

CHIẾN LƯỢC TỐI ƯU CÔNG SUẤT ĐƯỜNG LÊN CHO HỆ THỐNG VÔ TUYẾN KHÔNG PHÂN CHIA TẾ BÀO VỚI NHIỀU TRẠM CHUYỂN TIẾP TRÊN KHÔNG

Nguyễn Hoàng Anh*, Nguyễn Hữu Đức

Trường Đại học thông tin liên lạc

Thông tin chung:

Ngày nhận bài: 24/4/2025

Ngày phân biên: 27/4/2025

Ngày duyệt đăng: 04/6/2025

*Tác giả chính:

hoanganh25111991@gmail.com

DOI:

<https://doi.org/10.70879/KHirE>

N14U

Title:

Uplink Power Optimization Strategies for Cell-Free Wireless Systems with Multiple Aerial Relay Stations

Từ khóa:

Hệ thống không phân chia tế bào, trạm chuyển tiếp trên không, tối ưu công suất.

Keywords:

Cell Free (CF) system, aerial relay station (ARS), power optimization.

TÓM TẮT: Hệ thống không phân chia tế bào (CF: Cell-Free) đang ngày càng khẳng định ưu điểm vượt trội qua nhiều nghiên cứu và được xem là công nghệ tiềm năng cho mạng không dây 6G. Bài báo này nghiên cứu hiệu suất đường lên của hệ thống CF có sự hỗ trợ của các phương tiện bay không người lái (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) đóng vai trò như các trạm chuyển tiếp trên không (ARS: Aerial Relay Station). Mỗi ARS được trang bị nhiều ăng-ten và phân bố ngẫu nhiên trong khu vực để phục vụ đồng thời nhiều người dùng dưới mặt đất. Trong giai đoạn huấn luyện đường lên, các ARS ước lượng kênh và sử dụng các kênh này để tách tín hiệu nhận được. Để nâng cao hiệu suất hệ thống, bài báo đề xuất phương pháp tối ưu hóa công suất truyền dữ liệu. Đồng thời, biểu thức dạng đóng của tốc độ đường lên được xây dựng dựa trên kỹ thuật lọc kết hợp, và phương pháp phân đôi được áp dụng để giải quyết bài toán tối ưu. Thông qua khảo sát, bài báo đánh giá thông lượng người dùng khi thay đổi các tham số như số lượng người dùng, số lượng ARS và độ dài chuỗi pilot. Kết quả mô phỏng cho thấy, thông lượng trung bình người dùng được tối ưu cao hơn so với trường hợp không tối ưu.

ABSTRACT: Cell-Free (CF) wireless systems have increasingly demonstrated their outstanding advantages and are considered a promising technology for future 6G networks. This paper investigates the uplink performance of a CF system supported by unmanned aerial vehicle (UAV) acting as aerial relay station (ARS). Each ARS is equipped with multiple antennas and is randomly deployed within a specific area to simultaneously serve multiple ground users. During the uplink training phase, ARS estimate the channels and subsequently separate the received signals based on the estimated channels. To enhance the overall system performance, a power allocation optimization method for data transmission is proposed. Additionally, a closed-form expression for the achievable uplink rate is derived using the matched filtering technique, and a bisection approach is employed to solve the optimization problem. The study evaluates the user throughput under varying system parameters such as the number of users, ARS, and pilot sequence length. Simulation results demonstrate that the optimized user throughput is significantly higher than that of the non-optimized case.

1. Giới thiệu vấn đề nghiên cứu

Trong khi việc triển khai toàn cầu các ứng dụng mạng thế hệ thứ năm (5G: 5th Generation) hiện đang được tiến hành, mạng thế hệ thứ sáu (6G: 6th Generation) đã thu hút được sự chú ý đáng kể từ cả ngành công

nghiệp viễn thông và giới học thuật. So với 5G, 6G sẽ cung cấp dải tần rộng hơn, tốc độ truyền tải nhanh hơn, hiệu quả phổ tần cao hơn, dung lượng kết nối tăng đều, độ trễ ngắn hơn, vùng phủ sóng rộng hơn và khả năng chống nhiễu mạnh mẽ hơn để đáp ứng nhiều

yêu cầu dịch vụ mạng khác nhau. Nhằm đáp ứng các yêu cầu nêu trên, nhiều giải pháp đã được đề xuất và nghiên cứu, bao gồm việc sử dụng các máy bay không người lái (UAV: *Unmanned Aerial Vehicle*) hoạt động như các trạm gốc trên không (ARS: Aerial Base Station) và công nghệ không phân chia tế bào (CF: *Cell Free*).

