

TỐI ƯU HÓA TỔNG THÔNG LƯỢNG CHO HỆ THỐNG VIỄN THÔNG VỚI NHIỀU TRẠM CHUYỂN TIẾP TRÊN KHÔNG BẰNG THUẬT TOÁN TỐI ƯU BẦY ĐÀN

MAX-SUM THROUGHPUT IN MULTI-ARS SMALL CELL SYSTEMS USING PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Nguyễn Thái Cường¹, Nguyễn Văn Sơn², Đặng Hoàng Anh²,
Nguyễn Bá Nghi¹, Phạm Thanh Hiệp^{3,*}

DOI: <https://doi.org/10.57001/huih5804.2026.050>

TÓM TẮT

Mô hình đơn kết nối đường lên trong hệ thống không phân chia tế bào được hỗ trợ bởi nhiều phương tiện bay không người lái làm trạm chuyển tiếp trên không (ARS - Aerial relay station) được khảo sát trong nghiên cứu này. Chúng tôi tập trung vào việc tối ưu hóa tổng thông lượng của hệ thống bằng cách điều chỉnh công suất phát dữ liệu đường lên của mỗi người dùng. Bài toán tối ưu hóa tổng thông lượng là một bài toán không lồi và khó giải quyết bằng các phương pháp truyền thống, để giải quyết vấn đề này, chúng tôi đề xuất sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO - Particle swarm optimization), một thuật toán metaheuristic lấy cảm hứng từ tự nhiên, nổi tiếng về hiệu quả trong việc giải quyết các bài toán tối ưu hóa phức tạp, quy mô lớn. Hiệu năng của hệ thống được đánh giá bằng cách so sánh thông lượng trung bình của người dùng đạt được với việc điều khiển công suất dựa trên PSO so với kịch bản tối đa hoá thông lượng tối thiểu và không điều khiển công suất, tất cả người dùng đều phát ở công suất tối đa. Kết quả mô phỏng cho thấy thuật toán PSO cải thiện đáng kể tổng thông lượng của hệ thống bằng cách quản lý hiệu quả nhiễu giữa các người dùng. Các kết quả này khẳng định rằng PSO là một công cụ mạnh mẽ và linh hoạt để phân bổ tài nguyên trong các hệ thống truyền thông động, sử dụng nhiều ARS.

Từ khóa Hệ thống thông tin sử dụng nhiều ARS, tối ưu hóa công suất, tối ưu hóa tổng thông lượng, thuật toán PSO.

ABSTRACT

An uplink small cell (SC) system model that operates without traditional cell boundaries, leveraging multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) as aerial relay stations (ARSs), is analyzed in this research. We focus on optimizing the total system throughput by adjusting the uplink data transmission power of the users. Specifically, we formulate a max-sum rate optimization problem, which is inherently non-convex and challenging to solve with traditional methods. To address this, we propose to employ the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm, a nature-inspired metaheuristic known for its effectiveness in solving complex, large-scale optimization problems. The system's performance is evaluated by comparing the average user throughput achieved with PSO-based power control against a baseline scenario where all users transmit at full power. Simulation results demonstrate that the PSO algorithm significantly enhances the total system throughput by effectively managing inter-user interference. The findings confirm that PSO is a powerful and flexible tool for resource allocation in dynamic, multi-ARS communication systems

Keywords: Multi-ARS, power optimization, small cell, max-sum rate, PSO algorithm.

¹Trường Công nghệ thông tin và truyền thông, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

²Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Mở Hà Nội

³Khoa Vô tuyến điện tử, Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn

*Email: thanhhiệp@lqdtu.edu.vn

Ngày nhận bài: 05/8/2025

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 25/12/2025

Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2026

1. GIỚI THIỆU

Sự phát triển hướng tới mạng 5G và tương lai là 6G đã làm tăng nhu cầu về các giải pháp sáng tạo có thể cung cấp kết nối mọi lúc, mọi nơi, dung lượng cao và đáng tin cậy. Trong bối cảnh đó, việc tích hợp các phương tiện bay không người lái (UAV - Unmanned aerial vehicle) làm trạm chuyển tiếp trên không (ARS - Arial relay station) vào các mạng không dây đã thu hút được sự chú ý đáng kể [1, 2]. UAV mang lại sự linh hoạt trong triển khai chưa từng có, cho phép thiết lập mạng nhanh chóng ở những khu vực thiếu cơ sở hạ tầng mặt đất hoặc cần tăng cường dung lượng tạm thời. Khi kết hợp với kiến trúc đơn kết nối (SC - Small cell), một hệ thống nhiều ARS có thể phục vụ hiệu quả một số lượng lớn người dùng trong một khu vực cụ thể, nâng cao cả phạm vi phủ sóng và hiệu năng tổng thể của hệ thống.

Một trong những thách thức quan trọng trong các hệ thống nhiều người dùng, nhiều ARS như vậy là việc quản lý hiệu quả tài nguyên vô tuyến để giảm thiểu nhiễu và tối đa hóa dung lượng hệ thống. Điều khiển công suất đường lên là một cơ chế quan trọng để đạt được mục tiêu này. Mặc dù các chiến lược đơn giản như truyền ở công suất tối đa dễ thực hiện, chúng thường dẫn đến nhiễu nghiêm trọng giữa các người dùng, làm suy giảm hiệu năng của nhiều người dùng. Do đó, cần có các chiến lược tối ưu hóa công suất tinh vi hơn. Một số nghiên cứu về hệ thống sử dụng nhiều ARS không phân chia tế bào đã được công bố trong các tài liệu [3 - 7]. Trong đó, việc nghiên cứu tối ưu công suất cho hệ thống đa kết nối [3 - 5] và đơn kết nối [6, 7] để giảm nhiễu giữa các người dùng, tăng thông lượng người dùng đã được thực hiện. Tuy nhiên, các nghiên cứu này tập trung vào tối đa hoá mức thông lượng tối thiểu, tập trung vào việc biến đổi thông lượng của một người dùng sang các hàm lỗi và giải quyết bằng các bài toán tối ưu toán học.

