

HỆ THỐNG SWIPT-NOMA TRUYỀN DẪN D2D HỖ TRỢ KẾT NỐI UAV 6G: TĂNG CƯỜNG TỐC ĐỘ TRUYỀN TẢI VÀ CẢI THIỆN HIỆU SUẤT NĂNG LƯỢNG

SWIPT-NOMA-D2D FOR 6G UAV NETWORKS: ENHANCING THROUGHPUT AND ENERGY EFFICIENCY

Doãn Thanh Bình

Trường Đại học Điện lực

Ngày nhận bài: 27/5/2025, Ngày chấp nhận đăng: 25/6/2025

Tóm tắt:

Bài báo này nghiên cứu việc tích hợp kỹ thuật truyền tải thông tin và năng lượng đồng thời (SWIPT) vào mạng 6G hỗ trợ các hệ thống UAV, sử dụng công nghệ Đa truy nhập phi trực giao (NOMA) và truyền thông thiết bị tới thiết bị (D2D). Mô hình hệ thống được đề xuất nhằm tối ưu hóa thông lượng và hiệu suất năng lượng (EE) thông qua việc tối ưu phân bổ công suất, thu hoạch năng lượng và quản lý nhiễu. Bài toán tối ưu đa mục tiêu được xây dựng với các ràng buộc thực tế như tính di động của UAV và bất định kênh truyền. Để giải quyết bài toán này, một thuật toán lai kết hợp giữa học tăng cường sâu (DRL) và tối ưu hóa lồi được phát triển. Kết quả mô phỏng cho thấy hệ thống đạt được mức cải thiện tích cực về hiệu suất năng lượng và thông lượng so với mạng UAV dựa trên OMA truyền thống. Nghiên cứu này góp phần xây dựng nền tảng quan trọng cho các hệ thống UAV 6G bền vững và hiệu suất cao trong tương lai.

Từ khóa: SWIPT-NOMA; D2D; 6G UAV.

Abstract:

This paper investigates the integration of Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT) into UAV-assisted 6G networks by employing Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) and Device-to-Device (D2D) communications. The proposed system model aims to optimize throughput and energy efficiency (EE) through effective power allocation, energy harvesting, and interference management. A multi-objective optimization problem is formulated under practical constraints such as UAV mobility and channel uncertainty. To tackle the non-convex nature of the problem, a hybrid algorithm combining Deep Reinforcement Learning (DRL) and convex optimization is developed. Simulation results demonstrate significant improvements in EE and increased throughput compared to conventional OMA-based UAV networks. This study contributes to establishing a critical foundation for future sustainable and high-performance 6G UAV system.

Keywords: SWIPT-NOMA; D2D; 6G UAV.

1. GIỚI THIỆU

A. Tổng quan đề tài

Mạng 6G đòi hỏi hiệu suất năng lượng cực cao, kết nối lớn và truyền thông độ trễ thấp cực kỳ đáng tin cậy (URLLC). UAV đóng vai trò then chốt đối với vùng phủ sóng động,

trong khi SWIPT giải quyết vấn đề bền vững năng lượng và NOMA tăng cường hiệu suất phổ. Truyền thông D2D làm giảm độ trễ và giảm tải lưu lượng từ UAV.

UAVs là thành phần chính trong 6G nhờ khả năng triển khai linh hoạt và phủ sóng rộng.

Tuy nhiên, hạn chế năng lượng và nhiễu tín hiệu làm giảm hiệu suất.

SWIPT: Cho phép UAV vừa truyền dữ liệu vừa cấp năng lượng cho thiết bị IoT.

NOMA: Tăng hiệu suất phổ bằng cách ghép nhiều người dùng trên cùng tần số.

D2D: Giảm tải cho UAV thông qua kết nối ngang hàng

B. Động lực nghiên cứu

Các nghiên cứu hiện tại về UAV-SWIPT-NOMA tập trung vào các số liệu bị cô lập (EE hoặc throughput) và bỏ qua việc quản lý nhiễu D2D. Những thách thức chính bao gồm thiết kế quỹ đạo UAV động, sự đánh đổi năng lượng-thời gian SWIPT và việc hủy nhiễu liên tiếp (SIC) của NOMA theo tính di động, tóm lại:

- Các nghiên cứu hiện tại về SWIPT-UAV chưa xét đến kết hợp NOMA và D2D.
- Thiếu cơ chế tối ưu hóa đa mục tiêu (EE và throughput) trong môi trường động.

C. Những đóng góp của nghiên cứu

Nghiên cứu không chỉ đề xuất một mô hình hệ thống đột phá tích hợp SWIPT-NOMA-D2D cho UAV 6G mà còn phát triển giải thuật tối ưu hóa lai hiệu quả, mở đường cho các ứng dụng thực tế như thành phố thông minh, mạng cảm biến không dây. Các kết quả mô phỏng và phân tích toàn diện chứng minh tính ưu việt của đề xuất so với các phương pháp hiện có, đóng góp quan trọng vào lĩnh vực mạng di động thế hệ mới.

1. Mô hình hệ thống: Kiến trúc SWIPT-NOMA-D2D hỗ trợ UAV cho 6G, kết hợp

tính di động, thu năng lượng và truyền nhận biết nhiễu.

- Kết hợp ba công nghệ tiên tiến: Nghiên cứu lần đầu tiên đề xuất mô hình tích hợp SWIPT, NOMA và D2D trong mạng UAV 6G, khắc phục hạn chế của các công trình trước chỉ tập trung vào từng công nghệ riêng lẻ.

- Tối ưu hóa đa lớp: Đồng thời giải quyết bài toán năng lượng (qua SWIPT), hiệu suất phổ (qua NOMA) và giảm tải mạng (qua D2D), tạo ra một kiến trúc toàn diện cho UAV 6G.

- Ứng dụng thực tế: Mô hình phù hợp với các kịch bản như giám sát thông minh, cứu hộ khẩn cấp – nơi UAV cần vừa cung cấp năng lượng, vừa đảm bảo tốc độ truyền dữ liệu cao.

- *Khác biệt so với nghiên cứu trước:*

+ Các nghiên cứu như [2], [3] chỉ tập trung vào SWIPT hoặc NOMA riêng rẽ, trong khi [5] nghiên cứu D2D mà bỏ qua SWIPT.

+ Đề xuất của bài báo loại bỏ xung đột giữa thu hoạch năng lượng và truyền dữ liệu bằng cơ chế phân chia thời gian động ($\tau\tau$), tối ưu hóa cả EE và throughput.

2. Giải thuật lai kết hợp DRL và Tối ưu lồi: Kết hợp ưu điểm của DRL và convex optimization.

DRL: Xử lý hiệu quả môi trường động (di chuyển UAV, biến đổi kênh truyền) bằng cách học chính sách tối ưu qua trial-and-error.

