

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

TRƯỜNG QUANG PHÚC

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

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

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH – NĂM 2025

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

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

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

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án Cấp Cơ sở học tại
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Tp.HCM
vào ngày tháng năm 2025

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.

CHƯƠNG 1 TỔNG QUAN

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 khắc 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].

Môi trường vô tuyến được định nghĩa là một tập hợp các đối tượng làm thay đổi đáng kể sự lan truyền của sóng điện từ 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. 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 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 và kỹ thuật khuếch đại – chuyển tiếp được sử dụng để xử lý tín hiệu thu. Trong đó, các bộ chuyển tiếp 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 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 RIS hay các bề mặt phản xạ cấu hình được RIS đang được nghiên cứu nhiều với mô hình được xem xét với nhiều ưu điểm nổi bật khi so sánh với môi trường vô tuyến hiện tại và các kỹ thuật AF hay DF.

1.2 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 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 RIS.
- Đề xuất thuật toán tối thiểu tổng độ trễ và giảm tải tính toán trong hệ thống điện toán biên MEC có sự hỗ trợ của UAV và mặt phản xạ thông minh RIS.

1.3 Nhiệm vụ nghiên cứu

- 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, đánh giá các 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 RIS.
- 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 RIS.
- Nghiên cứu tối ưu hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ của RIS.
- Nghiên cứu tối ưu độ trễ của hệ thống MEC có sự hỗ trợ của UAV và RIS.

1.4 Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

Mạng 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 đánh giá hiệu năng của mạng.

1.5 Hướng tiếp cận và phương pháp nghiên cứu

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

Nghiên cứu cơ sở lý thuyết dựa trên 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 đánh giá hiệu quả của việc áp dụng mô hình đã đề xuất.

1.6 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 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.

Chương 2 CƠ SỞ LÝ THUYẾT

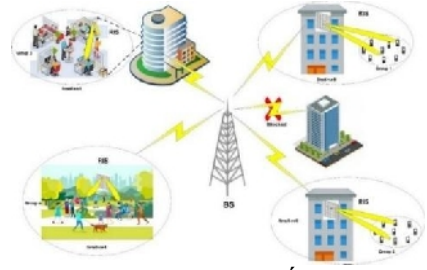
Nội dung chương trình bày về cơ sở lý thuyết liên quan đến mặt phản xạ thông minh RIS, các mô hình kênh truyền vô tuyến có hỗ trợ của mặt phản xạ thông minh, các ứng dụng mặt phản xạ thông minh trong mạng thông tin vô tuyến 6G. Bên cạnh đó, cơ sở lý thuyết quan đến hệ thống truyền thông vô tuyến có sự 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.

Chương 3 TỐI ƯU THÔNG LƯỢNG MẠNG DI ĐỘNG CÓ SỰ HỖ TRỢ CỦA MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH

Nội dung chương xem xét ứng dụng mặt phản xạ thông minh trong mạng di động tế bào. Cụ thể, tổng thông lượng mạng được cực đại dựa trên các ràng buộc về công suất tiêu thụ của hệ thống và chất lượng dịch vụ QoS.

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

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, gồm một trạm gốc đơn ăng-ten phục vụ $M = \{1, \dots, M\}$ nhóm người dùng, với số lượng người dùng khác nhau trong mỗi nhóm và phân bố đồng đều trong vùng phủ sóng của trạm gốc.



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

3.1.1 Kênh truyền vô tuyến và thông lượng thông tin

Xem xét hệ trục tọa độ gồm trạm gốc BS và người dùng: (x_0, y_0, H_0) , (x_m, y_m, H_m) , $m \in M$ $(x_k, y_k, 0)$, $k \in K$ với H_0 và H_m lần lượt là chiều cao của trạm gốc và độ cao đặt bề mặt phản xạ thông minh RIS. Từ trạm gốc BS đến người dùng gồm: kênh truyền từ trạm gốc BS đến RIS và kênh truyền từ RIS đến người dùng. Mô hình kênh truyền trong không gian tự do từ trạm gốc BS đến RIS như sau [63], [64]:

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

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 bề mặt phản xạ thông minh thứ m .

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

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

Đường phản xạ từ mặt phản xạ thông minh RIS đến người dùng (NLoS) [65], suy hao đường truyền từ 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 [66] 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.

Khi hiệu ứng dịch pha của tín hiệu trên các phần tử phản xạ của 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 $\theta_{nm} \in [0, 2\pi](\forall n = 1, 2, \dots, N, m \in M)$ lần lượt là biên độ và góc pha của tín hiệu phản xạ tại phần tử phản xạ thứ n của bề mặt phản xạ 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 $\alpha_{nm} = 1$ [67]. 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 $\widehat{h_{0,m}} \in C^{N \times 1}$ và $\widehat{h_{m,k}^H} \in C^{1 \times N}$ Trong đó, H là toán liên hiệp Hermitan.