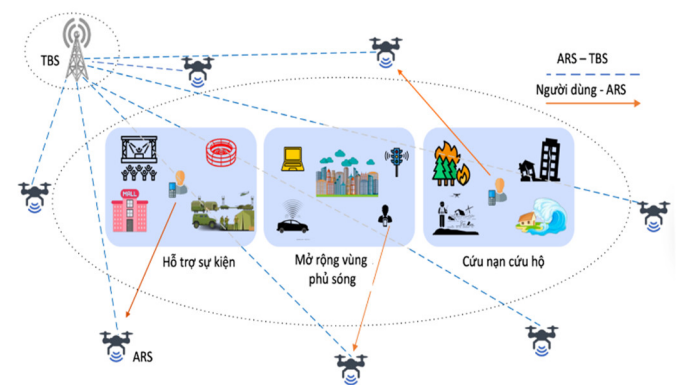
Tối đa hóa tổng thông lượng của tất cả người dùng là một mục tiêu phổ biến trong thiết kế hệ thống, vì nó nhằm mục đích đạt được tổng thông lượng dữ liệu cao nhất có thể cho toàn bộ mạng. Tuy nhiên, bài toán tối ưu hóa tổng thông lượng thường không lồi, gây khó khăn cho việc giải quyết bằng các kỹ thuật tối ưu hóa lồi truyền thống. Điều này đã khiến các nhà nghiên cứu khám phá các thuật toán metaheuristic, vốn rất phù hợp để tìm kiếm các giải pháp chất lượng cao cho các bài toán tối ưu hóa phức tạp, phi tuyến [8, 9].

Trong số các thuật toán lấy cảm hứng từ tự nhiên khác nhau, tối ưu hóa bầy đàn (PSO - Particle swarm optimization) đã nổi lên như một phương pháp mạnh mẽ

và hiệu quả. Lấy cảm hứng từ hành vi xã hội của đàn chim hoặc bầy cá, PSO tìm kiếm giải pháp tối ưu trong một không gian nhiều chiều thông qua một quần thể các giải pháp ứng cử viên, hay còn gọi là "hạt" (particles) [10]. Ưu điểm của nó bao gồm dễ triển khai, ít tham số cần điều chỉnh và khả năng mạnh mẽ trong việc tìm kiếm các điểm tối ưu toàn cục cho các bài toán phức tạp [11]. Mặc dù PSO đã được áp dụng trong nhiều bối cảnh truyền thông không dây khác nhau, việc ứng dụng nó để điều khiển công suất nhằm tối đa hóa tổng thông lượng trong một hệ thống SC nhiều ARS vẫn là một lĩnh vực nghiên cứu đầy hứa hẹn.

Bài báo này tập trung vào vấn đề cụ thể này, chúng tôi đề xuất một hệ thống đơn kết nối sử dụng nhiều ARS đường lên, trong đó nhiều người dùng giao tiếp với một trạm gốc mặt đất (TBS - Terrestrial base station) thông qua một số lượng lớn ARS hoạt động như các trạm chuyển tiếp giải mã và chuyển tiếp (DF - Decode and forward). Chúng tôi xây dựng bài toán điều khiển công suất đường lên như một nhiệm vụ tối ưu hóa tổng thông lượng và sử dụng thuật toán PSO để tìm các hệ số phân bổ công suất tối ưu cho người dùng. Đóng góp chính của công trình này là chứng minh và định lượng các lợi ích về hiệu năng đạt được khi sử dụng PSO để tối đa hóa tổng thông lượng so với chiến lược truyền ở công suất tối đa đơn giản. Phân tích của chúng tôi cung cấp những hiểu biết có giá trị về hiệu quả của PSO như một giải pháp thực tế để quản lý tài nguyên trong các mạng không dây được hỗ trợ bởi UAV trong tương lai.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

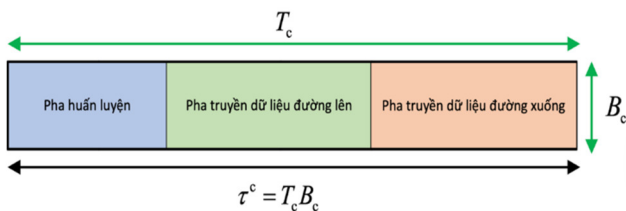


Hình 1. Các kịch bản triển khai và mô hình hệ thống SC nhiều ARS đường lên

Chúng tôi xem xét một mô hình SC nhiều ARS đường lên được thiết kế để hoạt động trong các bối cảnh thực tế khác nhau, như minh họa trong hình 1. Hệ thống bao gồm A trạm ARS và K người dùng, mỗi thiết bị được trang bị một ăng-ten đơn và được phân bố ngẫu nhiên trong một khu vực địa lý xác định. Các ARS này phục vụ người

dùng trên cùng một tài nguyên thời gian - tần số và chuyển tiếp dữ liệu của họ đến một TBS trung tâm.

Quá trình truyền thông được chia thành hai giai đoạn chính: liên kết từ Người dùng đến ARS và liên kết từ ARS đến TBS. Chúng tôi sử dụng giao thức chuyển tiếp DF tại ARS, và giả định rằng hai giai đoạn này diễn ra trong các khe thời gian khác nhau, không gây nhiễu lẫn nhau. Việc truyền thông đường lên trong mỗi liên kết tuân theo giao thức song công phân chia theo thời gian (TDD - Time division duplex), như trong Hình 2, bao gồm 03 giai đoạn hay còn gọi là 03 pha: pha huấn luyện đường lên, dùng để gửi các tín hiệu hoa tiêu dành cho ước lượng kênh truyền, pha truyền dữ liệu đường lên (từ người dùng tới TBS) và pha truyền dữ liệu đường xuống (từ TBS tới người dùng). Bài báo này tập trung vào các liên kết Người dùng-ARS, vì chất lượng của các liên kết này thường là nút thắt cổ chai đối với thông lượng từ đầu cuối đến đầu cuối của hệ thống.