CF đại diện cho mô hình đa đầu vào và đa đầu ra (MIMO: Multiple In, Multiple Out) phân tán với số lượng lớn các điểm truy cập (APs: *Access Points*) phục vụ một số lượng nhỏ người dùng đồng thời [1]. Các AP hợp tác thông qua mạng front-haul để ghép kênh theo không gian của người dùng bằng cách sử dụng chung tài nguyên tần số thời gian. Do đó, CF kết hợp các lợi ích của môi trường phân tán và hệ thống MIMO lớn (mMIMO: massive MIMO) được biết đến là một kỹ thuật khả thi có thể nâng cao hiệu quả truyền dẫn không dây và cung cấp phạm vi phủ sóng cao hơn [2].

Mặt khác, những ưu điểm của ARS trong hệ thống truyền thông không dây đã được chứng minh trong các báo cáo gần đây [3] [4]. Đặc biệt, việc gắn các AP hoặc trạm gốc (BS: *Base Station*) trên UAV trong một mạng không dây mang lại sự bổ sung cho thiết kế hệ thống thêm linh hoạt, triển khai mạng năng động, đáp ứng nhanh chóng các nhu cầu dịch vụ đa dạng về mặt địa lý, v.v. có thể tham khảo ở [5] để biết về các vấn đề tổng quan. Do đó, có thể thấy rằng các kỹ thuật truyền thông

CF [10]. Trong khi đó, Các tác giả trong [11] sử dụng trạm gốc di động (MBS: *Mobile Base Station*) để hỗ trợ hệ thống CF trong việc xây dựng một kết nối trên không- mặt đất đồng nhất sử dụng ưu điểm đường truyền tầm nhìn thẳng (LoS: *Line-of-Sight*) của kết nối trên không. Tuy nhiên, thành phần đường truyền không theo tầm nhìn thẳng (NLoS: *Non-Line-of-Sight*) không được xem xét. Các tác giả đã đồng thời

thông ARS và CF trở thành những giải pháp quan trọng trong mạng 6G.

Trong vài năm qua, hệ thống CF đã nhận được sự quan tâm, đặc biệt là chú trọng đến ước tính kênh truyền, tối ưu hóa bài toán phân công chuỗi pilot và điều khiển công suất. Cấu trúc CF, mô hình truyền và quy trình huấn luyện kênh đã được khảo sát chi tiết ở tài liệu tham khảo [6], [7]. Tuy nhiên, các phân tích này tập trung vào thiết kế CF thông thường, không tính đến trường hợp thực tế. Các tác giả ở [8] đã xem xét một cấu trúc trong đó các AP và người dùng được nhóm lại và mỗi người dùng nhận được dịch vụ từ một số lượng hạn chế của các AP tùy thuộc vào tình huống thực tế.

Tài liệu tham khảo [9] đã thử nghiệm khả năng kết nối UAV được sử dụng làm trạm BS, trọng tâm chính của các nghiên cứu này là tối ưu hóa quỹ đạo và công suất. Các tác giả đã phát triển mô hình kênh giữa UAV và người sử dụng mặt đất (GU: *Ground User*), triển khai UAV như một AP di động để hỗ trợ GU và đề xuất một kỹ thuật tối ưu hóa quỹ đạo tập trung vào bài toán tối ưu hàm lỗi xấp xỉ liên tiếp và tối ưu hóa xen kẽ.

Như đã đề cập ở trên, mặc dù công nghệ CF và ARS có nhiều ưu điểm, nhưng sự tích hợp này trong một hệ thống truyền thông không dây còn giới hạn trong nghiên cứu. Cụ thể, nghiên cứu đã tiến hành trước đây chỉ tập trung vào mô hình UAV với tư cách là người dùng hỗ trợ trong hệ

nghiên cứu các kỹ thuật tối ưu hóa quỹ đạo và quản lý năng lượng trong hệ thống có sự hỗ trợ của MBS. Mô hình thiết kế nêu trên là xa rời thực tế và đòi hỏi tính toán phức tạp. Xuất phát từ những hạn chế nêu trên, chúng tôi nghiên cứu truyền thông đường lên đa ARS dựa trên hệ thống CF mMIMO bao gồm việc tối ưu hóa hệ số điều khiển công suất dữ liệu để cải thiện

chất lượng của hệ thống. Sau đây là tóm tắt những đóng góp chính của bài báo:

Chúng tôi phát triển hệ thống đường lên đa ARS dựa trên kỹ thuật CF phù hợp với xu hướng công nghệ 6G hiện tại. Quá trình truyền được thực hiện thông qua cơ chế song công phân chia theo thời gian (TDD: *Time Division Duplex*) [1], mô hình kênh được thiết kế phù hợp với tiêu chuẩn LTE tiên tiến bắt buộc của hiệp hội viễn thông quốc tế (ITU: *International Telecommunication Union*) và nhóm dự án đối tác thế hệ thứ 3 (3GPP: *Third Generation Partnership Project*) hỗ trợ cho mô hình kênh của phương tiện bay trên không [12].

Chúng tôi đưa ra được công thức dạng đóng cho hệ thống đa ARS về thông lượng đường lên của mỗi người dùng bằng kỹ thuật lọc kết hợp. Lỗi ước tính kênh truyền và bài toán tối ưu công suất đều đã được xem xét trong khảo sát của chúng tôi.

