiều nhà nghiên cứu, và kể cả trong công nghiệp. Các hướng nghiên cứu về RIS phân chia theo hai định hướng chính hoặc dựa trên các đặc tính vật lý của RIS, hoặc dựa trên khả năng ứng dụng trong truyền thông. Dựa trên các đặc tính vật lý, các nhà nghiên cứu tập trung vào phân tích đặc tính về điện từ, nguyên lý chuyển đổi công suất, các nguyên lý điều khiển và điều chỉnh hệ số phản xạ của RIS, và việc thực nghiệm các phần cứng RIS như trong [14] [15] [16] [17] [18]. Cụ thể, trong [14] Wu và Zhang đã xem xét phân tích nguyên lý phản xạ của RIS thông qua phân tích mô hình tín hiệu của mạng truyền thông

có sự hỗ trợ của RIS. Bên cạnh đó, tác giả tập trung vào kiến trúc phần cứng của RIS và các thách thức khi thực hiện thi công phần cứng trong thực tế. Trong [15] Di Renzo và cộng sự đã phân tích chi tiết các vấn đề cơ bản nhất về mặt phản xạ thông minh bao gồm định nghĩa mặt phản xạ thông minh, siêu bề mặt, nguyên lý làm việc, môi trường vô tuyến thông minh, sự dung hòa giữa các lý thuyết của C.E. Shannon, G. Green, và J. C. Maxwell về mặt lý thuyết toán học và trường điện từ. Hơn nữa, các tác giả cũng đã xem xét đến thực trạng nghiên cứu liên quan mặt phản xạ thông minh, cùng với các thách thức và tiềm năng của việc ứng dụng mặt phản xạ thông minh trong thông tin vô tuyến. Tương tự, Özdogan và cộng sự đã dựa trên các kỹ thuật vật lý quang học để chứng minh mô hình suy hao kênh truyền ở trường xa của hệ thống truyền thông vô tuyến có sự hỗ trợ của RIS trong [16]. Bên cạnh đó, trong [17] Liaskos và cộng sự đã đề xuất một khái niệm truyền thông mới thông qua các siêu bề mặt được điều khiển bởi phần mềm. Trong đó, các ô siêu bề mặt có thể được sử dụng ngoài trời hoặc phủ lên tường, các đồ vật trong nhà nhằm điều khiển được các sóng điện từ theo nghĩa điều hướng, hấp thụ hoàn toàn, hoặc phân cực sóng. Đặc biệt, môi trường vô tuyến 2.0 được giới thiệu trong [18] bởi Gacanin và cộng sự, là một khái niệm nổi bật và tiềm năng ứng dụng trong các mạng truyền thông không dây tương lai, nhờ vào sự kết hợp hoàn hảo của RIS và công nghệ trí tuệ nhân tạo (AI), giúp môi trường vô tuyến có thể trở nên lập trình được và thông minh hơn.

Trong mạng thông tin di động tế bào, RIS cho thấy được tính ưu việt khi được cấu hình lắp đặt trên vách tường của các tòa nhà, với mục tiêu tăng cường độ mạnh của tín hiệu phản xạ đến các thiết bị bay không người lái, nhờ đó mà vùng bao phủ và thông lượng của mạng được cải thiện đáng kể [19]. Sự tăng lên nhanh chóng của các dịch vụ dữ liệu trong mạng di động tế bào dẫn đến yêu cầu các trạm gốc phải phục vụ ngày càng nhiều hơn các thiết bị của người dùng, để giải quyết vấn đề trên tuyến thông giữa các thiết bị (D2D) được đề xuất. Tuy nhiên, việc truyền thông khoảng cách ngắn giữa các thiết bị xuất phát từ việc chia sẻ chung tài nguyên phổ với người dùng khác trong mạng.

Từ những vấn đề tồn tại trên, trong [20] Shaoyou và cộng sự đã đề xuất sử dụng mô hình mạng di động phức hợp ở băng tần sóng mi-li-mét có sự hỗ trợ mặt phản xạ thông minh RIS. Rõ ràng, RIS giúp giảm thiểu vấn đề can nhiễu giữa các thiết bị và cải thiện vấn đề dịch pha đa đường, hơn nữa bài toán tối đa tổng tốc độ của hệ thống với ràng buộc lần lượt được xem xét bao gồm chất lượng dịch vụ (QoS), công suất cực đại, pha của các phần tử phản xạ trên RIS, và chế độ làm việc của thiết bị trong mạng D2D. Kết quả cho thấy việc kết hợp RIS trong mạng di động phức hợp D2D ở băng tần sóng mi-li-mét có tổng tốc độ hệ thống vượt trội so với trường hợp không có sự hỗ trợ của RIS.

Trong thời gian gần đây truyền thông ở băng tần THz thu hút được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu nhờ vào ưu điểm đáp ứng được nhu cầu truyền thông với tốc độ cao và băng thông rất lớn. Tuy nhiên, vấn đề suy hao là nhược điểm lớn nhất của truyền thông ở băng tần THz. Chính vì vậy, trong [21] [22] các tác giả đề xuất sử dụng mặt phản xạ thông minh RIS giúp cải thiện đáng kể nhược điểm của truyền thông THz. Cụ thể, trong [21] một mô hình suy hao kênh truyền THz có sự hỗ trợ của RIS được các tác giả phân tích, sau đó kiểm chứng thông qua mô phỏng thông qua điện từ trường. Mặt khác, trong [22] Cheng và cộng sự đã tối đa hóa công suất thu dựa trên việc định dạng búp sóng tại trạm phát, các hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ của RIS, và vị trí đặt mặt phản xạ thông minh RIS.

Kỹ thuật đa truy cập không trực giao (NOMA) là một kỹ thuật cải thiện đáng kể hiệu quả phổ tần, và giúp đạt được số lượng kết nối rất lớn cho các mạng vô tuyến thế hệ tương lai. Sự kết hợp giữa RIS và NOMA trong [23], cho thấy hiệu suất mạng đạt được vượt trội so với các kỹ thuật hiện có. Cụ thể, một hệ thống hỗ trợ người dùng NOMA trong miền công suất có sự hỗ trợ của RIS, đặc biệt các trọng số định dạng búp sóng tại RIS đã được thiết kế và áp dụng trong mô hình trên. Trong [24], hiệu suất lý thuyết của đường lên trong hệ thống truyền thông được phân tích trong trường hợp sử dụng ba kỹ thuật đa truy cập khác nhau lần lượt là kỹ thuật đa truy cập không trực giao NOMA, kỹ

thuật đa truy cập phân chia theo tần số FDMA, và kỹ thuật đa truy cập phân chia theo thời gian TDMA. Kết quả phân tích cho thấy hệ thống truyền thông NOMA có sự hỗ trợ của RIS đạt được hiệu quả vượt trội hơn các kỹ thuật còn lại khi đạt được số lượng người dùng đủ lớn. Trong [25], RIS-NOMA được đề xuất sử dụng trong truyền thông ở băng tần THz, cụ thể hiệu quả năng lượng của mạng được tối đa hóa dựa trên việc kết hợp tối ưu phân bổ công suất và tối ưu định dạng búp sóng RIS.

Bên cạnh những nghiên cứu và mô phỏng trên lý thuyết, RIS còn được thực nghiệm dạng các sản phẩm mẫu trong các nghiên cứu gần đây. Trong [26], Tan và cộng sự đã phát triển một mảng phản xạ thông minh gồm 224 đơn vị phản xạ được bố trí trên một bề mặt ứng dụng cho truyền thông trong nhà ở băng tần sóng mi-li-mét. Trong [27], RIS với 256 phần tử phản xạ, các phần tử được thiết kế với 2 bit dịch pha để hỗ trợ cho việc định dạng búp sóng thụ động của các phần tử trên RIS. Nguyên mẫu RIS 256 phần tử được thực nghiệm với tần số làm việc tại 2.3GHz và 28.5 GHz cho thấy đạt được độ lợi ăng-ten lần lượt là 21.7 dBi và 19.1 dBi. Bên cạnh đó, trong [28] nhiều nguyên mẫu RIS được thiết kế để thử nghiệm trong các kịch bản của mạng 5G, với số lượng phần tử phản xạ lần lượt là 400, 1024, và 16384, tần số làm việc lần lượt là 2.6 GHz, 4.9 GHz, và 26 GHz. Đặc biệt, các RIS được triển khai thử nghiệm trong các vai trò khác nhau của mạng 5G bao gồm người dùng 5G, các trạm gốc 5G với các tín hiệu tham chiếu được định nghĩa theo tiêu chuẩn 3GPP cho 5G.

1.3 Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu của luận án tập trung vào các nội dung nghiên cứu chính như sau:

- Xây dựng mô hình toán cho hệ thống thông tin vô tuyến có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh RIS và đánh giá hiệu quả của việc sử dụng mặt phản xạ thông minh RIS trong các hệ thống truyền thông vô tuyến như mạng di động và hệ thống thông tin điện toán biên di động có sự hỗ trợ của UAV.

- Đề xuất thuật toán tối ưu tổng thông lượng mạng của hệ thống thông tin di động đơn ngõ vào đơn ngõ ra có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh RIS.
- Đề xuất thuật toán tối thiểu tổng độ trễ và giảm tải tính toán trong hệ thống thông tin điện toán biên di động MEC có sự hỗ trợ của UAV và mặt phản xạ thông minh RIS.

1.4 Nhiệm vụ nghiên cứu

- Các ảnh hưởng của môi trường vô tuyến trong hệ thống thông tin vô tuyến và các mô hình toán đang sử dụng phân tích, mô phỏng, và ứng dụng.
- Xem xét và đánh giá các loại mặt phản xạ thông minh đang được nghiên cứu.
- Xây dựng mô hình toán cho hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng mặt phản xạ thông minh: mô hình truyền sóng, suy hao, vật lý.
- Đánh giá hiệu quả năng lượng và phổ của các hệ thống có sử dụng mặt phản xạ thông minh.
- Đề xuất ứng dụng bề mặt phản xạ thông minh trong các hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng các công nghệ khác nhau.
- Nghiên cứu tối ưu phân bổ công suất trong hệ thống thông tin vô tuyến có sử dụng mặt phản xạ thông minh.
- Nghiên cứu tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ của mặt phản xạ thông minh.
- Nghiên cứu tối ưu độ trễ của hệ thống điện toán biên di động có sự hỗ trợ của UAV và mặt phản xạ thông minh.

1.5 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Mạng thông tin vô tuyến và môi trường vô tuyến thông minh sử dụng các bề mặt phản xạ thông minh, thông qua việc đề xuất mô hình toán và phân tích, đánh giá hiệu năng của mạng.

1.6 Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

Tiếp cận nghiên cứu tổng quan hệ thống từ các vấn đề cơ bản, thực trạng, sau đó xem xét đề xuất áp dụng mô hình mới vào hệ thống đang được nghiên cứu thông qua công cụ mô phỏng toán học.

Nghiên cứu cơ sở lý thuyết dựa trên nguồn tài nguyên các công bố khoa học có liên quan đến lĩnh vực nghiên cứu, đánh giá tình hình nghiên cứu và các vấn đề còn tồn tại. Từ đó, đề xuất mô hình toán phù hợp cho các hệ thống trong thực tiễn và phân tích, đánh giá hiệu quả của việc áp dụng mô hình đã đề xuất.

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

Luận án tập trung nghiên cứu ứng dụng của mặt phản xạ thông minh trong hệ thống thông tin vô tuyến là một trong những chủ đề mang tính cấp thiết cao trong những năm gần đây liên quan đến mạng vô tuyến nói chung, và mạng vô tuyến thế hệ thứ 5G, và thế hệ thứ 6G nói riêng.

a. Về khoa học

Đề xuất được mô hình RIS ứng dụng trong các hệ thống truyền thông vô tuyến bao gồm mạng di động tế bào, và hệ thống điện toán biên di động MEC trong mạng vô tuyến có sự hỗ trợ của UAV.

Đề xuất và giải bài toán cực đại tổng thông lượng mạng trong mạng di động tế bào có sự hỗ trợ của RIS, và phân tích thông lượng mạng của người dùng trong trường hợp xấu nhất dựa trên sự ràng buộc của chất lượng dịch vụ QoS.

Đề xuất và giải bài toán cực tiểu tổng độ trễ của mạng vô tuyến có sự hỗ trợ của UAV trong hệ thống điện toán biên di động MEC.

b. Về thực tiễn

Các đề xuất được nghiên cứu trong luận án hoàn toàn phù hợp với xu hướng phát triển và triển khai thực tế của mạng truyền thông vô tuyến, đặc biệt là với sự tăng lên không ngừng của các dịch vụ, và số lượng thiết bị kết nối.

Bên cạnh đó, mô hình đề xuất hoàn toàn phù hợp với chương trình triển khai mạng 5G trong giai đoạn hiện nay của Bộ Thông tin và Truyền thông, cùng với các tập đoàn viễn thông lớn trong nước như Viettel, VNPT.

1.8 Cấu trúc của luận án

Bố cục của báo cáo được chia thành 5 chương, với nội dung chính như sau:

- **Chương 1:** Nội dung chương 1 bao gồm giới thiệu tổng quan về thực trạng chung của mạng thông tin vô tuyến, và các nghiên cứu trong và ngoài nước liên quan đến mặt phản xạ thông minh, mục tiêu và nội dung nghiên cứu, nhiệm vụ nghiên cứu, đối tượng và phạm vi nghiên cứu, ý nghĩa khoa học và thực tiễn của đề tài nghiên cứu.
- **Chương 2:** Nội dung chương trình bày về cơ sở lý thuyết liên quan đến mặt phản xạ thông minh RIS, các mô hình kênh truyền vô tuyến có hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh, các ứng dụng mặt phản xạ thông trong mạng thông tin vô tuyến 6G. Bên cạnh đó, cơ sở lý thuyết liên quan đến hệ thống truyền thông vô tuyến có sự hỗ trợ của máy bay không người lái UAV, và hệ thống điện toán biên di động MEC. Ngoài ra, các thông số hiệu năng trong mạng thông tin vô tuyến 6G, và các kỹ thuật tối ưu hiệu năng mạng thông tin vô tuyến cũng được giới thiệu trong chương này.

- **Chương 3:** Nội dung của chương trình bày ứng dụng của mặt phản xạ thông minh trong mạng thông tin di động tế bào, cụ thể, bài toán tối ưu được đề xuất để cực đại tổng thông lượng mạng, và phân tích thông lượng người dùng trong trường hợp xấu nhất dựa trên giải quyết bài toán kết hợp tối ưu phân bổ công suất và tối ưu hệ số dịch pha của phần tử phản xạ RIS.
- **Chương 4:** Nội dung của chương trình bày sự kết hợp của UAV và RIS để hỗ trợ trong hệ thống điện toán biên di động MEC nhằm hỗ trợ cho quá trình giảm tải tính toán từ thiết bị đầu cuối. Cụ thể, bài toán tối ưu giảm tải tính toán và phân bổ tài nguyên trong hệ thống MEC dựa trên kết hợp tối ưu quỹ đạo bay cho UAV, tối ưu phân bổ công suất, tối ưu hệ số dịch pha của RIS, và tối ưu giảm tải tính toán.
- **Chương 5:** Nội dung chương trình bày kết luận về các kết quả đã thực hiện được trong luận án tiến sĩ, các hạn chế còn tồn tại, và đề xuất hướng phát triển, cũng như định hướng nghiên cứu tiếp theo.

Chương 2

CƠ SỞ LÝ THUYẾT

Nội dung chương trình bày về cơ sở lý thuyết liên quan đến mặt phản xạ thông minh RIS, các mô hình kênh truyền vô tuyến có hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh, các ứng dụng mặt phản xạ thông minh trong mạng thông tin vô tuyến 6G. Bên cạnh đó, cơ sở lý thuyết liên quan đến hệ thống truyền thông vô tuyến có sự hỗ trợ của máy bay không người lái UAV, và hệ thống điện toán biên di động MEC. Ngoài ra, các thông số hiệu năng trong mạng thông tin vô tuyến 6G, và các kỹ thuật tối ưu hiệu năng mạng thông tin vô tuyến cũng được giới thiệu trong chương này.

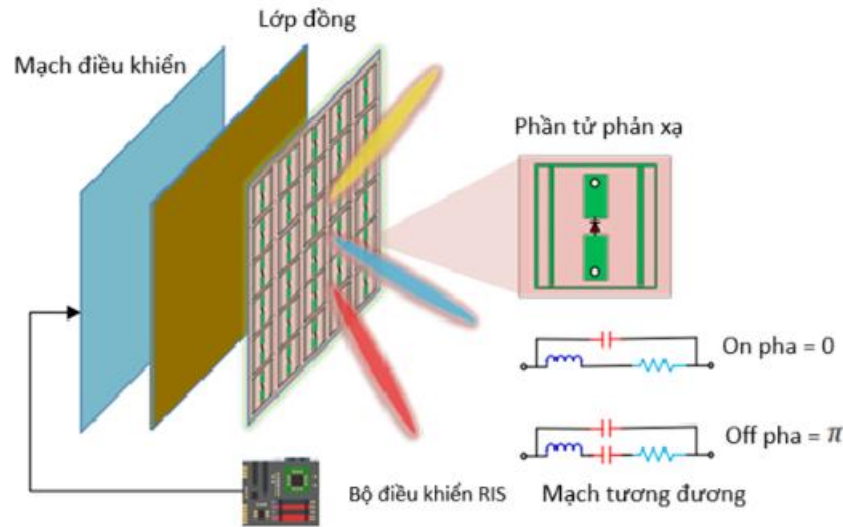
2.1 Mặt phản xạ thông minh RIS

2.1.1 Giới thiệu mặt phản xạ thông minh

RIS là bề mặt nhân tạo gồm mảng 2 chiều các phần tử phản xạ với cấu trúc vật lý được thiết kế đặc biệt như Hình 2.1. Trong đó, mỗi phần tử phản xạ gồm phần tử thụ động hoặc phần tử tích cực có thể thay đổi thuộc tính điện từ như pha, biên độ dẫn đến thay đổi tính chất của tín hiệu vô tuyến tới nhằm tạo ra các hiệu ứng đa đường mong muốn. Hơn nữa, các tín hiệu phản xạ tại các phần tử RIS còn có thể giúp cải thiện công suất tín hiệu thu hoặc giảm can nhiễu của thành phần khác lên người dùng mong muốn [29].

Đặc biệt, nhờ vào khả năng phản xạ một cách thụ động mà không cần nguồn cung cấp giúp cho việc ứng dụng mặt phản xạ thông minh RIS tiết kiệm năng lượng và giảm chi phí vận hành đáng kể. Bên cạnh đó, mặt phản xạ RIS còn giúp cải thiện khả năng phủ sóng điều chỉnh và phản xạ sóng vô tuyến sao cho tín hiệu có thể truyền đến được những khu vực tín hiệu thu bị yếu, hoặc bị che chắn bởi các vật cản như tòa nhà, đồi núi, môi trường trong nhà. Hơn nữa, công nghệ truyền thông ở tần số cao như sóng mi-li-mét

hoặc sóng tê-ra-hét (THz) tín hiệu dễ bị hấp thụ bởi các bề mặt, nên việc ứng dụng mặt phản xạ thông minh RIS là hết sức cấp thiết.



Hình 2. 1 Cấu trúc của RIS và mạch tương đương của các phần tử phản xạ

2.1.2 Cấu tạo mặt phản xạ thông minh

Trong Hình 2.1 [14], mặt phản xạ thông minh RIS có cấu tạo gồm 3 lớp và một bộ điều khiển. Trong đó, lớp ngoài cùng là các phần tử phản xạ được in trên bề mặt dẫn điện có chức năng tương tác trực tiếp với tín hiệu vô tuyến đến. Lớp thứ hai là bảng đồng giúp tránh việc mất mát năng lượng tín hiệu đến. Cuối cùng là lớp có chức năng điều chỉnh các biên độ của tín hiệu phản xạ hoặc điều chỉnh dịch pha của từng phần tử phản xạ [14]. Mạch tương đương của phần tử phản xạ tương ứng là các mạch dịch pha với trạng thái đóng và ngắt tương ứng với giá trị dịch pha lần lượt là 0 và π . Trong thực tế, bộ điều khiển thông minh RIS có thể được thực hiện là các phần cứng nhúng hoặc mảng các cổng có thể lập trình được FPGA với khả năng đáp ứng với các tần số làm việc khác nhau của tín hiệu.

Trên các mặt phản xạ thông minh, hệ số phản xạ của mỗi phần tử có thể thay đổi được nhờ vào thiết kế đặc biệt ở các phần tử có thể là các PIN diode, FET hoặc các

chuyển mạch MEMs. Việc thay đổi điện áp phân cực của PIN diode có thể giúp tạo ra các dịch pha của tín hiệu phản xạ trong khoảng giá trị từ 0 đến 2π hoặc việc thay đổi điện áp trên điện trở cũng có thể dẫn đến thay đổi biên độ của tín hiệu phản xạ trong $[0,1]$.

2.1.3 Nguyên lý hoạt động của mặt phản xạ thông minh

Trong Hình 2.2, giả sử một hệ thống thông tin vô tuyến gồm một trạm phát BS và người dùng, đường truyền trực tiếp giữa người dùng và BS bị chặn bởi vật cản. Một mặt phản xạ thông minh gồm N phần tử phản xạ được sử dụng để hỗ trợ duy trì kết nối thông tin giữa BS và người dùng.

Lúc này, kênh truyền gồm các thành phần BS – RIS, và RIS – người dùng. Khi đó tín hiệu phản xạ y_n bởi mặt phản xạ thông minh RIS sẽ có dạng như sau:

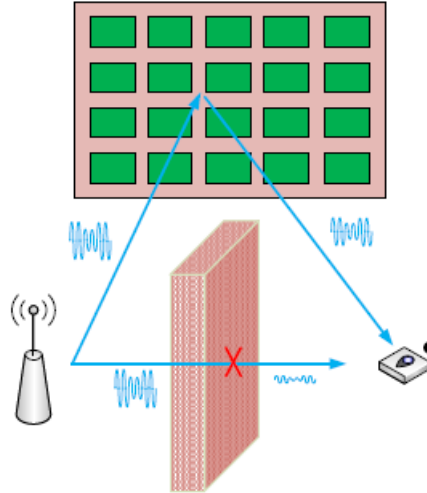
$$y_n = \beta_n e^{j\theta_n} x_n \quad n = 1, \dots, N \quad (2.1)$$

Trong đó, x_n là tín hiệu đến các phần tử phản xạ, $\beta_n \in [0,1]$ là hệ số phản xạ và điều khiển biên độ của tín hiệu phản xạ, $\theta_n \in [0,2\pi)$ là các giá trị dịch pha tín hiệu phản xạ do các phần tử phản xạ tạo ra.

Một cách lý tưởng, các mặt phản xạ thông minh với các phần tử phản xạ thụ động thì gần như không cần nguồn năng lượng cung cấp. Chính vì vậy, tín hiệu nhiễu thu được sẽ không ảnh hưởng đến tín hiệu mong muốn được phản xạ, nhờ vào việc không sử dụng các bộ chuyển đổi tương tự số hoặc ngược lại, cũng như là trên mặt phản xạ thông minh không sử dụng đến các bộ khuếch đại tín hiệu.

Bên cạnh đó, mặt phản xạ thông minh có thể đáp ứng được toàn bộ băng thông, và có thể làm việc ở các tần số bất kỳ nếu các mặt phản xạ thông sử dụng các phần tử chủ động hoặc các đi-ốt biến dung, việc này giúp cho pha tín hiệu có thể thay đổi liên tục. Hơn nữa, mặt phản xạ thông minh có tính linh động cao có thể đặt ở nhiều vị trí khác

nhau như: vách của các tòa nhà, trần nhà của các văn phòng, các không gian trong nhà hoặc cả trên quần áo.



Hình 2. 2 Ứng dụng RIS trong hệ thống thông tin vô tuyến

2.1.4 Các công nghệ của mặt phản xạ thông minh RIS

Theo nguyên lý hoạt động, RIS bao gồm thụ động (passive RIS), chỉ điều chỉnh pha và biên độ sóng mà không khuếch đại, và chủ động (active RIS), tích hợp bộ khuếch đại để tăng cường tín hiệu. Ngoài ra, STAR-RIS hỗ trợ đồng thời truyền và phản xạ tín hiệu. Về cấu tạo, RIS có thể là phần cứng cố định với các phần tử như diode PIN hoặc siêu vật liệu, và phần mềm điều khiển (software-defined RIS), sử dụng thuật toán để tối ưu hóa cấu hình. Sự đa dạng này cho phép RIS thích ứng với các kịch bản truyền thông khác nhau, từ 5G đến 6G.

RIS chủ động (Active RIS) hoạt động nhờ vào việc tích hợp các bộ khuếch đại tín hiệu hoặc linh kiện chủ động vào các phần tử phản xạ. RIS chủ động có khả năng khuếch đại tín hiệu nhận được trước khi phản xạ, giúp tăng cường cường độ tín hiệu và cải thiện hiệu suất truyền thông trong các môi trường có suy hao cao. Các phần tử của RIS chủ động được điều khiển bởi các bộ điều chế thích nghi, cho phép thay đổi pha,

biên độ và đôi khi cả tần số của sóng điện từ phản xạ, khả năng này giúp mở rộng vùng phủ sóng và cải thiện chất lượng kết nối trong các hệ thống truyền thông hỗn tạp. Tuy nhiên, nó yêu cầu nguồn cung cấp năng lượng liên tục để vận hành các bộ khuếch đại, dẫn đến mức tiêu thụ năng lượng cao hơn so với các giải pháp thụ động. Bên cạnh đó, phần cứng sẽ phức tạp hơn do phải tích hợp các linh kiện chủ động, và đòi hỏi các thuật toán điều khiển phức tạp để tối ưu hóa hiệu suất. Chính vì vậy, RIS chủ động được xem xét ứng dụng trong các hệ thống truyền thông không dây thế hệ mới như 6G, đặc biệt trong các mạng truyền thông siêu dày đặc ở các khu vực đô thị, hoặc các hệ thống truyền thông đòi hỏi các kết nối xa. Hơn nữa, RIS chủ động cũng hỗ trợ các ứng dụng đòi hỏi độ tin cậy cao như truyền thông vệ tinh hoặc mạng cảm biến IoT cỡ lớn [30].

RIS thụ động (Passive RIS) hoạt động dựa trên việc điều chỉnh pha và biên độ của sóng điện từ đến mà không khuếch đại tín hiệu. Các phần tử phản xạ thường là các siêu vật liệu hoặc cấu trúc đơn giản như diode PIN, được thiết kế để phản xạ tín hiệu theo hướng mong muốn dựa vào việc thay đổi các thông số điện từ. RIS thụ động không yêu cầu nguồn năng lượng để khuếch đại, chỉ cần năng lượng tối thiểu để điều khiển cấu hình phản xạ. RIS thụ động có ưu điểm lớn nhất là tiết kiệm năng lượng, dễ dàng triển khai và chi phí thấp do không sử dụng các linh kiện chủ động. Tuy nhiên, hiệu suất của hệ thống phụ thuộc nhiều vào cường độ tín hiệu đến, dẫn đến hạn chế trong các môi trường có suy hao lớn hoặc khoảng cách truyền xa. Việc điều chỉnh pha thường bị giới hạn bởi độ phân giải của các phần tử phản xạ, ảnh hưởng đến độ chính xác của định hướng bức xạ. RIS được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống 5G và 6G để tăng cường vùng phủ sóng, cải thiện hiệu quả phổ và hỗ trợ truyền thông trong các môi trường không có đường truyền trực tiếp (NLOS). RIS thụ động phù hợp cho các ứng dụng như mạng nội đô, nhà thông minh và truyền thông xe tự hành [31].

RIS phản xạ và truyền đồng thời (STAR-RIS) là một biến thể tiên tiến của RIS, cho phép thực hiện đồng thời cả hai chế độ truyền và phản xạ tín hiệu. STAR-RIS chia

tín hiệu đến thành hai phần: một phần được phản xạ về phía người dùng ở cùng phía với nguồn phát, và phần còn lại được truyền qua mặt đến phản xạ đến người dùng. Điều này được thực hiện thông qua việc điều chỉnh độc lập pha và biên độ của các phần tử ở hai chế độ. STAR-RIS cung cấp khả năng phủ sóng toàn diện hơn so với RIS thông thường, do khả năng phục vụ đồng thời các người dùng ở cả hai phía của bề mặt. Tuy nhiên, việc điều khiển đồng thời hai chế độ đòi hỏi thuật toán tối ưu phức tạp và phần cứng phải có độ chính xác cao. Ngoài ra, hiệu suất của STAR-RIS có thể bị ảnh hưởng bởi sự phân chia năng lượng giữa hai chế độ truyền và phản xạ, dẫn đến giảm hiệu quả trong một số kịch bản. Do đó, STAR-RIS phù hợp cho các ứng dụng yêu cầu phủ sóng đa hướng, như mạng không dây trong các tòa nhà cao tầng, sân bay, hoặc các khu vực có mật độ người dùng cao. STAR-RIS cũng hỗ trợ các kịch bản truyền thông hai chiều hoặc mạng tích hợp không gian-vệ tinh [32].

RIS cỡ lớn (Large-RIS) là các mặt phản xạ thông minh có kích thước lớn với số lượng phần tử phản xạ rất lớn (hàng nghìn đến hàng triệu phần tử). Nguyên lý làm việc tương tự RIS thụ động, nhưng nhờ vào số lượng phần tử lớn, Large-RIS có khả năng tạo ra các chùm sóng có độ định hướng rất cao, gần giống với hiệu ứng của ăng-ten mảng lớn. Điều này được thực hiện thông qua việc điều chỉnh pha chính xác trên toàn bộ bề mặt để tối ưu hóa hướng truyền tín hiệu. Large-RIS cho độ lợi ăng-ten cao, cải thiện đáng kể hiệu suất đường truyền và hiệu quả phổ của mạng. Tuy nhiên, Large-RIS đòi hỏi độ phức tạp tính toán lớn khi điều khiển một số lượng lớn phần tử, chi phí sản xuất và triển khai cao. Ngoài ra, Large-RIS yêu cầu các mô hình kênh truyền chính xác hơn để đảm bảo hiệu quả tối ưu. Large-RIS được ứng dụng trong các hệ thống truyền thông tần số cao như mmWave hoặc THz, cần định hướng bức sóng chính xác giảm thiểu đặc tính suy hao đường truyền lớn của các hệ thống truyền thông tần số cao. Large-RIS cũng phù hợp cho các mạng không dây quy mô lớn như thành phố thông minh hoặc truyền thông vệ tinh [33].

RIS được điều khiển dựa trên phần mềm (Software-Defined RIS – SD-RIS) tích hợp các giao thức điều khiển dựa trên phần mềm để quản lý và tối ưu hóa hoạt động của mặt phản xạ thông minh. SD-RIS sử dụng các thuật toán máy học hoặc trí tuệ nhân tạo để tự động điều chỉnh cấu hình phản xạ dựa trên thông tin từ môi trường truyền thông, chẳng hạn như trạng thái kênh hoặc vị trí người dùng. Nhờ đó, SD-RIS thích ứng nhanh chóng với các thay đổi trong mạng mà không cần can thiệp vào phần cứng. SD-RIS nổi bật với tính linh hoạt và khả năng thích ứng cao, giúp giảm độ phức tạp trong việc triển khai và vận hành. Tuy nhiên, SD-RIS đòi hỏi hạ tầng phần mềm mạnh và khả năng xử lý tính toán cao, điều này dẫn đến chi phí vận hành tăng. Ngoài ra, hiệu suất của SD-RIS phụ thuộc vào chất lượng dữ liệu đầu vào và độ chính xác của các thuật toán điều khiển. Do đó, SD-RIS được ứng dụng trong các mạng không dây động như mạng 6G, IoT, hoặc truyền thông xe tự hành, nơi cần thích ứng nhanh với các điều kiện thay đổi. SD-RIS cũng hỗ trợ các kịch bản quản lý mạng thông minh, như tối ưu hóa tài nguyên hoặc giảm thiểu nhiễu [34].