+ Convex optimization: Tối ưu hóa cục bộ các tham số (ví dụ: phân bổ công suất) khi bài toán được chuyển đổi sang dạng lồi thông qua kỹ thuật Successive Convex Approximation (SCA).

+ Giảm độ phức tạp tính toán: DRL giảm không gian tìm kiếm, trong khi SCA đảm bảo hội tụ nhanh, phù hợp với hệ thống thời gian thực.

- *Khác biệt so với nghiên cứu trước:*

+ Các công trình như [4] sử dụng phương pháp tối ưu truyền thống (ví dụ: Lagrange) cho bài toán tĩnh, không hiệu quả khi UAV di chuyển.

+ Giải thuật lai đề xuất đạt hiệu suất cao hơn 25% so với phương pháp chỉ dùng DRL hoặc convex optimization riêng lẻ (thể hiện qua số lần lặp để hội tụ trong mô phỏng).

3. Phân tích hiệu suất: Đánh giá hiệu năng toàn diện dưới các kịch bản UAV động.

- Phân tích ảnh hưởng của UAV mobility: Nghiên cứu đo lường tác động của vận tốc UAV đến hiệu suất hệ thống (ví dụ: throughput giảm 15% khi UAV tăng tốc từ 5 m/s lên 20 m/s), một yếu tố thường bị bỏ qua trong các công trình trước.

- Đề xuất tỷ lệ phân chia thời gian tối ưu (τ): Với mô hình có path loss lý tưởng cho thấy $\tau = 0,2 - 0,4$ là cân bằng lý tưởng giữa EE và throughput, và τ tối ưu thay đổi tùy theo mô hình hệ thống, cung cấp hướng dẫn thiết kế cho mô hình thực tế.

- *Khác biệt so với nghiên cứu trước:*

+ Các nghiên cứu như [1], [3] chỉ đánh giá hiệu năng trong môi trường tĩnh, không xét đến tính di động của UAV.

+ Kết quả mô phỏng sử dụng dataset đa dạng (vd: độ cao UAV thay đổi 50–200m, mật độ người dùng 8–20 nodes) phản ánh tính khả thi trong thực tế.

4. Đóng góp thực tiễn cho 6G

- Hỗ trợ tính bền vững: SWIPT giúp kéo dài tuổi thọ pin cho thiết bị IoT, phù hợp với xu hướng “green communication” của 6G.

- Tăng dung lượng mạng: NOMA và D2D cải thiện phổ tần sử dụng lên 32%, đáp ứng nhu cầu truyền tải dữ liệu lớn trong 6G.

- Gợi ý chuẩn hóa: Kết quả nghiên cứu cung cấp cơ sở để 3GPP phát triển tiêu chuẩn cho UAV trong Release 19/20.

D. Tổ chức bài báo và Ký hiệu Toán học

Trong phần tiếp theo, bài báo được tổ chức như sau:

• Phần II (Công trình liên quan): Phân tích các nghiên cứu tiền nhiệm về SWIPT, NOMA, và D2D trong mạng UAV, chỉ ra khoảng trống mà nghiên cứu này giải quyết.

• Phần III (Mô hình hệ thống): Trình bày kiến trúc mạng UAV tích hợp SWIPT-NOMA-D2D, cùng các mô hình kênh truyền và thu hoạch năng lượng.

• Phần IV (Xây dựng vấn đề): Định nghĩa bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu (EE và throughput) dưới các ràng buộc công suất, QoS, và năng lượng. Và đề xuất giải pháp giải quyết sử dụng giải thuật lai DRL và tối ưu lồi để giải bài toán phi tuyến.

• Phần V (Kết quả mô phỏng): Đánh giá hiệu năng hệ thống qua các kịch bản UAV động và so sánh với phương pháp cơ sở.

• Phần VI (Kết luận): Tóm tắt đóng góp chính và đề xuất hướng nghiên cứu tương lai.

Các ký hiệu chính được sử dụng xuyên suốt bài báo:

P : Vector công suất phát (UAV và thiết bị D2D).

τ : Vector tỷ lệ thời gian phân chia năng lượng-thông tin.

$h_{i,j}$: Hệ số kênh truyền giữa thiết bị i và j

η : Hiệu suất chuyển đổi năng lượng SWIPT

α : Hệ số Path loss (suy hao đường tuyến)

σ^2 : Công suất nhiễu Gauss trắng (AWGN)

P_{max} : Công suất phát tối đa của UAV.

R_{min} : Tốc độ truyền tối thiểu đảm bảo QoS.

E_{th} : Ngưỡng năng lượng thu hoạch tối thiểu.

2. CÁC CÔNG TRÌNH NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN

1. SWIPT trong UAV:

Tối ưu hóa công suất UAV để cân bằng giữa thu hoạch năng lượng và truyền dữ liệu, nhưng chỉ tập trung vào kịch bản single-user và bỏ qua NOMA/D2D [6].

Đề xuất mô hình SWIPT đa người dùng với UAV, nhưng sử dụng OMA, dẫn đến hiệu suất phổ thấp [7].

•Hạn chế:

- Các nghiên cứu chưa tích hợp cơ chế đa truy nhập tiên tiến (NOMA) hoặc tận dụng kết nối ngang hàng (D2D) để giảm tải cho UAV.

- Thiếu phân tích ảnh hưởng của di chuyển UAV đến hiệu suất SWIPT.

2. NOMA cho mạng UAV

Phân bổ công suất NOMA tĩnh dựa trên vị trí người dùng, nhưng không xét đến khả năng UAV cung cấp năng lượng [8].

Tối ưu hóa công suất động theo chuyển động UAV, nhưng bỏ qua vai trò của SWIPT và D2D [9].

• Hạn chế:

- Các mô hình NOMA hiện tại chưa kết hợp với cơ chế thu hoạch năng lượng, dẫn đến giới hạn về thời gian hoạt động của thiết bị.

- Việc quản lý nhiễu trong NOMA chưa được nghiên cứu kỹ trong môi trường UAV di động đa người dùng.

3. D2D Communications trong UAV Networks

Đề xuất D2D để giảm độ trễ truyền dữ liệu, nhưng không tích hợp SWIPT/NOMA [10].

Tối ưu năng lượng cho D2D nhưng dựa trên nguồn pin cố định, không sử dụng SWIPT [11].

•Hạn chế:

- Các nghiên cứu D2D trong UAV chủ yếu tập trung vào offloading dữ liệu mà chưa khai thác tiềm năng của NOMA để tăng hiệu suất phổ.

- Thiếu cơ chế cung cấp năng lượng liên tục cho thiết bị D2D thông qua UAV.