Hình 2. Giao thức song công phân chia theo thời gian (TDD)

Kênh truyền giữa ARS thứ a và người dùng thứ k được mô hình hóa như sau:

$$g_{ak} = \sqrt{\beta_{ak}} h_{ak} \tag{1}$$

trong đó h_{ak} là thành phần pha định quy mô nhỏ, được mô hình hóa như một biến ngẫu nhiên độc lập và phân bố đồng nhất (i.i.d.) $\mathcal{CN}(0,1)$. Thành phần β_{ak} đại diện cho pha định quy mô lớn, bao gồm suy hao đường truyền và che khuất. Thành phần suy hao đường truyền, PL_{ak} được tính toán dựa trên tiêu chuẩn 3GPP LTE cho các phương tiện bay trong môi trường đô thị đông dân [12].

Trong mô hình SC được đề xuất của chúng tôi, khái niệm về ranh giới tế bào cố định được loại bỏ. Thay vào đó, mỗi người dùng kết nối với một ARS duy nhất cung cấp chất lượng kênh tốt nhất, được xác định bởi hệ số pha định quy mô lớn nhất. Việc liên kết lấy người dùng làm trung tâm này được định nghĩa là:

$$a_k = \arg \max_{\{a \in \text{ARSs}\}} \beta_{ak} \tag{2}$$

Chiến lược này đảm bảo rằng mỗi người dùng được phục vụ bởi trạm chuyển tiếp tốt nhất có thể tại bất kỳ thời điểm nào, đơn giản hóa việc xử lý tín hiệu và quản lý

tài nguyên. Chúng tôi giả định rằng liên kết này vẫn cố định trong suốt khoảng thời gian kết hợp (coherence interval).

Giao thức TDD bao gồm một pha để huấn luyện đường lên. Trong khoảng thời gian τ_p^u mẫu, mỗi người dùng k truyền một chuỗi hoa tiêu $\sqrt{\tau_p^u} \phi_k$. ARS phục vụ người dùng k , a_k , nhận tín hiệu hoa tiêu này và thực hiện ước tính kênh bằng kỹ thuật sai số trung bình bình phương tối thiểu (MMSE - Minimum mean square error) [13]. Kênh ước tính, $\hat{g}_{a_k k}$, có thể được biểu diễn như sau:

$$\hat{g}_{a_k k} = g_{a_k k} - \varepsilon_{a_k k} \tag{3}$$

trong đó, $\varepsilon_{a_k k}$ là sai số ước tính kênh, độc lập về mặt thống kê với ước tính $\hat{g}_{a_k k}$. Phương sai của kênh ước tính được ký hiệu là $\omega_{a_k k}$. Sau khi ước tính kênh, pha truyền dữ liệu đường lên bắt đầu. Người dùng thứ k truyền ký hiệu dữ liệu q_k (với $E\{|q_k|^2\} = 1$) với hệ số điều khiển công suất η_k^u ($0 \leq \eta_k^u \leq 1$) trên một tỉ số tín hiệu trên tạp âm (SNR - Signal to noise ratio) đường lên đã được chuẩn hóa là ρ^u . Tín hiệu nhận được tại ARS a_k là sự chồng chất của tín hiệu mong muốn từ người dùng k , nhiễu từ tất cả các người dùng khác ($k' \neq k$) và tạp âm, được thể hiện bởi công thức sau [14]:

$$y_{a_k}^u = \sqrt{\rho^u} \hat{g}_{a_k k} \sqrt{\eta_k^u} q_k + \sqrt{\rho^u} \varepsilon_{a_k k} \sqrt{\eta_k^u} q_k + \sqrt{\rho^u} \sum_{k' \neq k}^K g_{a_k k'} \sqrt{\eta_{k'}^u} q_{k'} + w_{a_k} \tag{4}$$

trong đó thành phần thứ hai là do sai số ước tính kênh, thành phần thứ ba là nhiễu đa người dùng, và w_{a_k} là nhiễu Gauss cộng. Dựa trên tín hiệu nhận được này, thông lượng đường lên có thể đạt được cho người dùng k có thể được biểu diễn dưới dạng đóng như sau:

$$R_k^{\text{User-ARS}} = E \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{\rho^u \eta_k^u |\hat{g}_{a_k k}|^2}{\rho^u \eta_k^u (\beta_{a_k k} - \omega_{a_k k}) + \rho^u \sum_{k' \neq k}^K \eta_{k'}^u \beta_{a_k k'} + 1} \right) \right\} \tag{5}$$

Vi ước tính kênh $|\hat{g}_{a_k k}|^2$ tuân theo phân phối mũ, thông lượng này có thể được tính bằng hàm tích phân mũ, $Ei(.)$ [6, 7].

3. ĐỀ XUẤT THUẬT TOÁN PSO TỐI ƯU HOÁ TỔNG THÔNG LƯỢNG

3.1. Thuật toán PSO

Mục tiêu chính của chúng tôi là tối đa hóa tổng thông lượng của hệ thống. Điều này có thể được xây dựng thành một bài toán tối ưu hóa tổng thông lượng, trong đó chúng tôi nhằm tìm ra tập hợp các hệ số điều khiển công suất tối ưu của người dùng $\eta^u = \{\eta_1^u, \dots, \eta_K^u\}$ để tối đa hóa

tổng các thông lượng có thể đạt được của tất cả người dùng. Bài toán được phát biểu như sau:

$$\begin{aligned} \max_{\eta^u} \sum_{k=1}^K R_k^{\text{User-ARS}} \\ \text{s.t. } 0 \leq \eta_k^u \leq 1, \quad \text{for all } k = 1, \dots, K. \end{aligned} \quad (6)$$

Hàm mục tiêu trong (6) là không lỗi do các thành phần nhiều kết hợp trong mẫu số của biểu thức thông lượng (5). Điều này gây khó khăn cho việc giải quyết bằng các phương pháp tối ưu hóa thông thường. Để giải quyết vấn đề này, chúng tôi sử dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO). PSO là một kỹ thuật tối ưu hóa ngẫu nhiên dựa trên quần thể, lấy cảm hứng từ trí tuệ tập thể của các bầy đàn. Nó hoạt động bằng cách duy trì một quần thể các giải pháp ứng cử viên, được gọi là các hạt, và di chuyển các hạt này trong không gian tìm kiếm theo các công thức toán học đơn giản về vị trí và vận tốc của hạt. Chuyển động của mỗi hạt bị ảnh hưởng bởi vị trí tốt nhất đã biết của chính nó và cũng được hướng dẫn đến các vị trí tốt nhất đã biết trong không gian tìm kiếm, được cập nhật khi các hạt khác tìm thấy các vị trí tốt hơn.