Chúng tôi đề xuất một thuật toán để tối ưu hóa hệ số công suất truyền dữ liệu đường lên bằng cách sử dụng các bài toán tối ưu tuyến tính. Sau đó chất lượng hệ thống được đánh giá bằng cách so sánh thông lượng trung bình mà mỗi người dùng đạt được khi không tối ưu và tối ưu hóa hệ số công suất truyền dữ liệu cũng như khi thay đổi số lượng người dùng, ARS và khoảng thời gian giai đoạn huấn luyện đường lên.

Phần còn lại của bài báo này được cấu trúc như sau. Phần 2 mô tả mô hình hệ thống và xử lý tín hiệu. Kết quả mô phỏng và thảo luận về kết quả nghiên cứu của chúng tôi được trình bày trong Phần 3. Cuối cùng, Phần 4 thể hiện kết luận công trình nghiên cứu của chúng tôi.

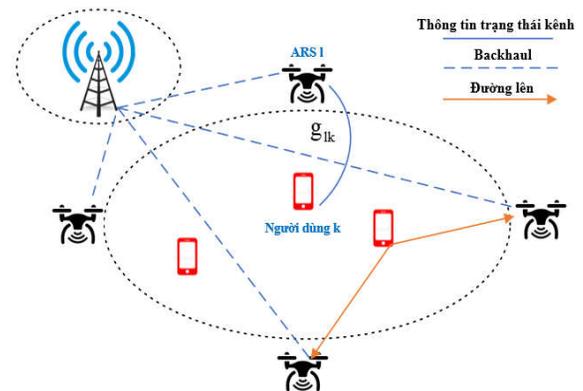
2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

Như đã thể hiện trong Hình 1, chúng tôi khảo sát hệ thống truyền thông không dây

đường lên đa ARS hỗ trợ cho hệ thống CF. Hệ thống đề xuất được triển khai với L ARS và K người dùng mặt đất. Mỗi ARS được trang bị N ăng-ten. Trong khi đó mỗi người dùng chỉ được cung cấp một ăng-ten duy nhất và các ARS và người dùng được phân bố ngẫu nhiên trên khắp một khu vực rộng lớn. Ngoài ra, mỗi ARS kết nối với một trạm gốc trên mặt đất (GBS: *Ground Base Station*) qua mạng backhaul. Chúng tôi giả sử rằng tất cả ARS đều được liên kết với GBS bằng một mạng backhaul hoàn hảo với dung lượng vô hạn và không lỗi.

Mặt khác, chúng tôi giả sử rằng tất cả L ARS đều phục vụ đồng thời tất cả K người dùng sử dụng cùng một tài nguyên tần suất thời gian. Vấn đề kết nối giữa người dùng và ARS được thực hiện bằng cơ chế TDD [1]. Các ước lượng kênh thu được được sử dụng để tách tín hiệu do người dùng phân phối trong đường lên. Trong đường lên, kỹ thuật matched filtering, còn được biết đến là xử lý MRC được giả định sử dụng tại ARS để phát hiện tín hiệu của người dùng. Trong bài báo này, chúng tôi sử dụng $\mathbf{g}_{lk} \in \mathbb{R}^{N \times 1}$ để minh họa véc tơ kênh truyền từ ARS l đến người dùng k . Mô hình toán học được thể hiện như sau:

$$\mathbf{g}_{lk} = \sqrt{\beta_{lk}} \mathbf{h}_{lk}, \quad (1)$$



Hình 1. Mô Hình CF sử dụng nhiều ARS

trong đó $\mathbf{h}_{lk} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ là véc tơ của pha-đỉnh phạm vi hẹp và chúng tôi xem xét rằng $\{h_{lk}\}, l=1, \dots, L, k=1, \dots, K$, là phân bố độc lập và không giống nhau (*i.i.d.*) CN $(0, I_N)$ véc tơ biến ngẫu nhiên (*RV*). Khái niệm về pha-đỉnh quy mô nhỏ độc lập được xác nhận bởi thực tế là ARS và người dùng được triển khai trên một khu vực rộng lớn. Do đó, tập hợp phân tán lớn gây bất lợi cho ARS và người sử dụng. Hệ thống phân tán sử dụng băng rộng, và đại lượng \mathbf{g}_{lk} và \mathbf{h}_{lk} bị ảnh hưởng bởi tần số. Tuy vậy, pha-đỉnh quy mô

$$PL_{lk} = \begin{cases} PL_{LoS} = \max\{PL', 30.9 + \\ (22.25 - 0.5 \log_{10}(h_{ABS})) \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)\} \\ PL_{NLoS} = \max\{PL_{LoS}, 32.4 + \\ (43.2 - 7.6 \log_{10}(h_{ABS})) \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f_c)\}. \end{cases} \quad (3)$$

trong đó f_c là tần số sóng mang (MHz). PL' ,

PL_{LoS} , PL_{NLoS} thể hiện là suy hao đường truyền trong không gian tự do và LoS/NLoS lần lượt là suy hao của các ARS với kịch bản đô thị. h_{ABS} là chiều cao của ARS và chúng tôi giả sử rằng $22.5m \leq h_{ABS} \leq 300m$. d_{3D} minh họa khoảng cách 3D giữa các ARS và người dùng.