$\mathbf{h}_{0,m} \in C^{N \times 1}$ và $\mathbf{h}_{m,k}^H \in C^{1 \times N}$ lần lượt là ma trận kênh truyền giữa trạm gốc BS và bề mặt phản xạ RIS thứ m và kênh truyền giữa bề mặt phản xạ 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 [68] như sau:

$$\mathbf{g}_{m,k} = \mathbf{h}_{m,k}^H \Phi_m \mathbf{h}_{0,m}, \quad (3.7)$$

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

Xét xét kỹ thuật đa truy cập phân chia theo thời gian TDMA trong mạng di động tế bào, với 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 ta có được biểu thức tín hiệu thu tại phía người dùng như biểu thức (3.8):

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

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 $\Phi_M = [\Phi_m]_{m=1}^M$. Biểu thức tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR tại phía thu như trong biểu thức (3.9):

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

3.1.2 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 (3.11):

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

Mục tiêu (3.12) cực đại tổng thông lượng hệ thống theo biến công suất phát cực đại tại trạm gốc BS và hệ số dịch pha của các phần tử phản xạ của mặt phản xạ thông minh. Ràng buộc được xem xét trong (3.12) là chất lượng dịch vụ QoS và công suất cực đại.

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

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

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

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

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 và biên dưới của góc dịch pha tại phần tử phản xạ thứ n của mặt phản xạ thứ m .

3.2 Bài toán kết hợp tối ưu tổng thông lượng mạng

Bài toán được định nghĩa trong biểu thức (3.12) là các hàm không lồi với các hàm (3.12a) và (3.12b). Nên các hệ số điều khiển công suất của BS và dịch pha của các phần tử phản xạ trên RIS được tối ưu theo cách dùng phương pháp lặp.

3.2.1 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:

$$\max_{p_0} R_{total}(p_0) \quad (3.13a)$$

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

Dựa trên phương pháp xấp xỉ và biến đổi bất đẳng thức logarit [69] 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 (3.15):

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

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

$$R_{m,k}(p_{m,k}) \geq \widehat{R}_{m,k}^{(i)}(p_{m,k}), \forall k \in K_m, \forall m \in M, \quad (3.15)$$

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

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

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

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

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

$$\widehat{R_{m,n}^{(i)}}(\mathbf{p}_0) \geq \bar{r}_{m,k}, m \in M, k \in K, \quad (3.17c)$$

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

Thuật toán 1: Phân bổ công suất	
Ngõ vào:	$\widehat{R_{total}^{(k)}}(\mathbf{p}_0) =$
$i = 0, \Phi_M, \varepsilon = 10^{-3}, I_{max} = 20$	$\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \widehat{R_{m,k}^{(k)}}(\mathbf{p}_{m,k}).$
Lặp lại:	Biểu thức (3.17) được giải bằng giải
Giải (3.17) tìm $(\mathbf{p}_0^{(i+1)})$ dùng CVX	thuật 1 trong Bảng 3.1, sử dụng thư
$i = i + 1$	viện CVX [70]. Các giá trị được thiết
Cho đến khi hội tụ hoặc $(i > I_{max})$	lập $\mathbf{i} = \mathbf{0}, \Phi_M$, và $\varepsilon = 10^{-3}$. Số lần
Ngõ ra: $\mathbf{p}_0^*$	lặp $I_{max} = 20$ và ngõ ra t là các hệ
	số điều khiển công suất.

Thuật toán 1 được đề xuất nhằm giải bài toán tối ưu lồi (3.17), với mục tiêu cực đại hóa tổng tốc độ thu được $R_{total}(\mathbf{p}_0)$. Bài toán có số biến tối ưu và số ràng buộc tuyến tính lần lượt vào khoảng $\mathcal{O}(K)$ và $\mathcal{O}(K + N)$. 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 $\mathcal{O}(K^3)$ [84].

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

Hệ số điều khiển công suất p_0 khi xem xét ở 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:

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

$$s. t. (3.12c), (3.12d) \quad (3.18b)$$

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 $a_k = P_0 / \sigma_k^2$, xét $|\psi_m^n|^2 = 1$ ta có biểu thức sau:

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

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

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

Tuy nhiên, bài toán trên không phải là bài toán lồi (convex). Ta đặt $X_{m,k} = \chi_{m,k} \chi_{m,k}^H$ và $\psi_m^H X_{m,k} \psi_m = \text{tr}(X_{m,k} \psi_m \psi_m^H) = \text{tr}(X_{m,k} \Psi_m)$ trong đó $\Psi_m = \psi_m \psi_m^H$ cần phải thỏa điều kiện $\Psi_m \geq \mathbf{0}$ và $\text{tr}(\Psi_m) = 1$.

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

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

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

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

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

Thuật toán 2: Tìm kiếm hệ số dịch pha

Ngõ vào:

$$i = 0, p_0, \varepsilon = 10^{-3}$$

$$I_{max} = 20$$

Lặp lại

for $m = [1:M]$

Giải (3.20) tìm $(\Phi_M^{(i+1)})$ dùng CVX

end for

$$i = i + 1$$

Cho đến khi (hội tụ) hoặc $(i > I_{max})$

Ngõ ra: Φ_M^*

Thuật toán 2 thực hiện quá trình lặp qua M bài toán con trong (3.20), 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 phân xạ thứ m . Độ phức tạp tính toán toàn bộ thuật toán ước lượng vào khoảng $\mathcal{O}(20.M.N^6)$ [84].

3.3 Kết quả mô phỏng và thảo luận

Chương trình mô phỏng được thực hiện dựa trên phần mềm Matlab và có sự hỗ trợ của thư viện CVX để giải bài toán tối ưu với các thông số mô phỏng được thiết lập như trong Bảng 3.3.

Kết quả mô phỏng được thực hiện và đánh giá theo các trường hợp sau:

OOP, EOP, ORP, ERP.