Đối với bài toán tối đa hoá tổng công suất, mỗi hạt đại diện cho một bộ hệ số điều khiển công suất hoàn chỉnh η^u cho tất cả K người dùng. "Độ phù hợp" (fitness) của mỗi hạt được đánh giá bằng hàm mục tiêu từ (6). Thuật toán PSO lặp đi lặp lại việc cập nhật vận tốc và vị trí của mỗi hạt để khám phá không gian giải pháp và hội tụ về tập hợp các hệ số công suất giúp tối đa hóa tổng thông lượng của toàn hệ thống. Quy trình chung được nêu trong Thuật toán 1.

Thuật toán 1: Thuật toán PSO để tối ưu hóa tổng thông lượng

1. **Khởi tạo hệ thống:** Xác định các tham số cho hệ thống đơn kết nối nhiều ARS đường lên.

2. **Khởi tạo quần thể PSO:**

- Tạo một quần thể gồm $N_{\text{particles}}$ hạt. Mỗi hạt p_i là một véc-tơ K chiều đại diện cho một giải pháp phân bổ công suất, η^u .

- Khởi tạo vận tốc v_i và vị trí p_i ngẫu nhiên cho tất cả các hạt trong không gian tìm kiếm $[0,1]^K$.

- Xác định các tham số PSO: trọng số quán tính w , hệ số học tập cá nhân c_1 , và hệ số học tập xã hội c_2 .

3. **Đánh giá độ phù hợp:**

- Đối với mỗi hạt p_i , tính giá trị độ phù hợp của nó bằng hàm mục tiêu:

$$F(\eta^u) = \sum_{k=1}^K R_k^{\text{User-ARS}} \quad (7)$$

- Khởi tạo vị trí tốt nhất của cá nhân p_i^{best} cho mỗi hạt và vị trí tốt nhất toàn cục g^{best} cho toàn bộ bầy đàn.

4. **Vòng lặp** (cho đến khi điều kiện dừng được thỏa mãn):

- Đối với mỗi hạt i :

- Cập nhật vận tốc của hạt:

$$\begin{aligned} v_i(t+1) = w \cdot v_i(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_i^{\text{best}}(t) - p_i(t)) \\ + c_2 \cdot r_2 \cdot (g^{\text{best}}(t) - p_i(t)), \end{aligned} \quad (8)$$

trong đó r_1, r_2 là các số ngẫu nhiên trong $[0,1]$.

- Cập nhật vị trí của hạt:

$$p_i(t+1) = p_i(t) + v_i(t+1).$$

- Áp dụng điều kiện biên: đảm bảo rằng tất cả các phần tử của $p_i(t+1)$ nằm trong phạm vi $[0,1]$.

- Đánh giá độ phù hợp của vị trí mới $F(p_i(t+1))$.

- Cập nhật vị trí tốt nhất cá nhân: Nếu $F(p_i(t+1)) > F(p_i^{\text{best}}(t))$, thì $p_i^{\text{best}}(t+1) = p_i(t+1)$.

- Cập nhật vị trí tốt nhất toàn cục: Nếu $F(p_i^{\text{best}}(t+1)) > F(g^{\text{best}}(t))$, thì $g^{\text{best}}(t+1) = p_i^{\text{best}}(t+1)$.

5. **Kết thúc:** Thuật toán dừng lại khi đạt đến số lần lặp tối đa hoặc sự cải thiện giá trị độ phù hợp toàn cục bị đình trệ.

6. **Đầu ra:** Trả về vị trí tốt nhất toàn cục g^{best} dưới dạng véc-tơ hệ số điều khiển công suất đã được tối ưu hóa η^u .

3.2. Phân tích độ phức tạp thuật toán PSO

Trong bài toán tối ưu hóa tổng thông lượng được xét, chi phí tính toán chủ yếu đến từ việc đánh giá hàm mục tiêu, tức là tổng thông lượng của tất cả người dùng, được xác định theo (5). Đối với mỗi người dùng, việc tính thông lượng yêu cầu tính toán nhiều gây ra bởi tất cả các người dùng còn lại, do đó độ phức tạp để đánh giá thông lượng cho một người dùng là $\mathcal{O}(K)$. Vì vậy, chi phí để đánh giá hàm mục tiêu cho toàn bộ hệ thống với K người dùng là $\mathcal{O}(K^2)$.

Thuật toán PSO duy trì một quần thể gồm N_p hạt, trong đó mỗi hạt đại diện cho một véc-tơ hệ số điều khiển công suất có K phần tử. Trong mỗi vòng lặp, thuật toán thực hiện các bước chính gồm: (i) cập nhật vận tốc và vị trí của từng hạt với độ phức tạp $\mathcal{O}(N_p K)$, và (ii) đánh giá hàm mục tiêu cho tất cả các hạt với độ phức tạp $\mathcal{O}(N_p K^2)$. Do đó, chi phí tính toán trong mỗi vòng lặp bị chi phối bởi bước đánh giá hàm mục tiêu.

Giả sử thuật toán PSO thực hiện tối đa I_{max} vòng lặp, độ phức tạp tính toán tổng thể của phương pháp PSO có thể được biểu diễn xấp xỉ như sau: $\mathcal{O}(I_{max}N_pK^2)$. Cần lưu ý rằng trong thực tế, số lượng hạt N_p và số vòng lặp I_{max} thường được chọn là các hằng số nhỏ và không phụ thuộc vào số người dùng K . Do đó, độ phức tạp của thuật toán PSO tăng theo bậc hai của số người dùng, cho thấy phương pháp đề xuất có khả năng mở rộng tốt và phù hợp để áp dụng cho các hệ thống SC nhiều ARS với số lượng người dùng vừa và lớn.