2.1. Ước lượng kênh truyền

Trong công trình nghiên cứu này, hệ thống hoạt động theo chế độ TDD [1]. Quá trình ước lượng kênh được thực hiện theo hai giai đoạn. Ở giai đoạn đầu tiên, tất cả người dùng truyền đồng thời chuỗi tín hiệu dẫn đường (pilot) $\phi_k \in \mathbb{C}^{r^\alpha \times 1}$ đến các ARS. Chúng tôi giả sử rằng $|\phi_k|^2 = 1 \forall k$. Thêm vào đó, chúng tôi xác định τ^c là chiều dài khoảng kết hợp (tần số-thời gian mẫu) bằng tích của băng thông kết hợp và thời gian kết hợp. τ^α là khoảng thời gian huấn luyện đường lên (mẫu tần số-thời gian), trong đó cần đảm bảo rằng $\tau^\alpha \leq \tau^c$. Đặt $\sqrt{\tau^\alpha \eta_k} \phi_k \in \mathbb{C}^{r^\alpha \times 1}$, $0 \leq \eta_k \leq 1$ minh họa cho công suất phân bổ bởi the user

lớn β_{lk} không đổi về tần số. Giả thiết rằng các kênh truyền là không đổi từng phần trong khoảng kết hợp tần số và khoảng kết hợp thời gian. Mỗi khối liên kết tần số-thời gian này phải được sử dụng để huấn luyện. Hệ số pha-đỉnh quy mô lớn β_{lk} ở công thức (1) thể hiện theo suy hao đường truyền được viết là:

$$\beta_{lk} = 10^{\frac{PL_{lk}}{10}}, \quad (2)$$

trong đó PL_{lk} là suy hao đường truyền đơn vị là dB và đã được trình bày theo [12] cho kịch bản đô thị.

k trong suốt giai đoạn huấn luyện. Biểu thức cho tín hiệu nhận được tại ARS thứ l là

$$\mathbf{Y}_l^p = \sqrt{\tau^\alpha \rho^p} \sum_{k=1}^K \mathbf{g}_{lk} \sqrt{\eta_k} \phi_k^H + \mathbf{w}_l^p, \quad (4)$$

trong đó ρ^p là tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) đã chuẩn hóa của mỗi symbol pilot.

$\mathbf{W}_l^p \in \mathbb{C}^{N \times r^\alpha}$ là ma trận tạp âm cộng tại ARS l . Các phần tử của \mathbf{w}_l^p là phân bố đều và độc lập (*i.i.d.*) CN $(0,1)$ RVs.

Quá trình xử lý dữ liệu pilot nhận được \mathbf{Y}_l^p được thực hiện theo sau:

$$\mathbf{y}_{lk}^p = \phi_k^H \mathbf{Y}_l^p = \sqrt{\tau^\alpha \rho^p} \mathbf{g}_{lk} + \sqrt{\tau^\alpha \rho^p} \sum_{k' \neq k}^K \mathbf{g}_{lk} \phi_k^H \phi_{k'} + \phi_k^H \mathbf{w}_l^p \quad (5)$$

Sau đó, các ARS tính toán ước lượng kênh truyền bằng cách sử dụng phương pháp MMSE. Do đó, ước lượng kênh \mathbf{g}_{lk} là

$$\hat{\mathbf{g}}_{lk} = E \left\{ \mathbf{g}_{lk} \tilde{\mathbf{y}}_{lk}^p H \right\} \left(E \left\{ \tilde{\mathbf{y}}_{lk}^p \tilde{\mathbf{y}}_{lk}^p H \right\} \right)^{-1} \tilde{\mathbf{y}}_{lk}^p = c_{lk} \tilde{\mathbf{y}}_{lk}^p, \quad (6)$$

trong đó, $c_{lk} \square \frac{\sqrt{\tau^\alpha \rho^p} \beta_{lk} \sqrt{\eta_k}}{\tau^\alpha \rho^p \sum_{k=1}^K \beta_{lk} \eta_k \|\phi_k^H \phi_k\|^2 + 1}$,

γ_{lk} minh họa bình phương trung bình của phần tử ước lượng kênh \hat{g}_{lk} được xác định như sau

$$\gamma_{lk} \square E \left\{ \left\| [\hat{g}_{lk}]_n \right\|^2 \right\} = \sqrt{\tau^\alpha \rho^p} \beta_{lk} \eta_k^{1/2} c_{lk}, \quad (7)$$

trong đó $[\hat{g}_{lk}]_n$ thể hiện phần tử thứ n của véc-tơ \hat{g}_{lk} .