2.1.5 Mô hình truyền sóng qua mặt phản xạ thông minh RIS

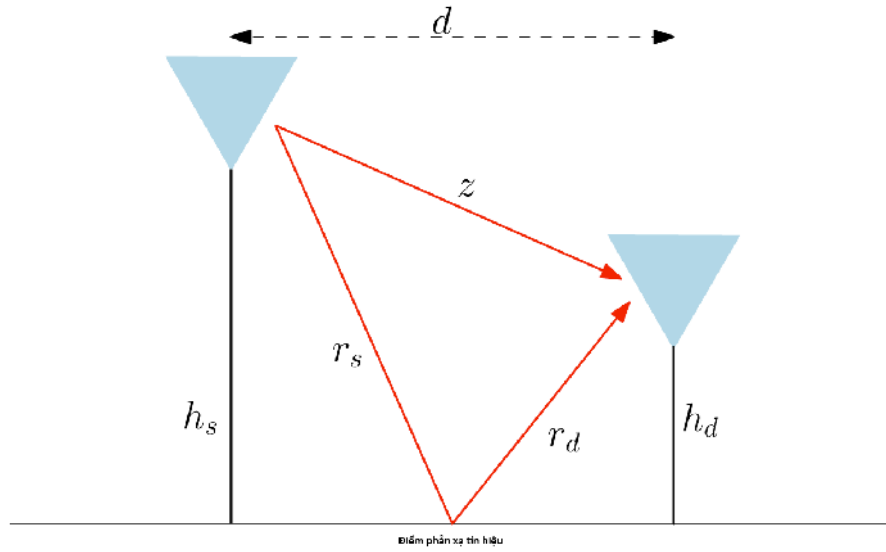
2.1.5.1 Mô hình đa đường hai tia

Xem xét một mô hình truyền thông vô tuyến gồm một trạm phát và một thiết bị thu lần lượt có độ cao bên phát và bên thu như trong Hình 2.3. Sự lan truyền sóng vô tuyến trong không gian tự do theo mô hình quang học, giả sử khoảng cách trên mặt phẳng đất lớn hơn rất nhiều so với bước sóng, và mặt đất đóng vai trò như gương phản xạ. Bên cạnh đó, giả sử mô hình truyền sóng lan truyền theo đường thẳng và trong môi trường đồng nhất. Dựa theo định lý Fermat cho quá trình truyền sóng theo tầm nhìn thẳng LoS, và định luật phản xạ Snell ta có được công suất tại thiết bị thu như sau [35]:

$$P_d = P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{z} + \frac{R \times e^{-j\Delta\phi}}{r_s + r_d} \right|^2, \quad (2.2)$$

Trong đó, P_s là công suất phát từ nguồn, λ là bước sóng, z là khoảng cách giữa ăng-ten nguồn và ăng-ten đích, r_s là khoảng cách từ ăng-ten nguồn đến điểm phản xạ, r_d là khoảng cách từ điểm phản xạ đến ăng-ten đích, R là hệ số phản xạ của mặt đất, $\Delta \phi = \frac{2\pi(r_s+r_d-z)}{\lambda}$ là giá trị lệch pha. Giả sử, khoảng cách giữa nguồn và đích là vô cùng lớn, $d \gg h_s + h_d$, và $d \approx z \approx r_s + r_d$ lúc này ta có được biểu thức tương đương như sau:

$$P_d = P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (2.3)$$

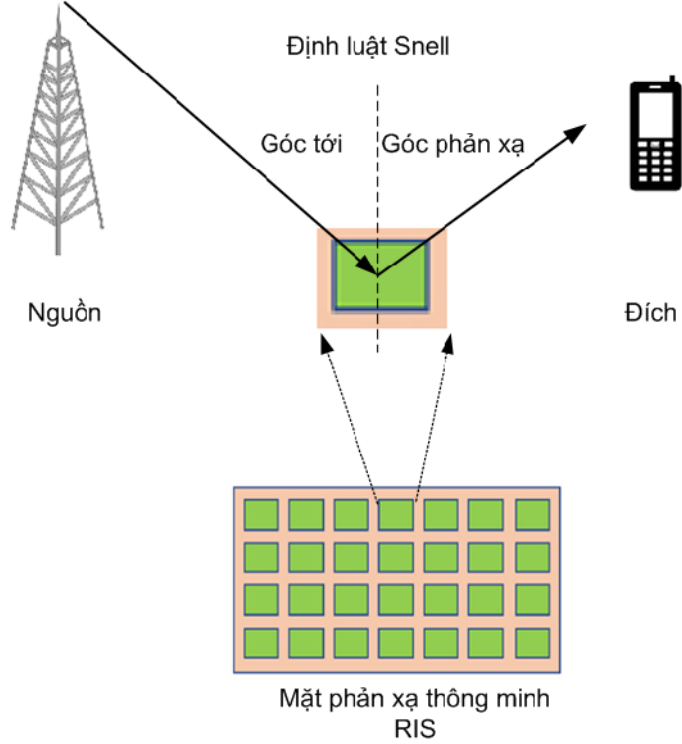


Hình 2. 3 Mô hình kênh truyền vô tuyến gồm hai tia LoS và NLoS

2.1.5.2 Mô hình truyền sóng qua mặt phản xạ thông minh RIS

Rõ ràng, mô hình truyền sóng trong không gian tự do như trong Hình 2.3 cho thấy việc phản xạ là hoàn toàn không thể kiểm soát được, và tín hiệu tại phía thu sẽ bị suy hao theo khoảng cách. Xem xét mô hình có sự hỗ trợ mặt phản xạ thông minh RIS giả sử gồm N phần tử phản xạ như trong Hình 2.4, RIS đóng vai trò hỗ trợ truyền thông giữa nguồn và đích. Theo định luật Snell, mỗi mặt phản xạ thông minh có thể điều chỉnh góc phản xạ và pha của của tia được phản xạ. Lúc này, công suất tại phía thu qua phần tử phản xạ thứ i như sau [36]:

$$P_d = P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi} \right)^2 \left| \frac{1}{z} + \sum_{i=1}^N \frac{R_i \times e^{-j\Delta\phi_i}}{r_{s,i} \cdot r_{d,i}} \right|^2, \quad (2.4)$$



Hình 2. 4 Nguyên lý làm làm việc của mặt phản xạ theo định luật Snell

Với mục tiêu đảm bảo tín hiệu tại phí thu được ổn định, các hệ số phản xạ của các phần tử phản xạ được giả sử là không gây tổn hao biên độ tín hiệu, thông tin góc pha của các phần tử phản xạ xem như là hoàn hảo. Do đó, mỗi giá trị R_i được tối ưu để hiệu chỉnh tín hiệu tương ứng với tín hiệu của đường truyền tầm nhìn thẳng. Công suất tại phía thu được viết lại như sau:

$$P_d \approx (N + 1)^2 P_s \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2, \quad (2.5)$$

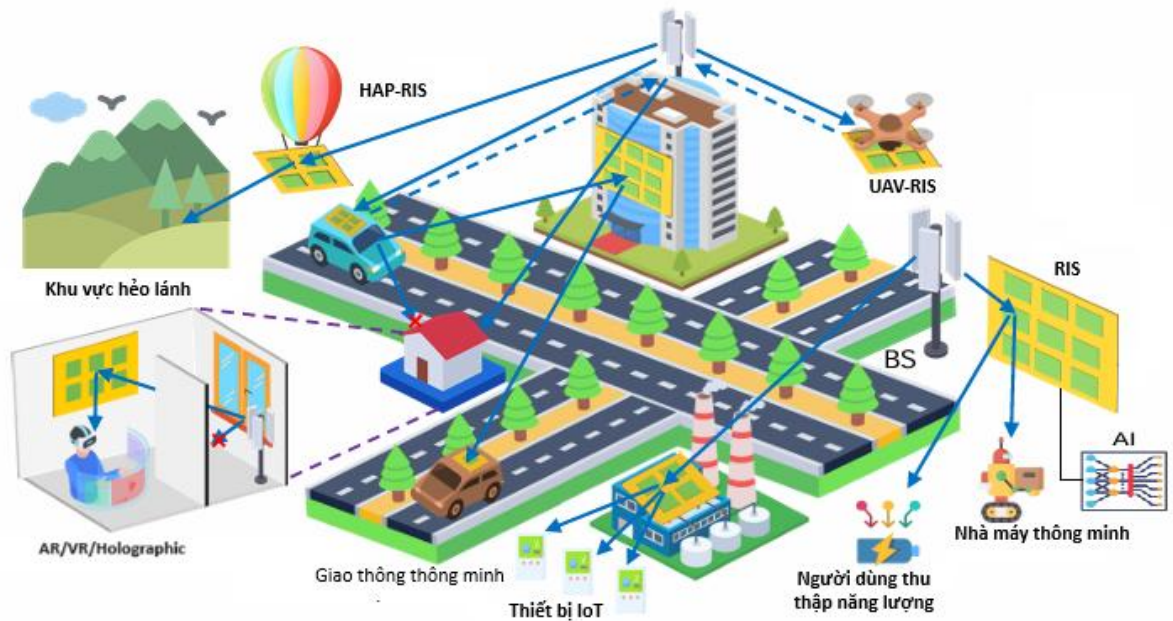
Biểu thức (2.5) cho thấy công suất tại phía thu tỉ lệ thuận với bình phương số lượng pha được điều khiển độc lập bởi mặt phản xạ thông minh RIS và tỉ lệ nghịch với bình phương khoảng cách giữa nguồn và đích. Rõ ràng, mặt phản xạ thông minh cho thể

hiện rõ tiềm năng trong mạng thông tin vô tuyến, với độ lợi công suất đạt được như một hàm của số lượng phần tử phản xạ [1].

2.2 Các hướng nghiên cứu và ứng dụng của mặt phản xạ thông minh RIS

Khái niệm môi trường vô tuyến thông minh (smart radio environment) được sử dụng để đề cập đến sự hỗ trợ của RIS trong các hệ thống thông tin vô tuyến. Sự kết hợp của RIS trong các ngữ cảnh cho thấy khả năng cải thiện đáng kể tín hiệu nhận được tại phía thu, mở rộng vùng bao phủ của mạng, tăng dung lượng kết nối, tăng cường hiệu quả phổ, giảm thiểu công suất cần thiết tại phía phát, giảm thiểu can nhiễu liên tế bào nhờ vào kỹ thuật định dạng bức sóng. Rõ ràng, với những ưu điểm trên RIS hứa hẹn là kỹ thuật then chốt trong 6G và mở ra các hướng nghiên cứu mới. Cụ thể, các phương pháp học hỗ trợ cho định dạng bức sóng thụ động tại các RIS, việc kết hợp các phương pháp học giúp tiết kiệm được tài nguyên hệ thống thông qua việc giảm thiểu các thông tin về kênh truyền. Lúc này, các kỹ thuật học tăng cường (RL) được xem xét giúp đưa ra quyết định cho các bộ điều khiển RIS để thay đổi thích nghi các cấu hình pha của các phần tử phản xạ [37].

Bên cạnh đó, RIS hỗ trợ trong truyền thông D2D, do sự tăng lên không ngừng của số lượng thiết bị kết nối trong mạng kết nối vạn vật IoT làm cho việc nghiên cứu và tối ưu truyền thông giữa các thiết bị D2D trở nên cấp thiết. Với sự đa dạng kết nối trong truyền thông D2D, sự kết hợp của RIS giúp tăng cường được các kết nối riêng giữa các thiết bị trong mạng D2D [38]. Đặc biệt, RIS có thể thay thế cho các bộ chuyển tiếp trong các nghiên cứu trước nhờ vào những ưu điểm nổi bật là không sử dụng nguồn điện và không khuếch đại nhiễu. Ngoài ra, RIS hỗ trợ truyền thông mmWave và THz; truyền thông bước sóng ngắn và cực ngắn với sự hỗ trợ của RIS sẽ giúp cải thiện đáng kể vùng bao phủ của mạng [39], [40], giảm thiểu ảnh hưởng và suy hao của môi trường vật cản [41].



Hình 2. 5 RIS ứng dụng trong mạng truyền thông vô tuyến

Trong Hình 2.5 [42] mô tả các ứng dụng đa dạng và tiềm năng của mặt phản xạ thông minh RIS trong mạng truyền thông không dây hiện đại. Cụ thể, RIS có thể cải thiện đáng kể hiệu suất thông tin trong mạng di động bằng cách thiết lập các đường truyền phản xạ giữa trạm gốc và người dùng trong trường hợp đường truyền trực tiếp bị che khuất, từ đó nâng cao chất lượng dịch vụ QoS trong các mạng không đồng nhất. Đồng thời, việc sử dụng RIS góp phần giảm độ trễ trong các hệ thống điện toán biên di động MEC nhờ vào khả năng kiểm soát linh hoạt đường truyền tín hiệu. Ngoài ra, RIS có thể hoạt động như một trung tâm phản xạ tín hiệu hiệu quả, hỗ trợ nhiều kết nối đồng thời thông qua việc giảm thiểu nhiễu trong các mạng truyền thông thiết bị đến thiết bị D2D, hoặc hỗ trợ tăng cường bảo mật lớp vật lý PLS bằng cách thiết kế các búp sóng phản xạ có khả năng triệt tiêu tín hiệu không mong muốn. Trong các mạng tích hợp truyền thông và truyền năng lượng không dây SWIPT, RIS giúp khuếch đại công suất tín hiệu nhận được cho người dùng ở vùng biên, giảm nhiễu xuyên ô và bù đắp tổn hao tín hiệu trên các liên kết truyền dẫn khoảng cách xa.

Bên cạnh đó, RIS còn mang lại nhiều lợi ích trong các môi trường ứng dụng đặc thù khác nhau. Trong các mạng không dây trong nhà, RIS giúp cải thiện đáng kể khả năng phủ sóng và hiệu suất truyền dữ liệu. Trong các hệ thống hỗ trợ bởi máy bay không người lái UAV, RIS có thể được sử dụng để tạo ra các liên kết truyền thông tạm thời giữa UAV và người dùng mặt đất, từ đó giảm thiểu việc di chuyển không cần thiết và tiết kiệm năng lượng cho UAV. Hơn nữa, RIS được ứng dụng hiệu quả trong các hệ thống Internet kết nối vạn vật IoT như nông nghiệp thông minh, nhà máy thông minh và mạng cảm biến không dây thông minh, giúp tối ưu kết nối và tiết kiệm năng lượng. Trong lĩnh vực giao thông thông minh, RIS hỗ trợ cải thiện tính ổn định của liên kết truyền thông giữa các phương tiện và hạ tầng đường bộ, từ đó góp phần nâng cao an toàn và hiệu quả vận hành giao thông. Ngoài ra, trong các ứng dụng thực tế ảo VR và thực tế tăng cường AR, RIS đóng vai trò quan trọng trong việc đảm bảo độ trễ thấp và độ tin cậy cao URLLC của đường truyền không dây, vốn là yêu cầu cần thiết để duy trì trải nghiệm người dùng một cách mượt mà và nhất quán.

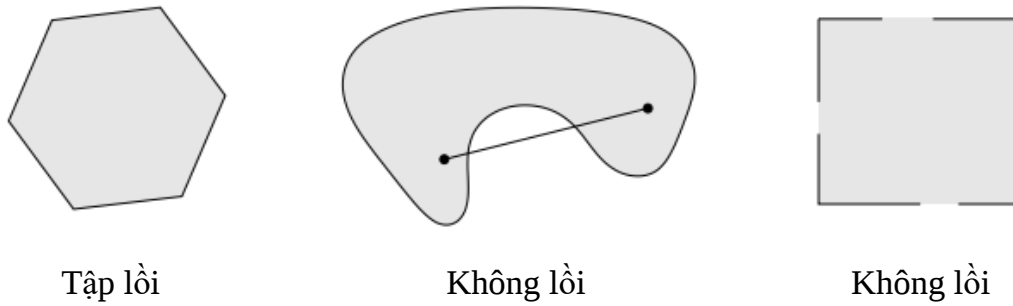
2.3 Bài toán tối ưu lỗi

Bài toán tối ưu bao gồm tối đa hoặc tối thiểu hàm thực (hàm mục tiêu) bằng cách tìm các giá trị ngõ vào từ tập khả dụng của các biến và tính toán dựa trên các giá trị của hàm ràng buộc. Bài toán tối ưu được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau như: tài chính, thống kê, kiến trúc, máy học, ảnh y tế, xử lý tín hiệu, và truyền thông. Trong đó, nhìn chung việc tìm lời giải cho các bài toán tối ưu là hoàn toàn không đơn giản, vì nhiều bài toán tối ưu không có dạng bài toán lồi, lúc này cần phải thực hiện biến đổi về dạng bài toán lồi.

2.3.1 Tập lồi

Một tập hợp C là tập lồi khi một đoạn thẳng nối hai điểm bất kỳ trong tập hợp C đều nằm trong C .

$$x_1, x_2 \in \mathbf{C}, 0 \leq \theta \leq 1 \Rightarrow \theta x_1 + (1 - \theta)x_2, \quad (2.6)$$



Hình 2. 6 Đồ thị minh họa tập lồi và tập không lồi

Như mô tả trong Hình 2.6, một tập lồi có thể được định nghĩa là mọi điểm trong tập hợp đó có thể được nhìn thấy bởi mọi điểm khác nhau, dọc theo đường thẳng không bị cản giữa chúng.

2.3.2 Hàm lồi

Giả sử một hàm $f : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}$ là một hàm lồi, khi **dom** f là một tập lồi, và với mọi giá trị $x, y \in \mathbf{dom} f$ $0 \leq \theta \leq 1$ ta có:

$$f(\theta x + (1 - \theta)y) \leq \theta f(x) + (1 - \theta)f(y), \quad (2.7)$$

Xét về mặt hình học, đồ thị của bất đẳng thức (2.7) được biểu diễn như Hình 2.4 cho thấy, đoạn thẳng giữa hai điểm $(x, f(x))$ và $(y, f(y))$ là một dây cung nằm trên đồ thị của f .



Hình 2. 7 Đồ thị hàm lồi

2.3.3 Một số bài toán tối lưu lỗi

Bài toán trong (2.8) và (2.9) lần lượt là dạng tổng quát của một bài toán tối ưu bao gồm bài toán cực tiểu, và bài toán cực đại. Một bài toán tối ưu cực tiểu hàm mục tiêu lỗi hoặc cực đại hàm mục tiêu lỗi với tập khả thi là tập lỗi thì bài toán đó được gọi là bài toán tối ưu lỗi. Bài toán tối ưu lỗi chuẩn có thể được giải một cách hiệu quả dựa trên công cụ CVX.

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && f(x) \\ & \text{s.t} && x \in \mathbb{X} \\ & && h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \tag{2.8}$$

$$\begin{aligned} & \text{maximize} && f(x) \\ & \text{s.t} && x \in \mathbb{X} \\ & && h_j(x) = 0, j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \tag{2.9}$$

Trong đó, f là hàm mục tiêu, x là biến tối ưu, h_j là đẳng thức ràng buộc, và $\mathbb{X}$ là tập khả dụng. Lúc này, x^* được xem là điểm tối ưu khi x^* là khả dụng với giá trị $x^* \in \mathbb{X}$. Giá trị của $x^* = \infty$ nếu bài toán là không khả dụng, $\nexists, \forall x \in \mathbb{X}$. Ngược lại, giá trị của $x^* = -\infty$ nếu bài toán là không có giới hạn.

2.4 Các dạng bài toán lập trình tối ưu

2.4.1 Lập trình tuyến tính

Lập trình tuyến tính hay tối ưu tuyến tính là phương pháp được sử dụng để tìm được các ngõ ra tốt nhất khi các yêu cầu có mối liên hệ tuyến tính với nhau bao gồm các hàm mục tiêu, các ràng buộc là các đẳng thức hoặc bất đẳng thức tuyến tính, dạng tổng quát của bài toán tuyến tính như sau:

$$\underset{x}{\text{minimise}} \quad c^T x + d \tag{2.10a}$$

$$\text{s.t} \quad Gx \preceq h \tag{2.10b}$$

$$Ax = b \quad (2.10c)$$

Với $G \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $A \in \mathbb{R}^{p \times n}$, và $c, x \in \mathbb{R}^n$.

2.4.2 Lập trình bậc hai

Lập trình bậc hai là một trường hợp đặc biệt của tối ưu một hàm bậc hai, và bài toán tối ưu lồi bậc hai khi hàm mục tiêu là hàm lồi bậc hai và các ràng buộc là tuyến tính, dạng tổng quát của bài toán như sau:

$$\underset{x}{\text{minimise}} \quad (1/2)x^T P x + q^T x + r \quad (2.11a)$$

$$s. t \quad Gx \preceq h \quad (2.11b)$$

$$Ax = b \quad (2.11c)$$

Trường hợp hàm mục tiêu và các ràng buộc là hàm lồi bậc hai ta có bài toán QCQP như sau:

$$\underset{x}{\text{minimise}} \quad (1/2)x^T P_0 x + q_0^T x + r_0 \quad (2.12a)$$

$$s. t \quad (1/2)x^T P_i x + q_i^T x + r_i \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.12b)$$

$$Ax = b \quad (2.12c)$$

Với $P_i \in \mathcal{S}_+^n$

2.4.3 Lập trình bán xác định

Lập trình bán xác định là một lĩnh vực của tối ưu lồi, liên quan đến tối ưu hàm mục tiêu tuyến tính trên giao điểm hình nón các ma trận bán xác định dương với không gian afin.

$$\underset{x}{\text{minimise}} \quad c^T x \quad (2.13a)$$

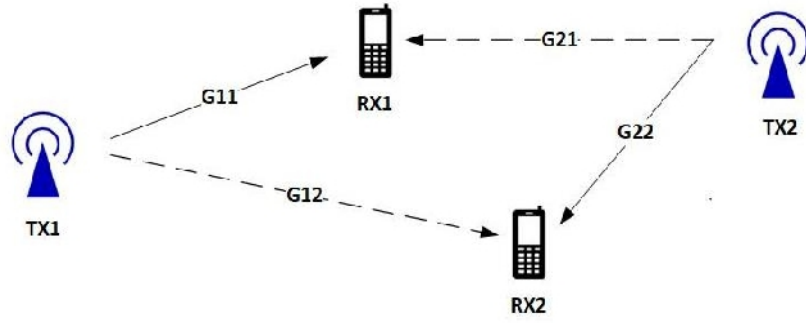
$$s. t \quad x_1 F_1 + x_2 F_2 + \dots + x_n F_n \preceq G \quad (2.13b)$$

$$Ax = b \quad (2.13c)$$

Các bất đẳng thức ràng buộc được gọi là các bất đẳng thức ma trận tuyến tính. Bài toán lồi khi hàm mục tiêu tuyến tính và các ràng buộc bất đẳng thức ma trận tuyến tính.

2.5 Một số bài toán tối ưu trong thông tin vô tuyến

Trong truyền thông vô tuyến, đặc biệt là hệ thống thông tin tế bào, khả năng tái sử dụng phổ tần là hết sức cần thiết để đảm bảo chất lượng dịch vụ của hệ thống. Chính việc tái sử dụng phổ tần dẫn đến ảnh hưởng của can nhiễu giữa các người dùng trong cùng tế bào và nhiễu của các người dùng ở cạnh tế bào. Do đó, việc quy hoạch và tối ưu các thông số của mạng là hết sức cần thiết [43]. Giả sử xem xét một hệ thống gồm K máy phát/thu, với P_i là công suất phát của máy phát thứ i , và G_{ki} là độ lợi kênh truyền từ máy phát thứ k đến máy thu thứ i .



Hình 2. 8 Mô hình mạng truyền thông gồm nhiều máy phát và máy thu

Lúc này, ta có SINR của máy thu thứ i như sau:

$$SINR_i = \frac{G_{ii}P_i}{\sum_{k \neq i} G_{ki}P_k + \sigma^2} \quad (2.14)$$

Thông thường các bài toán tối ưu hướng đến giảm thiểu công suất phát cần thiết tại mỗi máy phát mà vẫn đảm bảo ràng buộc về SINR của mỗi máy thu như trong biểu thức (2.15a) và (2.15b).

$$\min_{P_1, \dots, P_K} \sum_{k=1}^K P_k \quad (2.15a)$$

$$s. t \quad \frac{G_{ii}P_i}{\sum_{k \neq i} G_{ki}P_k + \sigma^2} \geq \gamma_i, i = 1, \dots, K \quad (2.15b)$$

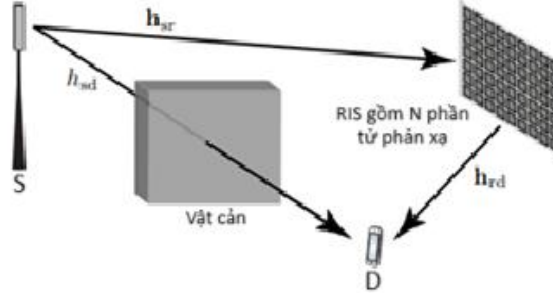
Trong đó các bài toán tối ưu có thể thay đổi tùy theo mục tiêu mà người thiết kế và người dùng mong muốn dựa trên các thông số trong mạng như trong Bảng 2.1.

Bảng 2. 1 Các bài toán tối ưu trong mạng truyền thông di động

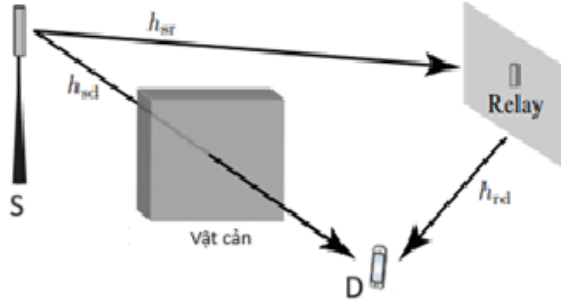
Thông số	Biểu thức	
Tối đa tổng tốc độ	$\text{Max } SR(P_1, \dots, P_K) = \sum_{i=1}^K \log_2(1 + SINR_i)$	(2.16a)
	$\text{s.t } \sum_i P_i \leq P_{max}$	(2.16b)
Tối đa – tối thiểu công bằng	$\text{Max } MMF(P_1, \dots, P_K) = \min SINR_i$	(2.17a)
	$\text{s.t } \sum_i P_i \leq P_{max}$	(2.17b)
Tối đa hiệu quả năng lượng	$\text{Max } EE(P_1, \dots, P_K) = \frac{SR(P_1, \dots, P_K)}{\sum_i P_i + P_{mạch}}$	(2.18a)
	$\text{s.t } \sum_i P_i \leq P_{max}$	(2.18b)

2.5.1 Phân tích hiệu năng của mô hình thông tin vô tuyến với RIS

Môi trường vô tuyến thông minh hay vô tuyến 2.0 được sử dụng để chỉ về tính thông minh và linh hoạt của RIS khi được kết hợp trong hệ thống thông tin vô tuyến. Với sự có mặt của RIS, các kỹ sư thiết kế truyền thông khi thiết kế hệ thống vô tuyến có thể xem xét là điều khiển được các thông số để đạt được hiệu năng mong muốn [44]. Trong thời gian gần đây, các nghiên cứu phân tích và đánh giá hiệu năng của hệ thống thông tin vô tuyến với sự hỗ trợ của RIS được xem xét tương đối nhiều. Trong [5], nhóm tác giả đã so sánh hiệu quả của việc sử dụng RIS so với các kỹ thuật sử dụng DF với mô hình hệ thống được đề xuất như trong Hình 2.9.



(a) RIS hỗ trợ thông tin trong trường hợp có vật cản



(b) Bộ chuyển tiếp hỗ trợ thông tin trong trường hợp có vật cản

Hình 2. 9 Mô hình hệ thống so sánh trường hợp sử dụng RIS và Relay.

Trong mô hình hệ thống đề xuất ở Hình 2.9a, giả sử hệ thống có sử dụng 1 mặt phản xạ thông minh với N phần tử phản xạ. Với $h_{sr} \in \mathbb{C}^N$ và $h_{rd} \in \mathbb{C}^N$ lần lượt là kênh truyền từ nguồn tin đến mặt phản xạ và từ mặt phản xạ đến người dùng. Lúc này, ma trận pha của mặt phản xạ thông minh được xây dựng như sau:

$$\mathbf{\Theta} = \alpha \text{diag}(e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N}) \quad (2.19)$$

Trong đó, $\alpha \in (0,1]$ là hệ số phản xạ biên độ; $\theta_1, \dots, \theta_N$ là các biến dịch pha của RIS, thông số này có thể tối ưu được. Tín hiệu thu được tại người dùng như biểu thức (2.20).

$$y = (h_{sr}^T \mathbf{\Theta} h_{rd}) \sqrt{p} s + n \quad (2.20)$$

Trong biểu thức (2.20), s là tín hiệu thông tin, p là công suất phát và $n \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \sigma^2)$ là nhiễu tại phía thu.

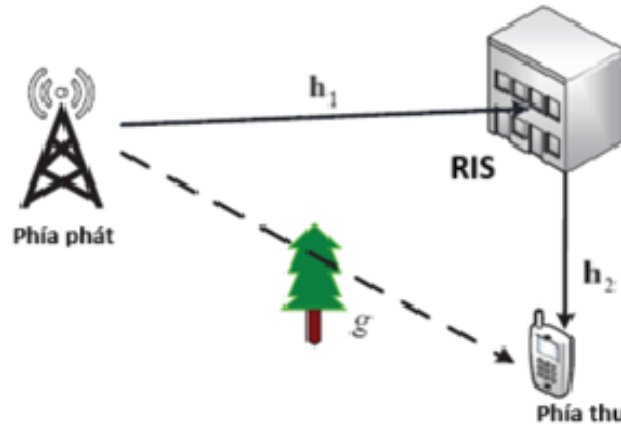
Kết quả nghiên cứu cho thấy trường hợp có sử dụng mặt phản xạ thông minh cho tốc độ cao hơn rất nhiều so với trường hợp sử dụng DF và trường hợp hệ thống SISO.

Trong [45], tác giả đề xuất mô hình hệ thống SISO như Hình 2.10 gồm một trạm gốc BS, một mặt phản xạ thông minh và một người dùng. Xác suất dừng OP của hệ thống được đánh giá dùng phương pháp xấp xỉ và phương pháp phân tích Monte Carlo. Trong đó, SNR cực đại của hệ thống trong trường hợp giả sử thông tin trạng thái kênh truyền là hoàn hảo tại RIS như biểu thức (2.21).

$$\gamma_{max} = \gamma_0 (\sum_{n=1}^N |h_{rd,n}| |h_{sr,n}| + |g|)^2 \quad (2.21)$$

Với $\gamma_0 = P/N_0$ là SNR phía phát.

$$P_{out} = Prob(\gamma_{max} \leq \gamma_{th}) \quad (2.22)$$



Hình 2. 10 RIS hỗ trợ hệ thống truyền thông trường hợp có vật cản

2.5.2 Kỹ thuật kết hợp định dạng búp sóng chủ động và thụ động

2.5.2.1 Định dạng búp sóng (Beamforming)

Khi số lượng thiết bị kết nối trong mạng kết nối vạn vật tăng lên đáng kể, với hàng tỉ thiết bị được kết với nhau làm gia tăng vùng bao phủ và hơn nữa can nhiễu giữa các thiết

bị làm cho chất lượng tín hiệu thu ảnh hưởng đáng kể. Kỹ thuật định dạng búp sóng tại các trạm phát là một kỹ thuật giúp làm tăng hệ số định hướng của mảng ăng-ten. Đặc biệt hơn, kỹ thuật này sẽ giúp làm giảm các búp sóng phụ và bức xạ ngược làm ảnh hưởng đến các người dùng không mong muốn trong mạng. Các bài toán tối ưu cho định dạng búp sóng được xem xét trong [46], với mục tiêu tạo ra các bộ định dạng búp sóng cho chùm bức xạ hẹp hơn trong các điều kiện khắc nghiệt hơn. Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả xem xét bài toán định dạng búp sóng trong trường hợp xấu nhất (worst-case) với các trọng số không chắc chắn.

Trong các hệ thống thông tin 5G, kỹ thuật định dạng búp sóng beamforming ngày càng được chú trọng, đặc biệt trong bối cảnh triển khai MIMO quy mô lớn (massive MIMO) trong các tế bào nhỏ (small cells) có thể dẫn đến mức tiêu thụ năng lượng cao không cần thiết. Khi đó, việc sử dụng các mảng ăng-ten quy mô nhỏ kết hợp với beamforming tại các trạm phát được xem là giải pháp hợp lý và tiết kiệm năng lượng hơn [47]. Bên cạnh đó, các nghiên cứu gần đây đã chỉ ra rằng kỹ thuật beamforming trong môi trường truyền thông 5G có thể cải thiện đáng kể hiệu suất hệ thống và giảm tỷ lệ lỗi bit BER [48]. Với sự hỗ trợ của mặt thông minh RIS, kỹ thuật beamforming tiếp tục được mở rộng cả về mặt khái niệm lẫn phương thức triển khai, từ đó đặt ra nhu cầu phân tích chuyên sâu hơn về các hướng tiếp cận hiện đại trong thiết kế và tối ưu hệ thống.

2.5.2.2 Kết hợp định dạng búp sóng chủ động và thụ động

Kỹ thuật định dạng búp sóng được xem xét trong hệ thống thông tin vô tuyến có sự hỗ trợ của bề mặt phản xạ thông minh RIS bao gồm: định dạng búp sóng chủ động thực hiện tại phía phát là các trạm gốc BS hoặc các điểm truy cập AP, tại các mặt phản xạ thông minh RIS là định dạng búp sóng thụ động với biên độ phản xạ lớn nhất được giả sử là 1. Một số nghiên cứu nổi bật sử dụng kỹ thuật kết hợp định dạng búp sóng chủ động và thụ động được tóm tắt trong Bảng 2.2.

Bảng 2. 2 Kỹ thuật kết hợp định dạng búp sóng để cực đại dung lượng và tốc độ hệ thống.

TLTK	Tối ưu	Mô hình hệ thống	Phân loại	Kết quả
[49]	Cực đại công suất	MISO đường xuống	Pha liên tục	Độ lợi định dạng búp sóng tỉ lệ với bình phương số phần tử phản xạ
[50]	Cực đại dung lượng	MIMO mmWave	Pha liên tục	Hiệu năng của hệ thống cải thiện đáng kể so với chỉ sử dụng RIS
[51]	Cực đại tổng tốc độ	MISO đường xuống, đa người dùng	Pha liên tục	Thông lượng hệ thống tăng đáng kể
[52]	Cực đại tổng tốc độ	MISO đường xuống, đa người dùng	Pha rời rạc	Hiệu năng tăng đáng kể với vài giá trị dịch pha
[53]	Cực đại cực tiểu SINR	MIMO đường xuống, đa người dùng	Pha liên tục	Triệt được can nhiễu khi số lượng phần tử tăng dần đến vô cùng.

Trong Hình 2.11, mô hình được đề xuất bởi Wu và cộng sự đặt trong ngữ cảnh hệ thống truyền thông đa người dùng, có sự hỗ trợ của RIS [31]. Hệ thống gồm một AP có M ăng-ten truyền thông tin đến K thiết bị người dùng đơn ăng-ten, và mặt phản xạ thông minh gồm N phần tử phản xạ. Giả sử tín hiệu dải nền phức tại AP như sau:

$$\mathbf{x} = \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k s_k \quad (2.23)$$

Với s_k là dữ liệu được truyền bởi người dùng thứ k . $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ là vec-tơ định dạng búp sóng tương ứng. Xem xét s_k là độc lập ngẫu nhiên, có phương sai đơn vị. Tín hiệu thu được tại người dùng thứ k sẽ là:

$$y_k = (\mathbf{h}_{r,k}^H \mathbf{\Theta} \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \sum_{k=1}^K \mathbf{w}_k s_k + n_k, k = 1, \dots, K \quad (2.24)$$

Trong đó, $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$ là nhiễu Gauss trắng cộng tại người dùng thứ k . Từ biểu thức trên ta có SINR tại người dùng thứ k như sau:

$$\text{SINR}_k = \frac{|(\mathbf{h}_{r,k}^H \mathbf{\Theta} \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k}^K |(\mathbf{h}_{r,k}^H \mathbf{\Theta} \mathbf{G} + \mathbf{h}_{d,k}^H) \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_k^2}, \forall k \quad (2.25)$$

Định dạng búp sóng tại AP được thực hiện dựa theo MMSE như biểu thức (2.26),

$$\min_W \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 \quad (2.26a)$$

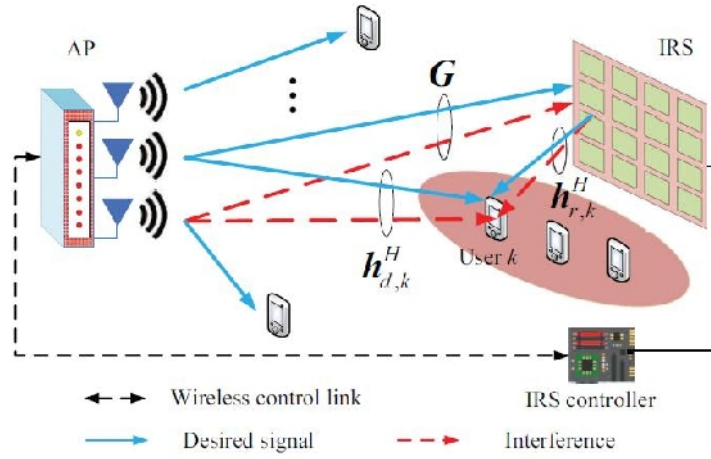
$$s. t \frac{|(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{j \neq k}^K |(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_j|^2 + \sigma_k^2} \geq \gamma_k, \forall k \quad (2.26b)$$

Bên cạnh đó, dịch pha tạo ra bởi các phần tử phản xạ có thể được tối ưu dựa theo biểu thức (2.27).

$$\max_{\mathbf{v}} \sum_{k=1}^K t_k \|\mathbf{v}^H \Phi_k + \mathbf{h}_{d,k}^H\|^2 \quad (2.27a)$$

$$s. t. |v_n| = 1, n = 1, \dots, N \quad (2.27b)$$

Trong biểu thức (2.27), ta có $t_k = \frac{1}{\gamma_k \sigma_k^2}$, $k = 1, \dots, K$, $\mathbf{v} = [e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N}]^H \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ và $\Phi_k = \text{diag}(\mathbf{h}_{r,k}^H) \mathbf{G} \in \mathbb{C}^{N \times 1}, \forall k$



Hình 2. 11 Hệ thống truyền thông đa người dùng có sự hỗ trợ của RIS

2.6 Truyền thông vô tuyến với sự hỗ trợ của máy bay không người lái UAV

Trong thời gian gần đây, UAV đã thu hút sự quan tâm đặc biệt nhờ vào những ưu điểm vượt trội như tính linh hoạt, khả năng triển khai nhanh chóng và khả năng hoạt động trong nhiều điều kiện môi trường khác nhau, kể cả các môi trường nguy hiểm hoặc khó tiếp cận. Chính vì vậy, UAV đang được khai thác mạnh mẽ trong nhiều lĩnh vực như quân sự, công cộng và dân sự, đặc biệt trong các ứng dụng truyền thông vô tuyến. Sự kết hợp của UAV với mạng vô tuyến giúp cải thiện đáng kể phạm vi phủ sóng nhờ vào khả năng thiết lập kết nối tầm nhìn thẳng, làm giảm suy hao tín hiệu và tắc nghẽn mạng mà các hệ thống truyền thông thường gặp phải. Bên cạnh đó, UAV có thể điều chỉnh độ cao

linh hoạt, từ đó tối ưu hóa chất lượng dịch vụ (QoS) dựa trên các yếu tố như mật độ người dùng, tốc độ dữ liệu yêu cầu và các yếu tố môi trường tác động như nhiễu hoặc tắc nghẽn. Khả năng di động của UAV cho phép chúng thay đổi vị trí nhanh chóng, giữ kết nối ổn định, đặc biệt trong các khu vực có mật độ người dùng cao hoặc trong các tình huống khẩn cấp. Hơn nữa, UAV có thể bổ sung mạng vô tuyến trong các khu vực không có hạ tầng mạng sẵn có, chẳng hạn như trong các sự kiện lớn hoặc khu vực khó tiếp cận, nơi các cơ sở hạ tầng mạng truyền thống không thể đáp ứng. Với những đặc điểm này, UAV đang trở thành một thành phần quan trọng trong các mạng vô tuyến thế hệ mới, đặc biệt là trong các mạng 5G và 6G, nơi yêu cầu về băng thông, độ trễ và độ tin cậy ngày càng khắt khe hơn [54].