Đối với phương pháp tối đa hóa thông lượng tối thiểu (max-min), bài toán thường được giải thông qua việc giới thiệu một biến phụ và áp dụng thuật toán tìm kiếm hai phân (bisection) kết hợp với việc kiểm tra tính khả thi tại mỗi vòng lặp. Trong mỗi bước kiểm tra khả thi, thông lượng của từng người dùng cần được đánh giá trong điều kiện có nhiều từ tất cả các người dùng còn lại, dẫn đến độ phức tạp tính toán bậc hai theo số người dùng, tức là $\mathcal{O}(K^2)$. Ngoài ra, số vòng lặp của thuật toán bisection, ký hiệu là I_b , phụ thuộc vào độ chính xác yêu cầu và không cố định trước. Do đó, độ phức tạp tính toán tổng thể của phương pháp max-min có thể được xấp xỉ là: $\mathcal{O}(I_bK^2)$, trong đó I_b có thể khá lớn trong các kịch bản yêu cầu độ chính xác cao. Hơn nữa, tại mỗi vòng lặp, phương pháp max-min thường phải giải các bài toán con dạng lồi hoặc gần lồi, làm gia tăng đáng kể chi phí tính toán thực tế.

So với phương pháp max-min, thuật toán PSO được đề xuất không yêu cầu giải các bài toán con lặp đi lặp lại, cũng như không cần tính đạo hàm hay lồi hóa bài toán. Mặc dù PSO có thêm hệ số N_p liên quan đến số lượng hạt, nhưng N_p thường nhỏ và được giữ cố định. Do đó, phương pháp PSO thể hiện ưu thế về tính linh hoạt và khả năng mở rộng, đặc biệt phù hợp với các hệ thống SC nhiều ARS có cấu trúc động và số lượng người dùng lớn.

3.3. Tính hội tụ của thuật toán PSO

Thuật toán tối ưu hóa bầy đàn (PSO) là một phương pháp tối ưu metaheuristic dựa trên quần thể, trong đó các hạt di chuyển trong không gian tìm kiếm thông qua sự kết hợp giữa khả năng khai thác (exploitation) và khám phá (exploration). Mặc dù PSO không đảm bảo hội tụ toàn cục theo nghĩa chặt chẽ của tối ưu hóa lồi, nhiều nghiên cứu đã chỉ ra rằng thuật toán có khả năng hội tụ ổn định về nghiệm tối ưu cục bộ hoặc nghiệm gần tối ưu đối với các bài toán không lồi và đa cực trị.

Trong PSO, quá trình hội tụ được điều khiển bởi phương trình cập nhật vận tốc, bao gồm ba thành phần chính: thành phần quán tính, thành phần học tập cá nhân

và thành phần học tập xã hội. Trọng số quán tính w đóng vai trò quan trọng trong việc cân bằng giữa khả năng khám phá không gian tìm kiếm và khả năng hội tụ. Khi w được lựa chọn phù hợp (thường giảm dần theo số vòng lặp), các hạt ban đầu có xu hướng khám phá rộng, sau đó dần tập trung quanh các vùng nghiệm tốt, từ đó thúc đẩy quá trình hội tụ. Các hệ số học tập cá nhân c_1 và học tập xã hội c_2 lần lượt phản ánh xu hướng của hạt quay về nghiệm tốt nhất của chính nó và nghiệm tốt nhất toàn cục của bầy đàn. Khi hai hệ số này được thiết lập cân bằng, các hạt có xu hướng hội tụ về vùng lân cận của nghiệm tốt nhất toàn cục đã tìm được, đồng thời tránh hiện tượng dao động hoặc phân kỳ. Dưới các điều kiện tham số thỏa mãn, vận tốc của các hạt sẽ suy giảm dần theo thời gian, dẫn đến sự ổn định của vị trí các hạt và do đó đảm bảo tính hội tụ của thuật toán.

Đối với bài toán tối ưu hóa tổng thông lượng trong hệ thống SC nhiều ARS, không gian tìm kiếm của PSO là hữu hạn và bị chặn bởi các ràng buộc công suất $0 \leq \eta_k^u \leq 1$. Việc áp dụng điều kiện biên sau mỗi lần cập nhật vị trí giúp đảm bảo các hạt luôn nằm trong miền khả thi, từ đó tránh các hành vi không ổn định và góp phần cải thiện khả năng hội tụ của thuật toán. Ngoài ra, hàm mục tiêu được sử dụng là hàm liên tục theo các biến công suất, điều này tạo điều kiện thuận lợi cho quá trình hội tụ của PSO.

Trong thực tế, quá trình hội tụ của thuật toán PSO thường đạt được sau một số vòng lặp hữu hạn và giá trị hàm mục tiêu toàn cục có xu hướng tăng nhanh trong các vòng lặp đầu, sau đó bão hòa khi bầy đàn hội tụ quanh nghiệm tối ưu. Điều này cho thấy PSO có khả năng tìm ra nghiệm gần tối ưu với tốc độ hội tụ nhanh, đặc biệt phù hợp với các bài toán tối ưu phi lồi và có nhiều như bài toán điều khiển công suất trong hệ thống SC nhiều ARS. Do đó, mặc dù không đảm bảo tối ưu toàn cục tuyệt đối, thuật toán PSO vẫn là một công cụ hiệu quả và đáng tin cậy cho việc tối ưu hóa tổng thông lượng trong các hệ thống viễn thông động.

4. KẾT QUẢ SỐ VÀ THẢO LUẬN

Phần này đánh giá hiệu năng của hệ thống được đề xuất, tập trung vào hiệu quả của việc tối ưu hóa công suất dựa trên PSO cho chiến lược tối đa hóa tổng thông lượng. Chúng tôi so sánh kết quả với kịch bản cơ sở khi tất cả người dùng truyền tin với công suất tối đa ($\eta_k^u = 1$ cho mọi k). Hiệu năng hệ thống được đánh giá dựa trên thông lượng trung bình của người dùng.

