

BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC DUY TÂN

LÂM CHI THƯƠNG

NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT LƯU TRỮ
VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU
TỐI ƯU THỜI GIAN THỰC
DÙNG UAV TRONG MẠNG 6G IoT

Chuyên ngành: Khoa học máy tính
Mã số chuyên ngành: 9.48.01.01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC MÁY TÍNH

Đà Nẵng, 2026

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
ĐẠI HỌC DUY TÂN

Người hướng dẫn khoa học:

Người hướng dẫn chính: TS. VÕ NGUYỄN SƠN

Người hướng dẫn phụ:

.....

(ghi rõ họ tên, chức danh khoa học, học vị)

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận án họp tại Đại
học Duy Tân vào lúc giờ ngày tháng
..... năm

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Thư viện Đại học Duy Tân

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong xu hướng phát triển của mạng 5G/6G, các dịch vụ IoT đa phương tiện đòi hỏi ngày càng cao về dung lượng truyền, độ trễ thấp và khả năng đáp ứng thời gian thực. UAV là nền tảng hỗ trợ linh hoạt nhờ khả năng cơ động, triển khai nhanh và mở rộng vùng phủ sóng, đặc biệt phù hợp cho các bài toán lưu trữ và phân phối dữ liệu. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện nay chủ yếu mới xem xét riêng lẻ từng thành phần như lưu trữ, phân bổ công suất hoặc quỹ đạo bay, chưa tối ưu đồng thời các yếu tố này dưới ràng buộc thời gian phục vụ. Vì vậy, luận án tập trung nghiên cứu các kỹ thuật lưu trữ và phân phối dữ liệu tối ưu thời gian thực dùng UAV trong mạng 6G IoT.

2. Mục tiêu, đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu

Mục tiêu của luận án là đề xuất các kỹ thuật lưu trữ và phân phối dữ liệu tối ưu thời gian thực dùng UAV trong mạng 6G IoT nhằm nâng cao dung lượng, rút ngắn thời gian phục vụ và sử dụng hiệu quả tài nguyên mạng. Đối tượng nghiên cứu là hệ thống phân phối nội dung hỗ trợ bởi UAV và người dùng IoT, trong đó xem xét các yếu tố chính gồm lưu trữ, công suất truyền, công suất bay, quỹ đạo bay và cơ chế phối hợp UAV–MBS. Luận án sử dụng phương pháp phân tích mô hình toán học kết hợp mô phỏng định lượng và giải thuật heuristic để xây dựng, giải và đánh giá các bài toán tối ưu.

3. Nhiệm vụ nghiên cứu và kết quả đạt được

Luận án tập trung vào ba nhiệm vụ chính: (i) khảo sát tổng quan các mô hình lưu trữ và phân phối dữ liệu trong mạng 6G IoT hỗ trợ UAV; (ii) xây dựng mô hình tối ưu kết hợp lưu trữ, công suất và quỹ đạo bay cho hệ một UAV; và (iii) mở rộng sang mô hình phối hợp nhiều UAV với MBS nhằm đáp ứng yêu cầu thời gian thực tốt hơn. Kết quả nghiên cứu đã đề xuất hai mô hình tối ưu TCP-3DF và RCD-CTR, đồng thời công bố 04 công trình quốc tế và 01 công trình trong nước liên quan trực tiếp đến nội dung luận án.

4. Bố cục luận án

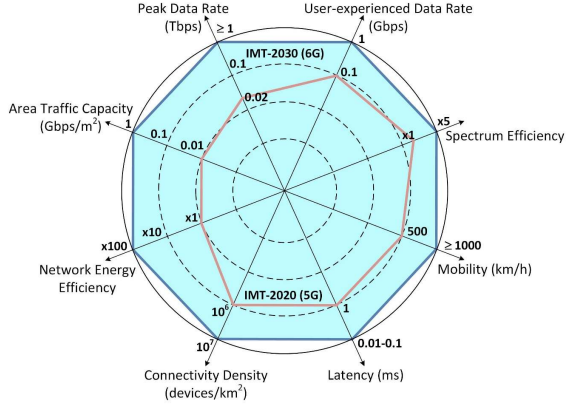
- Mở đầu
- Chương 1: Tổng quan về lưu trữ và phân phối dữ liệu trong mạng 6G IoT
- Chương 2: Tối ưu lưu trữ và phân phối dữ liệu dùng UAV trong mạng 6G IoT
- Chương 3: Tối ưu lưu trữ và phân phối dữ liệu thời gian thực dùng UAV bày đàn trong mạng 6G IoT
- Kết luận

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU TRONG MẠNG 6G IoT

1.1. MẠNG 6G VÀ 6G IoT

1.1.1. Giới thiệu mạng 6G

Các nhóm nghiên cứu đã xác lập các chỉ số hiệu suất chính để đánh giá mạng không dây 6G bao gồm phổ tần và hiệu quả năng lượng, tốc độ dữ liệu cao nhất, tốc độ dữ liệu do người dùng trải nghiệm, dung lượng lưu trữ khu vực (hoặc dung lượng lưu trữ không gian), mật độ kết nối, độ trễ và tính di động, như minh họa ở Hình 1-1.