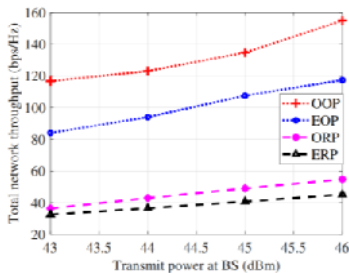
Bảng 3. 3 Thông số sử dụng trong mô phỏng

STT	Thông số	Giá trị
1.	Số anten 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

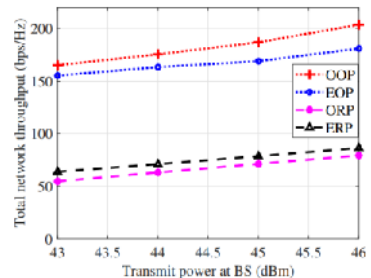
3.3.1. Tổng thông lượng mạng cực đại

Hình 3.2, 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 43 dBm – 46 dBm, số 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 mặt phản xạ nhưng không tối ưu hệ số dịch pha.

Tương tự, trong Hình 3.3, kết quả mô phỏng xem xét trong trường hợp công suất phát tại trạm gốc và số phần tử phản xạ của RIS được giữ nguyên so với trong Hình 3.2. Số mặt phản xạ thông minh RIS $M = 8$, số nhóm người dùng $K = 30$. So sánh với trường hợp ở Hình 3.2, tổng thông lượng mạng tăng khi công suất phát tại trạm gốc tăng lên. Bên cạnh đó, khi tăng số lượng mặt phản xạ từ $M = 4$ lên $M = 8$, mặc dù số lượng người dùng cũng tăng lên, nhưng ta đạt được giá trị của tổng thông lượng mạng tăng lên đáng kể

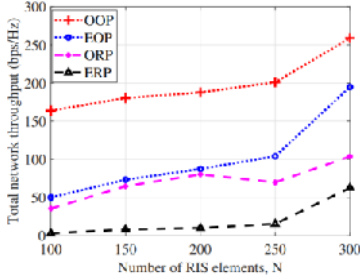


Hình 3. 2 Tổng thông lượng mạng



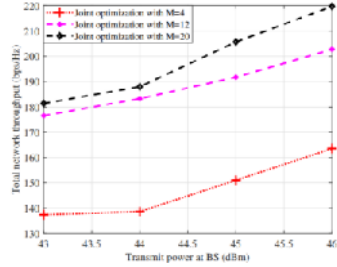
Hình 3. 3 Tổng thông lượng mạng

trường hợp $M=4$, $K=20$ và $N=200$



Hình 3.4 Tổng thông lượng mạng với $N = [100:300]$, $M = 8$, $K = 30$, $P_0^{max} = 46 \text{ dBm}$

trường hợp $M=8$, $K=30$ và $N=200$



Hình 3.5 Tổng thông lượng mạng đạt được trong trường hợp số lượng RIS khác nhau $M = 4$, $M = 12$, $M = 20$

Kết quả trong Hình 3.4 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 vượt trội hơn so với các trường hợp còn lại.

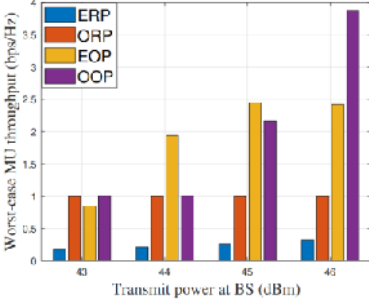
Hình 3.5 cho thấy tổng thông lượng mạng của phương pháp đề xuất khi số lượng RIS được điều chỉnh, cụ thể là $M = 4$, $M = 12$ và $M = 20$. Trong trường hợp này, tổng thông lượng mạng được ghi nhận tăng rõ rệt khi số lượng RIS tăng từ $M = 4$ lên $M = 20$. Đặc biệt, sự chênh lệch băng thông giữa $M = 4$ và $M = 20$ được quan sát có sự thay đổi mạnh mẽ khi công suất phát tăng từ 44 dBm lên 46 dBm, tương đương khoảng 56 bps/Hz ở công suất phát cực đại 46 dBm.

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

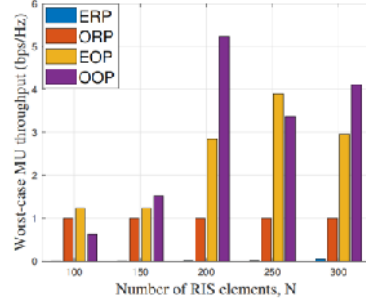
Xem xét thông lượng của người dùng (MU) trong trường hợp xấu nhất với các giá trị khác nhau của số lượng người dùng, số phần tử phản xạ của RIS [71].

Rõ ràng, kết quả mô phỏng trong Hình 3.6 cho thấy sự vượt trội của phương pháp được đề xuất **OOP** so với các phương pháp khác bao gồm **OPH**, **EOP**, và **ERP**, trong 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 $1 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}$ 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 $1 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}$ 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 $2.5 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}$ 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 $0.5 \frac{\text{bps}}{\text{Hz}}$, vì vậy không đáp ứng ràng buộc QoS trong (3.12c).