Các tham số mô phỏng được dựa trên các cấu hình hệ thống thực tế và được trình bày chi tiết trong bảng 1.

Thông lượng của người dùng được tính toán có xem xét đến chi phí từ pha ước tính kênh, sử dụng công thức:

$$T_k^u = B(1 - \tau_p^u/\tau^c)R_k^{User-ARS}, \tag{9}$$

trong đó, B là băng thông, τ_p^u là thời lượng hoa tiêu đường lên, và τ^c là khoảng thời gian kết hợp. Đối với các kịch bản mà số lượng người dùng K vượt quá số lượng ARS A , chúng tôi giả định rằng chỉ có A người dùng có thể được phục vụ tại bất kỳ thời điểm nào. Để mô hình hóa điều này một cách công bằng, thông lượng trung bình được nhân với hệ số A/K .

Bảng 1. Các tham số mô phỏng

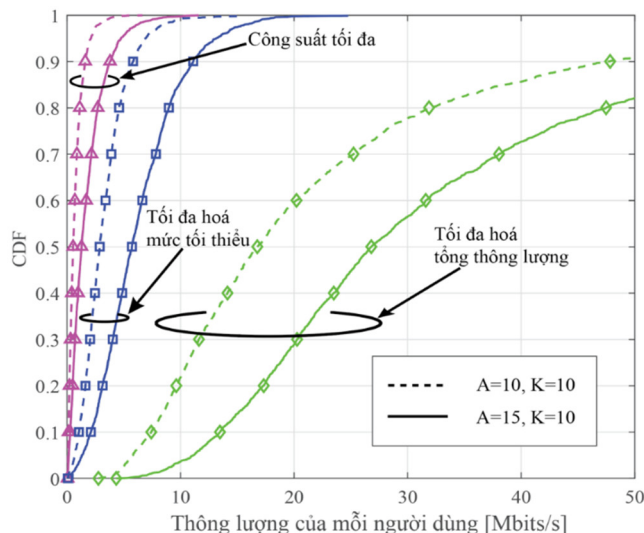
Tham số	Giá trị
Băng thông (B)	20MHz
Băng thông kết hợp (B_c)	200KHz
Thời gian kết hợp (T_c)	1ms
Hệ số nhiễu (NF)	9dB
Tần số sóng mang	6GHz
τ_p^u, τ_p^{ARS}	10 mẫu
τ^c	200 mẫu
Độ cao của ARS	$22,5m \leq h_{ARS} \leq 300m$
Công suất chuẩn hóa Hoa tiêu/Dữ liệu của người dùng	20/20mW
Công suất chuẩn hóa Hoa tiêu/Dữ liệu của ARS	200/200mW
Khu vực phân bố của A ARS và K người dùng	1km ²
Trọng số quán tính (w)	0,5
Trọng số nhận thức (hạt) (c_1)	1,5
Trọng số xã hội (bầy đàn) (c_2)	1,5
Số lượng hạt ($N_{particles}$)	30
Số lần lặp tối đa ($N_{iterations}$)	100
Số lần chạy độc lập	2000

Chúng tôi trình bày kết quả mô phỏng tập trung vào thông lượng trung bình của người dùng đạt được bởi chiến lược tối đa hóa tổng thông lượng sử dụng PSO, so với đường cơ sở là công suất tối đa. Thông lượng của người dùng được tính bằng công thức (9), và được biểu diễn thông qua hàm phân phối tích lũy (CDF - Cumulative distribution function) để tiện việc so sánh với phương pháp tối đa hóa thông lượng tối thiểu [7]. Phương pháp này được phát biểu như sau:

$$\begin{aligned} & \max_{\eta_k^u} \min R_k^{User-ARS}, \\ & \text{s.t. } 0 \leq \eta_k^u \leq 1, \quad \text{for all } k = 1, \dots, K. \end{aligned} \tag{10}$$

Với phương pháp toán học phân đôi (bisection), hệ số điều khiển công suất tối ưu cho chiếu lược tối đa hoá mức

tối thiểu đã được xác định [7], từ đó thông lượng của mỗi người dùng được tính toán tương tự theo công thức (9) và được biểu diễn trên các hình kết quả để so sánh với phương pháp tối ưu tổng thông lượng theo phương pháp PSO.

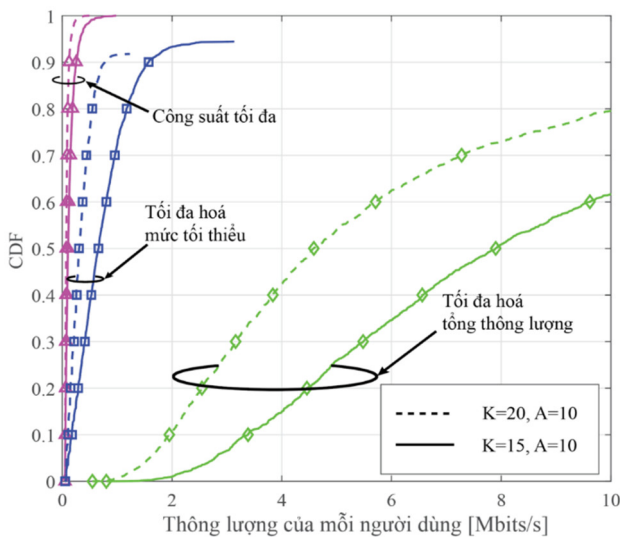


Hình 3. CDF của thông lượng trung bình trên mỗi người dùng cho chiến lược tối đa hóa tổng thông lượng bằng phương pháp PSO, tối đa hoá mức tối thiểu bằng phương pháp phân đôi và công suất tối đa với $K = 10$ và $A = 10, 15$