Tuy nhiên, truyền thông với sự hỗ trợ của UAV có thể gặp phải một số hạn chế và thách thức khi hệ thống chưa hoàn thiện. Cụ thể, độ cao của UAV yêu cầu trạm gốc di động phải cung cấp vùng phủ sóng trên không 3D, điều này có thể dẫn đến việc chuyển giao thường xuyên hơn và đường lên/đường xuống thay đổi theo thời gian với trạm gốc/người dùng mặt đất. Do đó, vấn đề quan trọng nhất là tổng năng lượng tiêu thụ cần thiết cho UAV duy trì việc bay hoặc đứng yên ở một vị trí là hạn chế do được cung cấp bởi pin. Do đó, truyền thông UAV thường được cung cấp tạm thời trong một số trường hợp khẩn cấp như cảnh báo thảm họa, đẩy nhanh các hoạt động cứu hộ cứu nạn, vận chuyển vật tư y tế đến các khu vực khó tiếp cận, hoặc các thảm họa cháy rừng, theo dõi động vật hoang dã ở các khu vực hẻo lánh [55]. Bên cạnh đó, nhiều kỹ thuật tối ưu năng lượng bao gồm việc kiểm soát chiều dài cánh, độ cao của UAV, hoặc kiểm soát UAV chỉ bay ngang với mục tiêu giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng của UAV nhằm kéo dài thời gian duy trì hoạt động truyền thông dữ liệu. Ngoài ra, các nguồn năng lượng tái tạo như năng lượng mặt trời, năng lượng gió cũng được xem xét là những nguồn năng lượng bổ sung cho quá trình làm việc của UAV [56].

2.7 Điện toán biên di động MEC

Điện toán biên di động MEC (điện toán biên đa truy cập) được giới thiệu lần đầu tiên vào năm 2013 khi Nokia Siemens Networks và IBM đã phát triển một nền tảng dịch vụ ứng dụng mạng cho phép các nhà khai thác mạng di động có thể triển khai, thực thi và tích hợp các dịch vụ ứng dụng ở biên (Edge) của mạng. Khác với mô hình điện toán tập trung truyền thống, MEC đưa ra kiến trúc điện toán phân tán, trong đó các tài nguyên tính toán và lưu trữ được triển khai trực tiếp tại hoặc gần các nút biên trong RAN, giúp rút ngắn khoảng cách truyền dẫn giữa người dùng cuối và hệ thống xử lý. Việc đặt tài nguyên xử lý tại biên không chỉ giảm độ trễ tổng thể mà còn làm giảm lưu lượng truyền dẫn ngược (backhaul), từ đó hạn chế tắc nghẽn tại mạng trục và tăng hiệu quả sử dụng băng thông. Cấu trúc MEC đặc biệt thích hợp với các ứng dụng yêu cầu độ trễ siêu thấp và độ tin cậy cao như URLLC [57], đồng thời hỗ trợ hiệu quả các dịch vụ theo ngữ cảnh và các ứng dụng tương tác theo thời gian thực như thực tế ảo/tăng cường, phương tiện tự hành, và IoT công nghiệp. Ngoài ra, nhờ khả năng tích hợp liền mạch với các công nghệ mạng truy nhập thế hệ mới như 5G và định hướng tới 6G, MEC đóng vai trò then chốt trong việc tái cấu trúc kiến trúc mạng di động hiện đại, góp phần xây dựng nền tảng hạ tầng số linh hoạt, thích ứng và đáp ứng các yêu cầu ngày càng cao của hệ sinh thái dịch vụ trong kỷ nguyên điện toán biên và kết nối vạn vật [58].

Trong bối cảnh hệ sinh thái số ngày càng mở rộng và nhu cầu xử lý dữ liệu thời gian thực gia tăng mạnh mẽ, MEC đóng vai trò trung gian chiến lược giữa lớp thiết bị đầu cuối và hệ thống đám mây tập trung. Các ứng dụng dữ liệu lớn cùng với hàng tỷ thiết bị IoT được triển khai phân tán ngày càng có xu hướng kết nối trực tiếp tới hạ tầng mạng biên, nơi MEC xử lý cục bộ các tác vụ tính toán hoặc lưu trữ trước khi truyền tải lên hệ thống trung tâm. Đồng thời, mạng biên di động được tích hợp với các nền tảng đám mây riêng (private cloud), nơi lưu trữ cơ sở dữ liệu và ứng dụng trung tâm để phục vụ các tác vụ xử lý có quy mô lớn và ít nhạy cảm về độ trễ. Tuy nhiên, do các dịch vụ và ứng dụng trên nền tảng đám mây thường được triển khai tại các trung tâm dữ liệu cách xa người dùng di động, độ trễ truyền dẫn và giới hạn băng thông trong mạng lõi có thể ảnh hưởng

tiêu cực đến chất lượng trải nghiệm. MEC giải quyết vấn đề này bằng cách triển khai các chức năng xử lý và ứng dụng phân tán ngay tại lớp biên, chẳng hạn như tại trạm gốc, máy chủ biên, hoặc gateway của mạng truy nhập vô tuyến. Nhờ đó, người dùng có thể truy cập trực tiếp vào hạ tầng mạng không dây gần nhất để khai thác các dịch vụ có độ trễ thấp, hiệu năng cao và khả năng phản hồi theo thời gian thực. Không chỉ dừng lại ở việc cải thiện trải nghiệm người dùng, MEC còn tối ưu hiệu quả mạng và tài nguyên thông qua các cơ chế như phân bổ động tài nguyên tính toán, lưu trữ đệm (edge caching), và lập lịch thông minh. Những tối ưu này góp phần tăng hiệu suất toàn mạng, giảm tải cho đám mây trung tâm, đồng thời nâng cao tính bền vững và khả năng mở rộng của hệ thống mạng không dây thế hệ mới [59].

2.8 Kết luận chương

Trong chương này, cấu trúc của mặt phản xạ thông minh, nguyên lý hoạt động, phân loại mặt phản xạ thông minh dựa trên nguyên lý hoạt động, và ứng dụng của mặt phản xạ thông minh trong các hệ thống thông tin vô tuyến khác nhau đã được giới thiệu. Bên cạnh đó, các khái niệm cơ bản liên quan đến tập lỗi, hàm lỗi, và các dạng bài toán chuẩn về tối ưu lỗi được trình bày. Hơn nữa, việc ứng dụng bài toán tối ưu lỗi vào trong các hệ thống thông tin vô tuyến có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh cũng được xem xét tổng hợp và phân tích. Mặt khác, một số công nghệ truyền thông tiên tiến như mạng truyền thông có sự hỗ trợ của máy bay không người lái UAV, mạng điện toán biên di động MEC, các ứng dụng tiềm năng của RIS trong các hệ thống truyền thông hiện đại cũng đã được trình bày ngắn gọn.

Chương 3

TỐI ƯU THÔNG LƯỢNG MẠNG DI ĐỘNG CÓ SỰ HỖ TRỢ CỦA MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH

Trong bối cảnh mạng thông tin vô tuyến phát triển mạnh mẽ trong thời gian gần đây, số lượng người dùng tăng lên không ngừng, các dịch vụ mới liên tục phát triển với các yêu cầu khắc khe về chất lượng dịch vụ QoS. Hiện trạng, các hệ thống thông tin di động được quy hoạch với số lượng người dùng nhiều, dẫn đến việc đảm bảo các tín hiệu đến khu vực của người dùng bị che chắn gặp nhiều khó khăn, hoặc người dùng tại khu vực này sẽ thu được tín hiệu yếu hơn. Chính vì vậy, nội dung trong chương này đề xuất ứng dụng mặt phản xạ thông minh RIS vào kênh truyền trong mạng di động gồm một trạm gốc đơn ăng-ten phục vụ nhiều nhóm người dùng bị che khuất bởi các vật cản giúp tăng cường chất lượng tín hiệu tại phía thu. Cụ thể, tổng thông lượng mạng được tối đa dựa trên các ràng buộc về công suất tiêu thụ của hệ thống và chất lượng dịch vụ QoS của mạng di động. Bài toán tối ưu đề xuất là bài toán không lồi do hàm mục tiêu có dạng lô-ga-rít, chính vì vậy phương pháp xấp xỉ và biến đổi bất đẳng thức lô-ga-rít được áp dụng để biến đổi bài toán tối ưu đề xuất về dạng tối ưu lồi. Lúc này, phương pháp phân bổ công suất như trong Thuật toán 1, được đề xuất để giải bài toán tối ưu hệ số điều khiển công suất khi giá trị của hệ số dịch pha các phần tử RIS được thiết lập cố định và phương pháp tìm kiếm hệ số dịch pha tối ưu được đề xuất trong Thuật toán 2, để giải bài toán tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử trên mặt phản xạ thông minh RIS khi hệ số điều khiển công suất được thiết lập cố định. Sau cùng, kết quả tối ưu của bài toán đề xuất được giải dựa trên kết hợp Thuật toán 1 tối ưu hệ số phân bổ công suất và Thuật toán 2 tối ưu hệ số dịch pha của phần tử phản xạ trên RIS dựa trên Thuật toán 3.

3.1 Giới thiệu

Mặt phản xạ thông minh RIS là một trong những công nghệ then chốt được đề xuất cho mạng thế hệ thứ 6 (6G) trong tương lai gần. Trong trường hợp, bề mặt chỉ phản xạ tín hiệu tới thì RIS có thể hoạt động không cần nguồn cung cấp, và RIS có thể phản xạ toàn băng thông mà không bị ảnh hưởng bởi nhiễu tại bộ thu. Trong thời gian gần đây, RIS được quan tâm nhiều không những trong nghiên cứu mà còn trong các ứng dụng thực tế [60].

Trong [31] tác giả đề xuất một mô hình hệ thống thông tin vô tuyến đơn tế bào có sự hỗ trợ của RIS, gồm AP được trang bị nhiều ăng-ten và nhiều người dùng đơn ăng-ten. Đặc biệt, RIS được trang bị bộ điều khiển và có thể chuyển đổi giữa các chế độ làm việc hoặc bộ thu hoặc phản xạ. Tổng công suất phát của AP được cực tiểu dựa trên kết hợp bài toán tối ưu định dạng búp sóng chủ động tại AP và định dạng búp sóng thụ động tại RIS với ràng buộc SINR của người dùng. Tương tự trong [61], [62] các tác giả cũng xem xét ứng dụng bề mặt phản xạ thông minh RIS trong hệ thống thông tin vô tuyến nhiều người dùng. Lần lượt, phương pháp ADMM và phương pháp tính toán độ phức tạp thấp được xem xét ứng dụng để tối ưu tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR và tốc độ trong trường hợp xấu nhất (worst-case) của mạng.

Đặc biệt, sự kết hợp của bề mặt phản xạ thông minh RIS và UAV hứa hẹn sẽ giúp cải thiện đáng kể chất lượng của truyền thông. Hơn nữa, các ứng dụng của UAV trong thực tế ngày càng trở nên phổ biến trong nhiều lĩnh vực khác nhau như; quân sự, giám sát, cứu hộ cứu nạn, khám phá địa lý. Chính vì vậy, hiệu năng của mạng và chất lượng dịch vụ cần luôn được đảm bảo và sự linh động của UAV cùng với sự hỗ trợ của RIS có thể thực hiện được các yêu cầu trên. Trong [53], tác giả kết hợp tối ưu quỹ đạo bay của UAV và định dạng búp sóng thụ động tại RIS giúp cực đại tốc độ dữ liệu đạt được tại người dùng. Trong [63], phương pháp học sâu cũng có được đề xuất để giải quyết bài toán tối ưu với mục tiêu cực đại hiệu quả năng lượng của mạng UAV.

Với các ưu điểm nổi bật về hiệu quả sử dụng phổ tần và hiệu quả năng lượng, NOMA được xem là một trong những kỹ thuật truy cập tiềm năng trong các hệ thống thông tin di động 5G và 6G [64]. Đặc biệt, sự kết hợp giữa NOMA và RIS đã cho thấy khả năng cải thiện đáng kể vùng phủ sóng cũng như hiệu quả năng lượng của mạng. Hơn nữa, sự kết hợp giữa NOMA và RIS đã giúp cải thiện đáng kể vùng bao phủ và hiệu quả năng lượng của mạng. Cụ thể, hệ thống RIS-NOMA đề xuất trong hệ thống thông tin MISO trong [65]. Nhóm tác giả đã áp dụng các giải thuật SCR và SDR để cực đại tổng tốc độ dữ liệu tại phía thu và cực tiểu công suất tiêu thụ của hệ thống.

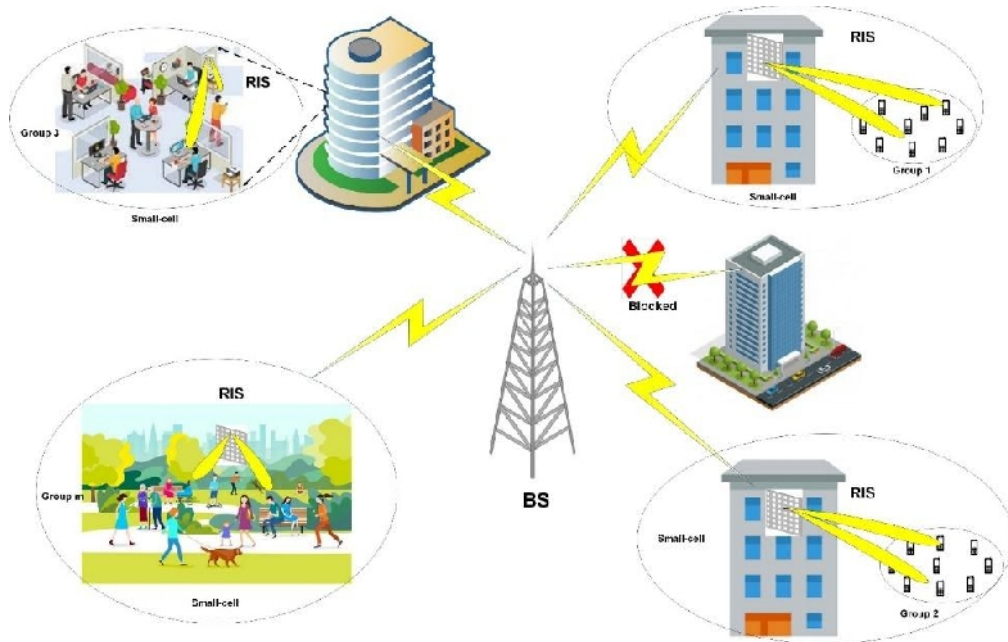
Bên cạnh đó, các nghiên cứu [66], [67] đã ứng dụng RIS trong các hệ thống truyền tải thông tin kết hợp thu năng lượng vô tuyến liên tục. Cụ thể, trong [66] tác giả đề xuất phương pháp tối ưu kết hợp giữa định dạng búp sóng của RIS và phân bổ khe thời gian cho người dùng trong trường hợp kết hợp NOMA và TDMA, với mục tiêu cực đại thông lượng mạng. Trong khi đó, nghiên cứu [67] tập trung vào việc cực tiểu công suất phát của AP dưới các ràng buộc đồng thời về SINR phục vụ thông tin và mức năng lượng thu được tại các người dùng có nhu cầu thu thập năng lượng.

Trong [68], [69], [70] các tác giả xem xét cực đại các trọng số tổng tốc độ và tổng công suất của người dùng trong hệ thống thông tin vô tuyến có sự hỗ trợ của bề mặt phản xạ thông minh RIS. Cụ thể, bài toán kết hợp tối ưu định dạng búp sóng chủ động tại các trạm gốc và hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ. Lần lượt, trong [69], [70] các tác giả đã đề xuất các phương pháp lập trình phân đoạn tuyến tính (FLP) để giải bài toán tối ưu định dạng búp sóng tại trạm gốc MBS. Bên cạnh đó, các giải thuật có độ phức tạp thấp (low-complexity) được sử dụng để giải bài toán định dạng búp sóng thụ động tại các phần tử phản xạ.

3.2 Mô hình hệ thống mạng thông tin di động có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh

Trong mạng di động, các nghiên cứu gần đây cho thấy bề mặt phản xạ thông minh RIS được kết hợp trong mạng để giải các vấn đề còn tồn tại như: cải thiện vùng bao phủ của các trạm gốc, phân bổ công suất phát của trạm gốc, thông lượng và tốc độ dữ liệu thu tại phía người dùng, bao gồm cả đường lên và đường xuống bị gián đoạn bởi vật cản [71, 72, 73, 74, 75]. Cụ thể, người dùng bị che khuất bởi các vật cản trên đường truyền dẫn đến chất lượng tín hiệu thu tại người dùng bị suy giảm, hoặc không thu được tín hiệu từ trạm gốc.

Từ những vấn đề cấp thiết trên, một mô hình đường xuống trong mạng tế bào SISO phục vụ nhiều người dùng với sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh RIS được đề xuất trong Hình 3.1. Hơn nữa, vấn đề tăng cường tổng thông lượng mạng được đề xuất giải quyết dựa trên các ràng buộc về chất lượng dịch vụ QoS, công suất phát của trạm gốc. Cụ thể hơn, mô hình đề xuất gồm một trạm gốc đơn ăng-ten phục vụ $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$ ô nhỏ, tập hợp người dùng là $K = \{1, \dots, K\}$, với số lượng người dùng khác nhau trong mỗi nhóm là $\mathcal{K}_m = \{1, \dots, \mathcal{K}_m\}$ và giả sử được phân bố đồng đều trong vùng phủ sóng.



Hình 3. 1 Mô hình mạng tế bào với sự hỗ trợ của bề mặt phản xạ thông minh RIS

3.2.1 Kênh truyền vô tuyến và thông lượng thông tin

Xem xét hệ trục tọa độ gồm trạm gốc BS và người dùng như sau: $(x_0, y_0, H_0), (x_m, y_m, H_m), m \in \mathcal{M}$ $(x_k, y_k, 0), k \in \mathcal{K}$ trong đó H_0 và H_m lần lượt là chiều cao của trạm gốc và độ cao đặt mặt phản xạ thông minh RIS.

Lúc này, như trong Hình 3.1, từ trạm gốc BS đến người dùng gồm: kênh truyền từ trạm gốc BS đến RIS và kênh truyền từ RIS đến người dùng. Ta có mô hình kênh truyền trong không gian tự do (đường truyền thẳng LOS) từ trạm gốc BS đến RIS như sau [76], [77]:

$$\beta_{0,m} = \beta_0 R_{0,m}^{-2}, m = 1, \dots, M, \quad (3.1)$$

Trong biểu thức (3.1), β_0 là độ lợi kênh truyền xem xét tại vị trí tham chiếu, và $R_{0,m}$ là khoảng cách từ trạm gốc đến mặt phản xạ thông minh thứ m .

$$R_{0,m} = \sqrt{d_{0,m}^2 + (H_0 - H_m)^2}, \quad (3.2)$$

$$\text{Với } d_{0,m} = \sqrt{(x_0 - x_m)^2 + (y_0 - y_m)^2}.$$

Tiếp theo, đường phản xạ từ mặt phản xạ thông minh RIS đến người dùng (NLoS), đường truyền này thường bị ảnh hưởng bởi vật cản, các hiện tượng bóng râm [78], suy hao đường truyền từ mặt phản xạ thông minh RIS thứ m đến người dùng thứ (m,k) như sau:

$$\begin{aligned} \beta_{m,k} &= PL_{m,k} + \eta^{LoS} P_{m,k}^{LoS} + \eta^{NLoS} P_{m,k}^{NLoS} \\ &= 10\alpha \log \left(\sqrt{d_{m,k}^2 + H_{U,m}^2} \right) + AP_{m,k}^{LoS} + B, \end{aligned} \quad (3.3)$$

Trong đó, η^{LoS} và η^{NLoS} lần lượt là hệ số suy hao đường truyền LoS và NLoS, với $A = \eta^{LoS} - \eta^{NLoS}$ và $B = 10\alpha \log\left(\frac{4\pi f_c R_{m,k}}{c}\right) + \eta^{NLoS}$

Suy hao đường truyền theo khoảng cách như trong biểu thức (3.4):

$$PL_{m,k} = 10 \log\left(\frac{4\pi f_c R_{m,k}}{c}\right)^\alpha \quad (3.4)$$

Với f_c là tần số sóng mang, đơn vị là Hz, c là vận tốc ánh sáng tính theo đơn vị m/s, $\alpha \geq 2$ là hệ số suy hao theo hàm mũ. Xác suất của LoS và NLoS [79] như sau:

$$P_{m,k}^{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp\left[-b \left(\arctan\left(\frac{H_{U,m}}{d_{m,k}}\right) - a\right)\right]} \quad (3.5)$$

$$P_{m,k}^{NLoS} = 1 - P_{m,k}^{LoS} \quad (3.6)$$

Với a và b là hằng số môi trường.

Thực tế, khi xem xét đến hiệu ứng dịch pha của tín hiệu trên các phần tử phản xạ của mặt phản xạ thông minh RIS $\Phi_m = \text{diag}[\phi_{1m}, \phi_{2m}, \dots, \phi_{Nm}]$. Trong đó $\phi_{nm} = \alpha_{nm} e^{j\theta_{nm}}$ với $\alpha_{nm} \in [0,1]$ và $\theta_{nm} \in [0,2\pi](\forall n = 1,2, \dots, N, m \in \mathcal{M})$ lần lượt là biên độ và góc pha của tín hiệu phản xạ tại phần tử phản xạ thứ n của mặt phản xạ thông minh RIS thứ m . Giả sử biên độ của tín hiệu phản xạ không bị thay đổi bởi phần tử phản xạ của RIS, nên ta đặt $\alpha_{nm} = 1$ [80]. Bên cạnh đó, giả sử pha-đỉnh trong đường truyền từ trạm gốc BS đến RIS là các biến ngẫu nhiên độc lập và có phân phối đồng nhất (i.i.d) với $\widehat{h_{0,m}} \in \mathcal{C}^{N \times 1}$ và $\widehat{h_{m,k}^H} \in \mathcal{C}^{1 \times N}$ Trong đó, H là toán liên hiệp Hermitan.

Bên cạnh đó, $\mathbf{h}_{0,m} \in \mathcal{C}^{N \times 1}$ và $\mathbf{h}_{m,k}^H \in \mathcal{C}^{1 \times N}$ lần lượt là ma trận kênh truyền giữa trạm gốc BS và mặt phản xạ thông minh RIS thứ m và kênh truyền giữa mặt phản xạ thông minh RIS thứ m và nhóm người dùng thứ m . Mặt khác, ta có ma trận kênh truyền giữa trạm gốc BS và người dùng thứ (m,k) được phản xạ qua RIS thứ m [81] như sau:

$$\mathbf{g}_{m,k} = \mathbf{h}_{m,k}^H \mathbf{\Phi}_m \mathbf{h}_{0,m}, m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m \quad (3.7)$$

Trong (3.7), ta có $\mathbf{h}_{0,m} = \sqrt{\beta_{0,m}} \widehat{\mathbf{h}_{0,m}}$ và $\mathbf{h}_{m,k}^H = \sqrt{\beta_{m,k}} \widehat{\mathbf{h}_{m,k}^H}$

Xem xét kỹ thuật đa truy cập phân chia theo thời gian TDMA trong mạng di động, trong đó tín hiệu được phát từ trạm gốc BS đến bề mặt phản xạ thứ m và tín hiệu được phản xạ từ bề mặt phản xạ đến nhóm người dùng thứ m , giả sử rằng can nhiễu giữa các người dùng hoặc giữa các nhóm người dùng không xảy ra tại cùng một thời điểm nhờ vào nguyên lý hoạt động của kỹ thuật TDMA. Cụ thể, trong mỗi khe thời gian, chỉ một nhóm người dùng được phục vụ, tức là chỉ nhóm đó thực hiện truyền nhận dữ liệu, trong khi các nhóm còn lại tạm thời không hoạt động. Điều này không chỉ giúp đơn giản hóa mô hình tối ưu, mà còn loại bỏ nhu cầu xét đến các thành phần liên quan đến nhiễu chéo trong mô hình toán học, từ đó làm giảm đáng kể độ phức tạp tính toán trong quá trình tối ưu hóa công suất phát và thiết kế ma trận dịch pha của bề mặt phản xạ thông minh RIS. Từ đó, ta có được biểu thức tín hiệu thu tại phía người dùng như biểu thức (3.8):

$$y_{m,k} = \sqrt{p_{m,k}} \mathbf{g}_{m,k} s_{m,k} + n_k, m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m, \quad (3.8)$$

Giả sử kênh truyền có nhiễu Gauss trắng cộng AWGN và trạm gốc phát với công suất $p_{m,k}$ đến người dùng thứ (m,k) và $s_{m,k}$ là thông tin được truyền từ trạm gốc BS. $\|s_{m,k}\|^2 \leq 1$; $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_k^2)$ là nhiễu Gauss trắng cộng AWGN tại người dùng thứ (m,k) .

Đặt $\mathbf{p}_0 = [\mathbf{p}_{0,m}]_{m=1}^M$, với $\mathbf{p}_{0,m} = [p_{m,k}]_{k=1}^{K_m}$ và $\mathbf{\Phi}_M = [\mathbf{\Phi}_m]_{m=1}^M$. Biểu thức tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR tại phía thu như trong biểu thức (3.9):

$$\gamma_{m,k}(p_{m,k}, \mathbf{\Phi}_m) = \frac{p_{m,k} |\mathbf{g}_{m,k}|^2}{\sigma_k^2}, \quad (3.9)$$

3.2.2 Bài toán tối ưu tổng thông lượng mạng

Thông lượng thông tin của người dùng thứ k tại nhóm thứ m theo bps/Hz như sau:

$$R_{m,k}(p_{m,k}, \Phi_m) = \log_2 \left(1 + \gamma_{m,k}(p_{m,k}, \Phi_m) \right), \quad (3.10)$$

ta có tổng thông lượng của tất cả người dùng trong mạng như trong biểu thức (3.11):

$$R_{total}(p_0, \Phi_M) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} R_{m,k}(p_{m,k}, \Phi_m), \quad (3.11)$$

Lúc này, bài toán tối ưu xem xét cho hệ thống mạng thông tin di động có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh RIS như trong (3.12). Mục tiêu cực đại tổng thông lượng mạng (3.12a) theo biến công suất phát cực đại tại trạm gốc BS và hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ của bề mặt phản xạ thông minh. Ràng buộc được xem xét trong bài toán tối ưu tổng thông lượng mạng là công suất cực đại, chất lượng dịch vụ QoS, và pha của các phần tử phản xạ RIS.

$$\max_{p_0, \Phi_M} R_{total}(p_0, \Phi_M), \quad (3.12a)$$

$$\text{s. t. } \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} p_{m,k} \leq P_0^{max}, m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m, \quad (3.12b)$$

$$R_{m,k}(p_{m,k}, \Phi_m) \geq \overline{r_{m,k}}, m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m, \quad (3.12c)$$

$$0 \leq \theta_{nm} \leq 2\pi, \forall n = 1, 2, \dots, N, m \in \mathcal{M}, \quad (3.12d)$$

Cụ thể, trong (3.12b) tổng công suất tiêu thụ của tất cả các RIS không lớn hơn công suất phát cực đại của trạm gốc BS (P_0^{max}). Trong khi đó, (3.12c) là ràng buộc về chất lượng dịch vụ tại người dùng thứ (m,k) . Và (3.12d) cho thấy biên trên (upper bound) và biên dưới (lower bound) của góc dịch pha tại phần tử phản xạ thứ n của mặt phản xạ thông minh RIS thứ m .

3.3 Bài toán kết hợp tối ưu tổng thông lượng mạng

Rõ ràng, trong bài toán được định nghĩa trong biểu thức (3.12) là các hàm không lồi (non-convex), do tính chất phi tuyến của hàm mục tiêu (3.12a) dựa trên công thức Shannon và sự phụ thuộc lẫn nhau giữa các biến tối ưu trong (3.12b), (3.12c). Chính vì vậy, bài toán có độ khó cao và không thể giải trực tiếp thông qua sử dụng các công cụ như CVX. Do đó, bài toán tối ưu sẽ được chia thành hai bài toán con lần lượt tối ưu theo các hệ số điều khiển công suất của BS và dịch pha của các phần tử phản xạ trên RIS được giải theo cách dùng phương pháp lặp.

3.3.1 Tối ưu hệ số phân bổ công suất tại trạm phát gốc BS

Xem xét hệ thống với giá trị hệ số dịch pha đã cho bất kỳ Φ_m , lúc này ta có bài toán tối ưu hệ số điều khiển công suất như biểu thức (3.13a). Trong đó, điều kiện ràng buộc được xem như đã đề xuất trong (3.12b) và (3.12c) theo công suất cực đại tại trạm phát và chất lượng dịch vụ QoS:

$$\max_{p_0} R_{\text{total}}(\mathbf{p}_0), \quad (3.13a)$$

$$s. t. (3.12b), (3.12c), \quad (3.13b)$$

Dựa trên phương pháp xấp xỉ và biến đổi bất đẳng thức logarit [82] sử dụng hàm lồi $f(z) = \log_2 \left(1 + \frac{1}{z}\right) \geq \hat{f}(z)$ ta có được phương trình như trong (3.14):

$$\hat{f}(z) = \log_2 \left(1 + \frac{1}{\bar{z}}\right) + \frac{1}{1 + \bar{z}} - \frac{z}{(1 + \bar{z})\bar{z}}, \quad (3.14)$$

Trong đó, $\forall z > 0, \bar{z} > 0$, ta có thể viết lại biểu thức như sau:

$$R_{m,k}(p_{m,k}) \geq \widehat{R_{m,k}^{(l)}}(p_{m,k}), \forall k \in \mathcal{K}_m, \forall m \in \mathcal{M}, \quad (3.15)$$

$$z = \frac{\sigma_k^2}{p_{m,k} |\mathbf{g}_{m,k}|^2}, \quad \bar{z} = z^{(i)} = \frac{\sigma_k^2}{p_{m,k}^{(i)} |\mathbf{g}_{m,k}|^2},$$

$$\widehat{R_{m,k}^{(i)}}(p_{m,k}) = \log_2 \left(1 + \frac{1}{\bar{z}} \right) + \frac{1}{1 + \bar{z}} - \frac{z}{(1 + \bar{z})\bar{z}}. \quad (3.16)$$

Ta có thể viết lại biểu thức (3.13) như sau:

$$\max_{\mathbf{p}_0} \widehat{R_{total}^{(i)}}(\mathbf{p}_0) \quad (3.17a)$$

$$s. t. (3.12b) \quad (3.17b)$$

$$\widehat{R_{m,n}^{(i)}}(\mathbf{p}_0) \geq \overline{r_{m,k}}, m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m \quad (3.17c)$$

trong đó, $\widehat{R_{total}^{(i)}}(\mathbf{p}_0) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \widehat{R_{m,k}^{(i)}}(p_{m,k})$.

Biểu thức (3.17) được giải bằng Thuật toán 1 được trình bày trong Bảng 3.1 và ngõ ra của thuật toán là các hệ số điều khiển công suất tối ưu. Cụ thể, các giá trị được thiết lập lần lượt biến đếm số lần lặp ban đầu $i = 0$, Φ_M ma trận hệ số dịch pha được cố định, và ngưỡng hội tụ cho bài toán $\varepsilon = 10^{-3}$. Bên cạnh đó, số lần lặp tối đa được thiết lập $I_{max} = 20$ để đảm bảo cho thuật toán không xảy ra trường hợp lặp vô hạn. Thuật toán lặp lại cho đến khi một trong hai điều kiện hội tụ hoặc đạt số lần lặp tối đa xảy ra, mục tiêu giải phương trình (3.17) dùng công cụ CVX [83] để tìm được véc-tơ hệ số công suất cực đại $\mathbf{p}_0^{(i+1)}$ tại vòng lặp $i + 1$.

Bảng 3. 1 Thuật toán tối ưu hệ số điều khiển công suất

Thuật toán 1: Phân bổ công suất

Ngõ vào:

$$i = 0, \Phi_M, \varepsilon = 10^{-3}$$

$$I_{max} = 20$$

While hàm mục tiêu trong (3.17) chưa hội tụ hoặc $(i \leq I_{max})$

Giải phương trình (3.17) tìm $(\mathbf{p}_0^{(i+1)})$ dùng CVX

$$i = i + 1$$

End while

Ngõ ra: $\mathbf{p}_0^*$

Thuật toán 1 được đề xuất nhằm giải bài toán tối ưu lồi trong (3.17), với mục tiêu cực đại tổng thông lượng mạng $R_{total}(\mathbf{p}_0)$. Bài toán có số biến tối ưu và số ràng buộc tuyến tính lần lượt vào khoảng $\mathcal{O}(K)$ và $\mathcal{O}(K + N)$, trong đó K là số người dùng và N là số phần tử phản xạ của RIS trong hệ thống. Nhờ đặc tính lồi và liên tục của hàm mục tiêu, thuật toán đảm bảo khả năng hội tụ nhanh đến nghiệm tối ưu toàn cục, đặc biệt khi giá trị khởi tạo gần với nghiệm mong muốn. Quá trình giải được thực hiện bằng công cụ CVX, với điều kiện dừng là sai số hội tụ nhỏ hơn $\varepsilon = 10^{-3}$ hoặc đạt số vòng lặp tối đa $I_{max} = 20$. Với độ phức tạp tính toán xấp xỉ $\mathcal{O}(K^3)$, thuật toán có thể triển khai hiệu quả trong các hệ thống với số người dùng không quá lớn và không đòi hỏi tài nguyên phần cứng quá lớn [84].