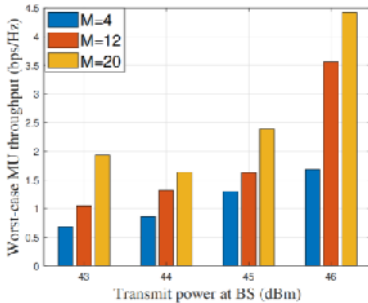


Hình 3. 6 Thông lượng trong trường hợp xấu nhất với $M = 8$, $K=30$, $N = 200$



Hình 3. 7 Thông lượng người dùng trong trường hợp xấu nhất với $N = [100:300]$

Trong Hình 3.7 cho thấy ảnh hưởng của số lượng phần 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 phần tử phản xạ thay đổi từ 100 đến 300. Kết quả cho thấy băng thông đạt được từ MU tệ nhất phần lớn đáp ứng được các ràng buộc QoS trong (3.13c), 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 có tối ưu **ERP**, băng thông MU của trường hợp tệ 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 RIS lần lượt $M = 4, M = 12, M = 20$.

3.4 Kết luận chương

Hình 3.8 thể hiện sự thay đổi của thông lượng MU 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 nhóm là $K = 30$. Hầu hết các trường hợp, thông lượng MU của phương pháp được đề xuất luôn lớn hơn 1 bps/Hz, Đặc biệt, thông lượng MU tại $M = 20$ cao hơn khoảng 2.5 lần so với thông lượng MU tại $M = 12$.

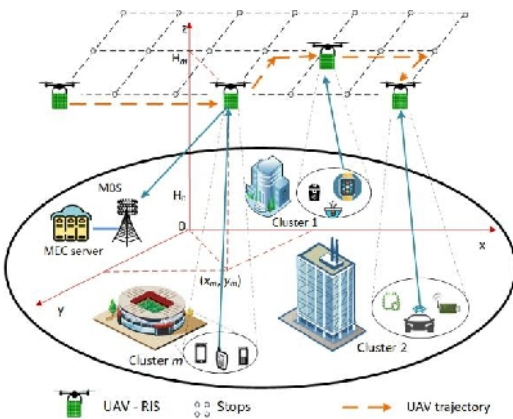
Một là, đề xuất một mô hình mạng di động tế bào có sự hỗ trợ của bề mặt phản xạ thông minh. Trong đó, mạng di động tế bào hỗ trợ nhiều người dùng được chia thành nhiều nhóm tại các vị trí khác nhau. Hai là, phân tích mô hình truyền sóng cho mạng với giả thiết là các nhóm người dùng bị che khuất bởi các vật cản như tòa nhà. 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. Bốn là, xây dựng và đề xuất bài toán tối ưu hệ số dịch pha của các phần 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 phần 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 bề mặt phản xạ RIS.

Chương 4 TỐI ƯU PHÂN BỐ CÔNG SUẤT VÀ GIẢM TẢI TÍNH TOÁN TRONG HỆ THỐNG MEC VỚI SỰ HỖ TRỢ CỦA UAV-RIS

Nội dung chương tập trung vào xem xét bài toán ứng dụng bề mặt phản xạ thông minh RIS vào trong hệ thống MEC có sự hỗ trợ của UAV. Cụ thể, vấn đề về tối ưu phân bổ công suất của trạm gốc MBS và giảm tải tính toán của các thiết bị trong hệ thống, với các ràng buộc về tài nguyên tính toán của thiết bị và chất lượng dịch vụ QoS. Bên cạnh đó, bài toán tối ưu quỹ đạo bay cho UAV cũng được xem xét, với mục tiêu tìm được đường bay ngắn nhất, và tiết kiệm năng lượng nhất cho UAV mang các bề mặt phản xạ thông minh RIS.

4.1 Mô hình hệ thống MEC kết hợp UAV-RIS

4.1.1 Mô hình hệ thống đề xuất



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

UAV-RIS (RIS: N phần tử phản xạ độc lập) đóng vai trò như một trạm gốc phục vụ một tế bào nhỏ (small-cell). Mô hình có một nhóm người dùng kết nối trực tiếp với MBS là $\mathcal{K}_0$, các nhóm còn lại sẽ nhận được sự hỗ trợ từ UAV-RIS. Người dùng (m, k) tương ứng người dùng k th tại nhóm thứ m th với $m = 1, \dots, M$ và $k \in \mathcal{K}_m$.

Hình 4.1, MBS được trang bị một mảng 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 $\mathcal{K}_m = \{1, \dots, K_m\}, m = 1, \dots, M$.

$u_{m,k}$ 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).

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

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

4.1.2 Mô hình kênh truyền

Giả sử MBS được bố trí trong hệ trục tọa độ 3 chiều xyz, RIS và người dùng lần lượt tại các vị trí tọa độ: $(x_0, y_0, H_0), (x_m, y_m, H_m), m \in \mathcal{M}$, 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 là H_0 và H_m . Các vị trí tọa độ được xác định dựa vào GPS và lưu trữ tại MBS. Suy hao đường truyền giữa MBS và bề mặt phản xạ thông minh thứ m th như sau [63]:

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

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

Biểu thức suy hao giữa người dùng thứ (m, k) th và UAV ($m = 1, \dots, M, k = 1, \dots, K_m$) như sau [65]:

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

Trong (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:

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

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 [66]:

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

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 $(0, k)$ th đến MBS được tính như sau: $G_{k,0} = \sqrt{\beta_{k,0}h_{k,0}} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$,

trong đó $h_{k,0}$ là các hệ số pha đình 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 đình 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 $\mathbf{h}_{m,k} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ và $\mathbf{h}_{m,0}^H \in \mathbb{C}^{L \times N}$ 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 $\mathbf{H}_{m,k} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ và $\mathbf{H}_{m,0}^H \in \mathbb{C}^{L \times N}$ với $\mathbf{H}_{m,k} = \sqrt{\beta_{m,k}}h_{m,k}$ và $\mathbf{H}_{m,0}^H = \sqrt{\beta_{m,0}}h_{m,0}^H$. Ma trận kênh truyền từ người dùng thứ (m, k) th đến MBS với $\mathbf{G}_{m,k} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ như sau [68]:

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

$\Phi_m = \text{diag}[\phi_{1m}, \phi_{2m}, \dots, \phi_{Nm}]$ 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 $\alpha_{nm} = 1$ [90].

4.1.3 Mô hình tín hiệu thu và thông lượng hệ thống

Trường hợp người dùng thứ (m, k) th trong nhóm thứ m th cần giảm tải chuyển tiếp sang MBS, tín hiệu có thể được truyền trực tiếp đến MBS hoặc thông qua UAV-RIS. 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 thức (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 $|s_{m,k}|^2 \leq 1$, 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) [91]. $\mathbf{G}_m = [\mathbf{G}_{m,1}, \dots, \mathbf{G}_{m,K_m}] \in \mathbb{C}^{L \times K_m}$ ($m = 0, 1, \dots, M$).

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 có được:

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

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

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

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

4.1.4 Mô hình giảm tải tác vụ

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

4.1.4.1 Tính toán cục bộ

$c_{m,k}$ 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:

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

4.1.4.2 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:

$$T_{m,k}^{tx}(p_{m,k}, \Phi_m) = \frac{\mathcal{J}_{m,\ell}}{R_{m,k}(p_{m,k}, \Phi_m)}, \quad (4.13)$$

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

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

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.

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

Thời gian để truyền kết 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 [79] [92].

4.1.5 Quỹ đạo bay của UAV

Bảng 4. 1: Đường bay ngắn nhất của UAV

Thuật toán 1: Tìm quỹ đạo ngắn nhất	Giả sử UAV sẽ bay qua $\mathbf{M}$ điểm dừng liên kết với $\mathbf{M}$ nhóm người dùng cần giảm tải tính toán trên mặt phẳng dạng lưới hình chữ nhật với ở độ cao là cố định $\mathbf{H}_m$. Thuật toán 1 thực hiện tìm quỹ đạo bay qua vị trí các điểm dừng cố định với khởi tạo ban đầu lần lượt: $(\mathbf{0}, \mathbf{0}, \mathbf{H}_m)$ là tọa độ và độ cao ban đầu của UAV, $(\mathbf{x}_m, \mathbf{y}_m, \mathbf{H}_m)$ 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 $\mathcal{T}$.
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	

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

Bài toán kết hợp tối ưu phân bổ công suất người dùng ($\mathbf{p}$), người dùng liên kết ($\mathbf{u}$), cấu hình dịch pha của các phần tử RIS (Φ), và phân bổ tài nguyên tính toán tại MBS (ζ) với ràng buộc về tài nguyên tính toán và chất lượng dịch vụ QoS với mục tiêu tối thiểu tổng độ trễ.

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

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

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

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

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

4.2.1 Tối ưu phân bổ công suất

Với các giá trị cố định của $\Phi, \mathbf{u}, \zeta$ thì biểu thức (4.16) như sau:

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

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

Bài toán trong biểu thức (4.17) có thể được giải dựa vào hàm lồi sau $f(x) = \log_2 \left(1 + \frac{1}{x}\right)$ 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:

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

Tại lần lặp thứ i - th: $x = \frac{\sigma_0^2}{P_{m,k}p_{m,k}|G_{m,k}^H \tilde{f}_{m,k}|^2}$ và $\bar{x} = x^{(i)} = \frac{\sigma_0^2}{P_{m,k}p_{m,k}^{(i)}|G_{m,k}^H \tilde{f}_{m,k}|^2}$,

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

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

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

Biến $\mathbf{r} \triangleq \{r_{m,k}\} (\forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K})$ thỏa điều kiện $\frac{1}{R_{m,k}(p_{m,k})} \leq r_{m,k}$.

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

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

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

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

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

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

Bảng 4. 2: Tối ưu phân bổ công suất

Thuật toán 2: Phân bổ công suất tối ưu

Ngõ vào: u, Φ, ζ , và khởi tạo $p^{(0)}, \varepsilon = 10^{-3}, I_{max} = 20$
for $m = 1$ to M

$i = 0$

Lặp lại:

Giải (4.23) tìm $\mathbf{p}^{(i+1)}$; $i = i + 1$

Cho đến khi hội tụ hoặc $i > I_{max}$;

end for

Bài toán (4.23) có dạng bài toán tối ưu lồi chuẩn, có thể giải được dựa vào sử dụng thư viện CVX [70] như trong thuật toán 2.