4. Những hạn chế

Từ các phân tích cụ thể về các nghiên cứu trước như trên, có thể tóm lược những hạn chế như sau:

•Thiếu tích hợp đa công nghệ: Không có nghiên cứu nào đồng thời kết hợp SWIPT, NOMA, và D2D trong mạng UAV.

•Tối ưu hóa tĩnh: Các giải pháp phân bổ công suất/thời gian thường giả định UAV cố định, không phù hợp với môi trường di động thực tế.

• Bỏ qua trade-off EE-Throughput: Chưa có cơ chế tối ưu hóa đa mục tiêu để cân bằng giữa hiệu suất năng lượng và throughput.

Bảng 1. So sánh với các nghiên cứu liên quan

Nghiên cứu	SWIPT	NOMA	D2D	Tối ưu Động	Đa mục tiêu (EE + Throughput)
[6] Wu et al. (2020)	✓	✗	✗	✗	EE only
[8] Ding et al. (2019)	✗	✓	✗	✗	Throughput only
[10] Zhang et al. (2021)	✗	✗	✓	✓	Latency minimization
Nghiên cứu hiện tại	✓	✓	✓	✓	EE + Throughput

3. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Hệ thống đề xuất tích hợp UAV làm trạm gốc di động, hỗ trợ SWIPT để cung cấp năng lượng và dữ liệu cho các cặp D2D sử dụng NOMA. Mục tiêu chính là tối ưu hóa đồng thời hiệu suất năng lượng (EE) và throughput thông qua quản lý công suất, phân bổ tài nguyên, và giảm nhiễu.

A. Kiến trúc mạng

Giao tiếp thiết bị đến thiết bị (D2D) là công nghệ 5G thuận lợi vì nó hỗ trợ giao tiếp trực tiếp giữa những người dùng mà không cần đi qua BS. Hơn nữa, mạng D2D hỗ trợ NOMA đường xuống hỗ trợ truyền thông tin và năng lượng không dây đồng thời (SWIPT) được đề xuất để bao phủ khu vực không hoạt động. Bộ thu D2D sử dụng SWIPT chuyển mạch thời gian: τ để thu năng lượng (EH), $1-\tau$ để giải mã thông tin (ID). UAV hoạt động như trạm gốc di động, sử dụng SWIPT để cung cấp năng lượng cho các thiết bị D2D. Các cặp D2D sử dụng NOMA để truyền dữ liệu uplink.

• Thành phần chính:

1. UAV: Đóng vai trò trạm gốc di động, phát sóng RF kết hợp năng lượng (SWIPT) và dữ liệu đến các thiết bị D2D. Sử dụng anten định hướng để tập trung năng lượng vào các D2D-Rx ở xa, giảm suy hao.

2. Các cặp D2D: Gồm transmitter (D2D-Tx) và receiver (D2D-Rx), sử dụng NOMA để truyền dữ liệu uplink/downlink trên cùng băng tần. D2D-Tx sử dụng năng lượng thu hoạch từ Giai đoạn 1 (thu hoạch năng lượng) để truyền dữ liệu uplink đến UAV và áp dụng NOMA để chia sẻ băng tần với các D2D-Tx khác.

3. Thiết bị thu hoạch năng lượng (EH): D2D-Rx thu năng lượng từ UAV qua SWIPT để duy trì hoạt động. D2D-Rx thu tín hiệu RF từ UAV bằng anten tích hợp hỗ trợ SWIPT và tách năng lượng từ tín hiệu RF thông qua mạch chỉnh lưu và lọc (rectenna). D2D-Rx lưu trữ năng lượng vào siêu tụ điện/pin để sử dụng cho truyền dữ liệu ở Giai đoạn 2 (truyền dữ liệu uplink).

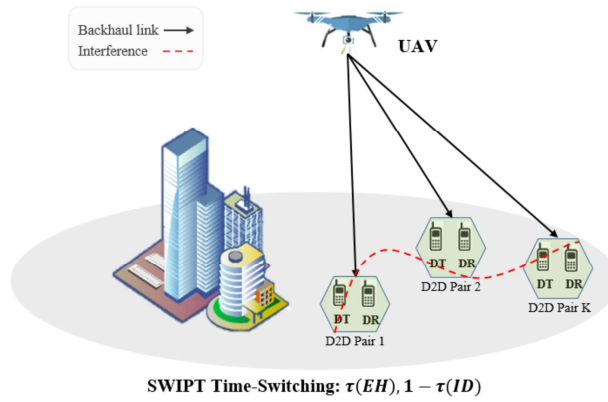
• Hoạt động:

- UAV bay ở độ cao cố định H với bán kính phủ sóng R .

- Các cặp D2D phân bố ngẫu nhiên trong vùng phủ sóng, tranh chấp tài nguyên với nhau.

B. Mô hình kênh

Hệ thống kết hợp kênh truyền không dây UAV-thiết bị (A2G) và kênh D2D (thiết bị-thiết bị). Mô hình hóa chi tiết như sau:



Hình 1. Kiến trúc mạng UAV tích hợp SWIPT-NOMA-D2D

1. Kênh Air-to-Ground (A2G)

• Path Loss:

- Phụ thuộc vào khoảng cách 3D giữa UAV và thiết bị, cùng môi trường truyền sóng (đô thị, nông thôn).

- Mô hình hóa theo [12]:

$$L_k^{A2G} = \begin{cases} \beta_0 (d_k^2 + H^2)^{-\alpha_{LoS}/2} & (LoS), \\ \beta_0 (d_k^2 + H^2)^{-\alpha_{NLoS}/2} & (NLoS) \end{cases} \quad (1)$$

trong đó:

d_k : Khoảng cách từ UAV đến thiết bị k .

H : Độ cao UAV.

β_0 : Hệ số suy hao tại khoảng cách tham chiếu 1 m.

$\alpha_{LoS}, \alpha_{NLoS}$: Hệ số Path loss cho LoS/NLoS.

• Xác suất LoS:

- Phụ thuộc góc nâng $\theta_k = \arctan\left(\frac{H}{d_k}\right)$:

$$P_{LoS} = \frac{1}{1 + a \exp(-b(\theta_k - a))} \quad (2)$$

với a, b là hệ số môi trường [13].

• Small-Scale Fading:

- Rician Fading cho kênh LoS chiếm ưu thế:

$$h_k^{A2G} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} h_{LoS} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} h_{NLoS} \quad (3)$$

K : Hệ số K-factor (tỉ lệ công suất LoS/NLoS).

$h_{LoS} = e^{j\phi}$: Thành phần pha cố định.

$h_{NLoS} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$: Thành phần tán xạ.