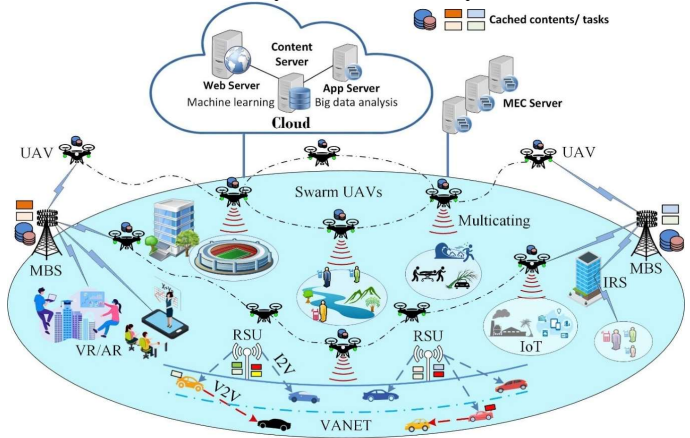
Hình 1-1. Các chỉ số mục tiêu của mạng 6G [11]

1.1.2. Giới thiệu mạng 6G IoT

Mạng 6G IoT được kỳ vọng hỗ trợ Massive IoT với yêu cầu cao về độ trễ, dung lượng và hiệu quả năng lượng.

1.2. LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU TRONG MẠNG 6G IoT

Trong các hướng nâng cao QoS cho B5G/6G và tối ưu hiệu quả sử dụng tài nguyên, các giải pháp lưu trữ và phân phối dữ liệu hỗ trợ bởi UAV nổi bật nhờ tính cơ động, khả năng mở rộng vùng phủ và triển khai linh hoạt.



Hình 1-3. Lưu trữ và phân phối dữ liệu hỗ trợ bởi UAV

1.3. KHÁI NIỆM VÀ MÔ HÌNH TOÁN HỌC VỀ LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU DÙNG UAV TRONG MẠNG 6G IoT

1.3.1. Độ phổ biến của dữ liệu

Theo mô hình phân phối Zipf-like, mức độ phổ biến p_i của nội dung thứ i : $p_i = \frac{i^{-\alpha}}{\sum_{l=1}^L l^{-\alpha}}$ (1.1), với $\alpha \geq 0$ là hệ số lệch độ phổ biến giữa các nội dung.

1.3.2. Chỉ số yêu cầu, chỉ số lưu trữ và chỉ số liên kết U2C

Số lượng cụm N_i có IDU yêu cầu nội dung i , các mối quan hệ giữa N_i và

chỉ số yêu cầu $q_{n,i}$, giữa chỉ số lưu trữ c_i và chỉ số liên kết U2C $a_{n,i}$ được mô hình hóa lần lượt theo (1.2) - (1.4): $N_i = \lfloor p_i N \rfloor$ (1.2), $N = \sum_{i=1}^I N_i = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N q_{n,i}$ (1.3), $a_{n,i} = c_i q_{n,i}$ (1.4).

1.3.3. Vùng phủ của UAV và xác suất của kênh truyền LoS

1.3.3.1. Vùng phủ của UAV

Góc nâng θ tối ưu làm tối đa vùng phủ:

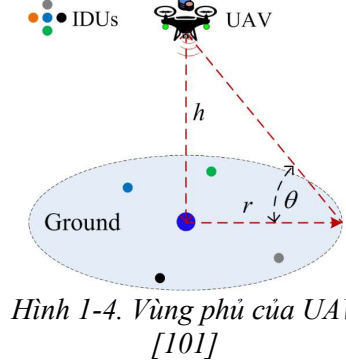
$$\theta = \tan^{-1}(h/r) \quad (1.5)$$

với h là độ cao, r là bán kính vùng phủ sóng tối đa của UAV theo Hình 1-4.

1.3.3.2. Xác suất của kênh truyền LoS

Xác suất để xuất hiện kênh truyền LoS từ UAV đến IDU m :

$$P_{n,m}^{LoS} = \frac{1}{1 + \kappa_n \exp(-\nu_n(\xi_m - \kappa_n))} \quad (1.6)$$



Hình 1-4. Vùng phủ của UAV [101]

trong đó, κ_n và ν_n là các hằng số tương ứng với môi trường n của vị trí đặt IDU, $\xi_m = \frac{180}{\pi} \arctan(h/r_m)$, $r_m = \sqrt{(x_D - x_m)^2 + (y_D - y_m)^2}$ với (x_m, y_m) là vị trí của IDU m và (x_D, y_D) là vị trí của UAV.