Hình 3 cho thấy hàm CDF của thông lượng trung bình của người dùng khi số lượng người dùng được cố định ở $K = 10$ và số lượng ARS thay đổi ($A = 10$ và $A = 15$). Kết quả rõ ràng cho thấy tối ưu hóa tổng thông lượng bằng PSO vượt trội đáng kể so với chiến lược tối đa hoá mức tối thiểu, và cao hơn nhiều so với việc truyền bằng công suất tối đa. Ví dụ, với $A = 15$, xét tại mức 90% người dùng đạt mức thông lượng (CDF = 0,1), thông lượng trung bình với PSO là khoảng 15 Mbits/s, tối đa hoá mức tối thiểu chỉ đạt 2 Mbit/s và chỉ khoảng 0.5 Mbits/s đối với trường hợp công suất tối đa. Sự gia tăng đáng kể này đạt được do PSO phân bổ công suất thấp hơn một cách thông minh cho những người dùng gây nhiễu mạnh, từ đó cải thiện SINR cho những người dùng khác và tăng dung lượng tổng của hệ thống. Hình 3 cũng cho thấy việc tăng số lượng ARS từ 10 lên 15 cải thiện thông lượng trung bình cho cả hai chiến lược, vì người dùng có cơ hội cao hơn được phục vụ bởi một ARS gần đó với điều kiện kênh tốt hơn.

Hình 4 kiểm tra hiệu năng hệ thống khi số lượng ARS được cố định ở $A = 10$ và số lượng người dùng thay đổi, lớn hơn số lượng ARS ($K = 15$ và $K = 20$). Một lần nữa, tối ưu hóa tổng thông lượng dựa trên PSO mang lại lợi thế rõ ràng so với chiến lược tối đa hoá mức tối thiểu và công suất tối đa. Khi số lượng người dùng tăng lên, việc truyền và nhận thông tin của người dùng và ARS bị ảnh hưởng

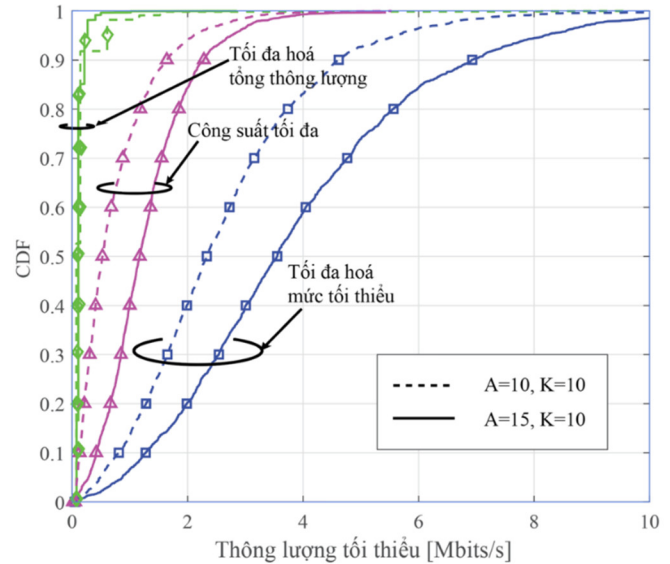
bởi nhiều nhiều hơn. Trong kịch bản này, chiến lược công suất tối đa hoạt động kém hiệu quả, vì nhiều gia tăng làm suy giảm nghiêm trọng SINR của hầu hết người dùng. Ngược lại, thuật toán PSO quản lý hiệu quả nhiều này bằng cách tối ưu hóa việc phân bổ công suất, dẫn đến thông lượng trung bình cao hơn nhiều. Kết quả cũng cho thấy khi K tăng từ 15 lên 20, thông lượng trung bình của người dùng giảm đối với cả hai phương án. Điều này là đúng với dự kiến, vì có nhiều người dùng hơn cạnh tranh cho cùng một tài nguyên do 10 ARS cung cấp, dẫn đến thông lượng trên mỗi người dùng thấp hơn. Tuy nhiên, khoảng cách hiệu năng giữa chiến lược được tối ưu hóa bằng PSO và chiến lược tối đa hoá mức tối thiểu, đặc biệt là công suất tối đa có sự chênh lệch lớn khi hệ thống trở nên đông đúc hơn, nhấn mạnh tầm quan trọng ngày càng tăng của việc điều khiển công suất thông minh trong các mạng dày đặc.



Hình 4. CDF của thông lượng trung bình trên mỗi người dùng cho chiến lược tối đa hoá tổng thông lượng bằng PSO, tối đa hoá mức tối thiểu bằng phương pháp phân đôi và công suất tối đa với $A = 10, K = 15, 20$

Việc tối đa hoá tổng thông lượng giúp nâng cao tổng thông lượng của hệ thống, vì thế thông lượng trung bình của từng người dùng cũng được nâng lên đáng kể, cao hơn so với các chiến lược khác so sánh trong công trình nghiên cứu như được biểu diễn trong hình 3 và 4. Tuy nhiên, chiến lược tối đa hoá tổng thông lượng chỉ tập trung vào tổng thông lượng mà không tập trung vào thông lượng của từng người dùng đơn lẻ, vì thế thông lượng tối thiểu của người dùng trong hệ thống dưới chiến lược tối đa hoá tổng thông lượng thấp hơn so với chiến lược tối ưu hoá mức tối thiểu, vốn tập trung nâng cao thông lượng thấp nhất, như biểu diễn trong hình 5. Vì thế, trong trường hợp người dùng ở những vị trí không thuận

lợi cho việc kết nối với ARS, thông lượng của người dùng có thể bị giảm xuống đáng kể nếu sử dụng chiến lược tối đa hoá tổng thông lượng. Để đảm bảo thông lượng của các người dùng đạt mức cao, cần có chế độ phân bổ ARS phù hợp, hỗ trợ kết nối đối với từng người dùng.