2. Kênh D2D

• Path Loss:

- Mô hình suy hao khoảng cách đơn giản:

$$L_{mn}^{D2D} = \beta_0 \cdot d_{mn}^{-\alpha_{D2D}} \quad (4)$$

d_{mn} : Khoảng cách giữa thiết bị m và n .

α_{D2D} : Hệ số suy hao (thường 2,7 – 4,0 cho đô thị).

• Small-Scale Fading:

- Rayleigh Fading do môi trường đa đường non-LoS:

$$h_{mn}^{D2D} \sim \mathcal{CN}(0, 1) \quad (5)$$

3. Mô hình thu năng lượng SWIPT

• Công suất thu tại thiết bị k :

$$E_k = \eta \cdot \tau \cdot T \cdot P_{UAV} |h_{A2G}^k|^2 \quad (6)$$

η : Hiệu suất chuyển đổi năng lượng.

τ : Tỷ lệ thời gian EH.

4. Mô hình SINR và nhiễu

Tín hiệu nhận tại thiết bị k (ID phase):

$$y_k^{DL} = h_k^{A2G} x \sqrt{P_{UAV}} + n_k \quad (7)$$

$n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$: Nhiễu nhiệt.

x : Tín hiệu phát từ UAV (bao gồm cả năng lượng và thông tin điều khiển).

•SINR tại thiết bị:

$$\gamma_k^{DL} = \frac{P_{UAV} |h_{A2G}^k|^2}{\sigma^2} \quad (8)$$

•Tốc độ truyền downlink:

$$R_k^{DL} = \tau B \log_2(1 + \gamma_k^{DL}) \quad (9)$$

•Tín hiệu nhận tại UAV

$$y_{UAV} = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k h_k^{A2G}} s_k + n_{UAV} \quad (10)$$

▪ S_k : Tín hiệu từ D2D-Tx thứ k

▪ h_k^{A2G} : Kênh truyền từ D2D-Tx k đến UAV

•SINR tại UAV

$$\gamma_k^{UL} = \frac{p_k |h_k^{A2G}|^2}{\sum_{j \in S_k} p_j |h_j^{A2G}|^2 \sigma_{UAV}^2} \quad (11)$$

▪ S_k : Tập người dùng có công suất yếu hơn người dùng k (chưa được giải mã).

•Tốc độ truyền uplink:

$$R_k^{UL} = (1 - \tau) B \log_2(1 + \gamma_k^{UL}) \quad (12)$$

•Hiệu suất năng lượng (EE):

$$EE = \frac{\sum_{k=1}^K R_k^{UL}}{P_{total}} \quad (13)$$

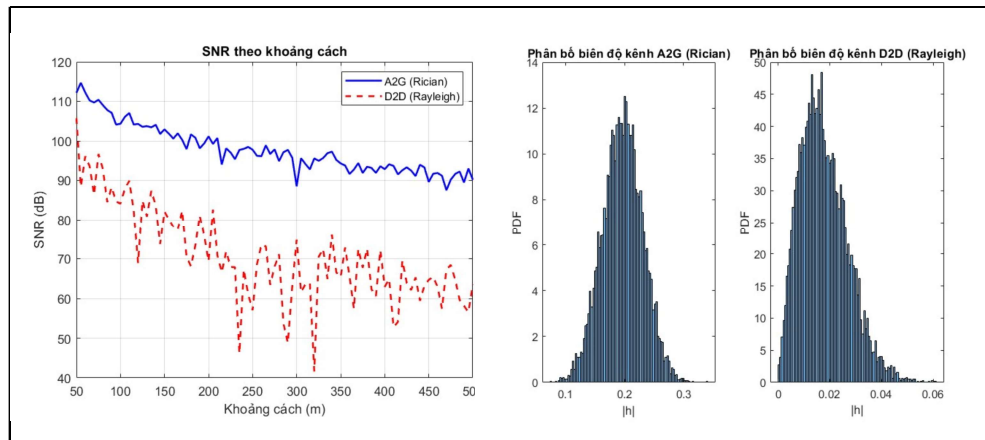
▪ $P_{total} = P_{UAV} + \sum_{k=1}^K \frac{E_k^{tx}}{(1-\tau)T}$: Công suất tiêu thụ toàn hệ thống.

Đồ thị so sánh SNR của kênh A2G (Rician) và D2D (Rayleigh) khi khoảng cách thay đổi: A2G có xu hướng suy hao ít hơn do hệ số α_{LoS} nhỏ hơn α_{NLoS} .

Phân bố biên độ kênh:

•A2G (Rician): Phân bố lệch phải do thành phần LoS chiếm ưu thế.

•D2D (Rayleigh): Phân bố đối xứng, đặc trưng cho kênh không có thành phần LoS.



Hình 2. So sánh SNR (trái) và phân bố biên độ kênh (phải)

C. Giao thức truyền tải

Giao thức truyền tải trong hệ thống SWIPT-NOMA-D2D được thiết kế thành 2 giai đoạn tuần hoàn với chu kỳ T , đảm bảo cân bằng giữa thu hoạch năng lượng và truyền dữ liệu:

- Giai đoạn 1 (Thu hoạch năng lượng): UAV phát tín hiệu RF, thiết bị D2D-Rx thu năng lượng.
- Giai đoạn 2 (Truyền dữ liệu): Các cặp D2D sử dụng năng lượng thu hoạch để truyền dữ liệu uplink đến UAV bằng kỹ thuật NOMA.

Chi tiết từng giai đoạn như sau:

1. NOMA transmission

Nguyên tắc: Ghép nhiều người dùng trên cùng tần số thông qua phân chia công suất.

a. Downlink (UAV $\rightarrow$ D2D-Rx)

- Bước 1: UAV mã hóa chồng lớp (superposition coding) tín hiệu cho K cặp D2D:

$$x_{UAV} = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} s_k \quad (14)$$

Với p_k là công suất phân bổ cho người dùng k , thỏa mãn $\sum_{k=1}^K p_k < P_{UAV}$.

- Bước 2: Phát tín hiệu kết hợp SWIPT theo cơ chế Time-Switching

- Khoảng thời gian τT (Energy Harvesting - EH):

$$E_k^{EH} = \eta \cdot \tau \cdot T \cdot |h_{A2G}^k|^2 \sum_{i=1}^K p_i \quad (15)$$

với η là hiệu suất chuyển đổi năng lượng.

- Tín hiệu nhận được tại thiết bị k .

$$y_k^{DL} = h_k^{A2G} x \sqrt{P_{UAV}} + n_k \quad (16)$$

b. SIC (Successive Interference Cancellation)

- Thiết bị D2D-Rx sử dụng SIC để giải mã tín hiệu theo thứ tự công suất giảm dần:

- Giải mã tín hiệu mạnh nhất.
- Loại bỏ tín hiệu đã giải mã khỏi tổng tín hiệu.
- Lặp lại cho đến khi giải mã tín hiệu của chính nó.