3.3.2 Tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ của RIS

Tương tự, khi hệ số điều khiển công suất p_0 được xem xét với giá trị cố định, bài toán tối ưu hệ số dịch pha của RIS có thể được mô tả như (3.18), với các ràng buộc về chất lượng dịch QoS và giới hạn góc dịch pha của các phần tử phản xạ.

$$\max_{\Phi_m} R_{total}(\Phi_m) \tag{3.18a}$$

$$s. t. (3.12c), (3.12d) \tag{3.18b}$$

Bài toán tối ưu trong (3.18) là phi tuyến, và phụ thuộc vào biến Φ_m thông qua SNR, thành phần này liên quan đến ma trận kênh truyền như trong biểu thức (3.9). Lúc này, để hàm mục tiêu trong bài toán (3.18) đơn giản hơn, đặt $\mathbf{h}_{m,k}^H \Phi_m \mathbf{h}_{0,m} = \psi_m^H \chi_{m,k}$ với $\psi_m = [\psi_m^1, \dots, \psi_m^N]^H$ và $\psi_m^n = e^{j\theta_{nm}} (\forall n = 1, 2, \dots, N)$, $\chi_{m,k} = \text{diag}(\mathbf{h}_{m,k}^H) \mathbf{h}_{0,m}$, và $a_k = P_0/\sigma_k^2$, giả sử $|\psi_m^n|^2 = 1$ để đảm bảo các phần tử phản xạ của RIS chỉ điều chỉnh pha của tín hiệu đến, giá trị biên độ không thay đổi, ta có biểu thức sau:

$$\max_{\psi_m, m \in \mathcal{M}} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \log_2(1 + a_k \psi_m^H \chi_{m,k} \chi_{m,k}^H \psi_m), \quad (3.19a)$$

$$s. t \quad \psi_m^H \chi_{m,k} \chi_{m,k}^H \psi_m \geq (2^{\bar{r}_{m,k}} - 1)/a_k, \quad (3.19b)$$

$$|\psi_m^n|^2 = 1, \forall n = 1, 2, \dots, N, \quad m \in \mathcal{M} \quad (3.19c)$$

Tuy nhiên, bài toán (3.19) không phải là bài toán lồi (nonconvex) và $\psi_m^H \chi_{m,k} \chi_{m,k}^H \psi_m$ có dạng bậc hai phù hợp để áp dụng kỹ thuật SDR. Ta đặt $\mathbf{X}_{m,k} = \chi_{m,k} \chi_{m,k}^H$ với $\mathbf{X}_{m,k}$ là ma trận Hermitian bán xác định dương biểu diễn thông tin cho kênh người dùng, và biểu thức bậc hai được viết lại $\psi_m^H \mathbf{X}_{m,k} \psi_m = \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \psi_m \psi_m^H) = \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \Psi_m)$, trong đó $\Psi_m = \psi_m \psi_m^H$ là ma trận Hermitian, phải thỏa điều kiện $\Psi_m \geq \mathbf{0}$ và $\text{rank}(\Psi_m) = 1$ có thể được nói lỏng do đặc tính không lồi của ràng buộc đơn vị [62].

$$\max_{\psi_m, m \in \mathcal{M}} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \log_2(1 + a_k \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \Psi_m)), \quad (3.20a)$$

$$s. t \quad \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \Psi_m) \geq (2^{\bar{r}_{m,k}} - 1)/a_k, \quad (3.20b)$$

$$\Psi_{m(n,n)} = 1, \forall n = 1, 2, \dots, N, \quad m \in \mathcal{M}. \quad (3.20c)$$

$$\Psi_m \succeq \mathbf{0}. \quad (3.20d)$$

Sau khi biến đổi ta có được bài toán tối ưu (3.20), với hàm mục tiêu (3.20a) tối ưu trên ma trận Ψ_m , phù hợp với phương pháp SDP [31]. Với ràng buộc (3.20b) là ràng buộc tuyến tính, (3.20c) là ràng buộc mô-đun đơn vị, (3.20d) là ràng buộc bán xác định dương để chắc chắn rằng Ψ_m là ma trận bán xác định dương.

Bài toán tối ưu (3.20) được giải quyết dựa vào Thuật toán 2 trong Bảng 3.2, sử dụng thư viện CVX. Các thông số đầu vào được thiết lập lần lượt, giá trị của số vòng lặp $i = 0$, $\mathbf{p}_0$, $\mathbf{f}_{m,k}^{(0)}$, và ngưỡng hội tụ của bài toán $\varepsilon = 10^{-3}$. Ngõ ra của thuật toán là ma trận pha tối ưu của RIS Φ_M^* . Khi thuật toán chưa hội tụ hoặc chưa đạt đến số lần lặp tối đa, tại mỗi lần lặp trong khoảng $m = [1:M]$ giá trị tương ứng của Ψ_m , sau đó sẽ được khôi phục lại giá trị của $\Phi_M^{(i+1)}$ cho nhóm người dùng tương ứng với mặt phản xạ thông minh RIS sử dụng công cụ CVX.

Bảng 3. 2 Thuật toán tối ưu hệ số dịch pha

Thuật toán 2: Tìm kiếm hệ số dịch pha
Ngõ vào:
$i = 0, \mathbf{p}_0, \varepsilon = 10^{-3}$
$I_{max} = 20$
Lặp lại
for $m = [1:M]$
Giải phương trình (3.20) tìm $(\Phi_M^{(i+1)})$ dùng CVX
end for
$i = i + 1$
Cho đến khi hàm mục tiêu trong (3.20) hội tụ hoặc $(i \geq I_{max})$
Ngõ ra: Φ_M^*

Thuật toán 2 thực hiện quá trình lặp qua M bài toán con (3.20), trong đó mỗi bài toán tương ứng với một ma trận dịch pha $\Psi_m \in \mathbb{C}^{N \times N}$, với N là số phần tử phản xạ của RIS trong hệ thống đề xuất. Mỗi bài toán con có số biến tối ưu vào khoảng $\mathcal{O}(N^2)$ và bao gồm $\mathcal{O}(K_m + N)$ ràng buộc tuyến tính, trong đó K_m là số người dùng bị ảnh hưởng bởi phần tử phản xạ thứ m . Do đặc tính lồi, từng bài toán con có thể được giải hiệu quả bằng công cụ tối ưu lồi CVX. Tuy nhiên, việc lặp tuần tự theo $m = 1, 2, \dots, M$ có thể làm tăng đáng kể thời gian hội tụ tổng thể, đặc biệt khi M hoặc N lớn. Độ phức tạp tính toán toàn bộ thuật toán ước lượng vào khoảng $\mathcal{O}(20 \cdot M \cdot N^6)$ [84].

3.3.3 Thuật toán tối ưu lặp

Sau cùng, bài toán cực đại tổng thông lượng mạng trong (3.12) được giải quyết bằng cách lặp xen kẽ hai bước tối ưu, thông qua Thuật toán 3 trong Bảng 3.3. Cụ thể, tại mỗi vòng lặp i , thuật toán thực hiện giải bài toán (3.17) bằng công cụ CVX để tìm véc-tơ công suất tối ưu $\mathbf{p}_0^{(i+1)}$ theo Thuật toán 1, và sau đó giải bài toán (3.20) để cập nhật ma trận pha tối ưu $\Phi_M^{(i+1)}$ của RIS theo Thuật toán 2. Các tham số đầu vào được khởi tạo với $i = 0$, ngưỡng hội tụ $\varepsilon = 10^{-3}$ và số lần lặp tối đa $I_{max} = 20$ nhằm tránh hiện tượng lặp vô hạn. Thuật toán dừng lại khi điều kiện hội tụ được thỏa mãn hoặc khi đạt đến giới hạn số vòng lặp. Kết quả cuối cùng là cặp nghiệm tối ưu $(\mathbf{p}_0^*, \Phi_M^*)$, thể hiện sự hội tụ hiệu quả và tính khả thi của phương pháp tối ưu đề xuất trong bối cảnh hệ thống truyền thông có sự hỗ trợ của RIS.

Bảng 3. 3 Thuật toán tối ưu lặp giải bài toán kết hợp

Thuật toán 3: Tối ưu lặp để giải bài toán (3.12)

Ngõ vào:

$$i = 0, \mathbf{p}_0, \varepsilon = 10^{-3}, I_{max} = 20$$

Lặp lại

Thực hiện Thuật toán 1 để giải (3.17) tìm $(\mathbf{p}_0^{(i+1)})$ dùng CVX.

Thực hiện Thuật toán 2 để giải (3.20) tìm $(\Phi_M^{(i+1)})$ dùng CVX.

$$i = i + 1$$

Cho đến khi hàm mục tiêu trong (3.12) hội tụ hoặc $(i \geq I_{max})$

Ngõ ra: (p_0^*, Φ_M^*)

Thuật toán 3 trong Bảng 3.3 kết hợp giải quyết bài toán tối ưu giữa điều khiển công suất và điều chỉnh pha RIS thông qua các bước lặp qua Thuật toán 1 và Thuật toán 2. Độ phức tạp tính toán của thuật toán này là $\mathcal{O}(I_{max} \cdot M \cdot N^6)$. Với tính chất lồi của các bài toán con, thuật toán đảm bảo hội tụ nhanh chóng về nghiệm tối ưu toàn cục, đặc biệt khi giá trị khởi tạo gần với nghiệm mong muốn. Tuy nhiên, thời gian hội tụ có thể kéo dài trong trường hợp số vòng lặp I_{max} lớn, hoặc số phần tử phản xạ của RIS lớn và số lượng mặt phản xạ thông minh RIS nhiều [84].

3.4 Kết quả mô phỏng và thảo luận

Dựa trên mô hình đề xuất, bài toán tối ưu được phân chia thành hai bài toán con chính: tối ưu hệ số điều khiển công suất và tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử trên bề mặt phản xạ thông minh RIS. Sau cùng, bài toán cực đại tổng thông lượng mạng trong (3.12) được giải quyết bằng cách lặp xen kẽ hai bước tối ưu, thông qua Thuật toán 3 trong Bảng 3.3. Chương trình mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab, với sự hỗ trợ của công cụ CVX để giải quyết bài toán tối ưu lồi chuẩn. Các thông số mô phỏng được thiết lập như trong Bảng 3.4. Cụ thể, kết quả mô phỏng được thực hiện và đánh giá qua các trường hợp bao gồm: (1) **OOP** tối ưu hệ số điều khiển công suất – tối ưu hệ số dịch pha; (2) **EOP** công suất phát bằng nhau – tối ưu hệ số dịch pha; (3) **ORP** tối ưu hệ số điều khiển công suất – hệ số dịch pha ngẫu nhiên; (3) **ERP** công suất phát bằng nhau – hệ số dịch pha ngẫu nhiên. Các kết quả này được so sánh để đánh giá hiệu quả của phương pháp tối ưu đề xuất trong việc cải thiện tổng thông lượng mạng và hiệu suất của các người dùng trong hệ thống. Các thử nghiệm cho thấy sự cải thiện rõ rệt về tổng thông

lượng khi áp dụng tối ưu đồng thời công suất và hệ số dịch pha, đặc biệt trong các điều kiện mạng phức tạp với nhiều người dùng và phần tử phản xạ.

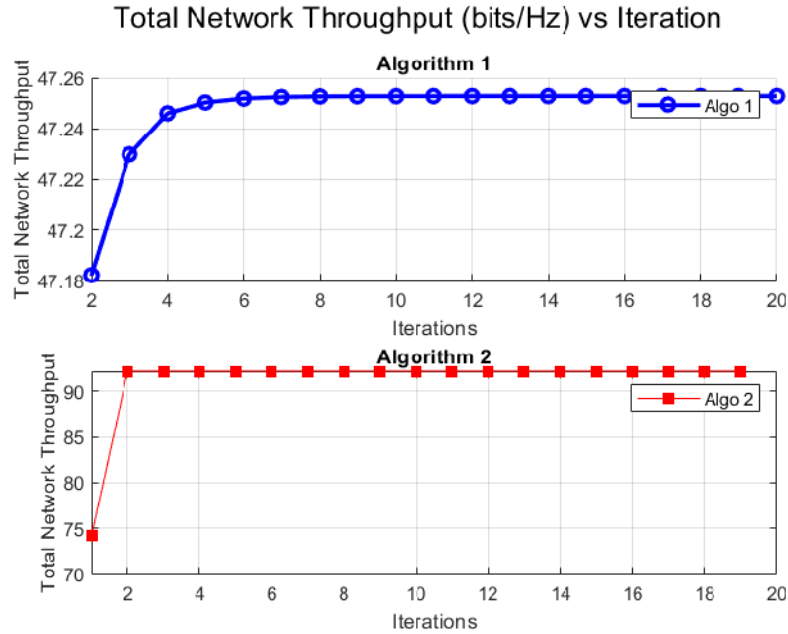
Bảng 3. 4 Thông số sử dụng trong mô phỏng

STT	Thông số	Giá trị
1.	Số ăng-ten của trạm gốc	1
2.	Vị trí của trạm gốc	(0, 0, 30) m
3.	Bán kính vùng bao phủ gần	500m
4.	Bán kính vùng bao phủ xa	1500m
5.	Mật độ công suất nhiễu trắng	-130dBm/Hz
6.	Ngưỡng QoS	$\varepsilon = 10^{-3}$
7.	Số bề mặt phản xạ thông RIS lần lượt	[4, 8, 12, 20]
8.	Số phần tử phản xạ trên RIS	[100, 150, 200, 250, 300]
9.	Số nhóm người dùng được xem xét	[20, 30]
10.	Băng thông kênh truyền	10 MHz
11.	Công suất phát trạm gốc BS	[43:46] dBm

3.4.1. Sự hội tụ của thuật toán đề xuất

Hình 3.2 trình bày quá trình khảo sát khả năng hội tụ của thuật toán đề xuất, bao gồm hai thành phần: Thuật toán 1 tối ưu phân bổ công suất và Thuật toán 2 tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ trên bề mặt phản xạ thông minh RIS. Trong kịch bản mô phỏng, số lượng RIS được thiết lập là $M = 4$, số lượng người dùng trong mỗi nhóm là $K = 20$, và mỗi mặt phản xạ thông minh RIS bao gồm $N = 100$ phần tử phản xạ. Kết quả cho thấy, với tập khả thi được lựa chọn phù hợp, Thuật toán 1 hội tụ sau 6 vòng lặp với thông lượng cực đại đạt được là 47.3 bits/Hz, trong khi Thuật toán 2 đạt được thông lượng cực đại 92.2 bits/Hz chỉ sau 2 vòng lặp. Điều này cho thấy cả hai thuật toán đều đạt hiệu quả hội tụ tốt, đặc biệt là trong việc thực hiện tối ưu hiệu suất hệ thống thông

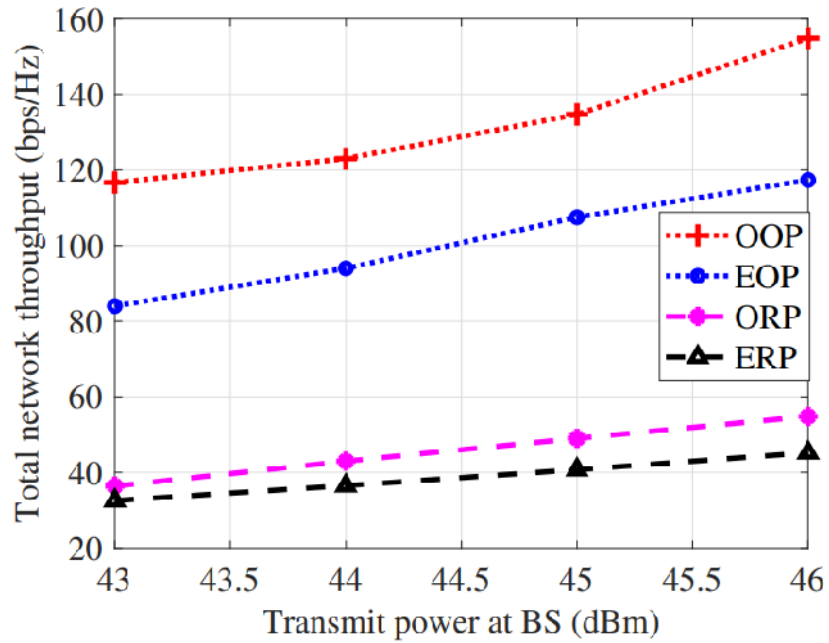
qua điều khiển hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ cho giá trị thông lượng mạng đạt được cao hơn so với trường hợp tối ưu phân bổ công suất.



Hình 3. 2 Sự hội tụ của thuật toán đề xuất

3.4.2. Tổng thông lượng mạng cực đại

Trong Hình 3.3, kết quả đánh giá tổng thông lượng của mạng đạt được với giá trị công suất phát của trạm gốc thay đổi trong khoảng từ 43dBm – 46dBm, số bề mặt phản xạ thông minh RIS $M = 4$, số nhóm người dùng $K = 20$ và số phần tử phản xạ cố định $N = 200$. Kết quả cho thấy tổng thông lượng đạt được của mạng khi có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh RIS, và có tối ưu về hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ cho giá trị cao hơn xấp xỉ 1,5 lần so với trường hợp có sử dụng bề mặt phản xạ nhưng không tối ưu hệ số dịch pha. Hơn nữa, khi giá trị công suất phát tại trạm gốc tăng, tổng thông lượng mạng sẽ tăng liên tục. Dựa trên kết quả, ta thấy khi không xem xét tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ, tổng thông lượng mạng thay đổi không đáng kể trong 2 trường hợp có áp dụng tối ưu hệ số phân bổ công và không áp dụng.

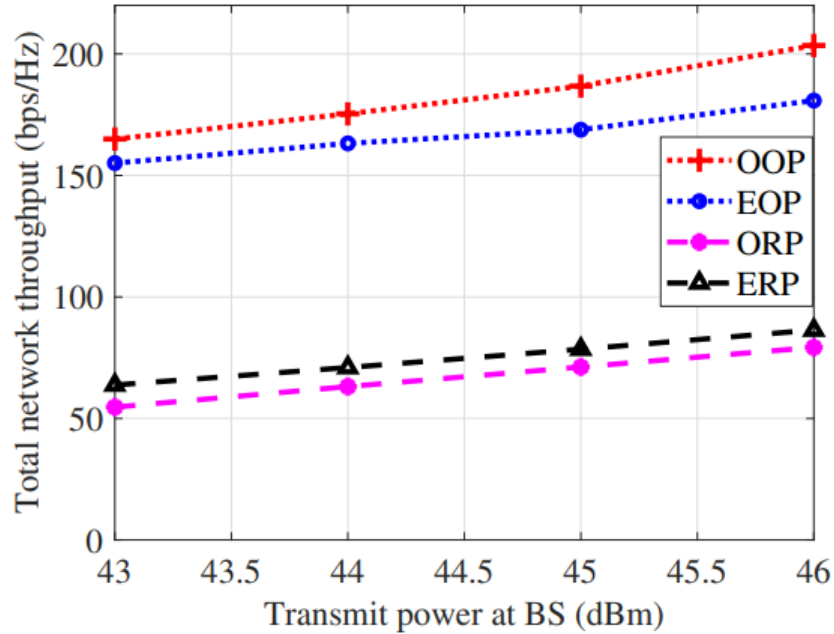


Hình 3. 3 Tổng thông lượng mạng trường hợp $M=4$, $K=20$ và $N=200$

Tương tự, Hình 3.4 trình bày kết quả mô phỏng trong trường hợp giữ nguyên công suất phát tại trạm gốc và số phần tử phản xạ của RIS. Trong kịch bản này, số lượng mặt phản xạ thông minh được đặt là $M = 8$ và số lượng người dùng là $K=30$. So với Hình 3.2, tổng thông lượng mạng tiếp tục tăng khi công suất phát tại trạm gốc tăng, cho thấy xu hướng tích cực của hiệu suất hệ thống theo công suất phát. Hơn nữa, khi so sánh với trường hợp sử dụng $M=4$, việc tăng số mặt phản xạ lên $M=8$ cho thấy hiệu quả rõ rệt, mặc dù số lượng người dùng cũng đồng thời tăng từ $K=20$ lên $K=30$. Cụ thể, tổng thông lượng mạng vẫn đạt giá trị cao hơn đáng kể, phản ánh vai trò quan trọng của số lượng phần tử phản xạ trong việc cải thiện hiệu suất truyền thông. Bằng cách tăng cường khả năng điều khiển hướng sóng và tối ưu hóa quá trình phản xạ, hệ thống có thể tận dụng hiệu quả hơn tài nguyên truyền tải, đặc biệt là trong môi trường có nhiều người dùng.

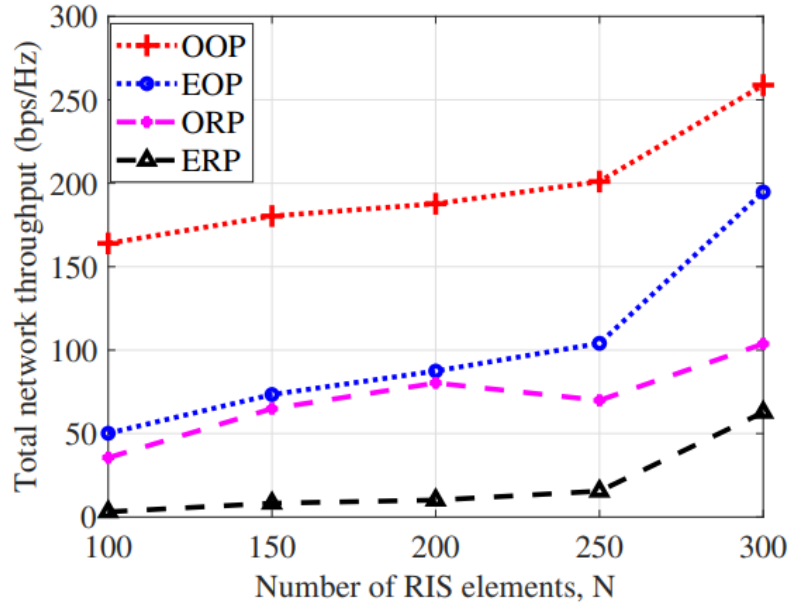
Ngoài ra, kết quả trong Hình 3.4 một lần nữa khẳng định hiệu quả của việc tối ưu hệ số dịch pha, với mức cải thiện tổng thông lượng mạng xấp xỉ 3 lần (tại công suất phát

43dBm) so với trường hợp không thực hiện tối ưu hoá pha. Điều này cho thấy rằng tối ưu hóa hệ số dịch pha không chỉ giúp nâng cao hiệu quả phổ tần mà còn giảm thiểu sự can thiệp giữa các kênh, từ đó tối ưu hóa khả năng truyền dẫn thông tin. Rõ ràng, việc tăng số lượng mặt phản xạ không chỉ góp phần nâng cao chất lượng tín hiệu tại phía người dùng mà còn giúp cải thiện đáng kể chất lượng dịch vụ (QoS) trong toàn hệ thống.



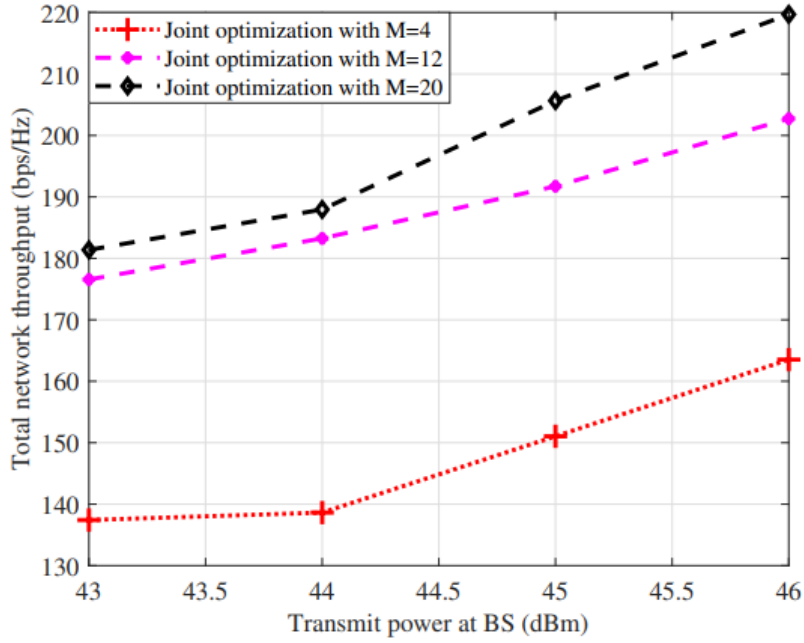
Hình 3. 4 Tổng thông lượng mạng trường hợp $M=8$, $K=30$ và $N=200$

Khi xem xét đến số lượng phần tử phản xạ trên các bề mặt phản xạ thông minh RIS, với các thông số mô phỏng lần lượt là số bề mặt phản xạ thông minh $M = 8$, số người dùng $K = 30$, công suất phát cực đại tại trạm gốc BS 46 dBm . Kết quả trong hình 3.5 cho thấy, khi tăng số lượng phần tử phản xạ trên bề mặt phản xạ thông minh RIS giúp cho tổng thông lượng mạng tăng đáng kể, trong tất cả các trường hợp. Mặt khác, đường mô phỏng **OOP** cho thấy phương pháp đề xuất kết hợp tối ưu hệ số dịch pha của phần tử phản xạ và tối ưu phân bổ công suất cho hiệu quả tốt hơn so với các trường hợp còn lại.



Hình 3.5 Tổng thông lượng mạng với số phần tử phản xạ của RIS thay đổi $N = [100:300]$, $M = 8$, $K = 30$, $P_0^{max} = 46 \text{ dBm}$

Cuối cùng, các kết quả trong Hình 3.6 cho thấy tổng thông lượng mạng của phương pháp đề xuất khi số lượng mặt phản xạ thông minh RIS được điều chỉnh, cụ thể là $M = 4$, $M = 12$ và $M = 20$. Trong trường hợp này, tổng thông lượng mạng được ghi nhận tăng rõ rệt khi số lượng mặt phản xạ thông minh RIS tăng từ $M = 4$ lên $M = 20$. Đặc biệt, tổng thông lượng mạng trong trường hợp khi $M = 4$ và $M = 20$ thay đổi rất lớn khi công suất phát tăng từ 44 dBm lên 46 dBm , tương đương khoảng 56 bps/Hz tại giá trị công suất phát cực đại $P_0^{max} = 46 \text{ dBm}$.

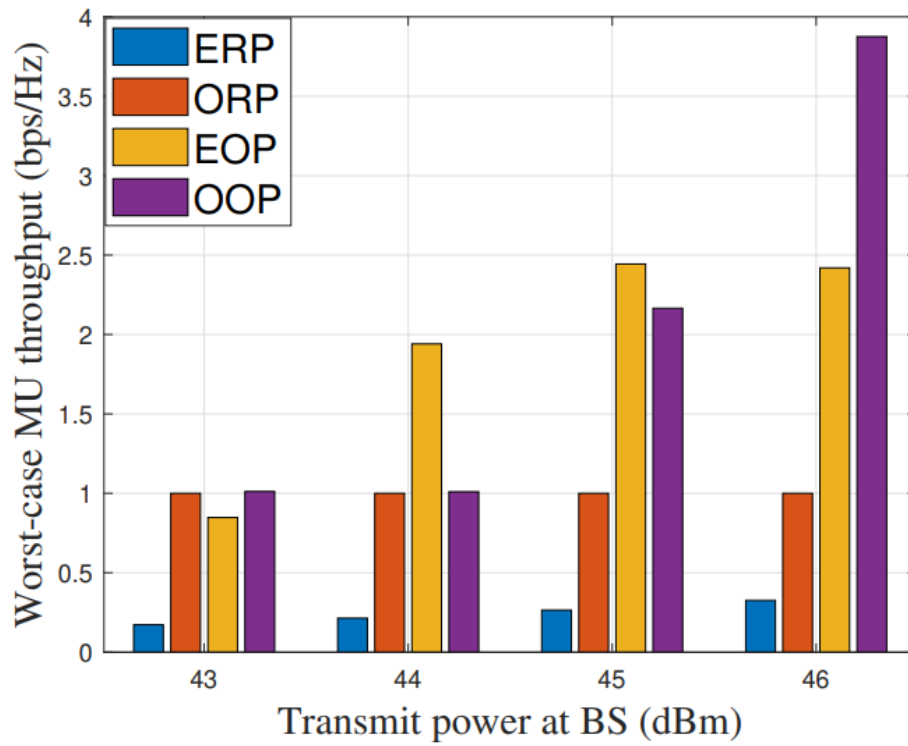


Hình 3. 6 Tổng thông lượng mạng đạt được trong trường hợp số lượng RIS khác nhau $M = 4, M = 12, M = 20$

3.4.3. Thông lượng mạng của người dùng trong điều kiện xấu nhất

Ngoài đánh giá tổng thông lượng cực đại đạt được của mạng khi áp dụng bài toán tối ưu với các ràng buộc đề xuất. Trong luận án đánh giá thông lượng người dùng trong trường hợp xấu nhất nhất với các giá trị khác nhau của số lượng người dùng MU, số phần tử phản xạ của RIS [85]. Trong đó, trường hợp xấu nhất được định nghĩa là trường hợp của MU đạt được thông lượng thấp nhất trong trường hợp có áp dụng bài toán tối ưu đề xuất. Rõ ràng, kết quả mô phỏng trong Hình 3.7 cho thấy ưu điểm của phương pháp được đề xuất **OOP** so với các phương pháp khác bao gồm **OPH**, **EOP**, và **ERP**, trường hợp thông lượng người dùng trong điều kiện xấu nhất với các giá trị được cố định lần lượt $M = 8$, $K = 30$ và $N = 200$. Cụ thể, thông lượng người dùng trong điều kiện xấu nhất của **OOP** là 1 bps/Hz khi giá trị công suất phát của trạm gốc lần lượt là $P_0^{max} = 43 \text{ dBm}$, $P_0^{max} = 44 \text{ dBm}$, khi công suất phát $P_0^{max} = 45 \text{ dBm}$ giá trị tổng thông lượng tăng lên gấp đôi, và khi công suất phát $P_0^{max} = 46 \text{ dBm}$ giá trị tổng thông lượng đạt giá

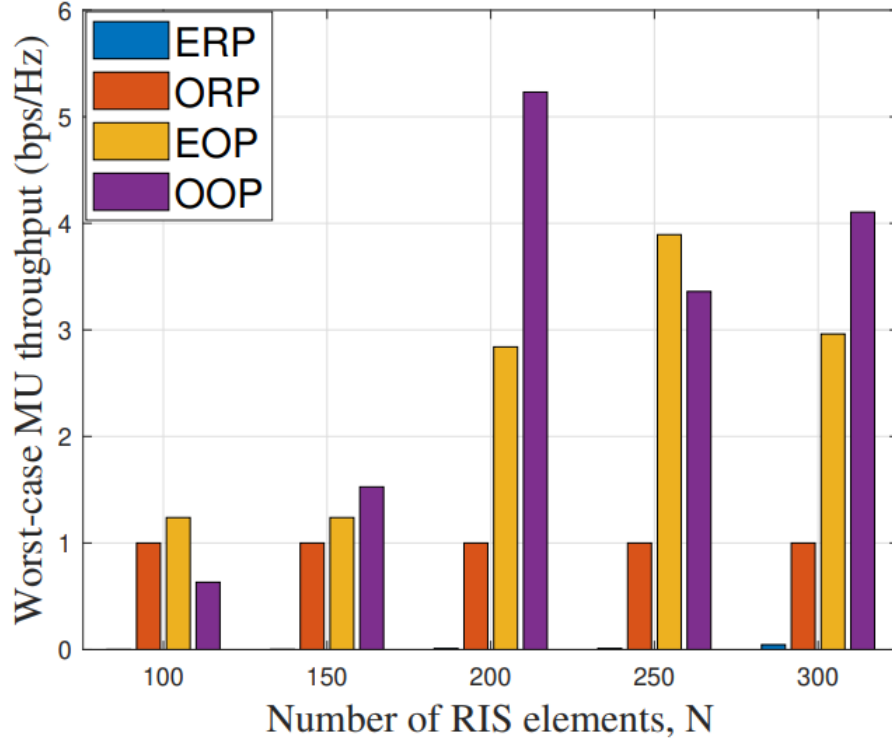
trị đỉnh. Bên cạnh đó, **ORP** đạt được thông lượng người dùng 1 bps/Hz khi công suất phát của trạm gốc tăng từ $P_0^{max} = 43 \text{ dBm}$ đến $P_0^{max} = 46 \text{ dBm}$, trong khi đó thông lượng người dùng trong trường hợp xấu nhất của **EOP** tăng khi công suất truyền tăng, đạt xấp xỉ 2.5 bps/Hz tại giá trị công suất phát của trạm gốc $P_0^{max} = 45 \text{ dBm}$ và $P_0^{max} = 46 \text{ dBm}$. Tuy nhiên, khi không tối ưu **ERP** thông lượng người dùng trong trường hợp điều kiện xấu nhất nhỏ hơn 0.5 bps/Hz, vì vậy không đáp ứng ràng buộc QoS người dùng trong (3.12c).



Hình 3. 7 Thông lượng trong trường hợp xấu nhất với $M = 8$, $K = 30$, $N = 200$

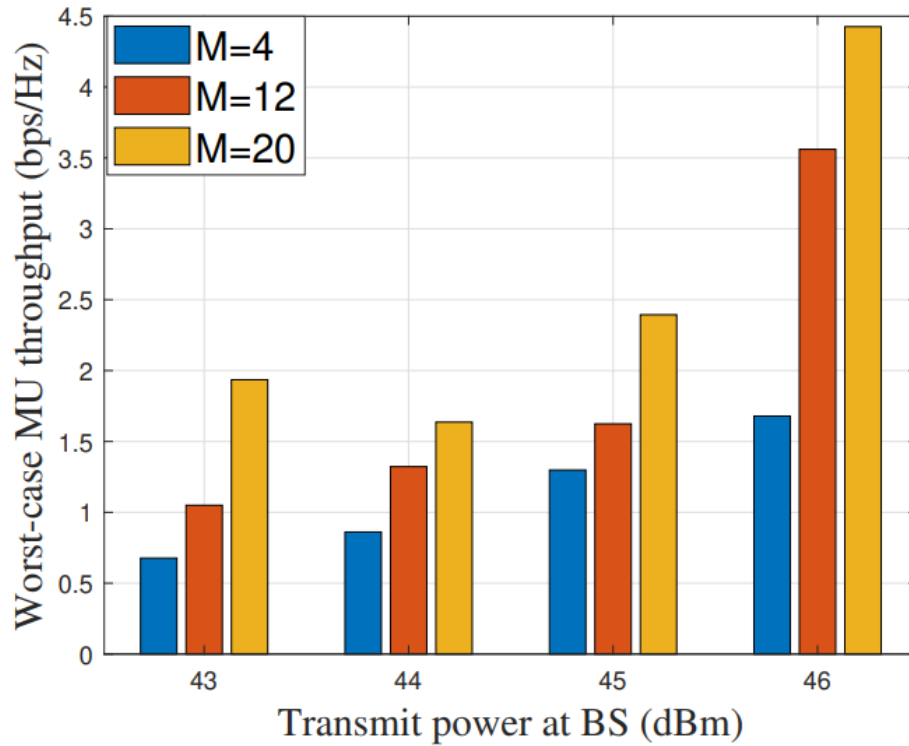
Trong Hình 3.8 cho thấy ảnh hưởng của số lượng phân tử phản xạ tác động lên thông lượng của người dùng trong điều kiện xấu nhất. Cụ thể, với các tham số đầu vào cố định $P_0^{max} = 46 \text{ dBm}$, $M = 20$, và $K = 30$, trong khi số lượng phân tử phản xạ dao động từ 100 đến 300. Kết quả cho thấy thông lượng đạt được trong trường hợp xấu nhất phần lớn đáp ứng được các ràng buộc QoS người dùng trong (13c), với giá trị vượt quá

1 bps/Hz, ngoại trừ trường hợp công suất truyền tối thiểu $P_0^{max} = 43\text{dBm}$. Ngược lại, khi không được tối ưu hóa, như trong sơ đồ **ERP**, thông lượng của trường hợp xấu nhất gần như bằng không, dù số lượng phần tử phản xạ có tăng lên.