2.2. Truyền tín hiệu đường lên

Tất cả người dùng đồng thời gửi dữ liệu đến các ARS ở đường lên. Đặt q_k , $E \left\{ |q_k|^2 \right\} = 1$ minh họa các symbol tương ứng với người dùng k ở tất cả các kịch bản. Các symbol này độc lập với nhau và độc lập với tất cả tạp âm

$$R_k^u = \log_2 \left(1 + \frac{N^2 \rho^u \eta_k^u \left(\sum_{l=1}^L \gamma_{lk} \right)^2}{N^2 \rho^u \sum_{k' \neq k} \eta_{k'}^u \|\phi_{k'}^H \phi_{k'}\|^2 \left(\sum_{l=1}^L \gamma_{lk} \sqrt{\frac{\eta_k^u}{\eta_{k'}}} \frac{\beta_{lk'}}{\beta_{lk}} \right)^2 + N \rho^u \sum_{k'=1}^K \eta_{k'}^u \sum_{l=1}^L \gamma_{lk} \beta_{lk'} + N \sum_{l=1}^L \gamma_{lk}} \right). \quad (12)$$

GBS thực hiện tách tín hiệu nhận được q_k từ r_k^u ở (9). Chúng tôi giả định rằng GBS chỉ sử dụng thông tin trạng thái về kênh cho mục

$$r_k^u = D_k \cdot q_k + B_k \cdot q_k + \sum_{k' \neq k} I_{kk'} \cdot q_{k'} + \square, \quad (10)$$

trong đó $D_k \square \sqrt{\rho^u \eta_k^u} E \left\{ \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\hat{g}_{lk}]_n^* [\mathbf{g}_{lk}]_n \right\}$, $B_k \square \sqrt{\rho^u \eta_k^u} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\hat{g}_{lk}]_n^* [\mathbf{g}_{lk}]_n - D_k$,

$$I_{kk'} \square \sqrt{\rho^u \eta_{k'}^u} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\hat{g}_{lk}]_n^* [\mathbf{g}_{lk'}]_n, \quad \square \square \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\hat{g}_{lk}]_n^* [\mathbf{w}_l]_n,$$

D_k, B_k và $I_{kk'}$ lần lượt thể hiện tín hiệu mong muốn, độ lợi búp sóng không xác định và nhiễu gây ra bởi người dùng khác. Chúng tôi xem xét tổng các thành phần dưới mẫu ở công thức (10) như ảnh hưởng tạp âm và sử dụng hệ số tạp âm Gaussian với trường hợp xấu nhất [13]. Tốc độ

và hệ số kênh truyền. Trước khi truyền dữ liệu, người dùng k nhân trọng số symbol của nó là q_k với hệ số công suất $\eta_k^u, 0 \leq \eta_k^u \leq 1$.

Tín hiệu nhận được tại ARS l được thể hiện như sau:

$$\mathbf{y}_l^u = \sqrt{\rho^u} \sum_{k=1}^K \mathbf{g}_{lk} \sqrt{\eta_k^u} q_k + \mathbf{w}_l^u. \quad (8)$$

Để xác định được symbol q_k được gửi từ người dùng thứ k . ARS thứ l thực hiện nhân tín hiệu nhận được \mathbf{y}_l^u với ước lượng kênh \hat{g}_{lk} . Sau đó đại lượng thu được $\hat{g}_{lk}^* \mathbf{y}_l^u$ được truyền tới GBS thông qua kết nối backhaul. Theo đó, GBS có thể thu được ước lượng kênh truyền:

$$r_k^u = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N [\hat{g}_{lk}]_n^* [\mathbf{y}_l^u]_n. \quad (9)$$

đích tách tín hiệu. Áp dụng phương pháp tương tự trong [1]. Đầu tiên, tín hiệu nhận được r_k^u được phân tích:

đạt được của người dùng k được tính toán như sau:

$$R_k^u = \log_2 \left(1 + \frac{\|D_k\|^2}{E \left\{ \|B_k\|^2 \right\} + \sum_{k' \neq k} E \left\{ \|I_{kk'}\|^2 \right\} + E \left\{ \|\square\|^2 \right\}} \right). \quad (11)$$

Theo kỹ thuật tương tự như trong [1], chúng tôi có thể thu được phương trình khả thi dạng đóng của đường lên (11) trình bày chi tiết ở công thức (12) ở đầu trang này.

2.3. Tối ưu công suất dữ liệu đường lên

Trong phần này trình bày cách hệ thống CF Multi-ARS có thể cung cấp dịch vụ chất lượng cao nhất cho tất cả người dùng và không phân biệt vị trí địa lý thông qua việc sử dụng công suất truyền dữ liệu đường lên được tối ưu hóa. Cụ thể, trong đường lên, bài toán của phương pháp tối ưu hóa công suất trình bày như sau:

$$\max_{\eta_k^u} \min_{k=1, \dots, K} R_k^u \quad (13)$$

$$0 \leq \eta_k^u \leq 1, k = 1, \dots, K,$$

trong đó R_k^u được đưa ra bởi công thức (12).