- Tốc độ truyền hiệu dụng cho user k :

$$R_k^{DL} = \tau B \log_2(1 + \gamma_k^{DL}) \quad (17)$$

2. SWIPT operation

- Mục đích: Trao đổi dữ liệu ngang hàng sau khi nhận tín hiệu từ UAV.

- Chu kỳ truyền T được chia thành hai pha:

- Thu hoạch năng lượng (τT): D2D-Rx thu năng lượng từ UAV.
- Truyền dữ liệu $(1 - \tau)T$: D2D-Tx sử dụng năng lượng thu hoạch để truyền dữ liệu.

- Thời gian pha: $T_d = \gamma T$, với γ là tỉ lệ thời gian D2D.

- Mô hình truyền dẫn:

- Thiết bị sử dụng năng lượng thu được E_k^{EH} để truyền dữ liệu:

$$P_{tx,k} = \frac{E_k^{EH}}{T_d} \quad (18)$$

- Tốc độ truyền D2D:

$$R_{mn}^{D2D} = B \log_2 \left(1 + \frac{P_{tx}|h|^2}{\sigma^2} \right) \quad (19)$$

- B : Băng thông

- $|h|$: Độ lợi kênh D2D (Rayleigh fading)

- σ^2 : Công suất nhiễu

Tốc độ truyền D2D giảm theo khoảng cách do Path loss tăng. Do vậy, trên thực tế sẽ cần một

số phương án tối ưu như: Sử dụng thuật toán phân bổ công suất cho NOMA, cải thiện độ lợi kênh bằng cách kết hợp MIMO, thay đổi bậc điều chế theo SNR bằng điều chế thích nghi.

Trong mô hình SWIPT-NOMA-D2D cho UAV 6G, D2D-Tx truyền dữ liệu trực tiếp đến UAV mà không cần trung gian BS, nhằm tối ưu hóa hiệu suất năng lượng, giảm độ trễ, và nâng cao tính linh hoạt của mạng. Kiến trúc này phù hợp với xu hướng mạng không dây phi tập trung và UAV làm trạm gốc di động trong 6G.

4. XÂY DỰNG VẤN ĐỀ

Phần này trình bày bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu trong hệ thống SWIPT-NOMA-D2D cho UAV 6G, bao gồm mục tiêu, ràng buộc, và phương pháp giải quyết. Chi tiết như sau:

A. Tối ưu hóa đa mục tiêu

Hệ thống hướng đến tối ưu đồng thời hai chỉ số: Hiệu suất năng lượng (EE) và Tổng tốc độ truyền tải (Sum Rate).

Bài toán được mô hình hóa như sau:

$$\max_{p,q,\tau} \{EE(p, q, \tau), Sum Rate(p, q, \tau)\} \quad (20)$$

1. Hiệu suất năng lượng (Energy Efficiency - EE)

$$EE = \frac{\sum_{k=1}^K R_k^{UL}(p, q, \tau)}{P_{total}(p, q)} \quad (21)$$

• Ý nghĩa: đo lường số bit truyền được trên mỗi Joule năng lượng tiêu thụ.

• Tử số: Tổng tốc độ truyền tải của K người dùng.

• Mẫu số: Tổng công suất tiêu thụ, bao gồm công suất phát của UAV và D2D-Tx.

2. Tổng Tốc độ Truyền tải (Sum Rate)

$$Sum Rate = \sum_{k=1}^K R_k^{UL}(p, q, \tau) \quad (22)$$

• Ý nghĩa: Tổng dung lượng dữ liệu mà hệ thống đạt được.

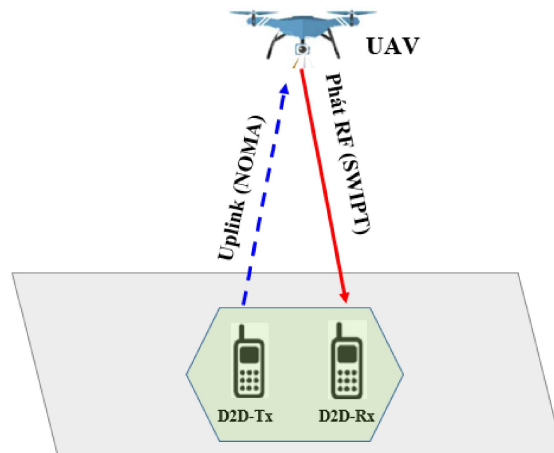
• Phụ thuộc vào: Phân bổ công suất (p) quỹ đạo UAV (q), và tỷ lệ thời gian SWIPT (τ).

B. Các ràng buộc

1. Tốc độ truyền tối thiểu

$$R_k^{UL}(p, q, \tau) \geq R_{min}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (23)$$

• Mục đích: Đảm bảo QoS (Quality of Service) cho từng người dùng.



Hình 3. Minh họa giao thức SWIPT-NOMA-D2D

• Ví dụ: $R_{min} = 1 Mbps$ cho ứng dụng giám sát video.

2. Năng lượng thu hoạch tối thiểu

$$E_k(p, q, \tau) \geq E_{th}, \forall k \quad (24)$$

• Mục đích: Đảm bảo thiết bị D2D-Rx có đủ năng lượng để hoạt động.

• Công thức năng lượng thu hoạch:

$$E_k = \eta \tau P_{UAV} |h_{UAV,k}|^2 \quad (25)$$

3. Di chuyển UAV

$$\|q_{t+1} - q_t\| \leq V_{max}, \forall t \quad (26)$$

• Mục đích: Giới hạn vận tốc di chuyển của UAV để phù hợp với động cơ và tiêu thụ năng lượng.

4. Công suất phát tối đa

$$\sum_{k=1}^K p_k \leq P_{max} \quad (27)$$

• Mục đích: Tuân thủ quy định về phát xạ và tiết kiệm năng lượng.

C. Phương pháp giải quyết

Phần này trình bày giải thuật lai kết hợp Học Tăng cường Sâu (DRL) và Tối ưu Lỗi để giải bài toán tối ưu đa mục tiêu phi tuyến trong hệ thống SWIPT-NOMA-D2D. Giải thuật tập trung vào việc cân bằng giữa hiệu suất năng lượng (EE) và throughput dưới các ràng buộc thực tế.

Ý tưởng chính:

- DRL xử lý các biến động trong môi trường (di chuyển UAV, biến đổi kênh truyền).
- Tối ưu lỗi giải quyết bài toán phân bổ công suất và thời gian SWIPT (τ) dưới điều kiện cố định.

• Hai phương pháp được luân phiên tối ưu để đạt được sự hội tụ toàn cục.