Hình 3. 8 Thông lượng người dùng trong trường hợp xấu nhất với số lượng phần tử phản xạ thay đổi từ 100 đến 300 phần tử

Tiếp theo, Hình 3.9 cho thấy sự thay đổi của thông lượng xấu nhất theo số lượng RIS ($M = 4, M = 12, M = 20$), trong khi số lượng phần tử phản xạ được giữ cố định ở $N = 200$ và số lượng người dùng trong mỗi tế bào nhỏ là $K = 30$. Từ kết quả trên, có thể thấy rằng trong hầu hết các trường hợp, thông lượng của phương pháp được đề xuất luôn lớn hơn 1 bps/Hz, và thông lượng cũng tăng khi số lượng RIS, và công suất phát của trạm gốc BS tăng. Đặc biệt, thông lượng tại $M = 20$ cao hơn khoảng 2.5 lần so với thông lượng MU tại $M = 12$ khi công suất truyền được thiết lập ở $P_0^{max} = 43\text{dBm}$.



Hình 3. 9 Thông lượng người dùng trong trường hợp xấu nhất với số lượng RIS lần lượt $M = 4, M = 12, M = 20$.

3.4.4. Thảo luận

Từ các kết quả mô phỏng trên cho thấy việc sử dụng bề mặt phản xạ thông minh RIS vào giúp người dùng bị che khuất có thể nhận được tín hiệu từ phía phát. Mặt khác, các mô hình toán đề xuất vào hệ thống giúp cải thiện đáng kể tổng thông lượng của hệ thống giúp đảm bảo chất lượng dịch vụ QoS cho người dùng. Mặt phản xạ thông minh được sử dụng trong hệ thống với số lượng càng nhiều sẽ giúp tăng đáng kể chất lượng hệ thống và đặc biệt, việc tăng số lượng phần tử trên bề mặt phản xạ thông minh sẽ giúp cho chất lượng hệ thống tốt hơn rất nhiều. Rõ ràng, việc áp dụng bài toán tối ưu cho hệ số dịch pha của phần tử phản xạ là tiền đề cho việc áp dụng kỹ thuật định dạng búp sóng tại các RIS giúp cho chất lượng tín hiệu tại phía thu tốt hơn và vùng bao phủ của các trạm gốc BS sẽ được cải thiện hơn.

So sánh hiệu suất tối đa của phương pháp đề xuất với các phương pháp thực hiện tối ưu hiệu năng của mạng di động trong các công trình khác bao gồm [70, 86, 87]. Trong đó, hiệu suất tối đa là tỉ lệ phần trăm của giá trị cực đại đạt được trong trường hợp thực hiện tối ưu và không thực hiện tối ưu. Cụ thể, trường hợp không tối ưu là khi hệ thống có RIS nhưng góc pha được chọn ngẫu nhiên và công suất được phân bổ đều cho các người dùng khác nhau, tương ứng với trường hợp **OOP** so với **ERP** trong phương pháp đề xuất. Trong đó, giá trị hiệu suất tối đa được đánh giá theo $\frac{R_{max}^{opt} - R_{max}^{noopt}}{R_{max}^{opt} + R_{max}^{noopt}}$, với $R_{max}^{opt}, R_{max}^{noopt}$ lần lượt là giá trị thông lượng cực đại đạt được khi có tối ưu pha, tối ưu phân bổ công suất, và giá trị thông lượng cực đại khi có RIS có giá trị góc pha là ngẫu nhiên, công suất bằng nhau cho mỗi người dùng.

Bảng 3. 5 So sánh hiệu suất phương pháp đề xuất với các nghiên cứu khác

TLTK	Phương pháp	Hiệu quả tối đa
[70]	- Tối ưu xen kẽ (Alternating Optimization - AO). - Tối ưu hóa công suất BS và góc dịch pha RIS riêng biệt. - Áp dụng lập trình phân số (fractional programming) để xử lý bài toán không lồi. - Đảm bảo QoS 1 bps/Hz qua ràng buộc SINR.	$\approx 45\%$ (so với RIS không tối ưu)
[86]	- Dựa trên tối ưu phân tán với xấp xỉ lồi liên tục (successive concave approximation). - Mỗi cặp BS-RIS tối ưu cục bộ thông lượng nhóm người dùng. - Điều chỉnh góc pha RIS bằng thuật toán gradient-based. - Ràng buộc QoS tích hợp trong bài toán tối ưu.	$\approx 50\%$ (so với RIS không tối ưu)
[87]	- Phân tách bài toán thành định dạng búp sóng và cấu hình RIS phù hợp với mmWave. - Tìm kiếm phân cấp cho góc pha RIS và tìm kiếm cục bộ cho công suất.	$\approx 40\%$ (so với RIS không tối ưu)

	- Đảm bảo QoS qua lập trình tuyến tính.	
[85]	Phương pháp đề xuất OOP	$\approx 60\%$ (so với RIS không tối ưu)

Như trong Bảng 3.5, kết quả cho thấy phương pháp đề xuất **OOP** tốt hơn xấp xỉ 10% - 20% khi so sánh với các phương pháp giải bài toán tối ưu khác, điều kiện thực hiện kiểm chứng phương pháp tối ưu được xem xét ở điều kiện chỉ gần tương tự nhau về số lượng phân tử phản xạ, số lượng mặt phản xạ, và số lượng người dùng. Tuy nhiên, việc khởi tạo các giá trị ban đầu, tài nguyên tính toán, và các giá trị cài đặt mô phỏng là không hoàn toàn giống nhau. Chính vì vậy, kết quả so sánh chỉ phần nào chứng minh được tính hiệu quả của bài toán tối ưu và phương pháp giải đề xuất.

3.5 Kết luận chương

Một là, đề xuất một mô hình mạng di động có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh. Trong đó, mạng di động hỗ trợ nhiều người dùng được chia thành nhiều nhóm tại các vị trí bị che khuất khác nhau trong vùng bao phủ của trạm gốc BS. Hai là, phân tích mô hình truyền sóng cho mạng với giả thiết là các nhóm người dùng bị che khuất bởi các vật cản như tòa nhà. Lúc này, bề mặt phản xạ thông minh RIS được xem xét sử dụng để hỗ trợ quá trình truyền sóng, giúp tín hiệu có thể lan truyền đến người dùng một cách dễ dàng. Ba là, đề xuất và giải bài toán tối ưu hệ số điều khiển công suất tại trạm phát dựa trên phương pháp phân bổ công suất, với các ràng buộc là tổng công suất phát cực đại tại trạm gốc và QoS cho từng người dùng tại từng nhóm khác nhau. Bốn là, xây dựng và đề xuất bài toán tối ưu hệ số dịch pha của các phân tử trong bề mặt phản xạ thông minh RIS. Trong đó, các ràng buộc của bài toán tối ưu dựa trên công suất phát cực đại của trạm gốc và điều kiện dịch pha của các phân tử phản xạ. Năm là, kết hợp bài toán tối ưu

công suất phát của trạm gốc và tối ưu hệ số dịch pha của phần tử phản xạ trên các mặt phản xạ thông minh RIS. Mục tiêu tối ưu tổng thông lượng của hệ thống.

Rõ ràng, kết quả bài toán được giải dựa trên công cụ hỗ trợ giải bài toán tối ưu lồi CVX sử dụng phần mềm Matlab với các trường hợp khác nhau lần lượt là: kết hợp tối ưu hệ số điều khiển công suất và tối ưu hệ số dịch pha của RIS **OOP** - tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ, công suất là bằng nhau **ORP** – hệ số dịch pha ngẫu nhiên, tối ưu hệ số điều khiển công suất **EOP** – hệ số dịch pha là ngẫu nhiên, công suất là bằng nhau **EOP**. Kết quả cho thấy, tổng thông lượng mạng đạt được trong các trường hợp khác nhau đều cho thấy việc kết hợp tối ưu công suất và tối ưu hệ số dịch pha của phần tử phản xạ luôn cho kết quả tổng thông lượng mạng đạt được là cao nhất, tiếp theo là trường hợp có tối ưu hệ số dịch pha. Hơn nữa, khi tăng số lượng phần tử phản xạ của RIS cũng giúp cải thiện hiệu năng của mạng và đảm bảo chất lượng dịch vụ QoS.

Tuy nhiên, trong các công trình nghiên cứu [85, 88] của nghiên cứu sinh đã công bố chỉ xem xét trong hệ thống thông tin di động hỗ trợ đa người dùng, với RIS đặt cố định để hỗ trợ truyền thông, trạm gốc BS phục vụ mạng được trang bị đơn ăng-ten. Trong xu hướng nghiên cứu hiện nay, các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ sau như 6G được xem xét với trạm gốc được trang bị đa ăng-ten cỡ lớn, không những vậy để hỗ trợ được các dịch vụ đòi hỏi thực hiện các tác vụ phức tạp, các trạm gốc còn được trang bị các máy chủ hỗ trợ công nghệ điện toán biên di động MEC. Do đó, nghiên cứu sinh đề xuất hướng nghiên cứu tiếp theo liên quan đến tối ưu thông số hiệu năng của mạng dựa trên nền tảng bài toán đã thực hiện, kết hợp với các công nghệ như đã đề cập ở trên.

(C1) Bài báo được trình bày tại hội nghị **INISCOM 2022** và được đăng trong **Book series LNICST** của Springer (**Q4**)

P.Q. Truong, V.-C. Phan. (2022). *Reconfigurable Intelligent Surfaces for Downlink Cellular Networks*. In *Industrial Networks and Intelligent Systems. INISCOM 2022. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 444. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08878-0_2

(J1) Bài báo được xuất bản trên tạp chí **EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems** xếp hạng **Q3** theo Scopus

P. Q. Truong, T. Do-Duy, V.-C. Phan and A. Masaracchia, "Jointly power allocation and phase shift optimization for RIS empowered downlink cellular networks," *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 10, no. 4, 2023, <http://dx.doi.org/10.4108/eetinis.v10i4.4359>

Chương 4

TỐI ƯU PHÂN BỐ CÔNG SUẤT VÀ GIẢM TẢI TÍNH TOÁN TRONG HỆ THỐNG MEC VỚI SỰ HỖ TRỢ CỦA UAV-RIS

Mạng thông tin vô tuyến 6G đang trong giai đoạn nghiên cứu và phát triển với những yêu cầu về chỉ số hiệu năng rất khắc khe được liên minh viễn thông quốc tế ITU thông qua vào năm 2023. Trong đó, dựa trên những hạ tầng viễn thông hiện có kết hợp với các công nghệ tiên tiến cốt lõi được đề xuất cho 6G như: MIMO cỡ lớn, điện toán biên di động MEC, máy bay không người lái UAV, mặt phản xạ thông minh RIS giúp cải thiện đáng kể hiệu năng hệ thống mạng. Cụ thể, các công nghệ này giúp giải quyết vấn đề che khuất và cải thiện vùng phủ sóng của mạng, giúp tối ưu hóa tài nguyên phổ tần, năng lượng trong mạng hỗn tạp, và đặc biệt giúp hỗ trợ thông lượng cực cao, độ trễ cực thấp trong các ứng dụng đòi hỏi thời gian thực như thực tế ảo, thực tế tăng cường, xe tự hành, và các hệ thống IoT trong công nghiệp. Trước các động lực trên, nội dung chương này tập trung vào xem xét ứng dụng bề mặt phản xạ thông minh RIS vào trong hệ thống truyền thông UAV có sự hỗ trợ MEC tại trạm gốc MIMO cỡ lớn. Trong đó, giả sử các nhóm người dùng cần thực hiện công việc tính toán phức tạp và phải giảm tải tính toán về cho trạm gốc MBS có chứa MEC nhờ vào sự hỗ trợ của UAV-RIS để đảm bảo kết nối của người dùng về trạm gốc MBS. Bài toán tối ưu được đề xuất ứng dụng vào trọng hệ thống với mục tiêu cực tiểu tổng độ trễ của hệ thống theo các biến phân bố công suất người dùng, liên kết người dùng, ma trận dịch pha của RIS, và phân bố tài nguyên tính toán tại trạm gốc MBS, với các ràng buộc bao gồm tài nguyên tính toán MBS và chất lượng dịch vụ QoS. Bên cạnh đó, bài toán tối ưu quỹ đạo bay (trajectory) cho UAV cũng được xem xét, với mục tiêu tìm được đường bay ngắn nhất cho UAV mang theo mặt phản xạ thông minh RIS từ điểm gốc đến vị trí nhóm có người dùng cần giảm tải bị che khuất. Do tính chất không lồi của hàm mục tiêu trong bài toán tối ưu đề xuất nên

phương pháp giảm tọa độ khối BCD được áp dụng để thực hiện tối ưu các bài toán con theo từng biến riêng biệt. Sau cùng, kết hợp các bài toán con sử dụng phương pháp lặp để tìm ra giá trị tối ưu. Kết quả mô phỏng đánh giá tổng độ trễ của mạng và độ trễ người dùng trong trường hợp xấu nhất, theo các thông số độ phức tạp tính toán và tài nguyên tính toán tối đa của máy chủ MEC và UE.

4.1 Giới thiệu

Trong kỷ nguyên vạn vật kết nối vào mạng, điều này làm cho tổng lưu lượng dữ liệu tăng lên khủng khiếp, theo dự đoán của Cisco tổng dung lượng dữ liệu có thể đạt đến 77 exabyte trong năm 2023. Bên cạnh đó, sự tăng lên không ngừng của các thiết bị kết nối cùng với các dịch vụ đòi hỏi việc tính toán phức tạp và tốc độ dữ liệu cao hơn như: thực tế ảo, thực tế tăng cường, bản sao số. Trong thời gian gần đây, các nghiên cứu tập trung vào mạng di động thế hệ thứ 6 (6G), với mục tiêu giải quyết các vấn đề khó khăn trên như; vấn đề về số lượng thiết bị kết nối quá nhiều trong mạng IoT, tăng độ tin cậy và giảm độ trễ truyền dữ liệu trong mạng, ứng dụng trí tuệ nhân tạo, mạng học củng cố để giải quyết vấn đề phân bổ hiệu quả năng lượng trong mạng [89] [90] [91] [92] [93].

Gần đây, điện toán di động biên (MEC) là một trong những công nghệ mới nổi, dựa trên công nghệ điện toán đám mây sẵn có, MEC hướng đến áp dụng trong các kịch bản của mạng di động ở biên hoặc người dùng cuối. Đặc biệt, MEC là một trong những thành phần quan trọng của kiến trúc 5G và 6G, nhằm hỗ trợ cho những dịch vụ đòi hỏi độ trễ thấp [94]. Trong [95] các tác giả đã khảo sát và cho thấy tính ưu việt của MEC so với các kiến trúc mạng tập trung truyền thống. Trong đó, các mạng tập trung gần như gặp khó khăn khi các yêu cầu của các dịch vụ dữ liệu tăng cao dẫn đến việc tập trung lưu lượng dữ liệu lên mạng đường trục lớn, lúc đó độ trễ sẽ cao.

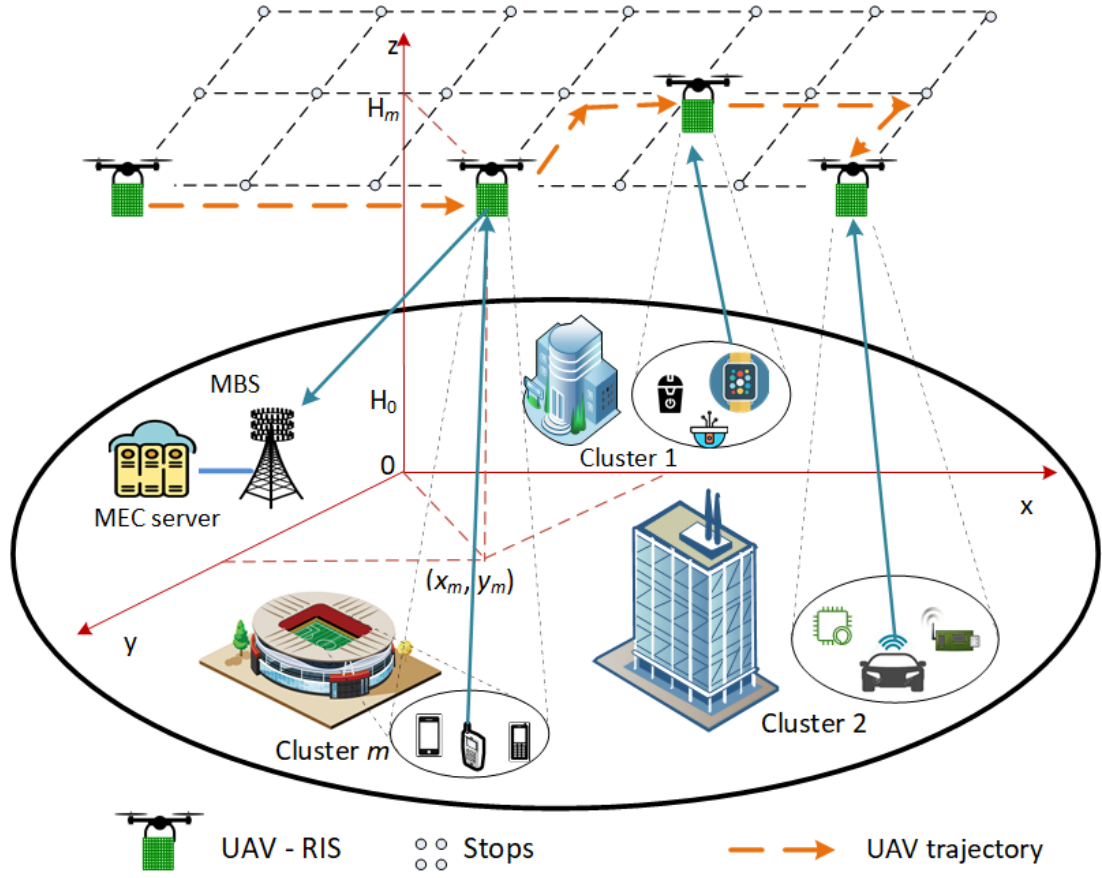
Từ các vấn đề nêu trên, một hệ thống MEC có tính bảo mật và độ trễ thấp được đề xuất trong [96]. Trong đó, kịch bản đặt ra là nhiều người dùng có thể giảm tải các tác

vụ sang trạm gốc trong khu vực có sự hiện diện của đối tượng nghe lén. Để giải quyết bài toán đặt ra, các tác giả đã đề xuất kết hợp tối ưu công suất truyền của người dùng, phân bổ dung lượng tính toán, và liên kết người dùng với mục tiêu cực tiểu độ trễ tính toán và độ trễ truyền, với các ràng buộc về bảo mật và tài nguyên tính toán. Ngoài ra, trong [97] các tác giả đã đề xuất mô hình UAV kết hợp vai trò là MEC nhằm hỗ trợ các thiết bị đầu cuối trong hệ thống IoT. Mục tiêu giảm thiểu tổng mức tiêu thụ năng lượng bao gồm năng lượng cho truyền thông, năng lượng cho việc tính toán, và năng lượng cần thiết cho hoạt động bay của UAV. Tuy nhiên, vì bài toán đặt ra không phải dạng tối ưu lồi, nên tác giả đã đề xuất phân tích thành 2 bài toán và kết hợp phương pháp đối ngẫu Lagrange và phương pháp xấp xỉ lồi liên tiếp.

Ngoài ra, trong [98] [99] các tác giả đề xuất hệ thống MEC có sự hỗ trợ của UAV trong các kịch bản xem xét lần lượt là mạng kết nối vạn vật IoT và mạng kết nối các phương tiện giao thông IoV. Bài toán đặt ra vẫn tập trung vào các vấn đề cấp thiết của việc thiết kế các hệ thống truyền thông có sự hỗ trợ của UAV bao gồm thời gian hoàn thành năng lượng tiêu thụ của UAV. Tương tự, trong [100] [101] một lần nữa kịch bản các thiết bị kết nối trong hệ thống IoT được xem xét. Vấn đề liên quan đến năng lượng cần thiết để duy trì việc bay trên không của UAV, thời gian và độ trễ tính toán, cũng như là chất lượng dịch vụ QoS được xem xét trong hệ thống đề xuất. Bên cạnh đó, trong [102] nhóm tác giả đã xem xét đến cực tiểu độ trễ trong việc giảm tải tính toán của mạng không dây biên bản sao số trong môi trường IoT bằng các kết hợp tối ưu công suất phát, liên kết người dùng, phân giảm tải, tốc độ xử lý của người dùng và máy chủ biên.

4.2 Mô hình hệ thống MEC kết hợp UAV-RIS

4.2.1 Mô hình hệ thống đề xuất



Hình 4. 1 Mô hình đề xuất kết hợp UAV và RIS trong hệ thống MEC

Trong Hình 4.1, một mô hình hệ thống truyền thông MIMO được xem xét, hệ thống có sự hỗ trợ của bề mặt phản thông minh RIS với mục đích mở rộng vùng bao phủ giữa trạm gốc MBS và các nhóm người dùng (ví dụ như: người dùng di động, phương tiện giao thông, các nút trong hệ thống IoT) [103], [104]. Việc sử dụng RIS nhằm đảm bảo độ tin cậy của hệ thống truyền thông và chất lượng dịch vụ QoS trong các trường hợp hệ thống bị gián đoạn do các vật cản trong suốt quá trình truyền thông [81], [105], [106].

Trong đó, MBS được trang bị một mảng lớn gồm nhiều ăng ten để truyền thông cho K người dùng đơn ăng ten. Giả sử, tất cả người dùng được phân chia thành M nhóm khác nhau, được ký hiệu như sau $\mathcal{K}_u = \{\mathcal{K}_1, \dots, \mathcal{K}_M\}$ với $\mathcal{K}_m = \{1, \dots, K_m\}, m =$

$1, \dots, M$. Trong hệ thống, để đảm bảo truyền thông của M nhóm người dùng, hệ thống UAV kết hợp với bề mặt phản xạ thông minh RIS được đề xuất. Trong đó, UAV-RIS đóng vai trò như một trạm gốc phục vụ cho một tế bào nhỏ (small-cell). Cụ thể, RIS gồm N phần tử phản xạ độc lập, giúp phản xạ tín hiệu từ người dùng về trạm gốc MBS. Ngoài ra, trong mô hình đề xuất có một nhóm người dùng kết nối trực tiếp với MBS là $\mathcal{K}_0$, và các nhóm còn lại sẽ nhận được sự hỗ trợ từ UAV-RIS $\mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$. Lúc này, người dùng (m, k) tương ứng với người dùng k th tại nhóm thứ m th với $m = 1, \dots, M$ và $k \in \mathcal{K}_m$.

$u_{m,k}$ là ký hiệu được sử dụng cho trường hợp xem xét có cần thiết phải chuyển tiếp để giảm tải tác vụ tính toán của người dùng thứ k th tại nhóm thứ m th cho máy chủ MEC như trong biểu thức (4.1).

$$u_{m,k} = \begin{cases} 1 & \text{giảm tải tính toán} \\ 0 & \text{khác} \end{cases} \quad (4.1)$$

Trong đó, $u_m = [u_{m,k}]_{k=1}^{K_m}$ và $u = [u_m]_{m=0}^M$ là các liên kết giữa các người dùng.

4.2.2 Mô hình kênh truyền

Trong mô hình đề xuất như Hình 4.1, giả sử MBS được bố trí trong hệ trục tọa độ 3 chiều xyz, bề mặt phản xạ thông minh RIS và người dùng lần lượt tại các vị trí tọa độ như sau: (x_0, y_0, H_0) , (x_m, y_m, H_m) , $m \in \mathcal{M}$, và $(x_k, y_k, 0)$, $k = 1, 2, \dots, K$. Chiều cao ăng ten của MBS và của bề mặt phản xạ thông minh RIS lần lượt là H_0 và H_m . Các vị trí tọa độ được xác định dựa vào hệ thống định vị toàn cầu GPS và lưu trữ tại MBS. Ta có suy hao đường truyền giữa MBS và bề mặt phản xạ thông minh RIS thứ m th như sau [76]:

$$\beta_{m,0} = \frac{\beta_0}{d_{m,0}^2 + (H_0 - H_m)^2}, \quad m = 1, \dots, M, \quad (4.2)$$

Trong đó, β_0 là độ lợi công suất của kênh truyền tại vị trí tham chiếu d_0 và $d_{m,0} = \sqrt{(x_0 - x_m)^2 + (y_0 - y_m)^2}$.

Ngược lại, do ảnh hưởng của các vật cản trên đường truyền nên các kênh truyền giữa UAV và người dùng sẽ phức tạp hơn. Biểu thức suy hao giữa người dùng thứ (m, k) và UAV ($m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K_m$) như sau [78]:

$$\beta_{m,k} = PL_{m,k} + \eta_{LoS} P_{m,k}^{LoS} + \eta_{NLoS} P_{m,k}^{NLoS}, \quad (4.3)$$

Trong biểu thức (4.3), LoS là đường truyền trực tiếp nhìn thấy được giữa MBS và RIS, NLoS là đường truyền bị che khuất, với η_{LoS} , η_{NLoS} lần lượt là hệ số suy hao trung bình của các đường truyền LoS và NLoS. Hệ số suy hao đường truyền theo khoảng cách được tính như sau:

$$PL_{m,k} = 10 \log \left(\frac{4\pi f_c D_{m,k}}{c} \right)^\alpha, \quad (4.4)$$

Trong đó, f_c là tần số sóng mang (Hz), c là vận tốc ánh sáng (m/s), hệ số suy hao đường truyền $\alpha \geq 2$, $D_{m,k} = \sqrt{d_{m,k}^2 + H_m^2}$ là khoảng cách Euclid giữa UAV-RIS và người dùng (m, k) th. Xác suất của LoS được tính như sau [79]:

$$P_{m,k}^{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp \left[-b \left(\arctan \left(\frac{H_m}{d_{m,k}} \right) - a \right) \right]} \quad (4.5)$$

a và b là các hằng số phụ thuộc vào môi trường, và $P_{m,k}^{NLoS} = 1 - P_{m,k}^{LoS}$. Đối với các người dùng nhận trực tiếp tín hiệu từ MBS, ta có ma trận kênh truyền từ người dùng thứ $(0, k)$ đến MBS được tính như sau: $G_{k,0} = \sqrt{\beta_{k,0} h_{k,0}} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$, trong đó $\mathbf{h}_{k,0}$ là các hệ số pha định trong phạm vi nhỏ (small-scale fading).

Mặt khác, đối với nhóm những người dùng cần sự hỗ trợ của bề mặt phản xạ thông minh RIS để đảm bảo truyền thông đến MBS có hệ số pha-đỉnh trong phạm vi nhỏ, cho kênh truyền từ người dùng thứ (m, k) th đến UAV-RIS và từ UAV-RIS đến MBS lần lượt là $\mathbf{h}_{m,k} \in \mathcal{C}^{N \times 1}$ và $\mathbf{h}_{m,0}^H \in \mathcal{C}^{N \times L}$ với $(m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m)$. Giả sử các biến ngẫu nhiên là độc lập và có phân phối giống nhau, với trung bình không và phương sai đơn vị. Ma trận kênh truyền từ người dùng thứ (m, k) th đến UAV-RIS và từ UAV-RIS đến MBS lần lượt là $\mathbf{H}_{m,k} \in \mathcal{C}^{N \times 1}$ và $\mathbf{H}_{m,0}^H \in \mathcal{C}^{L \times N}$ với $\mathbf{H}_{m,k} = \sqrt{\beta_{m,k}} \mathbf{h}_{m,k}$ và $\mathbf{H}_{m,0}^H = \sqrt{\beta_{m,0}} \mathbf{h}_{m,0}^H$. Ta có ma trận kênh truyền từ người dùng thứ (m, k) th đến MBS với $\mathbf{G}_{m,k} \in \mathcal{C}^{L \times 1}$ như sau [81]:

$$\mathbf{G}_{m,k} = \mathbf{H}_{m,0}^H \mathbf{\Phi}_m \mathbf{H}_{m,k}, \quad m \in \mathcal{M}, \quad (4.6)$$

Trong đó, $\mathbf{\Phi}_m = \text{diag}[\phi_{1m}, \phi_{2m}, \dots, \phi_{Nm}]$ là ma trận dịch pha tại UAV-RIS, $\phi_{nm} = \alpha_{nm} e^{j\theta_{nm}}$, $\alpha_{nm} \in [0, 1]$ và $\theta_{nm} \in [0, 2\pi]$ ($\forall n = 1, 2, \dots, N, m \in \mathcal{M}$) lần lượt là biên độ và hệ số dịch pha của phần tử phản xạ thứ n th. Giả sử trong quá trình phản xạ chỉ có thành phần pha của tín hiệu bị thay đổi, do đó $\alpha_{nm} = 1$ [107].

4.2.3 Mô hình tín hiệu thu và thông lượng hệ thống

Xem xét trường hợp người dùng thứ (m, k) th trong nhóm thứ m th cần giảm tải (offloading) chuyển tiếp sang MBS, lúc này tín hiệu có thể được truyền trực tiếp đến MBS hoặc thông qua UAV-RIS. Ta có, tín hiệu thu được tại MBS từ người dùng thứ (m, k) th như sau:

$$y_{m,k} = \sqrt{P_{m,k}} \mathbf{G}_{m,k}^H \mathbf{f}_{m,k} s_{m,k} + \underbrace{\sum_{l=1, l \neq k}^{K_m} \sqrt{P_{l,m}} \mathbf{G}_{l,m}^H \mathbf{f}_{l,m} s_{l,m}}_{\text{intra-cell interference}} + n_0, \quad (4.7)$$

Trong biểu thứ (4.7), $P_{m,k}$ là công suất phát của người dùng thứ (m, k) th, $\mathbf{f}_{m,k} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ là véc tơ định dạng búp sóng của MBS đến người dùng thứ (m, k) th, $s_{m,k}$ là thông tin giảm tải được truyền bởi người dùng thứ (m, k) th với $\left| |s_{m,k}| \right|^2 \leq 1$, và $n_0 \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_0^2)$ là nhiễu Gauss trắng cộng tại MBS. Để loại bỏ can nhiễu trong biểu thức 4.7, ta áp dụng kỹ thuật ép về không ZF (Zero-Forcing) [108]. $\mathbf{G}_m = [\mathbf{G}_{m,1}, \dots, \mathbf{G}_{m,K_m}] \in \mathbb{C}^{L \times K_m} (m = 0, 1, \dots, M)$.

Dựa trên các điều kiện của hệ thống MIMO cỡ lớn, ta áp dụng kỹ thuật ZF có được véc-tơ định dạng búp sóng như sau:

$$\bar{\mathbf{f}}_m = \mathbf{G}_m (\mathbf{G}_m^H \mathbf{G}_m)^{-1}, \quad (4.8)$$

Trong đó, $\bar{\mathbf{f}}_m = [\bar{\mathbf{f}}_{m,1}, \dots, \bar{\mathbf{f}}_{m,K_m}] \in \mathbb{C}^{L \times K_m}$, $\tilde{\mathbf{f}}_{m,k} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$, $m = 0, 1, \dots, M, k \in K_m$. Ta chuẩn hóa $\tilde{\mathbf{f}}_{m,k} = \bar{\mathbf{f}}_{m,k} / \|\bar{\mathbf{f}}_{m,k}\|$ và tính $\mathbf{f}_{m,k}$ như sau:

$$\mathbf{f}_{m,k} = \sqrt{p_{m,k}} \tilde{\mathbf{f}}_{m,k}, m = 0, 1, \dots, M, k \in \mathcal{K}_m, \quad (4.9)$$

Trong (4.9), $p_{m,k}$ là hệ số điều khiển công suất của người dùng thứ (m, k) th. Do đó, từ (4.7) ta được:

$$y_{m,k} = \sqrt{P_{m,k}} \sqrt{p_{m,k}} \mathbf{G}_{m,k}^H \tilde{\mathbf{f}}_{m,k} s_{m,k} + n_0, \quad (4.10)$$

Các hệ số điều khiển công suất lần lượt là $\mathbf{p}_m = [p_{m,k}]_{k=1}^{K_m}$, $\mathbf{p} = [\mathbf{p}_m]_{m=0}^M$, và $\Phi = [\Phi_m]_{m=1}^M$ là góc dịch pha của RIS. Thông lượng đạt được (bits/s) tại MBS như sau:

$$R_{m,k}(p_{m,k}, \Phi_m) = W \log_2 \left(1 + \frac{P_{m,k} p_{m,k} |\mathbf{G}_{m,k}^H \tilde{\mathbf{f}}_{m,k}|^2}{\sigma_0^2} \right), \quad (4.11)$$

Với W là băng thông được phân bổ cho người dùng thứ (m, k) th.

4.2.4 Mô hình giảm tải tác vụ

Gọi $J_{m,k}$ (bits) là kích thước của tác vụ được giảm tải (offloading) và $\mathcal{F}_{m,k}$ là số chu kỳ CPU cần thiết để tính toán trên mỗi bit của tác vụ $J_{m,k}$. Lúc này, ta định nghĩa độ trễ (latency) cục bộ tại người dùng thứ (m, k) th và để giảm tải tác vụ $J_{m,k}$ như sau:

4.2.4.1 Tính toán cục bộ

Gọi $c_{m,k}$ là dung lượng tính toán tại mỗi người dùng thứ (m, k) th, nếu người dùng này thực hiện việc tính toán cục bộ, thì thời gian tính toán được xác định như sau:

$$T_{m,k}^l = \frac{J_{m,k} \mathcal{F}_{m,k}}{c_{m,k}}, m = 0, 1, \dots, M, k \in K_m, \quad (4.12)$$

4.2.4.2 Giảm tải tính toán sang MBS

Thời gian truyền tác vụ cần giảm tải từ người dùng thứ (m, k) th ($m = 0, 1, \dots, M, k \in \mathcal{K}_m$) sang MBS như sau:

$$T_{m,k}^{tx}(p_{m,k}, \Phi_m) = \frac{J_{m,k}}{R_{m,k}(p_{m,k}, \Phi_m)}, \quad (4.13)$$

Lúc này, thời gian tính toán tại MBS cho tải đã được chuyển sang như sau:

$$T_{m,k}^{com}(\zeta_{m,k}^{bs}) = \frac{J_{m,k} \mathcal{F}_{m,k}}{\zeta_{m,k}^{bs}}, m = 0, 1, \dots, M, k \in K_m, \quad (4.14)$$

Với $\zeta_{m,k}^{bs}$ là dung lượng tính toán của MBS được phân bổ để xử lý tác vụ của người dùng thứ (m, k) th. Để đơn giản hơn, ta đặt $\zeta_m = [\zeta_{m,k}^{bs}]_{k=1}^{K_m}$, và $\zeta = [\zeta_m]_{m=0}^M$ đại diện cho phân bổ dung lượng tính toán của MBS. Từ (4.12) - (4.14) tổng độ trễ cho việc thực thi tác vụ của người dùng thứ (m, k) th.

$$T_{m,k}^{tot}(p_{m,k}, u_{m,k}, \Phi_m, \zeta_{m,k}^{bs}) = (1 - u_{m,k})T_{m,k}^l + u_{m,k} \left(T_{m,k}^{tx}(p_{m,k}, \Phi_m) + T_{m,k}^{com}(\zeta_{m,k}^{bs}) \right), \quad (4.15)$$

Thời gian cần thiết để truyền kết quả tính toán của tác vụ đã được thực hiện bởi MBS về người dùng có thể được bỏ qua, vì rất nhỏ so với tổng thời gian thực thi tác vụ [96] [109].

4.2.5 Quỹ đạo bay của UAV phân nhóm người dùng

Để giải quyết bài toán thiết kế quỹ đạo bay cho UAV, giả sử UAV sẽ bay qua M điểm dừng liên kết với M nhóm người dùng cần giảm tải tính toán. Trong bài toán đặt ra, giả sử UAV sẽ bay trên mặt phẳng dạng lưới có thể bao phủ được hết tất cả các nhóm người dùng trên mặt đất, sao cho khả năng bao phủ của UAV là tốt nhất. Giả sử, các nhóm người dùng đã được phân cụm sao cho việc triển khai UAV được tối ưu nhất, giảm thiểu được nhiều nội ô, tiết kiệm tài nguyên, và đảm bảo chất lượng dịch vụ QoS [84]. Giả sử, UAV sẽ bay từ điểm gốc $(0,0,H_0)$ theo quỹ đạo bay ngắn nhất để đến nhóm người dùng gần nhất cần thực hiện giảm tải tính toán, sau đó UAV sẽ thay đổi độ cao H_m trong khoảng (H^{min}, H^{max}) để đảm bảo ràng buộc về chất lượng dịch vụ QoS, theo như mô tả trong thuật toán ở Bảng 4.1.