4.2.2 Tối ưu hệ số dịch pha

Với các giá trị p, u, ζ cố định, biểu thức (4.16) có thể được viết lại như sau:

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

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

Với véc-tơ định dạng búp sóng phía phát cố định ($f_{m,k}, \forall n = 1, 2, \dots, N, m \in \mathcal{M}$). Cho $v_m = [v_m^1, \dots, v_m^N]^H$, $v_m^n = e^{j\theta_{nm}}, (\forall n = 1, 2, \dots, N)$. Ràng buộc ở (4.16d) như sau $|v_m^n|^2 = 1$. Đặt $\chi_{m,k} = \text{diag}(\mathbf{H}_{m,0}^H) \mathbf{H}_{m,k} \tilde{f}_{m,k}$, $H_{m,0}^H \Phi_m H_{m,k} \tilde{f}_{m,k} = v_m^H \chi_{m,k}$ Ta có thể áp dụng xấp xỉ (4.20) – (4.21) như sau:

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

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

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

Đặt biến $\tilde{r} \triangleq \{\tilde{r}_{m,k}\} (\forall m \in \mathcal{M}, \forall k \in \mathcal{K})$ $\frac{1}{R_{m,k}(\Phi_m)} \leq \tilde{r}_{m,k}$

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

Vì vậy, biểu thức (4.24) được viết lại tương đương như sau:

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

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

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

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

Ràng buộc ở (4.28b) sẽ tương đương (4.16c); $a_k = P_{m,k} p_{m,k} / \sigma_0^2$. Biểu thức (4.28) là dạng bài toán không lồi QCQP, không thể giải bằng cách sử dụng thư viện CVX. Ta phải biến đổi, lần lượt đặt $\mathbf{X}_{m,k} = \chi_{m,k} \chi_{m,k}^H$ và $v_m^H \mathbf{X}_{m,k} v_m = \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} v_m v_m^H) = \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} V_m)$, với $V_m = v_m v_m^H$ phải thỏa điều kiện $V_m \geq 0$ và $\text{rank}(V_m) = 1$ [46] [49]. Do đó, biểu thứ (4.28) được biến đổi như sau:

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

$$\text{s. t} \quad \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \mathbf{V}_m) \geq (2^{F_0} - 1)/a_k, \quad m \in \mathcal{M}, k \in \mathcal{K}_m, \quad (4.29b)$$

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

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

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

Bảng 4. 3: Tối ưu hệ số dịch pha

Thuật toán 3: Tìm hệ số dịch pha tối ưu

Ngõ vào: $u, \zeta, \mathbf{p}$, và khởi tạo $f_{m,k}^{(0)}$

Ràng buộc:

$f_{m,k}^{(0)}, \varepsilon = 10^{-3}, I_{max} = 20$

for $m = 1$ to M

$i = 0$

Lặp lại:

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

$f_{m,k}^{(i+1)}, i = i + 1$

Cho đến khi hội tụ hoặc $i > I_{max}$

end for

Ngõ ra: Φ_M^*

Với $\mathbf{y} = \frac{\sigma_0^2}{\mathbf{p}_{m,k} \mathbf{p}_{m,k} \text{tr}(\mathbf{X}_{m,k} \mathbf{V}_m)}$.

Biểu thức (4.29) là bài toán lồi SDP [46] [41], bài toán này có thể được giải dựa vào các bộ công cụ của CVX. Trong giải thuật, phương pháp BCD được đề xuất để giải bài toán trong biểu thức (4.29).

4.2.3 Tối ưu giảm tải quá trình tính toán

Với các giá trị $\mathbf{p}, \mathbf{u}, \Phi$ cố định, biểu thức (4.16) có thể được viết lại như sau:

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

$$\text{s.t} \quad (4.16e) \quad (4.30b)$$

Bảng 4.4 Thuật toán tối ưu lặp

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

Ngõ vào: $\mathbf{u}, \Phi, \zeta$ và khởi tạo $\mathbf{p}^{(0)}, f_{m,k}^{(0)}, \zeta^{(0)}$

Ràng buộc:

$\varepsilon = 10^{-3}, I_{max} = 20, j = 0$

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 $\zeta^{(j+1)}$

$j = j + 1$

Vì hàm mục tiêu và ràng buộc ở biểu thức (4.16e) là hàm lồi theo ζ , do đó bài toán (4.30) có thể được giải dựa trên thư viện CVX. Cuối cùng, bài toán tối ưu hóa lặp được đề xuất để xác định đồng thời phân bổ công suất tối ưu, tìm kiếm hệ số dịch pha và giảm tải tính toán. Trong thuật toán 4, quá trình thực hiện tối ưu được ở mỗi vòng lặp sẽ

Cho đến khi hội tụ hoặc $j > I_{max}$

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

là điểm bắt đầu cho vòng lặp tiếp theo.