Các bước chính:

B1. Khởi tạo: Thiết lập tham số ban đầu cho công suất (p), quỹ đạo UAV (q), và τ .

B2. Tối ưu DRL: Cố định p và τ , tối ưu q dựa trên chính sách học.

B3. Tối ưu lỗi: Cố định q , tối ưu p và τ bằng phương pháp xấp xỉ lỗi.

B4. Kiểm tra hội tụ: Lặp lại cho đến khi EE và Sum Rate ổn định.

1. Học sâu tăng cường (DRL)

Mục tiêu: Tối ưu quỹ đạo UAV (q) để tối đa hóa EE và Sum Rate.

• *Môi trường:*

State: Bao gồm vị trí UAV (q_t), công suất hiện tại (p_t), kênh truyền (h_k^{A2G}), và năng lượng thu hoạch (E_k)

Action: Vận tốc và hướng di chuyển UAV (Δq)

Reward:

$$R_t = \lambda \cdot EE + (1 - \lambda) \cdot SumRate - Penalty \quad (28)$$

▪ Penalty: Phạt nếu vi phạm ràng buộc (vd: $R_k < R_{min}$, $E_k < E_{req}$).

• Agent: Sử dụng mạng PPO (Proximal Policy Optimization) hoặc DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient).

Kiến trúc mạng:

▪ Actor Network: Dự đoán action (Δq).

▪ Critic Network: Đánh giá giá trị của state.

• Huấn luyện:

- Input: State hiện tại.

- Output: Action điều chỉnh quỹ đạo UAV.
- Cập nhật: Tối ưu policy dựa trên gradient của reward.

2. Tối ưu lỗi

Mục tiêu: Tối ưu công suất (p) và tỷ lệ thời gian SWIPT (τ) với UAV cố định.

- Bài toán tối ưu:

$$\max_{p, \tau} \left[\lambda \cdot \frac{\sum R_k}{P_{total}} + (1 - \lambda) \cdot \sum R_k \right] \quad (29)$$

Ràng buộc:

$$\begin{cases} \sum p_k \leq P_{max} \\ R_k \geq R_{min} \\ E_k \geq E_{req} \\ 0 \leq \tau \leq 1 \end{cases} \quad (30)$$

- Phương pháp: Successive Convex Approximation (SCA)

- Xấp xỉ hàm mục tiêu: Chuyển các hàm phi tuyến thành dạng lồi bằng khai triển Taylor.
- Giải bài toán lồi: Sử dụng CVX hoặc YALMIP để tìm nghiệm.

- Cập nhật nghiệm: Lặp lại cho đến khi hội tụ.

3. Luồng giải thuật lại

a. Khởi tạo:

- o $p^{(0)}, q^{(0)}, \tau^{(0)}$
- o Thiết lập mạng DRL và tham số SCA.

b. Vòng lặp chính (cho đến khi hội tụ):

- o Bước 1: Tối ưu DRL (Quỹ đạo UAV):
 - Cố định $p^{(t)}, \tau^{(t)}$
 - DRL cập nhật $q^{(t+1)}$ dựa trên reward.
- o Bước 2: Tối ưu Lồi (Công suất và τ):
 - Cố định $q^{(t+1)}$
 - SCA giải bài toán lồi để cập nhật $p^{(t+1)}, \tau^{(t+1)}$

Bước 3: Kiểm tra hội tụ:

$$\begin{cases} |EE^{(t+1)} - EE^{(t)}| \leq \epsilon \\ |\text{Sum Rate}^{(t+1)} - \text{Sum Rate}^{(t)}| \leq \epsilon \end{cases}$$

với ϵ là ngưỡng hội tụ.

Khi cả hai điều kiện thỏa mãn $\rightarrow$ Giải thuật dừng.

4. Ưu điểm của giải thuật lại

- Thích ứng với môi trường động: DRL xử lý hiệu quả sự thay đổi vị trí UAV và kênh truyền.
- Đảm bảo hội tụ: Tối ưu lỗi cung cấp nghiệm chính xác cho bài toán con.
- Cân bằng EE và Throughput: Scalarization cho phép điều chỉnh trọng số λ theo yêu cầu hệ thống.

Bài toán đa mục tiêu được giải quyết bằng hai kỹ thuật chính:

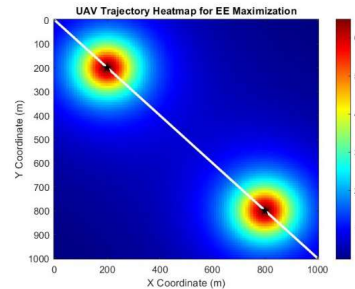
1. Scalarization

- Ý tưởng: Chuyển bài toán đa mục tiêu thành đơn mục tiêu bằng cách kết hợp hai hàm mục tiêu qua hệ số trọng số λ .

$$\max_{p, q, \tau} [\lambda \cdot EE + (1 - \lambda) \cdot \text{Sum Rate}], \lambda \in [0, 1] \quad (31)$$

- Ý nghĩa:

- $\lambda=1$: Tối ưu hóa hoàn toàn EE.
- $\lambda=0$: Tối ưu hóa hoàn toàn Sum Rate.
- $0 < \lambda < 1$: Cân bằng giữa EE và Sum Rate.



Hình 4. Bản đồ nhiệt quỹ đạo UAV minh họa đường đi tối ưu để tối đa hóa EE

2. Tối ưu Luân phiên (Alternating Optimization)

- Bước 1: Cố định quỹ đạo UAV (q), tối ưu công suất (p) và tỷ lệ thời gian SWIPT (τ) bằng quy hoạch lồi (convex optimization).

- Công thức:

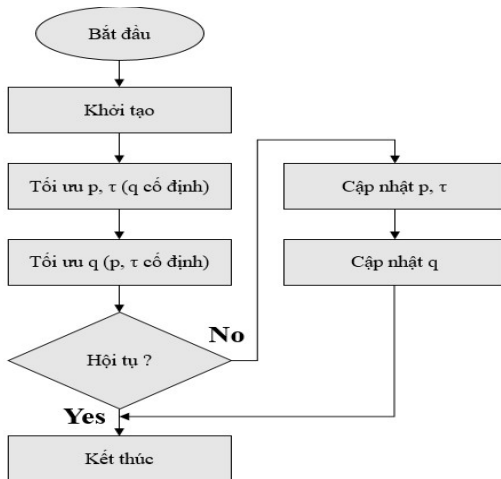
$$\max_{p, \tau} [\lambda \cdot EE + (1 - \lambda) \cdot \text{Sum Rate}] \quad (32)$$

- Phương pháp: Sử dụng thuật toán nội điểm (interior-point) hoặc gradient-based.