Hình 5. CDF của thông lượng tối thiểu trong các chiến lược khác nhau và công suất tối đa với $K = 10, A = 10, 15$

5. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã nghiên cứu hiệu năng đường lên của một hệ thống đơn kết nối nhiều ARS, tập trung vào việc tối đa hoá tổng thông lượng của hệ thống. Chúng tôi đã xây dựng bài toán điều khiển công suất đường lên dưới dạng bài toán tối ưu hóa tổng thông lượng, một bài toán không lồi và phức tạp. Để giải quyết, chúng tôi đã đề xuất áp dụng thuật toán tối ưu hóa bầy đàn, một phương pháp metaheuristic mạnh mẽ. Chúng tôi đã phát triển một mô hình hệ thống chi tiết, rút ra biểu thức cho thông lượng người dùng có thể đạt được và triển khai thuật toán PSO để tìm ra các hệ số điều khiển công suất tối ưu.

Kết quả mô phỏng của chúng tôi đã chứng minh rõ ràng những lợi ích đáng kể của việc sử dụng PSO để tối ưu hóa tổng thông lượng. So với chiến lược tối ưu hoá mức tối thiểu và truyền tải công suất tối đa cơ sở, phương pháp dựa trên PSO mang lại thông lượng trung bình của người dùng cao hơn đáng kể. Các lợi ích về hiệu năng đặc biệt rõ rệt trong các kịch bản bị giới hạn bởi nhiễu, chẳng hạn như khi số lượng người dùng tăng lên. Điều này khẳng định rằng việc phân bổ công suất thông minh, như được thực hiện bởi PSO, là rất quan trọng để giảm thiểu nhiễu giữa các người dùng và khai thác hết công suất của các hệ thống nhiều ARS. Các kết quả của nghiên cứu này

xác thực rằng PSO là một công cụ rất hiệu quả và thực tế để quản lý tài nguyên trong các mạng không dây thế hệ tiếp theo phức tạp được hỗ trợ bởi UAV. Công việc trong tương lai có thể khám phá tối ưu hóa đa mục tiêu bằng PSO, nhằm mục đích đồng thời tối đa hóa tổng thông lượng và đảm bảo sự công bằng cho người dùng.

LỜI CẢM ƠN

Công trình này được tài trợ bởi Bộ Giáo dục và Đào tạo theo đề tài mã số B2025-MHN-02.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. S. Gopi, S. Kalyani, L. Hanzo, "Cooperative 3D beamforming for small-cell and cell-free 6G systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 71 (5), 5023-5036, 2022.
- [2]. Y. Su, M. Liwang, Z. Chen, X. Du, "Toward optimal deployment of UAV relays in UAV-assisted internet of vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 72 (10), 13392-13405, 2023.
- [3]. Bui Anh Duc, Hoang Tran Manh, Hai-Nam Le, Xuan Nam Tran, Pham Thanh Hiep, Thu Phuong Nguyen, "Spatial Pilot Reassignment in Channel Training Phase of Multi-ARS Cell-Free System," in *2024 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2024)*, Ho Chi Minh, Viet Nam, 17-19, October, 2024.
- [4]. Bui Anh Duc, Tran Manh Hoang, Nguyen Thu Phuong, Xuan Nam Tran, Pham Thanh Hiep "Power Optimization and ARSs Selection Strategies in Downlink Cell-Free Multi-ARSs Communication Systems," *Arab. J. Sci. Eng.*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09441-4>.
- [5]. Bui Anh Duc, Tran Manh Hoang, Nguyen Thu Phuong, Xuan Nam Tran, Pham Thanh Hiep, "Pilot and data power optimization problems in multiple Aerial Relay Stations cell-free communication systems," *International Journal of Communication Systems*, 37, 10, e 5765, 2024. <https://doi.org/10.1002/dac.5765>.
- [6]. Anh Duc Bui, Manh Hoang Tran, Thu Phuong Nguyen, Xuan Nam Tran, Thanh Hiep Pham, "Data Power Optimization Algorithm for Downlink Multi-ARS Small Cell Communication Systems," *Journal on Information Technologies & Communications*, 1, 62-69, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32913/mic-ict-research.v2024.n1.1248>.
- [7]. Hoai Thi Bich Be, Duc Anh Bui, Hiep Thanh Pham, Phuong Thu Nguyen, "Developing Uplink Power Optimization and ARS Selection Algorithm for Multi-ARS Small Cell Communication System," *REV Journal on Electronics and Communications*, 14, 1, 20-27, 2024. doi: <http://dx.doi.org/10.21553/rev-jec.342>.
- [8]. A. Kumar, M. Nadeem, H. Banka, "Nature inspired optimization algorithms: A comprehensive overview," *Evolving Systems*, 14 (1), 141-156, 2023.

[9]. Q. Wu, J. Xu, Y. Zeng, D. W. K. Ng, N. Al-Dahir, R. Schober, A. L. Swindlehurst, "A comprehensive overview on 5G-and-beyond networks with UAVs: From communications to sensing and intelligence," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 39 (10), 2912-2945, 2021.

[10]. S. M. Mikki, A. A. Kishk, *Particle swarm optimization: A physics-based approach*, Vol. 20. Morgan & Claypool Publishers, 2008.

[11]. A. G. Gad, "Particle swarm optimization algorithm and its applications: A systematic review," *Archives of computational methods in engineering*, 29 (5), 2531-2561, 2022.

[12]. 3GPP, *Technical specification group radio access network; study on enhanced LTE support for aerial vehicles*. TR 36.777, Dec 2017.

[13]. T. L. Marzetta, H. Yang, *Fundamentals of massive MIMO*. Cambridge University Press, 2016.

[14]. S. M. Kay, *Fundamentals of statistical signal processing: Estimation theory*. Prentice-Hall, Inc., 1993.

AUTHORS INFORMATION

Nguyen Thai Cuong¹, Nguyen Van Son², Dang Hoang Anh², Nguyen Ba Nghien¹, Pham Thanh Hiep³

¹School of Information and Communications Technology, Hanoi University of Industry, Vietnam

²Faculty of Electrical and Electronic Engineering, Hanoi Open University, Vietnam

³Faculty of Radio-Electronic Engineering, Le Quy Don Technical University, Vietnam