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

Bài toán (4.16), 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 lỗi của (4.18) - (4.21), khối 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 $\mathcal{F}(\mathbf{p}, \boldsymbol{\Phi}, \boldsymbol{\zeta})$, với nghiệm tối ưu của từng bài toán con ở vòng lặp i là $\bar{\mathbf{p}}, \bar{\boldsymbol{\Phi}}, \bar{\boldsymbol{\zeta}}$, nhờ đặc tính của xấp xỉ SCA trong bài toán (4.23), ta có $\mathcal{F}(\mathbf{p}^{(i)}, \boldsymbol{\Phi}^{(i)}, \boldsymbol{\zeta}^{(i)}) \geq \mathcal{F}(\bar{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\Phi}^{(i)}, \boldsymbol{\zeta}^{(i)})$. Tương tự, tối ưu bài toán con cho RIS (4.29) và bài toán con cho MEC (4.30), ta có được $\mathcal{F}(\bar{\mathbf{p}}, \boldsymbol{\Phi}^{(i)}, \boldsymbol{\zeta}^{(i)}) \geq \mathcal{F}(\bar{\mathbf{p}}, \bar{\boldsymbol{\Phi}}, \boldsymbol{\zeta}^{(i)}) \geq \mathcal{F}(\bar{\mathbf{p}}, \bar{\boldsymbol{\Phi}}, \bar{\boldsymbol{\zeta}})$. Khi cập nhật giá trị $(\mathbf{p}^{(i+1)}, \boldsymbol{\Phi}^{(i+1)}, \boldsymbol{\zeta}^{(i+1)}) = (\bar{\mathbf{p}}, \bar{\boldsymbol{\Phi}}, \bar{\boldsymbol{\zeta}})$, ta có được $\mathcal{F}(\mathbf{p}^{(i+1)}, \boldsymbol{\Phi}^{(i+1)}, \boldsymbol{\zeta}^{(i+1)}) \leq \mathcal{F}(\mathbf{p}^{(i)}, \boldsymbol{\Phi}^{(i)}, \boldsymbol{\zeta}^{(i)})$, tức là giá trị hàm mục tiêu giảm đơn điệu qua các vòng lặp. Do miền khả thi đóng và bị chặn (do $\mathbf{0} \leq \mathbf{p}_{m,k} \leq \mathbf{1}$, $|\mathbf{v}_m^n|^2 = \mathbf{1}$, $\sum \mathbf{u}_{m,k} \boldsymbol{\zeta}_{m,k}^{bs} \leq \boldsymbol{\zeta}_{max}$), dãy $\mathcal{F}(\mathbf{p}^{(i)}, \boldsymbol{\Phi}^{(i)}, \boldsymbol{\zeta}^{(i)})$ hội tụ và mọi điểm giới hạn của dãy $(\mathbf{p}^{(i)}, \boldsymbol{\Phi}^{(i)}, \boldsymbol{\zeta}^{(i)})$ 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) $\mathcal{O}(MK)$ và độ phức tạp của phương pháp là $\tilde{\mathcal{O}}((MK)^3)$. Bài toán con cho RIS (4.29) số ẩn là $\mathcal{O}(N^2)$. Độ phức tạp tính toán là $\tilde{\mathcal{O}}(MKN^6)$ và thường bị chi phối khi N lớn. Bài toán MEC (4.30) có độ phức tạp tương đương $\tilde{\mathcal{O}}((MK)^3)$ Do đó, chi phí tính toán mỗi vòng lặp là $\tilde{\mathcal{O}}(MKN^6)$ và tổng chi phí khi thuật toán hội tụ sau I vòng lặp (thực tế giới hạn bởi $I_{max} = 20$): $\tilde{\mathcal{O}}(I \cdot MKN^6)$ [84, 112].

4.4 Kết quả mô phỏng

Mô phỏng được thực hiện trên Matlab với công cụ CVX và thông số mô phỏng được thiết lập như trong bảng 4.4. Mục tiêu kết quả mô phỏng so sánh phương pháp đề xuất với trường hợp không áp dụng tối ưu theo các tiêu chí sau:

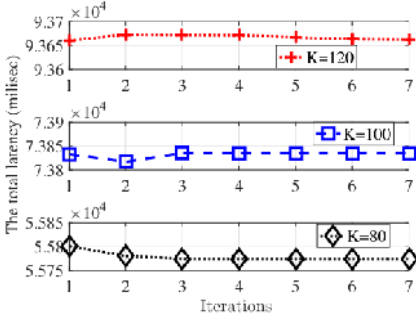
- Khả năng giảm thiểu tổng độ trễ mạng, được định nghĩa là $\sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^{K_m} T_{m,k}^{tot}$.
- Khả năng giảm thiểu độ trễ tổng tệ nhất, được định nghĩa là $\sum_{m=0}^M \max_{k \in \mathcal{K}_m} \{T_{m,k}^{tot}\}$

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

STT	Thông số	Giá trị
1	Số trạm gốc MBS	1

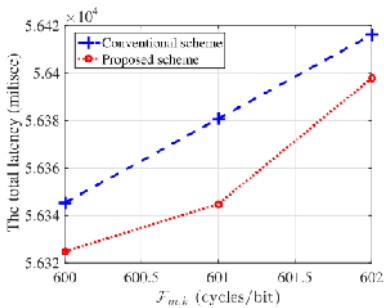
2	Bán kính vùng bao phủ gần	500m
3	Bán kính vùng bao phủ xa	2000m
4	Vị trí của MBS	(0,0,30)
5	Độ cao UAV (H^{min}, H^{max})	(50,150)m
6	Tần số sóng mang	2.4GHz
7	Băng thông kênh truyền	1 MHz
8	Công suất phát cực đại $P_{m,k}$	30 dBm
9	Ngưỡng QoS	$\bar{r}_0 = 1$ Mbps
10	Mật độ phổ công suất nhiễu trắng	$\sigma^2 = -130$ dBm/Hz
11	Kích thước của tác vụ được giảm tải [93]	$D_m = 100$ kB
12	Độ phức tạp của tác vụ giảm tải [93]	$\mathcal{F}_{m,k} = 600$ cycles/bit
13	Tài nguyên tính toán tối đa của MEC [93]	$\zeta_{max} = 30$ Giga cycles/s
14	Tài nguyên tính toán tối đa của UE [93]	$c_{m,k} = 0.5$ Giga cycles/s

4.4.1 Phân tích độ hội tụ

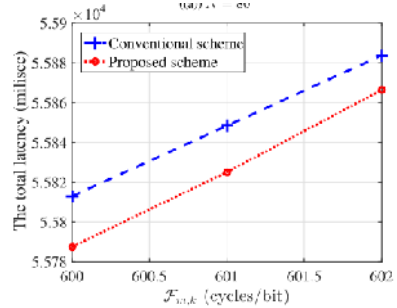


Hình 4. 2 Độ hội tụ của phương pháp đề xuất khi số người dùng K thay đổi

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.