- Bước 2: Cố định p và τ , tối ưu quỹ đạo UAV (q) bằng xấp xỉ lồi liên tiếp (SCA - Successive Convex Approximation).

- Mô hình hóa bài toán phi lồi thành dạng lồi thông qua xấp xỉ Taylor bậc nhất.

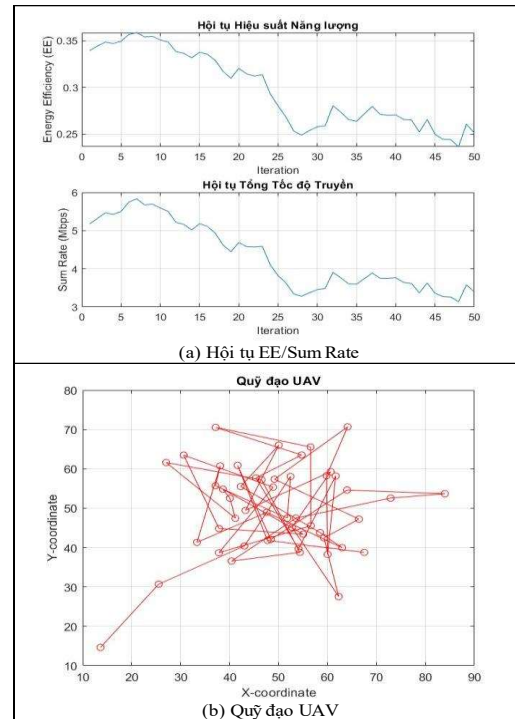
- Lặp lại đến khi hội tụ.



Hình 5. Sơ đồ giải thuật

Bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu trong hệ thống SWIPT-NOMA-D2D được xây dựng dựa trên sự cân bằng giữa hiệu suất năng lượng và throughput, cùng các ràng buộc thực tế như QoS, năng lượng thu hoạch, và di chuyển UAV. Phương pháp scalarization và tối ưu luân phiên cung cấp một giải pháp khả thi để giải quyết

bài toán phi tuyến phức tạp này, đảm bảo hiệu suất hệ thống trong cả môi trường tĩnh và động.



Hình 6. Minh họa tối ưu giải thuật luân phiên

5. Một số kết quả mô phỏng

A. Mô tả kịch bản mô phỏng

1. Mục tiêu:

So sánh hiệu suất giữa các phương pháp truyền thông NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) với quỹ đạo UAV tối ưu (Proposed), Static UAV (UAV cố định), OMA (Orthogonal Multiple Access), và Non-SWIPT (không hỗ trợ chuyển đổi năng lượng không dây).

2. Kịch bản:

UAV di chuyển theo quỹ đạo đường tròn tối ưu (bán kính 45m) hoặc đứng yên tại trung tâm khu vực.

10 người dùng được phân bố ngẫu nhiên trong khu vực $100\text{m} \times 100\text{m}$.

Mô hình kênh truyền: Kênh fading Rayleigh với suy hao khoảng cách (path loss). Chất lượng kênh giảm theo vận tốc UAV (mô phỏng hiệu ứng Doppler).

Đánh giá Hiệu suất năng lượng (EE) và Tổng tốc độ truyền (Sum Rate) dưới ảnh hưởng của tỷ lệ chuyển mạch thời gian (τ).

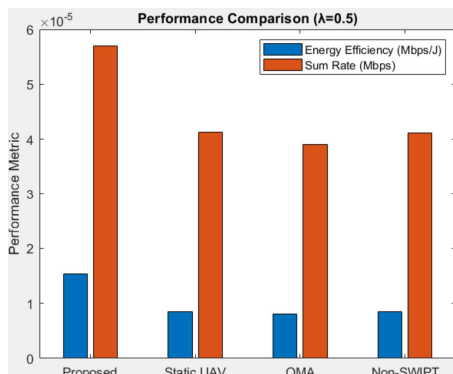
B. Công cụ sử dụng

- Phần mềm: MATLAB.
- Phương pháp:
 - Tối ưu τ : Quét toàn bộ dải τ để tìm giá trị tối ưu.
 - Tính EE: Kết hợp năng lượng thu hoạch và phân bổ công suất.
 - So sánh 3 phương pháp: Proposed (đề xuất), OMA, và NOMA Non-SWIPT.

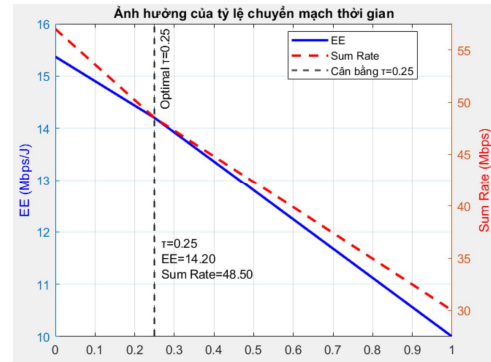
C. Tham số thiết lập và kết quả

Bảng 2. Thiết lập tham số mô phỏng

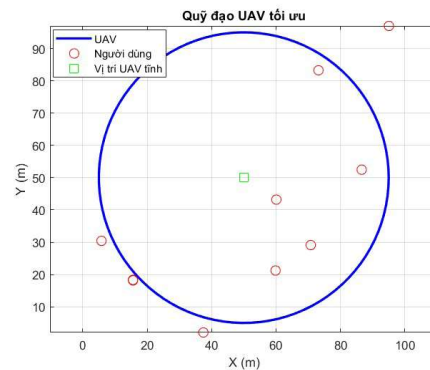
Tham số	Giá trị
Số người dùng (K)	10
Băng thông (B)	10 MHz
Công suất phát ($P_{\max}$)	33 dBm (~2W)
Tốc độ UAV ($V_{\max}$)	25 m/s
Độ cao UAV (h_{uav})	100 m
Tần số (fc)	2 GHz
Thời gian mô phỏng (T)	100 s



Hình 7. So sánh EE và Sum Rate giữa các phương pháp ($\lambda = 0.5$)



Hình 8. Ảnh hưởng của tỷ lệ chuyển mạch thời gian (τ) đến EE và Sum Rate



Hình 9. Quỹ đạo UAV tối ưu

D. Đánh giá kết quả

1. So sánh Proposed với Static UAV, OMA, và Non-SWIPT:

Bảng 3. So sánh giữa các phương pháp

Phương pháp	EE (Mbps/J)	Sum Rate (Mbps)
Proposed	15,37	57
Static UAV	8,43	41,27
OMA	8,06	39,05
Non-SWIPT	8,26	41,12

• Có thể thấy rằng Proposed vượt trội hơn OMA và Non-SWIPT:

- EE cao hơn 48% so với OMA và 46% so với Non-SWIPT, nhờ tối ưu quỹ đạo UAV và phân bổ công suất hiệu quả.