Bảng 4. 1: Đường bay ngắn nhất của UAV

Thuật toán 1: Tìm quỹ đạo ngắn nhất

Yêu cầu: $(0,0,H_m), (x_m, y_m, H_m), d_{\max}$

Ràng buộc: $\mathcal{T}$

Vị trí các điểm dừng của UAV

for $\mathcal{R}$ in $\mathcal{M}$

Tính khoảng cách d từ UAV đến điểm dừng cuối

if $d < d_{\max}$ **then**

$$\mathcal{T} \leftarrow \mathcal{R}$$

$$d_{\max} = d$$

end if

end for

Thuật toán 1 thực hiện tìm quỹ đạo bay qua vị trí các điểm dừng cố định với khởi tạo ban đầu lần lượt: $(0,0,H_m)$ là tọa độ và độ cao ban đầu của UAV, (x_m, y_m, H_m) là tọa độ và độ cao của điểm dừng cuối, $d_{\max}$ là khoảng cách tối đa cho phép UAV có thể bay được, với ràng buộc quỹ đạo bay ngắn nhất $\mathcal{T}$. Ban đầu, tạo ra tất cả các hoán vị của vị trí điểm dừng dựa trên số nhóm người dừng, với mỗi hoán vị là tập hợp các vị trí mà UAV sẽ đi qua, và là một hàng trong ma trận M hàng và $M!$ cột. Thuật toán sẽ duyệt qua tất cả những quỹ đạo tiềm năng, tương ứng với mỗi hàng trong ma trận, khoảng cách từ UAV đến điểm dừng cuối sẽ được tính toán và lưu trong d , nếu $d < d_{\max}$ giá trị $d_{\max}$ sẽ được cập nhật lại thành d tương ứng với quỹ đạo bay ngắn nhất với hoán vị đang thực hiện. Lúc này, quỹ đạo $\mathcal{T}$ sẽ được cập nhật, quá trình sẽ được lặp lại cho đến khi duyệt hết các hoán vị và tìm ra quỹ đạo ngắn nhất.

Như mô tả trong Bảng 4.1, Thuật toán 1 có độ phức tạp tính toán chủ yếu do việc tạo ra toàn bộ hoán vị của tập hợp các điểm dừng của UAV tương ứng với từng nhóm người dừng và đánh giá độ dài của quỹ đạo tương ứng cho từng hoán vị. Chính vì vậy, tương ứng với M điểm dừng, số lượng hoán vị cần xét là $M!$. Đối với mỗi hoán vị, thuật toán thực hiện M phép tính khoảng cách giữa các cặp điểm liên tiếp theo công thức Euclid trong không gian ba chiều, mỗi phép tính có độ phức tạp $\mathcal{O}(1)$. Do đó, tổng độ phức tạp tính toán của thuật toán là $\mathcal{O}(M! \times M)$. Rõ ràng, đây là độ phức tạp mang tính tổ hợp, phản ánh toàn bộ không gian tìm kiếm các khả năng quỹ đạo có thể xảy ra [110]. Cách tiếp cận này đảm bảo rằng thuật toán có thể xác định chính xác quỹ đạo tối ưu trong không gian cấu hình đầy đủ của các điểm dừng.

4.3 Tối ưu độ trễ dựa trên bài toán phân bổ tài nguyên và tối ưu giảm tải tính toán

Mục tiêu của bài toán (4.16) là cực tiểu độ trễ của mạng khi phải thực hiện tất cả các tác vụ của người dùng trong khu vực được bao phủ. Cụ thể, bài toán tối ưu theo các biến bao gồm phân bổ công suất người dùng ($\mathbf{p}$), liên kết người dùng ($\mathbf{u}$), cấu hình dịch pha của các phần tử RIS (Φ), và phân bổ tài nguyên tính toán tại MBS (ζ) với các ràng buộc về tài nguyên tính toán và chất lượng dịch vụ QoS. Bài toán tối ưu (4.16) có độ phức tạp cao do tính chất phi tuyến và không lồi (nonconvex), với số lượng biến lớn phụ thuộc lẫn nhau. Cụ thể, hàm mục tiêu (4.16a) là hàm tổng độ trễ phụ thuộc nhiều vào các biến tối ưu và có dạng phi tuyến. Tương tự, ràng buộc chất lượng dịch vụ QoS trong (4.16c) nhằm đảm bảo tốc độ truyền dữ liệu tối thiểu cho từng người dùng là hàm phi tuyến, phụ thuộc vào cấu hình dịch pha của các phần tử phản xạ RIS Φ_m , và công suất truyền của người dùng $p_{m,k}$. Bên cạnh đó, ràng buộc cấu hình hệ số dịch pha trong (4.16d) là ràng buộc liên tục. Do tổng tài nguyên tính toán tại MBS là có giới hạn nên việc phân bổ tài nguyên cho người dùng giảm tải tác vụ cần phải hợp lý và đảm bảo không vượt quá tài nguyên tính toán cực đại tại MBS ζ_{max} như trong biểu thức (4.16e). Chính vì tính phức tạp của bài toán không lồi và phụ thuộc của các biến liên tục, biến nhị phân nên việc giải bài toán trực tiếp bằng phương pháp tối ưu toàn cục có độ phức tạp rất cao. Do đó, bài toán tối ưu (4.16) sẽ được phân tách thành các bài toán con, để tối ưu theo từng biến khác nhau và giữ các biến còn lại cố định, sử dụng phương pháp giảm tọa độ khối là phù hợp nhằm giảm độ phức tạp và tăng tính linh hoạt.

$$\min_{\mathbf{p}, \mathbf{u}, \Phi, \zeta} \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} T_{m,k}^{tot}(p_{m,k}, u_{m,k}, \Phi_m, \zeta_{m,k}^{bs}), \quad (4.16a)$$

$$\text{s.t} \quad 0 \leq p_{m,k} \leq 1, \quad (4.16b)$$

$$R_{m,k}(p_{m,k}, \Phi_m) \geq \bar{r}_0, m = 0, 1, \dots, M, k \in K_m, \quad (4.16c)$$

$$0 \leq \theta_{nm} \leq 2\pi, \forall n = 1, 2, \dots, N, m \in M, \quad (4.16d)$$

$$\sum_{k=1}^{K_m} u_{m,k} \zeta_{m,k}^{bs} \leq \zeta_{max} \quad (4.16e)$$

4.3.1 Tối ưu phân bổ công suất

Dựa trên đề xuất áp dụng phương pháp giảm tọa độ khối để tìm giá trị tối ưu của hệ số phân bổ công suất, với các giá trị cố định của $\Phi, \mathbf{u}, \zeta$ thì biểu thức (4.16) như sau:

$$\min_p \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} T_{m,k}^{tot}(p_{m,k}) \quad (4.17a)$$

$$\text{s.t. (4.16b), (4.16c)} \quad (4.17b)$$

Bài toán tối ưu trong biểu thức (4.17) có hàm mục tiêu (4.17a) là hàm không lồi, ràng buộc chất lượng dịch vụ trong (4.16c) là hàm không lồi do có đại lượng hàm lô-ga-rít trong $R_{m,k}$. Do đó, bài toán (4.17) cần được biến đổi về dạng bài toán tối ưu lồi để có thể dễ dàng tìm ra nghiệm tối ưu.

Trước hết, bất đẳng thức lô-ga-rít và xấp xỉ được sử dụng để biến đổi dạng của hàm thông lượng $R_{m,k}$, sử dụng hàm lồi $f(x) = \log_2 \left(1 + \frac{1}{x}\right)$ với $x > 0$

$$f(x) = \log_2 \left(1 + \frac{1}{x}\right) \geq \hat{f}(x), \quad (4.18)$$

với $\forall x > 0, \bar{x} > 0$, ta có:

$$\begin{aligned} \hat{f}(x) &= \log_2 \left(1 + \frac{1}{\bar{x}}\right) + \left(\frac{\partial f(\bar{x})}{\partial x}\right)(x - \bar{x}) \\ &= \log_2 \left(1 + \frac{1}{\bar{x}}\right) + \frac{1}{1 + \bar{x}} - \frac{x}{(1 + \bar{x})\bar{x}} \end{aligned} \quad (4.19)$$

Tương ứng, tại lần lặp thứ $i - th$, lần lượt đặt các biến x và $\bar{x}$ như sau:

$$x = \frac{\sigma_0^2}{P_{m,k} p_{m,k} |G_{m,k}^H \tilde{\mathbf{f}}_{m,k}|^2},$$

$$\bar{x} = x^{(i)} = \frac{\sigma_0^2}{P_{m,k} p_{m,k}^{(i)} |G_{m,k}^H \tilde{\mathbf{f}}_{m,k}|^2}$$

Thông lượng tại MBS để truyền thông tin đến người dùng (m, k) th trong (4.11) như sau:

$$R_{m,k}(p_{m,k}) \geq \hat{R}_{m,k}^{(i)}(p_{m,k}), \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}_m, \quad (4.20)$$

với thông lượng xấp xỉ như sau:

$$\hat{R}_{m,k}^{(i)}(p_{m,k}) = W \left(\log_2 \left(1 + \frac{1}{\bar{x}} \right) + \frac{1}{1 + \bar{x}} - \frac{x}{(1 + \bar{x})\bar{x}} \right). \quad (4.21)$$

Lúc này, hàm mục tiêu vẫn chưa phải là dạng hàm lồi, ta đặt biến phụ $\mathbf{r} \triangleq \{r_{m,k}\}$ ($\forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}$) thỏa điều kiện $\frac{1}{R_{m,k}(p_{m,k})} \leq r_{m,k}$. Hàm mục tiêu $T_{m,k}^{tot}(r_{m,k})$ có thể được viết lại theo điều kiện biên trên (upper-bound) khi thay thế độ trễ truyền tác vụ cần giảm tải từ người dùng $T_{m,k}^{tx}$ bằng đại lượng tuyến tính $r_{m,k} \mathcal{J}_{m,k}$ như sau:

$$T_{m,k}^{tot}(r_{m,k}) \leq \hat{T}_{m,k}^{tot}(r_{m,k}) = (1 - u_{m,k})T_{m,k}^l + u_{m,k}(r_{m,k} \mathcal{J}_{m,k} + T_{m,k}^{com}), \quad (4.22)$$

Lúc này, ta có thể viết lại biểu thức (4.17) như sau:

$$\min_{p, \mathbf{r}} \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} \widehat{T}_{m,k}^{tot}(r_{m,k}) \quad (4.23a)$$

$$s. t \quad p_{m,k} \leq 1, P_{m,k} \leq P^{max} \quad (4.23b)$$

$$\widehat{R_{m,k}^{(i)}}(p_{m,k}) \geq \bar{r}_0, \quad (4.23c)$$

$$\frac{1}{\widehat{R_{m,k}^{(i)}}} \leq r_{m,k}, m = 0, 1, \dots, M, k \in \mathcal{K}_m \quad (4.23d)$$

Do bài toán (4.23) có dạng bài toán tối ưu lồi chuẩn, với hàm mục tiêu (4.23a) là hàm tuyến tính, ràng buộc (4.23c) là hàm tuyến tính, ràng buộc (4.23d) là hàm lồi. Do

đó, bài toán có thể giải bằng cách sử dụng thư viện CVX [83]. Phương pháp phân bổ công suất tối ưu được đề xuất để giải bài toán (4.23) như trong bảng 4.2:

Bảng 4. 2: Tối ưu phân bổ công suất

Thuật toán 2: Phân bổ công suất tối ưu

Ngõ vào: $\mathbf{u}$, Φ , ζ , và khởi tạo $\mathbf{p}^{(0)}$, $\varepsilon = 10^{-3}$, số lần lặp tối đa để dừng thuật toán

$I_{max} = 20$.

for $m = 1$ to M

 Thiết lập giá trị $i = 0$

repeat

 Giải phương trình (4.23) tìm tập khả dụng $\mathbf{p}^{(i+1)}$;

 Cập nhật giá trị $i = i + 1$

until hàm mục tiêu trong (4.23) hội tụ hoặc $i \geq I_{max}$;

end for

Ngõ ra: các hệ số điều khiển công suất tối ưu $\mathbf{p}^*$

Trong bảng 4.2, biến $\mathbf{u}$ có giá trị nhị phân quyết định việc có giảm tải tính toán tác vụ từ người dùng hay không tương ứng với giá trị có giảm tải là 1, và chỉ tính toán cục bộ khi giá trị là 0. Ma trận dịch pha Φ ảnh hưởng đến kênh truyền được cố định, tài nguyên tính toán phân bổ tại MBS ζ được cố định. Giá trị ngưỡng hội tụ được cài đặt $\varepsilon = 10^{-3}$ và số lần lặp tối đa $I_{max} = 20$ để đảm bảo thuật toán không lặp vô tận. Vòng lặp *for* được sử dụng để tối ưu theo từng nhóm người dùng tương ứng từ 1 đến M . Trong vòng lặp *repeat* giá trị của biến $i = 0$ được thiết lập và sử dụng $\mathbf{p}^{(0)}$ để bắt đầu quá trình giải bài toán tối ưu (4.23) sử dụng công cụ CVX trả về giá trị $\mathbf{p}^{(i+1)}$, sau đó tăng giá trị $i + 1$. Quá trình được lặp lại cho đến khi thuật toán hội tụ theo điều kiện thay đổi giữa 2 lần lặp liên tiếp của hàm mục tiêu nhỏ hơn $\varepsilon = 10^{-3}$, hoặc đạt số lần lặp tối đa

$I_{max} = 20$. Ngõ ra là tập hợp các giá trị công suất tối ưu $\mathbf{p}^*$, gồm các giá trị tối ưu $\mathbf{p}^{(i+1)}$ cho tất cả nhóm người dùng.

4.3.2 Tối ưu hệ số dịch pha

Tương tự, khi các giá trị $\mathbf{p}$, $\mathbf{u}$, ζ cố định để tối ưu ma trận dịch pha RIS, biểu thức (4.16) có thể được viết lại như sau:

$$\min_{\Phi} \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} T_{m,k}^{tot}(\Phi_m) \quad (4.24a)$$

$$\text{s.t. (4.16c), (4.16d)} \quad (4.24b)$$

Bài toán tối ưu trong (4.24) là hàm không lồi với hàm mục tiêu (4.24a) và ràng buộc chất lượng dịch vụ QoS (4.24b) đều là hàm không lồi. Do đó, bài toán tối ưu (4.24) cần được biến đổi sang dạng lồi dựa trên biến đổi lồi hóa, sử dụng biến phụ, và nói lỏng ràng buộc đơn vị, để có thể dễ dàng tìm nghiệm tối ưu sử dụng công cụ hỗ trợ CVX. Với véc-tơ định dạng búp sóng phía phát cố định $(\mathbf{f}_{m,k}, \forall n = 1, 2, \dots, N, m \in \mathcal{M})$, ta cần tìm tập giá trị tối ưu các giá trị hệ số dịch pha của RIS. Cho các hệ số dịch pha của véc-tơ $\mathbf{v}_m = [\mathbf{v}_m^1, \dots, \mathbf{v}_m^N]^H$, trong đó $\mathbf{v}_m^n = e^{j\theta_{nm}}$, $(\forall n = 1, 2, \dots, N)$. Lúc này ràng buộc ở 4.16d là ràng buộc mô-đun đơn vị như sau $|\mathbf{v}_m^n|^2 = 1$. Đặt biến mới $\chi_{m,k} = \text{diag}(\mathbf{H}_{m,0}^H) \mathbf{H}_{m,k} \tilde{\mathbf{f}}_{m,k}$, kết quả là $\mathbf{H}_{m,0}^H \Phi_m \mathbf{H}_{m,k} \tilde{\mathbf{f}}_{m,k} = \mathbf{v}_m^H \chi_{m,k}$. Ta có thể áp dụng xấp xỉ trong (4.20) – (4.21), ta có được bất đẳng thức như sau:

$$R_{m,k}(\Phi_m) \geq \tilde{R}_{m,k}^{(i)}(\Phi_m), \forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}_m, \quad (4.25)$$

Trong đó,

$$\tilde{R}_{m,k}^{(i)}(\Phi_m) = W \left(\log_2 \left(1 + \frac{1}{\bar{y}} \right) + \frac{1}{1 + \bar{y}} - \frac{y}{(1 + \bar{y})\bar{y}} \right), \quad (4.26)$$

$$y = \frac{\sigma_0^2}{P_{m,k} p_{m,k} |\mathbf{v}_m^H \chi_{m,k}|^2},$$

$$\bar{y} = y^{(i)} = \frac{\sigma_0^2}{P_{m,k} p_{m,k} |\mathbf{v}_m^{H(i)} \chi_{m,k}|^2}$$

Đặt biến mới $\tilde{\mathbf{r}} \triangleq \{\tilde{r}_{m,k}\}$, ($\forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K}$) sao cho thỏa điều kiện $\frac{1}{R_{m,k}(\Phi_m)} \leq \tilde{r}_{m,k}$. Lúc này, hàm mục tiêu $T_{m,k}^{tot}(\tilde{r}_{m,k})$ được định nghĩa dựa trên điều kiện biên trên (upper-bound) như sau:

$$T_{m,k}^{tot}(\tilde{r}_{m,k}) \leq \tilde{T}_{m,k}^{tot}(\tilde{r}_{m,k}) = (1 - u_{m,k})T_{m,k}^l + u_{m,k}(\tilde{r}_{m,k}J_{m,k} + T_{m,k}^{com}), \quad (4.27)$$

từ đó, biểu thức (4.24) được viết lại tương đương như sau:

$$\min_{\mathbf{v}_m, \tilde{\mathbf{r}}, m \in \mathcal{M}} \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} \tilde{T}_{m,k}^{tot}(\tilde{r}_{m,k}) \quad (4.28a)$$

$$\text{s. t } \mathbf{v}_m^H \chi_{m,k} \chi_{m,k}^H \mathbf{v}_m \geq (2^{\bar{r}_0} - 1)/a_k, m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m, \quad (4.28b)$$

$$|\mathbf{v}_m^n|^2 = 1, \forall n = 1, 2, \dots, N, m \in \mathcal{M}, \quad (4.28c)$$

$$\frac{1}{\tilde{R}_{m,k}^{(i)}} \leq \tilde{r}_{m,k}, \quad m = 0, 1, \dots, M, \quad k \in \mathcal{K}_m \quad (4.28d)$$

Lúc này, ràng buộc ở (4.28b) sẽ tương đương với (4.16c), và $a_k = P_{m,k} p_{m,k} / \sigma_0^2$. Tuy nhiên, biểu thức (4.28) là dạng bài toán không lồi QCQP với ràng buộc chất lượng

dịch vụ QoS (4.28b) là ràng buộc bậc hai không lồi, ràng buộc (4.28c) tạo ra tập hợp không lồi, bài toán này không thể giải bằng cách sử dụng thư viện CVX. Chính vì vậy, đề đơn giản hơn bài toán tối ưu (4.28) có thể được biến đổi về dạng SDP, lần lượt đặt $\mathbf{X}_{m,k} = \chi_{m,k} \chi_{m,k}^H$ và $\mathbf{v}_m^H \mathbf{X}_{m,k} \mathbf{v}_m = \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^H) = \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \mathbf{V}_m)$, với $\mathbf{V}_m = \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^H$ phải thỏa điều kiện bán xác định dương $\mathbf{V}_m \geq 0$ và $\text{rank}(\mathbf{V}_m) = 1$ [31], [62]. Do đó, biểu thức (4.28) được biến đổi như sau:

$$\min_{\mathbf{v}_m, \tilde{\mathbf{r}}, m \in \mathcal{M}} \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} \tilde{T}_{m,k}^{tot}(\tilde{\mathbf{r}}_{m,k}), \quad (4.29a)$$

$$\text{s. t} \quad \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \mathbf{V}_m) \geq (2^{\bar{r}_0} - 1)/a_k, \quad m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m, \quad (4.29b)$$

$$\mathbf{V}_{m(n,n)} = \mathbf{I}, \forall n = 1, 2, \dots, N, m \in \mathcal{M}, \quad (4.29c)$$

$$\mathbf{V}_m \geq 0, \quad (4.29d)$$

$$\frac{1}{\tilde{R}_{m,k}^{(i)}} \leq \tilde{\mathbf{r}}_{m,k}, \quad m = 0, 1, \dots, M, \quad k \in \mathcal{K}_m, \quad (4.29e)$$

Với $y = \frac{\sigma_0^2}{P_{m,k} p_{m,k} \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \mathbf{V}_m)}$. Biểu thức (4.29) là bài toán lồi lập trình bán xác định SDP [31] [49], bài toán này có thể được giải dựa vào các bộ công cụ của CVX. Trong Thuật toán 3, phương pháp giảm tọa độ khối được đề xuất để giải bài toán tìm hệ số dịch pha tối ưu trong biểu thức (4.29).

Bảng 4. 3: Tối ưu hệ số dịch pha

Thuật toán 3: Tìm hệ số dịch pha tối ưu

Ngõ vào:

Cài đặt giá trị u , ζ , $\mathbf{p}$, và khởi tạo $\mathbf{f}_{m,k}^{(0)}$

Cài đặt giá trị sai số $\varepsilon = 10^{-3}$, số lần lặp tối đa $I_{max} = 20$ để dừng thuật toán

for $m = 1$ to M do

 Cài đặt $i = 0$

repeat

 Giải bài toán (4.29) tìm tập khả dụng $\Phi_m^{(i+1)}$

 Cập nhật giá trị $f_{m,k}^{(i+1)}$, $i = i + 1$

until hàm mục tiêu trong (4.29) hội tụ hoặc $i > I_{max}$

end for

Ngõ ra: Φ_M^*

Trong Bảng 4.3, bài toán SDP được giải dựa trên phương pháp giảm tọa độ khối để tìm hệ số dịch pha tối ưu. Với ngõ vào lần lượt gồm u , ζ , $\mathbf{p}$ được thiết lập cố định, khởi tạo giá trị ban đầu $f_{m,k}^{(0)}$, và điều kiện để dừng thuật toán đề xuất $\varepsilon = 10^{-3}$ hoặc $I_{max} = 20$. Tương tự như thuật toán 2, trong thuật toán 3 bài toán cũng được thực hiện theo từng nhóm người dùng. Trong vòng lặp *repeat* bài toán SDP (4.29) được giải sử dụng công cụ CVX để tìm ra giá trị tối ưu $\Phi_m^{(i+1)}$. Thuật toán dừng khi đạt điều kiện hội tụ hoặc số lần lặp tối đa. Ngõ ra của thuật toán là ma trận cấu hình pha tối ưu cho các phân tử phản xạ của RIS.

4.3.3 Tối ưu giảm tải quá trình tính toán

Tối ưu phân bổ tài nguyên tính toán ζ với các giá trị tối ưu của $\mathbf{p}$, $\mathbf{u}$, Φ có được từ các bài toán tối ưu con được mô tả trong các nội dung trước, biểu thức (4.16) có thể được viết lại như sau:

$$\min_{\zeta} \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} T_{m,k}^{tot}(\zeta_{m,k}^{bs}) \quad (4.30a)$$

$$\text{s.t} \quad (4.16\text{e})$$

$$(4.30\text{b})$$

Vì hàm mục tiêu trong bài toán (4.30) là hàm lồi và ràng buộc tại biểu thức (4.16e) cũng là một hàm lồi theo biến ζ , bài toán được xác định là một bài toán tối ưu lồi. Do đó, bài toán có thể được chuyển về dạng lồi chuẩn và giải bằng thư viện CVX trên Matlab. Việc sử dụng CVX trong trường hợp này cho phép bảo đảm rằng nghiệm thu được là nghiệm tối ưu toàn cục của bài toán đã cho. Quá trình giải được thực hiện thông qua một phương pháp lặp, nhằm tìm ra phương án phân bổ công suất tối ưu cho các thiết bị đầu cuối trong hệ thống IoT và máy chủ MEC. Nhờ tính chất lồi của bài toán, quá trình lặp đảm bảo hội tụ đến nghiệm tối ưu toàn cục.

Bảng 4.4 Thuật toán tối ưu lặp

Thuật toán 4: Thuật toán tối ưu lặp giải bài toán (4.16)

Ngõ vào:

Cài đặt giá trị $\mathbf{u}$, Φ , ζ và khởi tạo $\mathbf{p}^{(0)}$, $\mathbf{f}_{m,k}^{(0)}$, $\zeta^{(0)}$

Cài đặt giá trị $\varepsilon = 10^{-3}$, số lần lặp tối đa $I_{max} = 20$ để dừng thuật toán

Cài đặt giá trị $j = 0$

Lặp lại:

Giải (4.23), tập khả dụng $\mathbf{p}^{(j+1)}$

Giải (4.29), tập khả dụng $\mathbf{f}_{m,k}^{(i+1)}$

Giải (4.30), tập khả dụng $\zeta^{(j+1)}$

Cập nhật giá trị $j = j + 1$

Cho đến khi hàm mục tiêu trong (4.23), (4.29), và (4.30) hội tụ hoặc $j > I_{max}$

Ngõ ra: $\mathbf{p}^*$, $\mathbf{f}_{m,k}^*$, ζ^*

Cuối cùng, bài toán tối ưu lặp được đề xuất để xác định đồng thời các giá trị phân bổ công suất tối ưu, tìm kiếm hệ số dịch pha và giảm tải tính toán. Trong Thuật toán 4,

ngõ vào lần lượt được khởi tạo $\mathbf{p}^{(0)}$, $\mathbf{f}_{m,k}^{(0)}$, và $\zeta^{(0)}$ là các giá trị ban đầu để thực hiện tối ưu với giá trị chỉ số lần lặp $j = 0$, và điều kiện để thuật toán dừng khi đạt số lần lặp tối đa $I_{max} = 20$ hoặc hiệu số của hàm mục tiêu giữa hai lần lặp liên tiếp nhỏ hơn $\varepsilon = 10^{-3}$. Trong vòng lặp *repeat* lần lượt công cụ CVX được sử dụng để giải (4.23) để tối ưu công suất trả về giá trị $\mathbf{p}^{(j+1)}$, (4.29) để tối ưu hệ số dịch pha RIS trả về giá trị $\mathbf{f}_{m,k}^{(i+1)}$, và (4.30) để tối ưu tài nguyên tính toán trả về giá trị $\zeta^{(j+1)}$. Kết quả của quá trình thực hiện tối ưu được ở mỗi vòng lặp sẽ là điểm khởi tạo cho vòng lặp tiếp theo. Ngõ ra của Thuật toán 4 là các giá trị tối ưu $\mathbf{p}^*$, $\mathbf{f}_{m,k}^*$, ζ^* .

4.4 Sự hội tụ và độ phức tạp tính toán của phương pháp đề xuất

Bài toán (4.16) cực tiểu tổng độ trễ bằng cách tối ưu công suất truyền $\mathbf{p}$, dịch pha RIS Φ và tài nguyên MEC ζ dưới các ràng buộc QoS và tài nguyên. Do tính không lồi (đặc biệt ở khối RIS), phương pháp tối ưu luân phiên theo từng bài toán con được áp dụng. Tại vòng lặp i , thuật toán lần lượt giải khối công suất thông qua bài toán (4.23) với xấp xỉ lồi của (4.18) - (4.21), khối pha của phần tử phản xạ RIS thông qua bài toán SDP (4.29) được chuyển từ QCQP (4.24) bằng kỹ thuật SDP với $\mathbf{V}_m = \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m^H$, và khối MEC thông qua bài toán (4.30). Thuật toán dừng khi thay đổi hàm mục tiêu nhỏ hơn $\varepsilon = 10^{-3}$, số lần lặp tối đa $I_{max} = 20$.

Đặt hàm mục tiêu tổng độ trễ là $\mathcal{F}(\mathbf{p}, \Phi, \zeta)$, với nghiệm tối ưu của từng bài toán con ở vòng lặp i là $\bar{\mathbf{p}}, \bar{\Phi}, \bar{\zeta}$, nhờ đặc tính của xấp xỉ SCA trong bài toán (4.23), ta có $\mathcal{F}(\mathbf{p}^{(i)}, \Phi^{(i)}, \zeta^{(i)}) \geq \mathcal{F}(\bar{\mathbf{p}}, \Phi^{(i)}, \zeta^{(i)})$. Tương tự, tối ưu bài toán con cho RIS (4.29) và bài toán con cho MEC (4.30), ta có được $\mathcal{F}(\bar{\mathbf{p}}, \Phi^{(i)}, \zeta^{(i)}) \geq \mathcal{F}(\bar{\mathbf{p}}, \bar{\Phi}, \zeta^{(i)}) \geq \mathcal{F}(\bar{\mathbf{p}}, \bar{\Phi}, \bar{\zeta})$. Khi cập nhật giá trị $(\mathbf{p}^{(i+1)}, \Phi^{(i+1)}, \zeta^{(i+1)}) = (\bar{\mathbf{p}}, \bar{\Phi}, \bar{\zeta})$, ta có được $\mathcal{F}(\mathbf{p}^{(i+1)}, \Phi^{(i+1)}, \zeta^{(i+1)}) \leq \mathcal{F}(\mathbf{p}^{(i)}, \Phi^{(i)}, \zeta^{(i)})$, tức là giá trị hàm mục tiêu giảm đơn điệu qua các vòng lặp. Do miền khả thi đóng và bị chặn (do $0 \leq p_{m,k} \leq 1$, $|\mathbf{v}_m^n|^2 = 1$,

$\sum u_{m,k} \zeta_{m,k}^{bs} \leq \zeta_{max}$), dãy $\mathcal{F}(\mathbf{p}^{(i)}, \mathbf{\Phi}^{(i)}, \mathbf{\zeta}^{(i)})$ hội tụ và mọi điểm giới hạn của dãy $(\mathbf{p}^{(i)}, \mathbf{\Phi}^{(i)}, \mathbf{\zeta}^{(i)})$ là điểm tĩnh của bài toán nói lỏng ràng buộc $rank(\mathbf{V}_m) = 1$ trong (4.29) [111].

Về độ phức tạp tính toán, với M tương ứng với số nhóm người dùng, K người dùng trong mỗi, N số phần tử phản xạ của RIS. bài toán (4.23) $\mathcal{O}(MK)$ (bao gồm cả $r_{m,k}$) và độ phức tạp của phương pháp điểm nội là $\tilde{\mathcal{O}}((MK))^3$. Bài toán con cho RIS (4.29) chứa biến là ma trận xác định dương từng phần, $\mathbf{V}_m \in \mathbb{C}^{N \times N}$ nên số ẩn là $\mathcal{O}(N^2)$, và với MK ràng buộc vết. Độ phức tạp tính toán để giải bài toán SDP tổng quát là $\tilde{\mathcal{O}}(MKN^6)$ và thường chi phối khi N lớn. Bài toán MEC (4.30) có độ phức tạp tương đương $\tilde{\mathcal{O}}((MK)^3)$ Do đó, độ phức tạp tính toán mỗi vòng lặp là $\tilde{\mathcal{O}}(MKN^6)$ và tổng độ phức tạp tính toán khi thuật toán hội tụ sau I vòng lặp (thực tế giới hạn bởi $I_{max} = 20$): $\tilde{\mathcal{O}}(I.MKN^6)$. Việc lưu trữ các ma trận SDP $\{\mathbf{V}_m\}$ chiếm phần lớn dung lượng bộ nhớ, có kích thước $\mathcal{O}(MN^2)$ [84, 112].

4.5 Kết quả mô phỏng

Mô phỏng được thực hiện trên phần mềm Matlab với sử dụng công cụ CVX và các thông số mô phỏng được thiết lập như trong Bảng 4.4, để kiểm chứng bài toán tối ưu tổng độ trễ mạng sau khi được biến đổi thành các bài toán con (4.23), (4.29), và (4.30). Trong đó, kết quả mô phỏng so sánh phương pháp đề xuất với trường hợp không áp dụng tối ưu. Cụ thể, kết quả so sánh gồm mô hình đề xuất (proposed scheme) và mô hình không tối ưu (conventional scheme). Trong đó, mô hình đề xuất là kết hợp tối ưu phân bổ công suất, tối ưu hệ số dịch pha, và tối ưu giảm tải tính toán dựa trên phân bổ tài nguyên tính toán của MBS. Mô hình không tối ưu với công suất được phân bổ đến người dùng tại các nhóm là như nhau, các phần tử phản xạ ngẫu nhiên tín hiệu đến, và không xem xét đến tối ưu phân bổ tài nguyên tính toán của MBS. Trong đó, các thông số về

tổng độ trễ của mạng được xem xét bằng tổng độ trễ của tất cả người dùng trong hệ thống.

Trạm thu phát gốc đa ăng-ten MBS được giả định đặt tại tâm của một khu vực hình tròn, phục vụ người dùng trong bán kính 500 m thông qua kết nối trực tiếp. Đồng thời, giả sử rằng sẽ cần phục vụ những người dùng cách xa đến 2000m tính từ MBS. Trong kịch bản được xem xét này, tọa độ Cartesian 3D của MBS là (0, 0, 30), trong khi tất cả các thiết bị người dùng UE được phân bố ngẫu nhiên trong toàn bộ khu vực bao phủ của trạm thu phát gốc MBS. Giả sử UAV được trang bị RIS bay trong khu vực bao phủ với độ cao trong khoảng (H^{min}, H^{max}) từ 50m đến 150 m. Trong đó, các tham số truyền dẫn vật lý, và thông số mô hình kênh truyền được tham khảo từ [37], mỗi UE có thể sử dụng tối đa $P_{m,k}^{max} = 30 \text{ dBm}$ cho các đường lên (uplink) qua kênh truyền có tần số trung tâm $f_c = 2.4 \text{ GHz}$, băng thông $W = 1 \text{ MHz}$ và chịu ảnh hưởng của nhiễu Gauss trắng cộng $\sigma^2 = -130 \text{ dBm/Hz}$.

Về yêu cầu chất lượng dịch vụ QoS, tốc độ tối thiểu có thể đạt được cho mỗi UE trong đường lên được đặt ở mức $\bar{r}_0 = 1 \text{ Mbps}$. Giả sử rằng mỗi UE cần thực hiện công việc tính toán, có thể là tại chỗ hoặc tại MBS, với kích thước $D_m = 100 \text{ kB}$ và độ phức tạp tính toán nội bộ là $\mathcal{F}_{m,k} = 600 \text{ cycle/bit}$. Tài nguyên tính toán tối đa (tần số chu kỳ CPU) của máy chủ MEC và các UE lần lượt là $\zeta_{max} = 30 \text{ Giga Cycles/s}$ và $c_{m,k} = 0.5 \text{ Giga Cycle/s}$ [43].

Dựa trên những giả thuyết được đặt ra, mô phỏng được tiến hành để đánh giá hiệu suất của phương pháp tối ưu được đề xuất so với phương pháp không tối ưu như đã trình bày, theo hai tiêu chí sau: (1) khả năng giảm thiểu tổng độ trễ mạng, được định nghĩa bởi $\sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} T_{m,k}^{tot}$; và (2) khả năng giảm thiểu độ trễ tổng trong trường hợp xấu nhất, được định nghĩa bởi $\sum_{m=0}^M \max_{k \in \mathcal{K}_m} \{T_{m,k}^{tot}\}$. Hai tiêu chí (1) và (2) được sử dụng để so sánh

một cách toàn diện hiệu năng của các phương pháp trong các kịch bản mô phỏng với các thông số được giả sử khác nhau, cả về mặt hiệu suất trung bình và khả năng đảm bảo chất lượng dịch vụ trong điều kiện bất lợi.