Bài toán (13) có thể viết lại là

$$\max_{\eta_k^u, t} t$$

$$t \leq R_k^u, k = 1, \dots, K \quad (14)$$

$$0 \leq \eta_k^u \leq 1, k = 1, \dots, K.$$

Mệnh đề 2: Bài toán tối ưu (14) là gần như tuyến tính.

Chúng minh: Từ công thức (13) với t đã cho có thể thấy rằng tất cả các bất bình đẳng liên quan đến (14) là tuyến tính và vì vậy bài toán (14) là gần như tuyến tính. Kết quả là, bằng việc sử dụng phương pháp Bisection để giải quyết bài toán tuyến tính theo tài liệu [21], bài toán (14) có thể giải quyết hiệu quả. Cụ thể, thuật toán 1 trình bày sẽ giải quyết biểu thức (14). Cụ thể quy trình giải thuật như sau:

Thuật toán 1: Thuật toán phân đôi (Bisection) giải quyết bài toán tối ưu lồi (14)

1: Khởi tạo: Lựa chọn giá trị đầu tiên của t_{\min} và t_{\max} định nghĩa là khoảng giá trị của hàm mục tiêu ở (14). Đặt giá trị sai số cho phép $\varepsilon > 0$

2: While $t_{\max} - t_{\min} < \varepsilon$ thực hiện
 $t := (t_{\max} + t_{\min}) / 2$.

Nếu Bài toán (14) là khả thi. Sau đó cài đặt $t_{\max} := t$ nếu không $t_{\min} := t$

Kết thúc

$$\text{Đặt } t^* \leftarrow \frac{t_{\max} + t_{\min}}{2}$$

3: End

4: Return t^*

Độ phức tạp tính toán: Độ chính xác của thuật toán chia đôi phụ thuộc vào mức độ sai số ε , trong đó dung sai càng nhỏ thì độ chính xác càng cao, nhưng đồng thời cũng làm tăng độ phức tạp tính toán do cần nhiều vòng lặp hơn. Số vòng lặp cần thiết để đạt được nghiệm trong phạm vi sai số ε được xác định

$$\text{nhằm đảm bảo hội tụ } n \geq \log_2 \left(\frac{t_{\max} - t_{\min}}{\varepsilon} \right)$$

và độ chính xác của nghiệm tối ưu.

3. Kết quả và thảo luận

Chúng tôi thử nghiệm ảnh hưởng của số lượng người dùng (K), số lượng ARS (L) và thời gian huấn luyện pilot (τ^α) đến thông lượng người dùng ở cả hai trường hợp tối ưu và không tối ưu công suất truyền dữ liệu đường lên.

Các tham số đã liệt kê trong Bảng 2 được sử dụng cho tất cả các kịch bản thí nghiệm. Tất cả ARS và người dùng được phân bố ngẫu nhiên trong một vùng rộng lớn có kích thước $D \times D$ km². Các đại lượng $\bar{\rho}^p, \bar{\rho}^u$ trong bảng tham số này lần lượt là giá trị trung bình công suất phát của các symbol pilot và dữ liệu đường lên. Chúng tôi phân tích thông lượng đường lên trên người dùng theo công thức sau:

$$T_k^u = B \frac{1 - \tau^\alpha / \tau^c}{2} R_k^u, \quad (15)$$

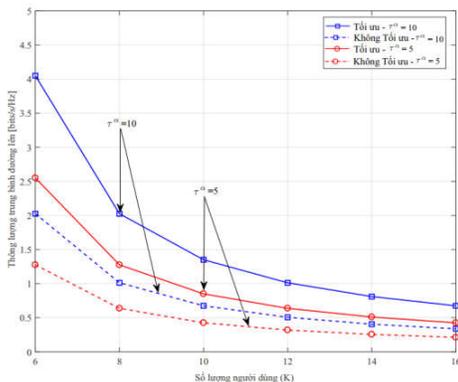
Bảng các tham số mô phỏng

Tham số	Giá trị
Tần số sóng mang	1.9 GHz
Băng thông	20 MHz

Băng thông kết hợp	200 KHz
Độ cao ARS	22.5m – 300m
Công suất phát (ρ^p, ρ^u)	100, 100 mW
Khoảng thời gian kết hợp (τ^c)	200 mẫu
Diện tích	1 Km ²

Chú ý rằng trong mô hình đề suất của chúng tôi, thông lượng trung bình đường lên của người dùng được tính theo các vị trí khác nhau của người dùng và ARS. 200 lần thực hiện ngẫu nhiên ARS và vị trí của người dùng cho ra kết quả mô phỏng. Trường hợp không tối ưu công suất, tất cả người dùng truyền với mức công suất tối đa, tức là $\eta_k^u = 1, k=1, \dots, K$. Trong khi đó trường hợp tối ưu công suất truyền dữ liệu đường lên, thông lượng mạng đường lên được đưa ra bằng việc sử dụng hệ số công suất được tính toán ở Phần 2.3.