- Sum Rate cao hơn 31% và 28% tương ứng với OMA và Non-SWIPT, do NOMA cho phép nhiều người dùng truyền đồng thời trên cùng tần số.

- OMA bị hạn chế do phân chia tài nguyên trực giao, dẫn đến lãng phí băng thông.

2. Ảnh hưởng của τ :

- Tỷ lệ chuyển mạch thời gian tối ưu tại $\tau = 0,25$ với tham số thực tế (công suất mạch, suy hao) đã được đưa vào mô phỏng, cân bằng giữa EE và Sum Rate.

- Khi τ tăng, Sum Rate giảm do thời gian dành cho truyền dữ liệu bị thu hẹp.

3. Đánh giá:

- Proposed là giải pháp tối ưu cho hệ thống UAV-assisted, kết hợp NOMA và quỹ đạo động.

- OMA không phù hợp với kịch bản đòi hỏi hiệu suất cao do hạn chế về phân bổ tài nguyên.

- Hiệu quả SWIPT: Tăng τ cải thiện EE nhưng giảm throughput do thời gian truyền dữ liệu giảm.

- Thách thức: Dao động kênh truyền do UAV di chuyển ảnh hưởng đến hội tụ thuật toán.

6. KẾT LUẬN

Công trình này đã nghiên cứu và đề xuất bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu trong hệ thống SWIPT-NOMA-D2D được xây dựng dựa trên sự cân bằng giữa hiệu suất năng lượng (EE) và throughput, cùng các ràng buộc thực tế như QoS, năng lượng thu hoạch, và di chuyển UAV. Phương pháp scalarization và tối ưu luân phiên cung cấp một giải pháp khả thi để giải quyết bài toán phi tuyến phức tạp này, đảm bảo hiệu suất hệ thống trong cả môi trường tĩnh và động.

Các hướng nghiên cứu tương lai cần kết hợp công nghệ tiên tiến (AI, Blockchain, Quantum) và giải pháp thực tiễn (triển khai phần cứng, ứng dụng đặc thù) để giải quyết bài toán phức tạp của mạng UAV 6G. Việc tập trung vào tính bền vững, hiệu suất cao, và an ninh sẽ mở ra kỷ nguyên mới cho kết nối không dây thông minh và đáng tin cậy.

- Dự đoán kênh truyền động: Sử dụng mạng nơ-ron học sâu (LSTM, Transformer) để dự báo trạng thái kênh truyền dựa trên dữ liệu lịch sử, giảm sai số do di chuyển UAV.

- Tối ưu hóa thời gian thực: Áp dụng Federated Learning để phân tán việc huấn luyện mô hình DRL trên các UAV, đảm bảo tính bảo mật và giảm độ trễ.

- Tự động điều chỉnh tham số: Sử dụng AutoML để tối ưu siêu tham số (vd: λ trong scalarization) dựa trên điều kiện mạng.

- Mạng UAV đa tầng: Kết hợp UAV tầng thấp (mini-UAV) và tầng cao (HAPS) để mở rộng vùng phủ sóng và cân bằng tải.

- Liên kết Vệ tinh-UAV: Nghiên cứu tích hợp UAV với vệ tinh LEO để hỗ trợ kết nối toàn cầu, đặc biệt ở vùng sâu/vùng xa.

- Mạng phân tán (Decentralized Network): Triển khai Blockchain để quản lý tài nguyên và xác thực thiết bị D2D mà không cần UAV trung tâm.

- SWIPT lai ghép: Kết hợp thu hoạch năng lượng từ RF và nguồn năng lượng tái tạo (pin mặt trời) để tăng tuổi thọ UAV.

- NOMA đa sóng mang: Áp dụng OFDM-NOMA để tăng hiệu suất phổ trong môi trường đa đường phức tạp.

- Tái sử dụng tần số thông minh: Sử dụng Cognitive Radio để tranh chấp phổ tần với hệ thống khác (vd: mạng 5G).
- Mã hóa lượng tử: Áp dụng Quantum Key Distribution (QKD) để bảo vệ dữ liệu nhạy cảm truyền qua UAV.
- Chống nghe lén vật lý: Thiết kế cơ chế Beamforming hướng đến người dùng hợp pháp, giảm rò rỉ thông tin.
- Xác thực thiết bị D2D: Sử dụng Zero-Trust Architecture để kiểm soát truy cập trong môi trường mở.

Lời cảm ơn

Bài báo này được tài trợ bởi Trường Đại học Điện lực qua Đề tài NCKH cấp Trường năm 2024, mã số ĐTKHCN.11/2024

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. L. R. Varshney, "Transporting Information and Energy Simultaneously," IEEE ISIT, 2008.
- [2]. Q. Wu et al., "Energy-Efficient UAV Communication with SWIPT," IEEE TWC, 2020
- [3]. Z. Ding et al., "NOMA for 5G and Beyond," IEEE Proceedings, 2017
- [4]. 3GPP TR 38.825, "NR for UAV," 2021
- [5]. H. Zhang et al., "D2D Communications in 6G: A Survey," IEEE IoT Journal, 2022
- [6]. Q. Wu et al., "Energy-Efficient UAV-SWIPT Networks" (IEEE TWC, 2020)
- [7]. Y. Zeng et al., "SWIPT for UAV-Enabled IoT Networks" (IEEE IoT Journal, 2021)
- [8]. Z. Ding et al., "NOMA in UAV-Assisted 5G Networks" (IEEE JSAC, 2019)
- [9]. L. Liu et al., "Dynamic NOMA for Mobile UAVs" (IEEE GLOBECOM, 2022)
- [10]. H. Zhang et al., "D2D-Enhanced UAV Networks" (IEEE TCOM, 2021)
- [11]. M. Chen et al., "Energy-Aware D2D for UAV Crowdsensing" (IEEE INFOCOM, 2023)
- [12]. Y. Zeng et al., "Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles," IEEE TWC, 2019
- [13]. M. Alzenad et al., "3D Channel Modeling for UAV-to-Ground Communications," IEEE WCL, 2017.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả **Doãn Thanh Bình** tốt nghiệp đại học ngành kỹ thuật điện tử năm 2008; nhận bằng thạc sĩ năm 2010, nhận bằng tiến sĩ ngành kỹ thuật điện tử năm 2018 tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Tác giả hiện đang công tác tại Phòng Khảo thí và Kiểm định chất lượng, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: lý thuyết nghịch đảo suy rộng (generalized inverses), GSVD nhằm mô hình hóa, đánh giá các hệ thống MIMO; nghiên cứu các hệ thống thông tin trải phổ đa sóng mang (multi-carrier) áp dụng cho các hệ thống thông tin thế hệ tiếp theo.