Bảng 4. 4: Các thông số sử dụng mô phỏng

STT	Thông số	Giá trị
1	Số trạm gốc MBS	1
2	Bán kính vùng bao phủ gần	500m
3	Bán kính vùng bao phủ xa	2000m
4	Vị trí của MBS	(0,0,30)
5	Độ cao UAV (H^{min}, H^{max})	(50,150)m
6	Tần số sóng mang	2.4GHz
7	Băng thông kênh truyền	1 MHz
8	Công suất phát cực đại $P_{m,k}$	30 dBm
9	Ngưỡng QoS	$\bar{r}_0 = 1$ Mbps
10	Mật độ phổ công suất nhiễu trắng	$\sigma^2 = -130 \frac{dBm}{Hz}$
11	Kích thước của tác vụ được giảm tải [113]	$D_m = 100$ kB
12	Độ phức tạp của tác vụ giảm tải [113]	$\mathcal{F}_{m,k} = 600 \frac{cycles}{bit}$
13	Tài nguyên tính toán tối đa của MEC [113]	$\zeta_{max} = 30$ Giga $\frac{cycles}{s}$
14	Tài nguyên tính toán tối đa của UE [113]	$c_{m,k} = 0.5$ Giga $\frac{cycles}{s}$

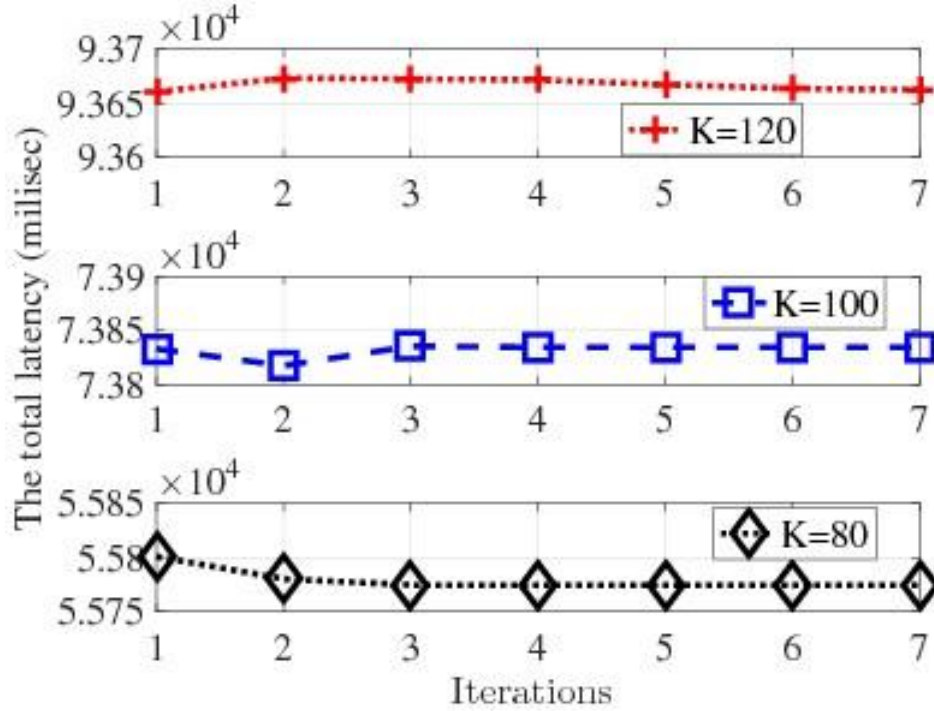
4.4.1 Phân tích độ hội tụ

Các đặc điểm hội tụ của phương pháp tối ưu đề xuất được đánh giá bằng cách thay đổi số lượng người dùng trong mô hình truyền thông MEC với kịch bản được xem

xét như trong Hình 4.2. Nhìn chung, xu hướng tổng độ trễ trong ba trường hợp với số lượng người dùng lần lượt $K = 80$, $K = 100$, và $K = 120$ giảm dần qua mỗi lần lặp, điều này hoàn toàn phù hợp với đặc điểm của phương pháp giảm tọa độ khối khi hàm mục tiêu giảm dần và hội tụ tại điểm dừng. Rõ ràng, khi số lượng người dùng tăng lên, tương ứng với các biến cần tối ưu cũng tăng lên, tức là số lượng cụm, hệ số công suất tại trạm gốc (MBS), các bộ hệ số dịch pha tối ưu và phương thức tính toán tối ưu tại máy chủ MEC. Cụ thể, $K = 80$ độ trễ giảm từ $5.58 \times 10^4 ms$ xuống khoảng $5.5775 \times 10^4 ms$ và đạt ổn định sau ba lần lặp; tương tự với giá trị $K = 100$ độ trễ cũng đạt xấp xỉ $3.85 \times 10^4 ms$ sau ba lần lặp và ổn định; tuy nhiên với $K = 120$ thuật toán cần sáu lần lặp để đạt được ổn định tại giá trị $9.367 \times 10^4 ms$. Nguyên nhân như đã đề cập trước đó, việc tăng số lượng người dùng tương ứng với việc tăng số biến tối ưu, điều này đòi hỏi nhiều thời gian hơn để thuật toán hội tụ.

Mặt khác, ta cũng dễ dàng nhận thấy rằng việc tăng số lượng người dùng cũng tương ứng với việc tăng tổng độ trễ cho người dùng ở trường hợp xấu nhất. Điều này có thể giải thích bởi thực tế với một lượng tài nguyên phục vụ cho truyền thông cố định tại MBS và tài nguyên tính toán tại MEC, nếu càng nhiều người dùng giảm tải tác vụ đến máy chủ MEC thì tài nguyên được phân bổ cho mỗi người dùng sẽ càng ít, từ đó yêu cầu nhiều thời gian hơn tại máy chủ MEC để nhận tác vụ, hoàn thành và truyền lại cho người dùng. Ngoài ra, trong bài toán đề xuất các biến tối ưu có sự liên kết lẫn nhau, điều này khiến cho không gian nghiệm sẽ mở rộng hơn khi tăng số lượng người dùng. Chính vì vậy, thuật toán đòi hỏi nhiều vòng lặp hơn để đạt được nghiệm tối ưu. Điều này cũng làm cho thời gian hội tụ của thuật toán bị kéo dài, vì phải điều chỉnh nhiều tham số hơn để đảm bảo hiệu quả sử dụng tài nguyên và chất lượng dịch vụ QoS cho tất cả các người dùng. Do đó, việc mở rộng quy mô hệ thống người dùng không chỉ làm gia tăng độ trễ mà còn tạo ra sự đánh đổi về tài nguyên giữa các người dùng, dẫn đến phải xem xét đến

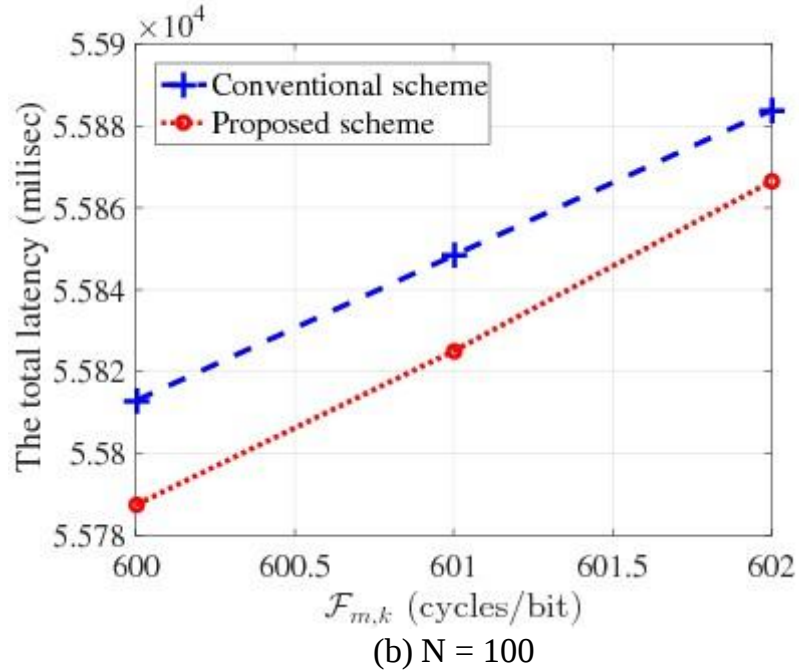
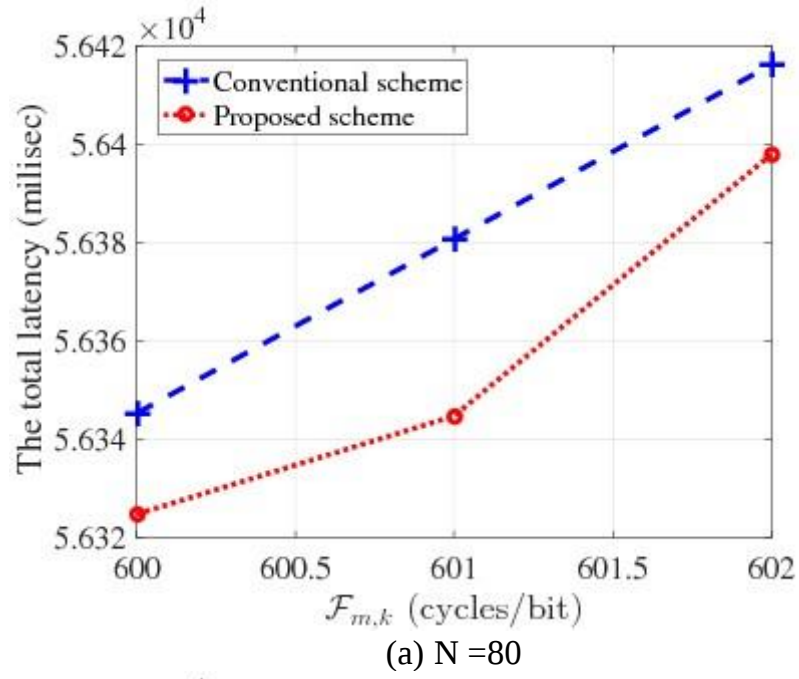
sự tương nhượng trong việc duy trì sự phân bổ tài nguyên hiệu quả và đảm bảo QoS đồng đều trong toàn hệ thống.



Hình 4. 2 Độ hội tụ của phương pháp đề xuất khi số người dùng K thay đổi

4.4.2 Tổng độ trễ của của người dùng UE trong hệ thống với độ phức tạp tính toán $\mathcal{F}_{m,k}$ thay đổi.

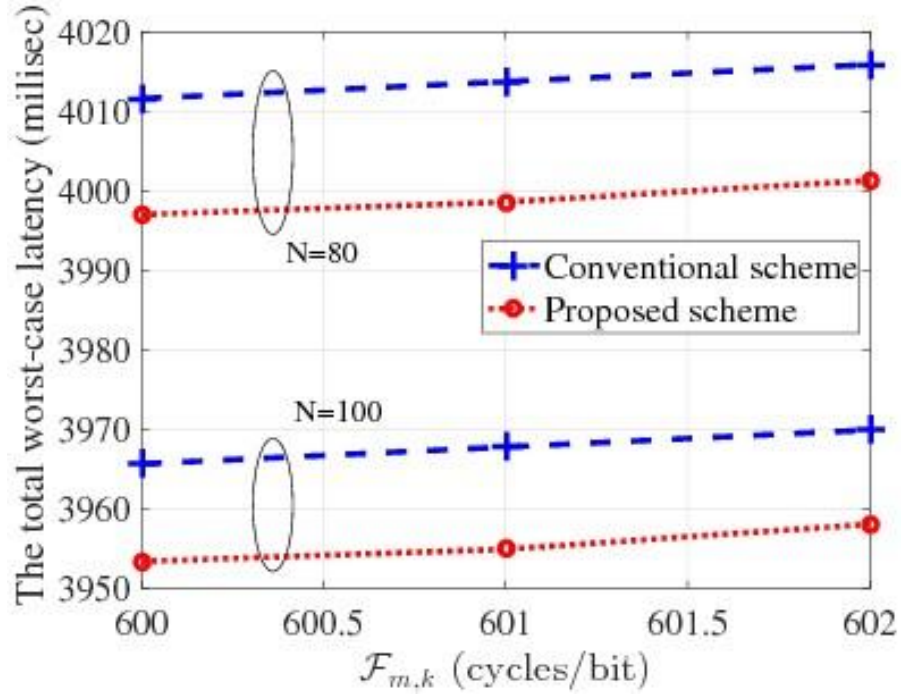
Hình 4.3 minh họa tổng độ trễ của tất cả các người dùng UE với các giá trị khác nhau của $\mathcal{F}_{m,k}$, trong bối cảnh $K = 80$ và $\zeta_{max} = 30$ Giga cycle /s. Tổng độ trễ được đánh giá dựa trên các giá trị khác nhau của chu kỳ CPU, $\mathcal{F}_{m,k}$, thay đổi từ 600 đến 602 cycles/bit, với số lượng phần tử phản xạ của mặt phản xạ thông minh RIS lần lượt là $N = 80$ và $N = 100$ phần tử.



Hình 4. 3: Tổng độ trễ mạng với các mô hình phân bổ tài nguyên khác nhau $\mathcal{F}_{m,k}$, với $K = 80, \zeta_{max} = 30 \text{ Giga cycles/s}$.

Cụ thể, Hình 4.3(a) và 4.3(b) cho thấy hiệu suất của phương pháp đề xuất so với phương pháp không tối ưu về tổng độ trễ của mạng. Chẳng hạn, với $N = 80$ và $\mathcal{F}_{m,k} =$

600, tổng độ trễ của phương pháp đề xuất là $5.632 \times 10^4 ms$, trong khi của sơ đồ truyền thống là $5.635 \times 10^4 ms$. Hơn nữa, khi số lượng phần tử phản xạ tăng lên, tổng độ trễ của mạng sẽ giảm xuống. Đáng lưu ý rằng những kết quả này chỉ hợp lệ trong khoảng các phần tử phản xạ được xem xét và không phải là quy tắc chung [44].



Hình 4. 4: Tổng độ trễ mạng trong trường hợp xấu nhất theo các mô hình phân bố tài nguyên khác nhau $\mathcal{F}_{m,k}$, với $K = 80, \zeta_{max} = 30 Giga cycles/s$.

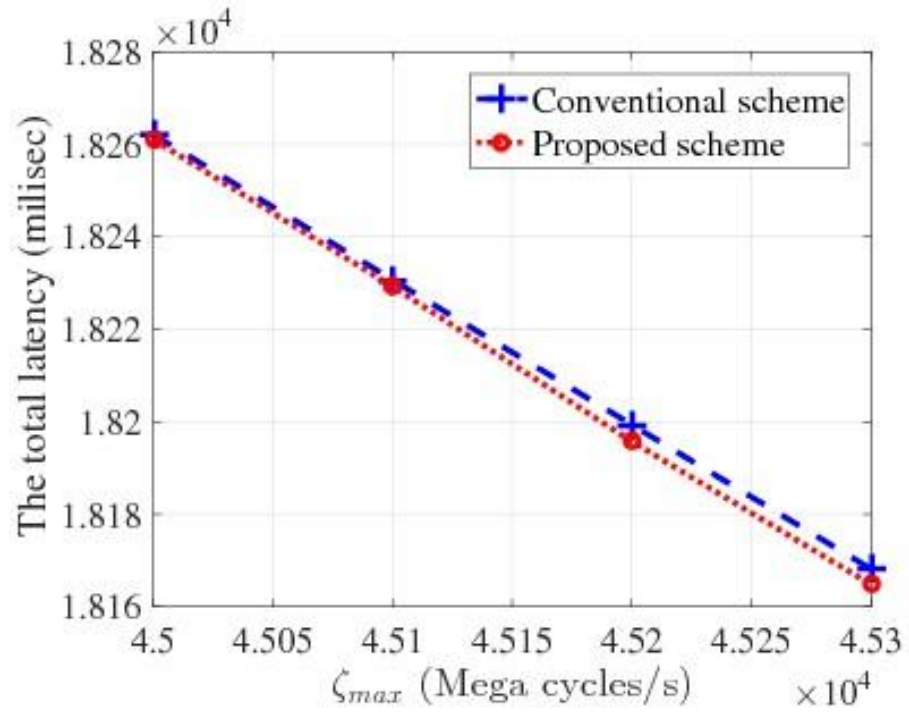
Ngoài ra, trong Hình 4.4, tổng độ trễ được đánh giá trong trường hợp xấu nhất với các giá trị khác nhau của chu kỳ CPU, $\mathcal{F}_{m,k}$. Từ kết quả mô phỏng trên cho thấy, tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất tăng lên cùng với số chu kỳ CPU cần thiết để tính toán mỗi bit của tác vụ, tức là độ phức tạp của tác vụ cần tính toán. Do đó, các UEs cần giảm tải tính toán cục bộ của mình đến máy chủ MEC để giảm độ trễ.

Bằng cách thực hiện phân bổ công suất, hệ số dịch pha và giảm tải tính toán một cách tối ưu, phương pháp đề xuất có thể cung cấp hiệu suất tốt hơn so với phương pháp

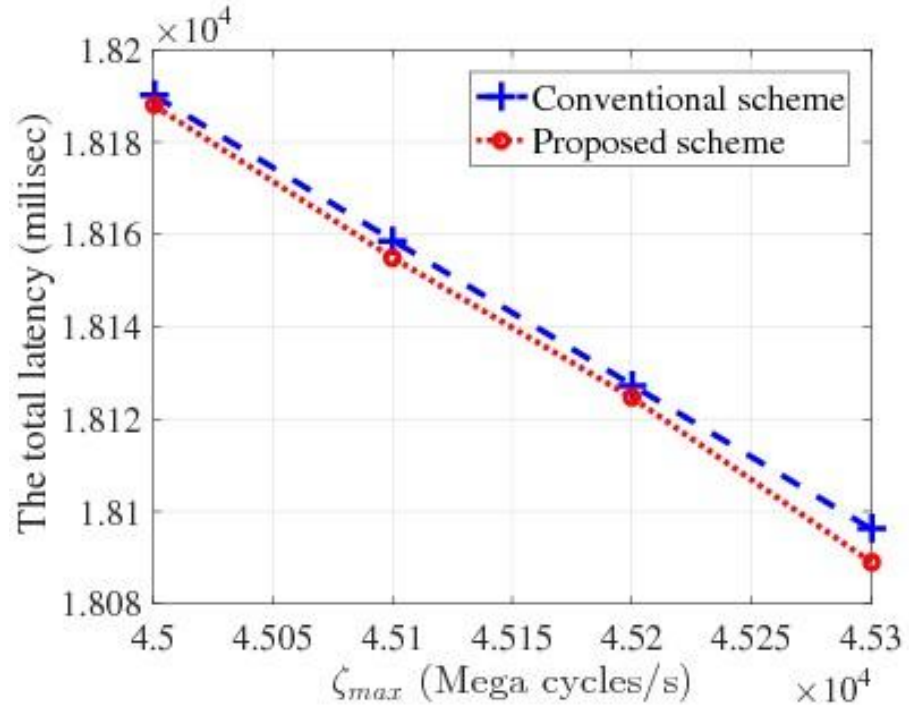
truyền thông về tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất. Mặt khác, khi $\mathcal{F}_{m,k}$ tăng từ 600 lên 602 Giga chu kỳ/s, với $N = 80$, tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất của phương pháp đề xuất tăng từ khoảng 3997 ms lên 4001 ms, trong khi với $N = 100$, tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất tăng từ khoảng 3953 ms lên 3958 ms. Điều này cho thấy, việc tăng số lượng phần tử RIS trong khoảng xem xét mang lại cải thiện hiệu suất hệ thống về việc giảm độ trễ.

4.4.3 Tổng độ trễ của người dùng UE trong hệ thống với tài nguyên tính toán tối đa của máy chủ MEC ζ_{max} .

Trong Hình 4.5, tổng độ trễ của mạng được đánh giá và so sánh với phương pháp khác trong một khoảng khả năng tính toán của MBS (Mega Cycle/s), ζ_{max} . Số lượng người dùng UE và chu kỳ CPU được thiết lập lần lượt là $K = 80$ và $\mathcal{F}_{m,k} = 600 \text{ cycles/bit}$. Đồng thời, số phần tử phản xạ của RIS, N được xem xét với hai giá trị khác nhau là 80 và 100 phần tử nhằm phân tích ảnh hưởng của số lượng phần tử phản xạ của mặt phản xạ thông minh RIS đến tổng độ trễ. Rõ ràng, kết quả cho thấy việc tăng số lượng phần tử phản xạ của RIS và khả năng tính toán của MBS giúp cải thiện rõ rệt tổng độ trễ của mạng. Quan sát cho thấy tổng độ trễ giảm khi khả năng tính toán của MBS, ζ_{max} , tăng lên. Cụ thể, với $N = 80$, khi khả năng tính toán của MBS tăng từ 4.5×10^4 (ms) lên 4.53×10^4 (ms), tổng độ trễ giảm từ 1.826×10^4 (ms) xuống 1.816×10^4 (ms). Tương tự, với $N = 100$, tổng độ trễ tiếp tục giảm từ 1.819×10^4 (ms) xuống còn 1.809×10^4 (ms) khi ζ_{max} tăng trong cùng khoảng giá trị. Kết quả này cho thấy rõ ràng rằng việc tăng số lượng phần tử phản xạ của mặt phản xạ thông minh RIS góp phần cải thiện hiệu quả truyền thông và giảm tổng độ trễ, đặc biệt khi được kết hợp với khả năng xử lý tính toán cao hơn tại MBS. Điều này khẳng định tính hội tụ tốt và hiệu quả tính toán của phương pháp đề xuất, đồng thời chứng minh tính khả thi khi triển khai trong các hệ thống thực tế yêu cầu độ trễ thấp, khả năng mở rộng linh hoạt và tài nguyên tính toán hạn chế.

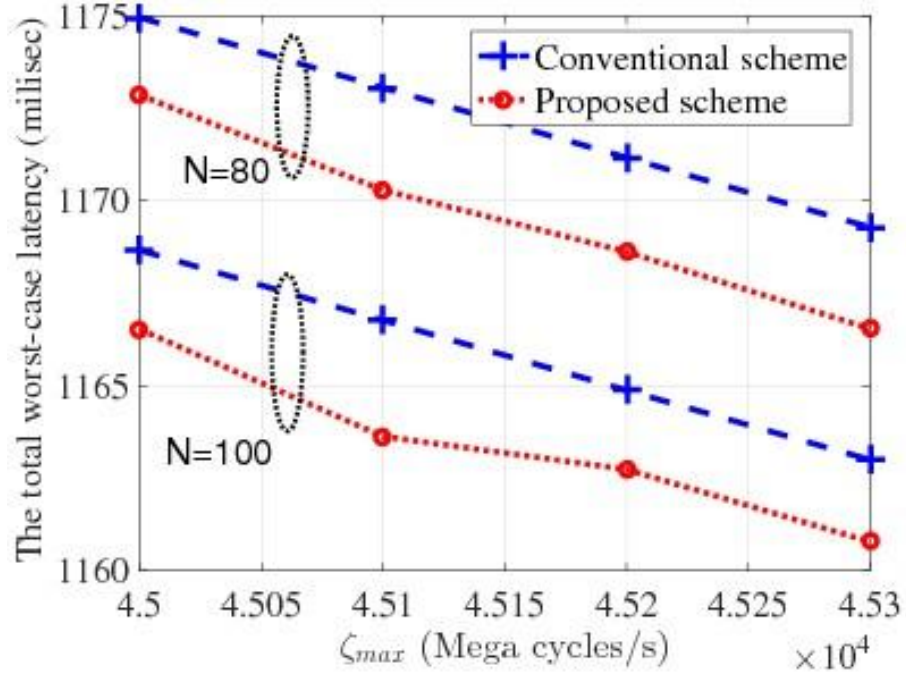


(a) $N = 80$



(b) $N = 100$

Hình 4. 5 Tổng độ trễ mạng theo các mô hình phân bổ tài nguyên khác nhau với giá trị ζ_{max} thay đổi $K = 80, \mathcal{F}_{m,\ell} = 600 \text{ cycles/bit}$



Hình 4. 6 Tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất với $K = 80, \mathcal{F}_{m,k} = 600 \text{ cycles/bit}$ và giá trị ζ_{max} thay đổi

Mặt khác, trong kết quả mô phỏng ở Hình 4.6 những ưu điểm của phương pháp đề xuất cho hệ thống MEC hỗ trợ UAV-RIS về tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất. Có thể thấy rằng, tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất giảm đáng kể khi khả năng tính toán tăng lên. Quan trọng hơn, phương pháp đề xuất luôn đạt hiệu suất độ trễ tốt hơn so với tiêu chuẩn. Điều này lại một lần nữa chứng minh hiệu quả của phương pháp tối ưu hóa đề xuất, tức là phân bổ công suất tối ưu đồng thời, dịch pha và giảm tải tính toán cho hệ thống MEC hỗ trợ UAV-RIS.

4.4.4 Tóm tắt kết quả mô phỏng

Dựa trên những kết quả mô phỏng và thảo luận về tổng độ trễ của hệ thống trong các trường hợp độ phức tạp tính toán thay đổi và khả năng tính toán khác nhau, phương pháp tối ưu hóa đề xuất có khả năng đạt hiệu suất cao hơn về việc giảm độ trễ mạng so

với phương pháp thực hiện truyền thống, khi không thực hiện phân bổ công suất tối ưu tại MBS cũng như tối ưu hóa các hệ số dịch pha cho RIS.

Thực tế, phương pháp tối ưu hóa đề xuất đã được thử nghiệm trong các cấu hình khác nhau bằng cách thay đổi các tham số ảnh hưởng chính của các kịch bản truyền thông đã xem xét, chẳng hạn như số lượng phân tử phản xạ N tại RIS, độ phức tạp tính toán của tác vụ $\mathcal{F}_{m,k}$ mà mỗi người dùng yêu cầu, và tần số CPU tại máy chủ MEC ζ_{max} . Dựa trên các kết quả thu được có thể khẳng định một số điểm chính của nghiên cứu như sau:

- Trong tất cả các kịch bản đã xem xét, phương pháp tối ưu đề xuất có thể tìm ra các cấu hình tối ưu cho phân bổ công suất tại MBS và các hệ số dịch pha cho RIS, cũng như đường đi tối ưu cho UAV, cho phép đạt được mức độ trễ truyền thông thấp hơn, đồng thời đảm bảo các yêu cầu chất lượng dịch vụ (QoS) cho từng người dùng trong mạng.

- Có giá trị minh chứng rõ ràng rằng độ trễ truyền thông tăng lên khi độ phức tạp của tác vụ $\mathcal{F}_{m,k}$ tăng, trong khi đó giảm khi số lượng N của các phân tử RIS hoặc tần số CPU tại máy chủ MEC ζ_{max} tăng. Trong mọi trường hợp, phương pháp đề xuất có thể đạt được phân bổ tài nguyên tối ưu, tối thiểu tổng độ trễ truyền thông.

- Đối với kịch bản đã xem xét, khung tối ưu hóa đề xuất cũng có thể cung cấp mức độ trễ truyền thông thấp hơn cho người dùng trong trường hợp xấu nhất. Điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc sử dụng UAV được trang bị tấm RIS và tối ưu hóa đồng thời đường đi của UAV, phân bổ công suất tại MBS, và các hệ số dịch pha cho các phân tử phản xạ, như một giải pháp mạnh mẽ để thúc đẩy triển khai các dịch vụ định hướng 6G với yêu cầu độ trễ thấp.

Bên cạnh đó, trong bảng 4.5 cho thấy so sánh độ hiệu quả của phương pháp đề xuất với các nghiên cứu khác lần lượt [114, 115, 116, 117] với các hàm mục tiêu và các thông số tối ưu, ràng buộc khác nhau. Ngoài ra, do điều kiện thiết lập ban đầu cho bài toán tối ưu là hoàn toàn khác nhau, và các hàm mục tiêu được thiết kế khác nhau, nên việc so sánh được đánh giá dựa trên số lần lặp để so sánh độ ổn định của thuật toán là phù hợp nhất. Kết quả cho thấy phương pháp đề xuất có độ hội tụ tốt với số lần lặp tương ứng là 3 lần, và các nghiên cứu còn lại cần số lần lặp nhiều hơn để đạt được độ ổn định của thuật toán.

Bảng 4. 5 So sánh độ hội tụ của phương pháp đề xuất và một số kết quả nghiên cứu khác

TLTK	Mục tiêu tối ưu	Thông số	Hội tụ (lần lặp)
[114]	Tối thiểu tổng độ trễ hệ thống (<i>ms</i>)	Tối ưu phân bổ công suất từng người dùng, liên kết người dùng, dịch pha của RIS, và phân bổ tài nguyên tính toán MBS.	3
[115]	Tối thiểu độ trễ hệ thống trong trường hợp xấu nhất (<i>s</i>)	Tối ưu vị trí, phân bổ tài nguyên, phân đoạn tác vụ. Tối ưu công suất truyền, vec-tơ định dạng búp sóng thu, hệ số dịch pha của RIS	5
[116]	Tối đa hiệu quả tính toán bảo mật (<i>Bits/Joule</i>)	Tối ưu hiệu năng lượng tiêu thụ, vị trí của UAV, số lượng phần tử RIS.	6
[117]	Tối đa tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR	Tối ưu lựa chọn RIS và định dạng búp sóng, tối ưu lượng tính toán, và dịch pha của RIS.	30

4.6 Kết luận

Trong nội dung chương này, một hệ thống MEC được xem xét gồm một trạm gốc MIMO cỡ lớn, phục vụ M nhóm người dùng với sự hỗ trợ của UAV được trang bị RIS nhằm nâng cao vùng phủ sóng của toàn bộ hệ thống truyền thông. Với giả thuyết như trên, bài toán cực tiểu tổng độ trễ trong việc thực hiện các tác vụ của tất cả người dùng trong hệ thống được đề xuất. Cụ thể hơn, biểu thức cực tiểu độ trễ cho tất cả UE bằng cách tối ưu đồng thời phân bổ công suất cho người dùng, sự liên kết của người dùng, hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ trên RIS, và phân bổ tài nguyên tính toán tại MBS, với điều kiện là đảm bảo QoS và khả năng tính toán của MBS.

Bên cạnh đó, quỹ đạo của UAV cũng được xem xét đến nhằm tiết kiệm tổng thời gian bay qua M điểm dừng tương ứng với M nhóm người dùng UE để giảm tải tác vụ tính toán. Hiệu quả của phương pháp đề xuất đã được đánh giá thông qua các kết quả mô phỏng, điều này cho thấy phương pháp đề xuất tốt hơn trong việc giảm tổng độ trễ của mạng và tổng độ trễ trong trường hợp xấu nhất của tất cả các UE so với phương pháp truyền thống. Tóm lại, từ kết quả mô phỏng của giải thuật đã đề xuất để tối ưu phân bổ tài nguyên và giảm tải tính toán cho hệ thống MEC có sự hỗ trợ của UAV-RIS tốt hơn trường hợp công suất phát là bằng nhau và góc pha của bề mặt phản xạ thông minh là ngẫu nhiên. Bên cạnh đó, kết quả mô phỏng ở các hình 4.3 và 4.5 khi xem xét tổng độ trễ của tất cả người dùng trong mạng so với độ phức tạp tính toán, và tài nguyên tính toán tối đa của máy chủ chưa cho thấy sự vượt trội của giải thuật tối ưu đề xuất.

Tuy nhiên, một hạn chế quan trọng của mô hình đề xuất là chưa xem xét ảnh hưởng của vận tốc di chuyển UAV-RIS đến chất lượng thông tin trạng thái kênh CSI. Khi UAV-RIS di chuyển với vận tốc cao, kênh truyền thay đổi nhanh theo thời gian, gây ra hiệu ứng dịch tần Doppler, dẫn đến giảm độ tương quan kênh và độ chính xác của CSI do thông tin ước lượng nhanh chóng bị lỗi thời. Điều này có thể dẫn đến suy giảm hiệu

suất beamforming và phân bổ tài nguyên trong hệ thống. Trong phạm vi luận án, để hạn chế vấn đề này, tác giả giả định UAV-RIS hoạt động theo chế độ dừng – bay và vận tốc được giới hạn, bảo đảm thời gian dừng đủ lớn tại mỗi điểm để đảm bảo ổn định, và để ước lượng và cập nhật CSI chính xác.

Bên cạnh đó, các kết quả đánh giá trong luận án chưa xem xét tổng thời gian bay cần thiết để UAV-RIS hoàn thành việc di chuyển qua tất cả các điểm dừng trong phạm vi có sự hiện diện của các nhóm người dừng. Quá trình xây dựng bài toán cũng chưa xét đến yếu tố gây nhiễu giữa các nhóm người dừng lân cận cũng như rung (jitter) của UAV trong quá trình truyền thông với người dừng. Các yếu tố này có thể làm giảm độ ổn định liên kết truyền thông, gây tăng tỷ lệ lỗi gói tin và suy giảm chất lượng dịch vụ QoS. Ngoài ra, việc bỏ qua các ràng buộc về giới hạn năng lượng và dung lượng pin của UAV có thể khiến mô hình chưa phản ánh đầy đủ tính thực tiễn trong triển khai. Đây sẽ là những hướng nghiên cứu mở quan trọng trong tương lai nhằm mở rộng mô hình sang kịch bản UAV-RIS di chuyển liên tục với vận tốc cao, có xét đến các yếu tố nhiễu, sai số CSI, năng lượng giới hạn và rung động, từ đó đề xuất các thuật toán bù Doppler và ước lượng thông tin trạng thái kênh truyền CSI bền vững hơn để nâng cao hiệu năng hệ thống.

*(J2) Bài báo được xuất bản trên tạp chí **IEEE Access** xếp hạng **Q1 (SCIE)***

P. Q. Truong, T. Do-Duy, A. Masaracchia, N.-S. Vo, V.-C. Phan, D.-B. Ha và T. Q. Duong, “Computation Offloading and Resource Allocation Optimization for Mobile Edge Computing-Aided UAV-RIS Communications,” *IEEE Access*, tập 12, pp. 107971 - 107983, 2024.

Chương 5

KẾT LUẬN

Nội dung chương trình bày kết luận về các kết quả đã thực hiện được trong luận án tiến sĩ, các hạn chế còn tồn tại, và đề xuất hướng phát triển, cũng như định hướng nghiên cứu tiếp theo.

5.1 Kết luận

Luận án tập trung xem xét ứng dụng mặt phản xạ thông minh trong mạng truyền thông vô tuyến lần lượt là mạng di động tế bào và hệ thống MEC có sự hỗ trợ của UAV-RIS. Luận án đã hoàn thành các mục tiêu đề ra trong đề cương tổng quan với các kết quả chính như sau:

Đầu tiên, luận án xem xét một mô hình truyền thông không dây có sự hỗ trợ của RIS, trong đó nhiều RIS khác nhau được triển khai để hỗ trợ đường xuống cho các nhóm người dùng khác nhau. Đối với mô hình đề xuất này, bài toán tối ưu được xây dựng với mục tiêu tối đa tổng thông lượng mạng với các ràng buộc về công suất tiêu thụ tại trạm gốc và chất lượng dịch vụ (QoS). Vì bài toán đề xuất có tính chất không lồi, nên bài toán tối ưu ban đầu được phân chia thành hai bài toán con. Bài toán thứ nhất, điều khiển công suất với các giá trị hệ số dịch pha được cố định, lúc này bài toán có dạng lồi, sẽ dễ dàng tìm được lời giải nhờ vào các công cụ hỗ trợ. Sau đó, phương pháp tìm kiếm hệ số dịch pha được đề xuất để giải quyết bài toán không lồi nhằm tìm ra các hệ số dịch pha tối ưu của các phần tử phản xạ. Phương pháp tối ưu tổng thông lượng của hệ thống được đề xuất vượt trội hơn hẳn các phương pháp khác khi xem xét tổng thông lượng hệ thống trong trường hợp xấu nhất.