(a) N=80

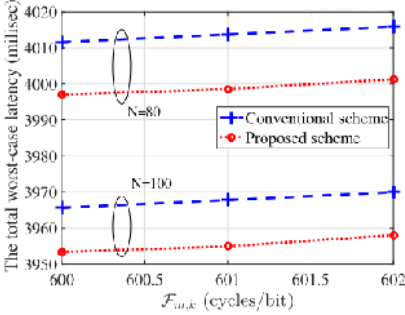


(b) N=100

Hình 4. 3: Tổng độ trễ mạng với các mô hình phân bổ tài nguyên khác nhau

$\mathcal{F}_{m,k}$, với $K = 80, \zeta_{max} = 30 \text{ Giga cycles/s}$.

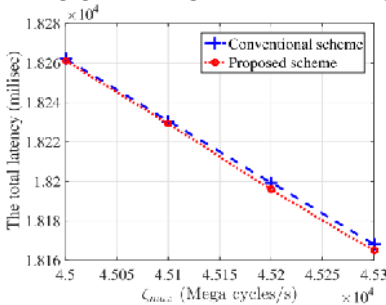
Hình 4.3(a) và 4.3(b) so sánh tổng độ trễ với $N = 80$ và $\mathcal{F}_{m,k} = 600$, tổng độ trễ của phương pháp đề xuất là $5.632 \times 10^4 \text{ ms}$. Khi số lượng phần tử phản xạ tăng lên, tổng độ trễ của mạng sẽ giảm xuống [44].



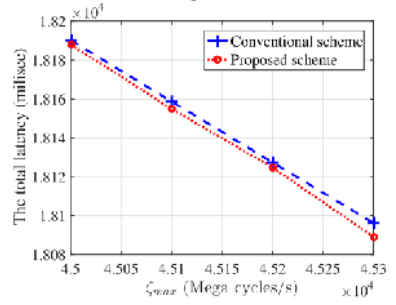
Hình 4. 4: Tổng độ trễ mạng trong trường hợp xấu nhất theo các mô hình phân bổ tài nguyên khác nhau $\mathcal{F}_{m,k}$, với $K = 80, \mathcal{F}_{m,k} = 600 \text{ cycles/bit}$.

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} .

Hình 4.5, tổng độ trễ của mạng được so sánh với phương pháp khác trong một khoảng khả năng tính toán của MBS (Mega cycles/s), ζ_{max} . Người dùng (UEs) và chu kỳ CPU được thiết lập lần lượt là $K = 80$ và $\mathcal{F}_{m,k} = 600 \text{ cycles/bit}$. cho thấy tăng số lượng phần tử RIS và khả năng tính toán của MBS tổng độ trễ của mạng giảm đáng kể khi khả năng tính toán của MBS tăng lên.

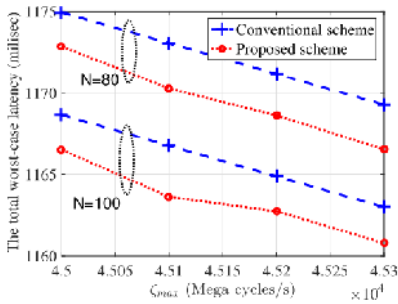


(a) $N = 80$



(b) $N=100$

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



Mặt khác, trong Hình 4.6 những điểm vượt trội 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.

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

4.5 Kết luận

Tóm lại, kết quả mô phỏng của giải thuật đề xuất 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 như nhau và góc pha của bề mặt phản xạ thông minh là ngẫu nhiên. Tuy nhiên, kết quả mô phỏng ở các hình 4.2a và 4.3a 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.

Chương 5 KẾT LUẬN

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.

Thứ hai, luận án đề xuất một bài toán tối ưu cho hệ thống MEC, 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. 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 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 lập 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.

Thực vậy, RIS với nhiều ưu điểm vượt trội được xem là một trong những công nghệ then chốt cho truyền thông 6G. Cụ thể, mạng 6G hứa hẹn mang lại nhiều dịch vụ trong tương lai với các 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. RIS 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 chất lượng kết nối và giảm nhiễu, tiết kiệm năng lượng hơn so với các giải pháp truyền thống.

5.2 Hướng phát triển

Trong vấn đề nghiên cứu thứ nhất, chưa xem xét đến trường hợp trạm phát gốc BS là đa ăng-ten. Hơn nữa, số lượng phần tử tối ưu cũng chưa được giải quyết. Bài toán về truyền năng lượng và thông tin liên tục chưa được phân tích và đánh giá trong hệ thống.

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

Bên cạnh đó, 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.