Có thể thấy rằng tất cả các hình minh họa thông lượng trung bình của trường hợp tối ưu công suất cao hơn so với trường hợp không tối ưu ở mô hình CF Multi-ARS. Cụ thể, Hình 2 chỉ ra rằng thông lượng trung bình giảm khi số người dùng tăng lên. Nguyên nhân dẫn đến điều này là khi số lượng người dùng tăng lên, nhiều liên người dùng đồng thời sẽ tăng. Chính vì vậy làm giảm hiệu quả giải mã tín hiệu.

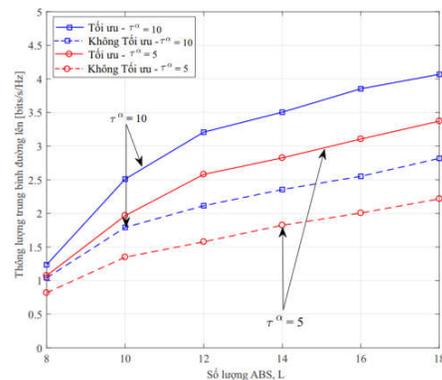


Hình 2. Thông lượng đường lên trung bình so với số lượng người dùng tương đương Có/Không tối ưu công suất

Mặt khác khi số người dùng cao yêu cầu ước lượng kênh truyền tăng điều này ảnh hưởng đến khung thời gian dành cho truyền dữ liệu. Ngược lại, Hình 3 thể hiện thông lượng người dùng cải thiện khi số lượng ARS tăng. Bởi vì càng nhiều ARS phục vụ tăng độ lợi cho quá trình truyền sóng tại 1 thời điểm đồng thời càng nhiều dữ liệu được thu về.

Trong cả hình 2 và hình 3 chúng tôi khảo sát thông lượng của người dùng đường lên với $\tau^a = 5$ và $\tau^a = 10$. Chúng ta có thể thấy rằng với trường hợp $\tau^a = 10$ có giá trị thông lượng trung bình tốt hơn. Nguyên nhân của điều này là với $\tau^a = 10$ có nhiều khoảng thời gian dành cho ước lượng kênh truyền hơn do đó phẩm chất ước lượng kênh truyền tốt hơn đồng thời nhiễu chuỗi pilot sẽ giảm xuống.

Hình 4 mô tả ảnh hưởng của chiều dài chuỗi pilot (τ^a) lên thông lượng trung bình của hệ thống. Nếu giá trị τ^a nhỏ khoảng thời gian dành cho truyền dữ liệu nhiều hơn trong toàn bộ khung thời gian kết hợp trong khi đó chất lượng kênh truyền sẽ bị giảm xuống do việc tăng vấn đề nhiễu chuỗi pilot. Khi tăng giá trị τ^a thì thông lượng sẽ tăng đến một giá trị cụ thể.

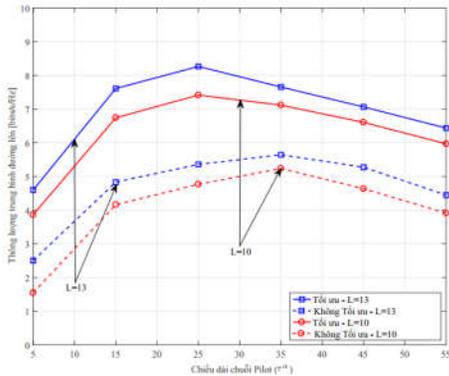


Hình 3. Thông lượng đường lên trung bình so với số lượng ARS tương đương Có/Không tối ưu công suất

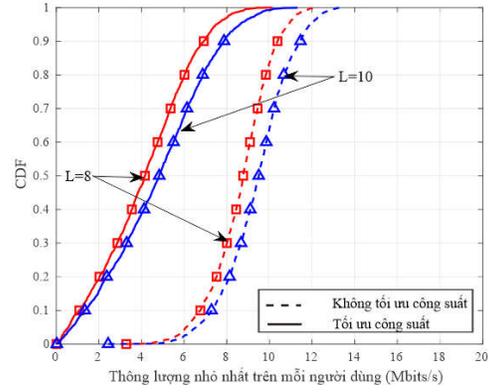
Điều này có thể giải thích bởi thực tế rằng với số lượng ARS và người dùng cố định thì tăng chiều dài chuỗi pilot để khoảng thời gian ước lượng kênh được mở rộng. Vì vậy, chất lượng ước

lượng kênh truyền sẽ tốt hơn và nhiều kết hợp sẽ giảm. Tuy nhiên với giá trị lớn hơn $\tau^\alpha = 25$ ứng với trường hợp tối ưu và $\tau^\alpha = 35$ đối với trường hợp không tối ưu thì việc gia tăng có xu hướng bão hòa vì số lượng ký tự phân bổ cho truyền dữ liệu đường lên bị giảm. Nếu chúng ta tiếp tục tăng chiều dài chuỗi pilot tương đương với việc thông lượng trung bình sẽ giảm.