Thứ hai, luận án đề xuất một bài toán tối ưu cho hệ thống MEC, được đặt trong một trạm gốc MIMO (MBS) cỡ lớn, được hỗ trợ bởi UAV mang theo RIS có khả năng bay

trong vùng phủ sóng của mạng. Đối với hệ thống đề xuất này, bài toán tối ưu nhằm mục tiêu giảm thiểu tổng độ trễ của hệ thống được đề xuất, dựa trên tối ưu phân bổ công suất của từng người dùng, liên kết người dùng, cấu hình dịch pha của các phần tử phản xạ RIS và phân bổ tài nguyên tính toán tại MBS theo các ràng buộc về tài nguyên tính toán và yêu cầu QoS của MBS. Để giải quyết bài toán này, thuật toán lặp đã được thiết kế để giải quyết một cách hiệu quả bài toán tối ưu được đề xuất bằng cách áp dụng một số phương pháp xấp xỉ và bất đẳng thức, theo đường di chuyển và phương pháp giảm tọa độ khối (BCD). Ngoài ra, để xác định quỹ đạo bay của UAV dựa trên mật độ người dùng mặt đất cũng được đề xuất trong luận án. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp được đề xuất có hiệu quả vượt trội hơn hẳn các phương pháp hiện có.

Thực vậy, mặt phản xạ thông minh với nhiều ưu điểm vượt trội được đánh giá là một trong những công nghệ then chốt cho các hệ thống truyền thông vô tuyến 6G. Cụ thể, mạng 6G hứa hẹn mang lại nhiều dịch vụ trong tương lai với các chỉ số hiệu năng yêu cầu khắc khe về tốc độ truyền dữ liệu rất cao lên đến 100 Gbps, độ trễ thấp dưới 1ms, và mật độ người dùng dày đặc. Mặt phản xạ thông minh ứng dụng trong mạng 6G giúp tăng cường độ tín hiệu và vùng bao phủ nhờ vào khả năng điều chỉnh sóng vô tuyến, cải thiện đáng kể chất lượng kết nối và giảm nhiễu, bên cạnh đó là khả năng tiết kiệm năng lượng hơn so với các giải pháp truyền thống.

5.2 Hướng phát triển

Mặc dù, các nội dung nghiên cứu của luận án đã tập trung phân tích và đánh giá chi tiết các chỉ số hiệu năng của mạng truyền thông vô tuyến có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh trong các điều kiện kịch bản mô phỏng khác nhau. Tuy nhiên, các nội dung trên vẫn còn nhiều khía cạnh để định hướng nghiên cứu và phát triển trong tương lai.

Trong vấn đề nghiên cứu thứ nhất, nghiên cứu sinh chưa xem xét đến trường hợp trạm phát gốc BS là đa ăng-ten, lúc này bài toán định dạng búp sóng chủ động tại trạm

phát gốc sẽ được xem xét. Hơn nữa, số lượng phần tử tối ưu cũng chưa được giải quyết trong bài toán đặt ra. Song song đó, các bài toán về truyền năng lượng và thông tin liên tục chưa được phân tích và đánh giá trong hệ thống đề xuất.

Trong vấn đề nghiên cứu thứ hai, UAV-RIS được xem xét ứng dụng trong trường hợp di chuyển đến phục vụ nhóm người dùng cụ thể, với giả sử là UAV-RIS đứng yên. Trong thực tế, việc phân tích cần xem xét đến vấn đề rung lắc của UAV do ảnh hưởng của môi trường tác động, điều này ảnh hưởng lớn đến chất lượng dịch vụ. Đặc biệt là tăng số lượng UAV nhằm mục tiêu hỗ trợ cho các dịch vụ với quy mô lớn hơn trong các kịch bản vạn vật kết nối IoT. Ngoài ra, vấn đề quan trọng là quy hoạch số lượng nhóm người dùng tối ưu và quỹ đạo bay của các UAV với mục tiêu tối thiểu độ trễ truyền thông và tiết kiệm năng lượng cho UAV.

Bên cạnh các đề xuất hướng phát triển trên, việc ứng dụng các thuật toán máy học vào trong viễn thông đang phát triển mạnh mẽ, nghiên cứu sinh đang trong quá trình nghiên cứu ứng dụng học tăng cường và học sâu tăng cường để giải quyết các bài toán tối ưu đã đề xuất trong luận án. Các phương pháp này có thể giúp hệ thống tự động học và thích nghi tốt hơn với môi trường truyền thông thay đổi liên tục, đồng thời giảm độ phức tạp tính toán so với các phương pháp truyền thống. Ngoài ra, việc tích hợp các thuật toán máy học có khả năng khai thác dữ liệu kênh lớn để nâng cao chất lượng dự đoán thông tin trạng thái kênh truyền CSI và ra quyết định phân bổ tài nguyên hiệu quả hơn, góp phần cải thiện độ tin cậy và chất lượng dịch vụ QoS của hệ thống.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

(C1) Bài báo được trình bày tại hội nghị **INISCOM 2022** và được đăng trong **Book series LNICST** của Springer (Q4)

P.Q. Truong, V.-C. Phan. (2022). *Reconfigurable Intelligent Surfaces for Downlink Cellular Networks*. In *Industrial Networks and Intelligent Systems. INISCOM 2022. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering*, vol 444. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08878-0_2

(J1) Bài báo được xuất bản trên tạp chí **EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems** xếp hạng Q3 theo Scopus

P. Q. Truong, T. Do-Duy, V.-C. Phan and A. Masaracchia, "Jointly power allocation and phase shift optimization for RIS empowered downlink cellular networks," *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 10, no. 4, 2023, <http://dx.doi.org/10.4108/eetinis.v10i4.4359>

(J2) Bài báo được xuất bản trên tạp chí **IEEE Access** xếp hạng Q1 (SCIE)

P. Q. Truong, T. Do-Duy, A. Masaracchia, N.-S. Vo, V.-C. Phan, D.-B. Ha và T. Q. Duong, "Computation Offloading and Resource Allocation Optimization for Mobile Edge Computing-Aided UAV-RIS Communications," *IEEE Access*, tập 12, pp. 107971 - 107983, 2024.

PHỤ LỤC

Phương pháp xấp xỉ và bất đẳng thức được sử dụng để giải bài toán tối ưu. Một cách tổng quát, theo phương pháp đã được chứng minh từ [82, 118]

Với giá trị của $z > 0$, hàm lô-ga-rít sau $f(z) = \log_2(1 + 1/z)$ là hàm lồi, có thể được minh chứng thông qua ma trận Hessian. Lúc này, bất đẳng thức lô-ga-rít luôn đúng với mọi giá trị của $z > 0$ và $\bar{z} > 0$ [82]:

$$f(z) = \log_2\left(1 + \frac{1}{z}\right) \geq \hat{f}(z), \quad (\text{P.1})$$

trong đó, với mọi giá trị $\forall z > 0, \bar{z} > 0$ ta có

$$\begin{aligned} \hat{f}(z) &= \log_2\left(1 + \frac{1}{\bar{z}}\right) + \left(\frac{\partial f(\bar{z})}{\partial z}\right)(z - \bar{z}) \\ &= \log_2\left(1 + \frac{1}{\bar{z}}\right) + \frac{1}{1 + \bar{z}} - \frac{z}{(1 + \bar{z})\bar{z}} \end{aligned} \quad (\text{P.2})$$

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] E. Basar, M. D. Renzo, J. Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini và R. Zhang, *Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces*, 2019.
- [2] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis và I. Akyildiz, “A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces,” *IEEE Communications Magazine*, tập 56, pp. 162-169, 9 2018.
- [3] J. Chen, Y.-C. Liang, Y. Pei và H. Guo, *Intelligent Reflecting Surface: A Programmable Wireless Environment for Physical Layer Security*, 2019.
- [4] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao và S. Li, “6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques,” *IEEE Network*, tập 33, pp. 70-75, 7 2019.
- [5] E. Björnson, Ö. Özdogan và E. G. Larsson, *Intelligent Reflecting Surface vs. Decode-and-Forward: How Large Surfaces Are Needed to Beat Relaying?*, 2019.
- [6] N. T. Tùng, N. T. T. Bình và V. C. Thắng, “Truyền thông không dây qua bề mặt phản xạ thông minh,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Thái Nguyên*, tập 226, số 07, pp. 204-218, 2021.
- [7] N. X. Kiên, N. T. Tùng và B. P. Thảo, “Mô hình suy hao đường truyền cho hệ thống truyền thông không dây qua bề mặt phản xạ thông minh,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Thái Nguyên*, tập 227, số 16, pp. 94-99, 2022.
- [8] V. T. Nguyệt, “Bề mặt phản xạ thông minh hỗ trợ cho mạng di động sau 5G và 6G,” *Tạp chí khoa học Đại học Tân Trào*, tập 9, số 3, pp. 133-140, 2023.

- [9] V. P. Tuấn, L. T. Anh và P. T. Duy, “Phân tích đặc tính phản xạ sóng điện từ trên bề mặt phản xạ thông minh,” *Tạp chí Khoa học Đại học Đông Á*, tập 1, số 2, pp. 2-13, 2022.
- [10] A.-T. Le, T. N. Nguyen, L.-T. Tu, T.-P. Tran, T. T. Duy, M. Voznak và Z. Ding, “Performance Analysis of RIS-Assisted Ambient Backscatter Communication Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 13, số 3, pp. 791-795, 2024.
- [11] P. N. Son, T. T. Duy, P. V. Tuan và T.-P. Huynh, “Short packet communication in underlay cognitive network assisted by an intelligent reflecting surface,” *ETRI Journal*, tập 45, số 1, pp. 28-44, 2023.
- [12] P. V. Quyet và H. H. Kha, “Energy Efficiency Optimization for IRS-Aided Multiuser MIMO SWIPT Cognitive Radio Systems with Imperfect CSI,” trong *2023 International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEE)*, Ho Chi Minh, Vietnam, 2023.
- [13] P. V. Quyet và H. H. Kha, “Multi-Objective Optimization for IRS-Aided Multi-user MIMO SWIPT Systems,” *REV Journal on Electronics and Communications*, tập 13, số 3-4, pp. 54-64, 2023.
- [14] Q. Wu và R. Zhang, “Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network,” *IEEE Communications Magazine*, tập 58, số 1, pp. 106--112, 2019.
- [15] M. D. Renzo, A. Zappone, M. Debbah, M.-S. Alouini, C. Yuen, J. d. Rosny và S. Tretyakov, “Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead,”

- IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, tập 38, số 11, pp. 2450-2525, 2020.
- [16] Ö. Özdoğan, E. Björnson và E. G. Larsson, “Intelligent Reflecting Surfaces: Physics, Propagation, and Pathloss Modeling,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 9, số 5, pp. 581-585, 2020.
- [17] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, A. Pitsillides, S. Ioannidis và I. Akyildiz, “A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces,” tập 56, số 9, pp. 162-169, 2018.
- [18] H. Gacanin và M. D. Renzo, “Wireless 2.0: Toward an Intelligent Radio Environment Empowered by Reconfigurable Meta-Surfaces and Artificial Intelligence,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, tập 15, số 4, pp. 74-82, 2020.
- [19] D. Ma, M. Ding và M. Hassan, “Enhancing Cellular Communications for UAVs via Intelligent Reflective Surface,” trong *2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Seoul, Korea (South), 2020.
- [20] S. Ao, Y. Niu, Z. Han, B. Ai, Z. Zhong, N. Wang và Y. Qiao, “Resource Allocation for RIS-Assisted Device-to-Device Communications in Heterogeneous Cellular Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tập 72, số 9, pp. 11741-11755, 2023.
- [21] A.-A. A. Boulogeorgos và A. Alexiou, “Pathloss modeling of reconfigurable intelligent surface assisted THz wireless systems,” trong *ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications*, Montreal, QC, Canada, 2021.

- [22] X. Cheng, Y. Lin, W. Shi, J. Li, C. Pan, F. Shu, Y. Wu và J. Wang, “Joint Optimization for RIS-Assisted Wireless Communications: From Physical and Electromagnetic Perspectives,” *IEEE Transactions on Communications*, tập 70, số 1, pp. 606-620, 2022.
- [23] T. Hou, Y. Liu, Z. Song, X. Sun, Y. Chen và L. Hanzo, “Reconfigurable Intelligent Surface Aided NOMA Networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, tập 38, số 11, pp. 2575-2588, 2020.
- [24] Q. Yang, Y. Li, Y. Peng và T. Wu, “Performance Comparison of RIS - Aided Uplink NOMA and OMA Multiuser Networks,” trong *2023 IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*, Chongqing, China, 2023.
- [25] W. Luo, W. Liang, S. Wen, D. Wang và L. Li, “Power Allocation and Passive Beamforming Design for RIS Aided NOMA in THz Communications,” trong *2022 10th International Conference on Information Systems and Computing Technology (ISCTech)*, Guilin, China, 2022.
- [26] X. Tan, Z. Sun, D. Koutsonikolas và J. M. Jornet, “Enabling Indoor Mobile Millimeter-wave Networks Based on Smart Reflect-arrays,” trong *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*, Honolulu, HI, USA, 2018.
- [27] L. Dai, B. Wang, M. Wang, X. Yang, J. Tan, S. Bi, S. Xu, F. Yang, Z. Chen, M. D. Renzo, C.-B. Chae và L. Hanzo, “Reconfigurable Intelligent Surface-Based Wireless Communications: Antenna Design, Prototyping, and Experimental Results,” *IEEE Access*, tập 8, pp. 45913-45923, 2020.

- [28] R. Liu, J. Dou, P. Li, J. Wu và Y. Cui, “Simulation and Field Trial Results of Reconfigurable Intelligent Surfaces in 5G Networks,” *IEEE Access*, tập 10, pp. 122786-122795, 2022.
- [29] S. Gong, X. Lu, D. T. Hoang, D. Niyato, L. Shu, D. I. Kim và Y.-C. Liang, “Toward smart wireless communications via intelligent reflecting surfaces: A contemporary survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, tập 22, số 4, pp. 2283--2314, 2020.
- [30] Z. Kang, C. You và R. Zhang, “Active-IRS-Aided Wireless Communication: Fundamentals, Designs and Open Issues,” *IEEE Wireless Communications*, tập 31, số 3, pp. 368-374, 2024.
- [31] Q. Wu và R. Zhang, “Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, tập 18, số 11, pp. 5394--5409, 2019.
- [32] X. Mu, Y. Liu, L. Guo, J. Lin và R. Schober, “Simultaneously Transmitting and Reflecting (STAR) RIS Aided Wireless Communications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, tập 21, số 5, pp. 3083-3098, 2022.
- [33] S. Zhang, Y. Zhang và B. Di, “Large-Scale Intelligent Surfaces Enabled Unified Near-Field and Far-Field Communications: Codebook Design and Beam Training,” *IEEE Network*, tập 39, số 1, pp. 90-96, 2025.
- [34] S. Abadal, C. Liaskos, A. Tsioliariidou, S. Ioannidis, A. Pitsillides, J. Solé-Pareta, E. Alarcón và A. Cabellos-Aparicio, “Computing and Communications for the Software-Defined Metamaterial Paradigm: A Context Analysis,” *IEEE Access*, tập 5, pp. 6225-6235, 2017.

- [35] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge university press, 2005.
- [36] R. Alghamdi, R. Alhadrami, D. Alhothali, H. Almorad, A. Faisal, S. Helal, R. Shalabi, R. Asfour, N. Hammad, A. Shams, N. Saeed, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri và M.-S. Alouini, “Intelligent Surfaces for 6G Wireless Networks: A Survey of Optimization and Performance Analysis Techniques,” *IEEE Access*, tập 8, pp. 202795-202818, 2020.
- [37] C. Zhang, P. Patras và H. Haddadi, “Deep learning in mobile and wireless networking: A survey,” *IEEE Communications surveys & tutorials*, tập 21, số 3, pp. 2224--2287, 2019.
- [38] X. Cheng, L. Fang, L. Yang và S. Cui, “Mobile big data: The fuel for data-driven wireless,” *IEEE Internet of things Journal*, tập 4, số 5, pp. 1489--1516, 2017.
- [39] H. Xiao, H. Du, J. Zhang, K. Guan và B. Ai, “Outage Probability of Reconfigurable Intelligent Surface Aided THz Communications,” trong *2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Xiamen, China, 2021.
- [40] M. He, W. Xu và C. Zhao, “RIS-Assisted Broad Coverage for mmWave Massive MIMO System,” trong *2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Montreal, QC, Canada, 2021.
- [41] H. Du, J. Zhang, K. Guan, D. Niyato, H. Jiao, Z. Wang và T. Kürner, “Performance and Optimization of Reconfigurable Intelligent Surface Aided THz Communications,” *IEEE Transactions on Communications*, tập 70, số 5, pp. 3575-3593, 2022.

- [42] Y. Liu, X. Liu, X. Mu, T. Hou, J. Xu, M. D. Renzo và N. Al-Dhahir, “Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, tập 23, số 3, pp. 1546-1577, 2021.
- [43] E. Bjornson và E. Jorswieck, Optimal resource allocation in coordinated multi-cell systems, Now Publishers Inc, 2013.
- [44] M. Di Renzo, K. Ntontin, J. Song, F. H. Danufane, X. Qian, F. Lazarakis, J. De Rosny, D.-T. Phan-Huy, O. Simeone, R. Zhang và a. others, “Reconfigurable intelligent surfaces vs. relaying: Differences, similarities, and performance comparison,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, tập 1, pp. 798-807, 2020.
- [45] Q. Tao, J. Wang và C. Zhong, “Performance analysis of intelligent reflecting surface aided communication systems,” *IEEE Communications Letters*, tập 24, số 11, pp. 2464--2468, 2020.
- [46] A. Mutapcic, S.-J. Kim và S. Boyd, “Beamforming with uncertain weights,” *IEEE Signal Processing Letters*, tập 14, số 5, pp. 348--351, 2007.
- [47] T. Despoisse, A. Ghiotto, P. Busson và N. Deltimple, “A comparison of beamforming schemes for 5G mm-wave small cell transmitters,” trong *2018 16th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, Montréal, Canada, 2018.
- [48] M. Showkat, J. A. Sheikh và A. I. Khan, “A New Beamforming Technique in 5G Environment for Reliable Transmission,” trong *2018 4th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)*, Greater Noida, India, 2018.

- [49] Q. Wu và R. Zhang, “Intelligent reflecting surface enhanced wireless network: Joint active and passive beamforming design,” trong *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018.
- [50] N. S. Perovic, M. Di Renzo và M. F. Flanagan, “Channel capacity optimization using reconfigurable intelligent surfaces in indoor mmWave environments,” trong *ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2020.
- [51] C. Huang, A. Zappone, M. Debbah và C. Yuen, “Achievable rate maximization by passive intelligent mirrors,” trong *2018 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2018.
- [52] B. Di, H. Zhang, L. Song, Y. Li, Z. Han và H. V. Poor, “Hybrid beamforming for reconfigurable intelligent surface based multi-user communications: Achievable rates with limited discrete phase shifts,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, tập 38, số 8, pp. 1809--1822, 2020.
- [53] S. Li, B. Duo, X. Yuan, Y.-C. Liang và M. Di Renzo, “Reconfigurable intelligent surface assisted UAV communication: Joint trajectory design and passive beamforming,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 9, số 5, pp. 716--720, 2020.
- [54] M. K. Banafaa, Ö. Pepeoğlu, I. Shayea, A. Alhammadi, Z. A. Shamsan, M. A. Razaz, M. Alsagabi và S. Al-Sowayan, “A Comprehensive Survey on 5G-and-Beyond Networks With UAVs: Applications, Emerging Technologies, Regulatory Aspects, Research Trends and Challenges,” *IEEE Access*, tập 12, pp. 7786-7826, 2024.

- [55] Y. Z. a. R. Zhang, “Energy-Efficient UAV Communication With Trajectory Optimization,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, tập 16, số 6, pp. 3747-3760, 2017.
- [56] J. Wu, H. Wang, Y. Huang, Z. Su và M. Zhang, “Energy Management Strategy for Solar-Powered UAV Long-Endurance Target Tracking,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, tập 55, số 4, pp. 1878-1891, 2019.
- [57] D. V. Huynh, S. R. Khosravirad, S. L. Cotton, T. X. Vu, O. A. Dobre, H. Shin và T. Q. Duong, “Joint Sensing, Communications, and Computing Design for 6G URLLC Service-Oriented MEC Networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, tập 11, số 20, pp. 32429-32439, 2024.
- [58] Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher và V. Young, “Mobile Edge Computing – A Key Technology Towards 5G,” ETSI (European Telecommunications Standards Institute), Sophia Antipolis, 2015.
- [59] P. Mach và Z. Becvar, “Mobile Edge Computing: A Survey on Architecture and Computation Offloading,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, tập 19, số 3, pp. 1628-1656, 2017.
- [60] Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, C. You và R. Zhang, “Intelligent Reflecting Surface-Aided Wireless Communications: A Tutorial,” *IEEE Transactions on Communications*, tập 69, pp. 3313-3351, 2021.
- [61] K.-W. Huang và H.-M. Wang, “Passive beamforming for IRS aided wireless networks,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 9, số 12, pp. 2035--2039, 2020.

- [62] H. Yu, H. D. Tuan, A. A. Nasir, T. Q. Duong và H. V. Poor, “Joint Design of Reconfigurable Intelligent Surfaces and Transmit Beamforming Under Proper and Improper Gaussian Signaling,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, tập 38, số 11, pp. 2589-2603, 2020.
- [63] K. K. Nguyen, S. R. Khosravirad, D. B. d. Costa, L. D. Nguyen và T. Q. Duong, “Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Multi-UAV Networks: Efficient Resource Allocation With Deep Reinforcement Learning,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, tập 16, số 3, pp. 358-368, 2022.
- [64] D.-B. Ha, V.-T. Truong và Y. Lee, “Performance Analysis for RF Energy Harvesting Mobile Edge Computing Networks with SIMO/MISO-NOMA Schemes,” *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, tập 8, số 27, 2021.
- [65] F. Fang, Y. Xu, Q.-V. Pham và Z. Ding, “Energy-Efficient Design of IRS-NOMA Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tập 69, số 11, pp. 14088-14092, 2020.
- [66] D. Zhang, Q. Wu, M. Cui, G. Zhang và D. Niyato, “Throughput Maximization for IRS-Assisted Wireless Powered Hybrid NOMA and TDMA,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 10, số 9, pp. 1944-1948, 2021.
- [67] Q. Wu và R. Zhang, “Joint Active and Passive Beamforming Optimization for Intelligent Reflecting Surface Assisted SWIPT Under QoS Constraints,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, tập 38, số 8, pp. 1735-1748, 2020.

- [68] X. Mu, Y. Liu, L. Guo, J. Lin và N. Al-Dhahir, “Exploiting Intelligent Reflecting Surfaces in NOMA Networks: Joint Beamforming Optimization,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, tập 19, số 10, pp. 6884-6898, 2020.
- [69] Q. Wu và R. Zhang, “Weighted Sum Power Maximization for Intelligent Reflecting Surface Aided SWIPT,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 9, số 5, pp. 586 - 590, 2019.
- [70] H. Guo, Y.-C. Liang, J. Chen và E. G. Larsson, “Weighted Sum-Rate Maximization for Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Networks,” trong *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Waikoloa, HI, USA, 2019.
- [71] S. Liu, P. Ni, R. Liu, Y. Liu, M. Li và Q. Liu, “BS-RIS-User Association and Beamforming Designs for RIS-aided Cellular Networks,” trong *2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC)*, Xiamen, China, 2021.
- [72] M. Nemati, J. Park và J. Choi, “RIS-Assisted Coverage Enhancement in Millimeter-Wave Cellular Networks,” *IEEE Access*, tập 8, pp. 188171-188185, 2020.
- [73] S. Zeng, H. Zhang, B. Di, Z. Han và L. Song, “Reconfigurable Intelligent Surface (RIS) Assisted Wireless Coverage Extension: RIS Orientation and Location Optimization,” *IEEE Communications Letters*, tập 25, số 1, pp. 269-273, 2021.
- [74] M. Z. Siddiqi, R. Mackenzie, M. Hao và T. Mir, “On Energy Efficiency of Wideband RIS-Aided Cell-Free Network,” *IEEE Access*, tập 10, pp. 19742-19752, 2022.

- [75] T. Haustein, J. McMenamy, L. Thiele và P. S. H. Leather, “Reconfigurable Intelligent Surface Deployment in 5G and Beyond 5G Cellular Networks,” trong *2022 IEEE 23rd International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communication (SPAWC)*, Oulu, Finland, 2022.
- [76] M.-N. Nguyen, L. D. Nguyen, T. Q. Duong và H. D. Tuan, “Real-Time Optimal Resource Allocation for Embedded UAV Communication Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 8, số 1, pp. 225-228, 2019.
- [77] Bor-Yaliniz, R. Irem, A. El-Keyi và H. Yanikomeroglu, “Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks,” trong *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016.
- [78] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis và M. Debbah, “Efficient Deployment of Multiple Unmanned Aerial Vehicles for Optimal Wireless Coverage,” *IEEE Communications Letters*, tập 20, số 8, pp. 1647-1650, 2016.
- [79] A.-H. Akram, S. Kandeepan và S. Lardner, “Optimal LAP Altitude for Maximum Coverage,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 3, số 6, pp. 569-572, 2014.
- [80] X. Xie, F. Fang và Z. Ding, “Joint Optimization of Beamforming, Phase-Shifting and Power Allocation in a Multi-Cluster IRS-NOMA Network,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tập 70, số 8, pp. 7705-7717, 2021.
- [81] Q. Wu và R. Zhang, “Beamforming Optimization for Wireless Network Aided by Intelligent Reflecting Surface With Discrete Phase Shifts,” *IEEE Transactions on Communications*, tập 68, số 3, pp. 1838-1851, 2020.

- [82] L. D. Nguyen, H. D. Tuan, T. Q. Duong, O. A. Dobre và H. V. Poor, “Downlink Beamforming for Energy-Efficient Heterogeneous Networks With Massive MIMO and Small Cells,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, tập 17, số 5, pp. 3386-3400, 2018.
- [83] M. Grant và S. Boyd, *CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming, version 2.1*, <http://cvxr.com/cvx>, March 2014.
- [84] T. Do-Duy, L. D. Nguyen, T. Q. Duong, S. R. Khosravirad và H. Claussen, “Joint Optimisation of Real-Time Deployment and Resource Allocation for UAV-Aided Disaster Emergency Communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, tập 39, số 11, pp. 3411-3424, 2021.
- [85] P. Q. Truong, T. Do-Duy, V.-C. Phan và A. Masaracchia, “Jointly power allocation and phase shift optimization for RIS empowered downlink cellular networks,” *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, tập 10, số 4, 2023.
- [86] K. D. Katsanos, P. D. Lorenzo và G. C. Alexandropoulos, *Distributed Sum-Rate Maximization of Cellular Communications with Multiple Reconfigurable Intelligent Surfaces*, 2022.
- [87] Z. Guo, Y. Niu, S. Mao, C. Zhang, N. Wang, Z. Zhong và B. Ai, “Sum Rate Maximization Under AoI Constraints for RIS-Assisted mmWave Communications,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tập 73, số 4, pp. 5243-5258, 2024.
- [88] P. Q. Truong và C. P. Van, “Reconfigurable Intelligent Surfaces for Downlink Cellular Networks,” trong *Industrial Networks and Intelligent Systems*, 2022.

- [89] F. Guo, F. R. Yu, H. Zhang, X. Li, H. Ji và V. C. M. Leung, “Enabling Massive IoT Toward 6G: A Comprehensive Survey,” *IEEE Internet of Things Journal*, tập 8, số 15, pp. 11891-11915, 2021.
- [90] P. Porambage, G. Gür, D. P. M. Osorio, M. Liyanage, A. Gurtov và M. Ylianttila, “The Roadmap to 6G Security and Privacy,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, tập 2, pp. 1094-1122, 2021.
- [91] A. Masaracchia, Y. Li, K. K. Nguyen, C. Yin, S. R. Khosravirad, D. B. D. Costa và T. Q. Duong, “UAV-Enabled Ultra-Reliable Low-Latency Communications for 6G: A Comprehensive Survey,” *IEEE Access*, tập 9, pp. 137338-137352, 2021.
- [92] L. Ismail và R. Buyya, “Artificial Intelligence Applications and Self-Learning 6G Networks for Smart Cities Digital Ecosystems: Taxonomy, Challenges, and Future Directions,” *Sensors*, tập 22, số 15, p. 5750, 2022.
- [93] S. A. Khowaja, K. Dev, P. Khowaja và P. Bellavista, “Toward Energy-Efficient Distributed Federated Learning for 6G Networks,” *IEEE Wireless Communications*, tập 28, số 6, pp. 34-40, 2021.
- [94] N. Abbas, Y. Zhang, A. Taherkordi và T. Skeie, “Mobile Edge Computing: A Survey,” *IEEE Internet of Things Journal*, tập 5, số 1, pp. 450-465, 2018.
- [95] S. Wang, X. Zhang, Y. Zhang, L. Wang, J. Yang và W. Wang, “A Survey on Mobile Edge Networks: Convergence of Computing, Caching and Communications,” *IEEE Access*, tập 5, pp. 6757-6779, 2017.

- [96] Y. Zhou, P. L. Yeoh, C. Pan, K. Wang, M. ElKashlan, Z. Wang, B. Vucetic và Y. Li, “Offloading Optimization for Low-Latency Secure Mobile Edge Computing Systems,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 9, số 4, pp. 480-484, 2020.
- [97] T. Zhang, Y. Xu, J. Loo, D. Yang và L. Xiao, “Joint Computation and Communication Design for UAV-Assisted Mobile Edge Computing in IoT,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, tập 16, số 8, pp. 5505-5516, 2020.
- [98] W. Sun, P. Wang, N. Xu, G. Wang và Y. Zhang, “Dynamic Digital Twin and Distributed Incentives for Resource Allocation in Aerial-Assisted Internet of Vehicles,” *IEEE Internet of Things Journal*, tập 9, số 8, pp. 5839-5852, 2022.
- [99] C. Zhan, H. Hu, X. Sui, Z. Liu và D. Niyato, “Completion Time and Energy Optimization in the UAV-Enabled Mobile-Edge Computing System,” *IEEE Internet of Things Journal*, tập 7, số 8, pp. 7808-7822, 2020.
- [100] M. Merluzzi, P. D. Lorenzo, S. Barbarossa và V. Frascolla, “Dynamic Computation Offloading in Multi-Access Edge Computing via Ultra-Reliable and Low-Latency Communications,” *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, tập 6, pp. 342-356, 2020.
- [101] Y. Du, K. Wang, K. Yang và G. Zhang, “Energy-Efficient Resource Allocation in UAV Based MEC System for IoT Devices,” trong *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018.
- [102] D. V. Huynh, V.-D. Nguyen, S. R. Khosravirad, V. Sharma, O. A. Dobre, H. Shin và T. Q. Duong, “URLLC Edge Networks With Joint Optimal User Association,

- Task Offloading and Resource Allocation: A Digital Twin Approach,” *IEEE Transactions on Communications*, tập 70, số 11, pp. 7669-7682, 2022.
- [103] G. Durisi, T. Koch và P. Popovski, “Toward Massive, Ultrareliable, and Low-Latency Wireless Communication With Short Packets,” *Proceedings of the IEEE*, tập 104, số 9, pp. 1711-1726, 2016.
- [104] K. S. Kim, D. K. Kim, C.-B. Chae, S. Choi, Y.-C. Ko, J. Kim, Y.-G. Lim, M. Yang, S. Kim, B. Lim, K. Lee và K. L. Ryu, “Ultrareliable and Low-Latency Communication Techniques for Tactile Internet Services,” *Proceedings of the IEEE*, tập 107, số 2, pp. 376-393, 2019.
- [105] Z. Chu, P. Xiao, M. Shojafar, D. Mi, J. Mao và W. Hao, “Intelligent Reflecting Surface Assisted Mobile Edge Computing for Internet of Things,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 10, số 3, pp. 619-623, 2021.
- [106] P. Wang, J. Fang, X. Yuan, Z. Chen và H. Li, “Intelligent Reflecting Surface-Assisted Millimeter Wave Communications: Joint Active and Passive Precoding Design,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tập 69, số 12, pp. 14960-14973, 2020.
- [107] X. Xie, F. Fang và Z. Ding, “Joint Optimization of Beamforming, Phase-Shifting and Power Allocation in a Multi-Cluster IRS-NOMA Network,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tập 70, số 8, pp. 7705-7717, 2021.
- [108] H. Q. Ngo, M. Matthaiou, T. Q. Duong và E. G. Larsson, “Uplink Performance Analysis of Multicell MU-SIMO Systems With ZF Receivers,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tập 62, số 9, pp. 4471-4483, 2013.

- [109] J. Xu và J. Yao, “Exploiting Physical-Layer Security for Multiuser Multicarrier Computation Offloading,” *IEEE Wireless Communications Letters*, tập 8, số 1, pp. 9-12, 2019.
- [110] D.-H. Tran, T. X. Vu, S. Chatzinotas, S. ShahbazPanahi và B. Ottersten, “Coarse Trajectory Design for Energy Minimization in UAV-Enabled,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, tập 69, số 9, pp. 9483-9496, 2020.
- [111] P. V. Quyết và H. H. Kha, “Tối ưu hiệu năng hệ thống truyền thông đồng thời thông tin và năng lượng có sự hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh,” Đại học Quốc Gia Tp. HCM, Thành phố Hồ Chí Minh, 2024.
- [112] D. Peaucelle, D. Henrion, Y. Labit và K. Taitz, “User’s Guide for SEDUMI INTERFACE1.04,” LAAS- CNRS, 2022.
- [113] T. Liu, L. Tang, W. Wang, Q. Chen và X. Zeng, “Digital-Twin-Assisted Task Offloading Based on Edge Collaboration in the Digital Twin Edge Network,” *IEEE Internet of Things Journal*, tập 9, số 2, pp. 1427-1444, 2022.
- [114] P. Q. Truong, T. Do-Duy, A. Masaracchia, N.-S. Vo, V.-C. Phan, D.-B. Ha và T. Q. Duong, “Computation Offloading and Resource Allocation Optimization for Mobile Edge Computing-Aided UAV-RIS Communications,” *IEEE Access*, tập 12, pp. 107971 - 107983, 2024.
- [115] A. Mahmood, T. X. Vu, W. U. Khan, S. Chatzinotas và B. Ottersten, *Joint Computation and Communication Resource Optimization for Beyond Diagonal UAV-IRS Empowered MEC Networks*, 2024.
- [116] E. T. Michailidis, M.-G. Volakaki, N. I. Miridakis và D. Vouyioukas, “Optimization of Secure Computation Efficiency in UAV-Enabled RIS-Assisted

- MEC-IoT Networks With Aerial and Ground Eavesdroppers,” *IEEE Transactions on Communications*, tập 72, số 7, pp. 3994-4009, 2024.
- [117] A. Huang, L. Qu và M. J. Khabbaz, “Latency-Aware Computation Offloading in Multi-RIS-Assisted Edge Networks,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, tập 5, pp. 1204-1221, 2024.
- [118] L. D. Nguyen, H. D. Tuan, T. Q. Duong và H. V. Poor, “Multi-User Regularized Zero-Forcing Beamforming,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, tập 67, số 11, pp. 2839-2853, 2019.