Hơn thế nữa, chúng tôi phân tích chất lượng của hệ thống khi số lượng ARS thay đổi $L=10$ và $L=13$. Có thể thấy $L=13$ cho thông lượng tốt hơn $L=10$ bởi vì với số lượng ARS lớn có thể nâng cao được khả năng phủ sóng và chất lượng người dùng sẽ được cải thiện tốt hơn. Hình 5 minh họa hàm phân phối tích lũy (CDF: *Cumulative Distribution Function*) của thông lượng người dùng thấp nhất. Kết quả cho thấy rằng việc tối ưu công suất giúp cải thiện đáng kể thông lượng người dùng. Cụ thể, tại ngưỡng CDF = 0.1 (tương ứng với 90% xác suất thông lượng đạt được), khi số lượng ARS phục vụ là $L=10$, người dùng đạt được thông lượng 7 Mbit/s trong trường hợp có tối ưu công suất, so với chỉ 1 Mbit/s khi không áp dụng tối ưu. Bên cạnh đó, khi số lượng ARS phục vụ tăng, thông lượng người dùng cũng được nâng cao tương ứng.



Hình 4. Thông lượng đường lên trung bình so với chiều dài chuỗi pilot khác nhau - Có/Không tối ưu.



Hình 5. CDF của thông lượng người dùng, tương đương với trường hợp Có/Không tối ưu.

4. Kết Luận

Bài báo này đã nghiên cứu hệ thống CF nhiều ARS đường lên được trang bị nhiều ăng ten và được đặt ngẫu nhiên xung quanh khu vực nhất định để phục vụ số lượng người dùng mặt đất. Sau khi xác định biểu thức dạng đóng theo thông lượng đường lên của từng người dùng, chúng tôi đã sử dụng thuật toán tối ưu hóa cho hệ số kiểm soát công suất dữ liệu nhằm cải thiện thông lượng đường lên. Kết quả cho thấy hiệu năng của hệ thống có tối ưu hệ số điều khiển công suất dữ liệu được cải thiện và cao hơn so với hệ thống không có tối ưu trong tất cả các kịch bản được xem xét. Chúng tôi cũng xem xét tác động của số lượng người dùng, ARS và thời gian huấn luyện đối với chất lượng hệ thống. Tuy nhiên, chúng tôi chỉ đánh giá đường lên, hiệu suất đường xuống và điều khiển công suất trong huấn luyện đường lên nên được đánh giá cho các nghiên cứu trong tương lai.

Tài liệu tham khảo

1. G. Interdonato, *Cell-Free Massive MIMO: Scalability, Signal Processing and Power Control*. Linköping University Electronic Press, 2020.
2. H. He, X. Yu, J. Zhang, S. Song, and K. B. Letaief, "Cell-Free Massive MIMO for 6G Wireless Communication Networks,"

- Journal of Communications and Information Networks, vol. 6, no. 4, pp. 321-335, 2021.
3. M. Mozaffari, X. Lin, and S. Hayes, "Toward 6G with connected sky: UAV and beyond," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 12, pp. 74-80, 2021.
 4. T. M. Hoang, X. N. Tran, and P. T. Hiep, "Outage probability of aerial base station noma mimo wireless communication with RF energy harvesting," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 22, pp. 22874-22886, 2022.
 5. Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Communications magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, 2016.
 6. T. C. Mai, H. Q. Ngo, M. Egan, and T. Q. Duong, "Pilot power control for cell-free massive MIMO," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 11264-11268, 2018.
 7. H. Q. Ngo, A. Ashikhmin, H. Yang, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Cell-free massive MIMO: Uniformly great service for everyone," in *2015 IEEE 16th international workshop on signal processing advances in wireless communications (SPAWC), 2015: IEEE*, pp. 201-205.
 8. S. Buzzi and C. D'Andrea, "Cell-free massive MIMO: User-centric approach," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 6, pp. 706-709, 2017.
 9. Y. Liu, H.-N. Dai, H. Wang, M. Imran, X. Wang, and M. Shoaib, "UAV-enabled data acquisition scheme with directional wireless energy transfer for Internet of Things," *Computer Communications*, vol. 155, pp. 184-196, 2020.
 10. C. D'Andrea, A. Garcia-Rodriguez, G. Geraci, L. G. Giordano, and S. Buzzi, "Analysis of UAV communications in cell-free massive MIMO systems," *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, pp. 133-147, 2020.
 11. J. An and F. Zhao, "Trajectory optimization and power allocation algorithm in MBS-assisted cell-free massive MIMO systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 30417-30425, 2021.
 12. 3GPP, "Technical specification group radio access network; study on enhanced LTE support for aerial vehicles," p. TR 36.777, 2017.
 13. B. Hassibi and B. M. Hochwald, "How much training is needed in multiple-antenna wireless links?," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 4, pp. 951-963, 2003.