1.3.4. Mô hình công suất bay và vận tốc UAV

Mô hình công suất bay và vận tốc của UAV:

$$P_{n_T} = \frac{c_4 V_{n_T}}{4} + \frac{c_3 V_{n_T}^{3/4}}{2} + c_2 V_{n_T}^{1/2} + 2c_1 V_{n_T}^{1/4} + 4c_0 \quad (1.7)$$

trong đó, $c_0 = I_0^2 R_0$, $c_1 = 30 I_0 K_E / \pi$, $c_2 = 2 I_0 R_0 C_m / K_T$, $c_3 = 30 K_E C_m / (\pi K_T)$, $c_4 = R_0 C_m^2 / K_T^2$ và: $V_{n_T} = (m^2 g^2 + C_d^2 v_{n_T}^4) / C_t^2$. (1.8)

Bảng 1-1. Các ký hiệu mô hình công suất bay và vận tốc của UAV

Ký hiệu	Ý nghĩa
N_T	Số lượng điểm dừng trong 1 chuỗi dừng T , tức là $N_T \leq N$
v_{n_T}, P_{n_T}	Vận tốc/ công suất bay của UAV trên chặng n_T , $n_T = 1, 2, \dots, N_T$
I_0, R_0, U_0	Cường độ dòng điện không tải (A), điện trở của động cơ (Ω), điện áp không tải (V), 0.3 A, 0.4 Ω , 10 V
K_v	Hằng số tốc độ không tải danh định của động cơ (rpm/V), 380 rpm/V
K_E	Hằng số suất điện động ngược, $K_E = (U_0 - I_0 R_0) / (K_v U_0)$
K_T	Hằng số mô-men xoắn của động cơ, $K_T = 9.55 K_E$
m, g	Khối lượng UAV (kg); Gia tốc trọng trường (m/s^2); 3 Kg, 9.8 m/s^2
C_m	Hệ số mô-men cản ($Nm/(rad/s)^2$), $8.89 \times 10^{-7} Nm/(rad/s)^2$
C_d	Hệ số lực cản thân UAV ($N/(m/s)^2$), 0.11 $N/(m/s)^2$
C_t	Hệ số lực đẩy của UAV ($N/(rad/s)^2$), $4.85 \times 10^{-5} N/(rad/s)^2$

1.3.5. Mô hình kênh truyền

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu SINR của IDU m được UAV k phục vụ, và

dung lượng kênh truyền tương ứng: $\gamma_{k,m}(x,y) = \frac{P_{k,m}(x,y)}{I_{k,m}(x,y) + \sigma^2}$ (1.9) và $C_{k,m}(x,y) = B \log_2 (1 + \gamma_{k,m}(x,y))$ (1.10), với $P_{k,m}(x,y)$ là công suất thu được tại IDU m , $I_{k,m}(x,y) = \beta \sum_{j \neq m} P_j(x,y)$ là nhiễu mà IDU m nhận được từ UAV khác với UAV k , còn B là băng thông.

1.4. THIẾT KẾ TỐI ƯU THỜI GIAN THỰC DÙNG UAV TRONG MẠNG 6G IoT

Để đáp ứng yêu cầu thời gian thực, luận án tiếp cận theo hướng tối ưu đồng thời hiệu năng truyền dữ liệu và thời gian hoàn thành nhiệm vụ (thời gian phục vụ). Bài toán tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV có nhiều biến và ràng buộc phi tuyến được giải bằng giải thuật heuristic GA nhằm đạt lời giải gần tối ưu với độ phức tạp tính toán chấp nhận được.

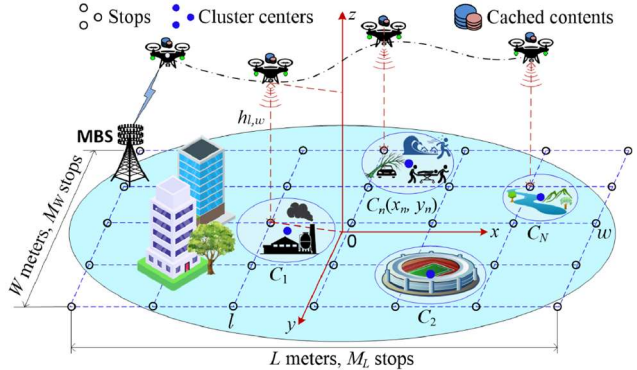
CHƯƠNG 2. TỐI ƯU LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU DÙNG UAV TRONG MẠNG 6G IoT

2.1. GIỚI THIỆU HỆ THỐNG

Chương 2 đề xuất mô hình TCP-3DF nhằm tối ưu đồng thời lưu trữ nội dung, phân bổ công suất truyền, công suất bay và quỹ đạo bay 3D của UAV có xét đến thời gian phục vụ. Mục tiêu là cực đại dung lượng phân phối dữ liệu đồng thời giảm thời gian đáp ứng và sử dụng hiệu quả tài nguyên.

2.2. CẤU TRÚC VÀ HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG THEO MÔ HÌNH TCP-3DF

Hệ thống gồm một MBS, một UAV, I nội dung và N cụm IDU phân bố trong khu vực phục vụ. UAV thực hiện lưu trữ trước một phần nội dung và bay đến các điểm dừng tối ưu trong không gian 3D để phân phối dữ liệu đến các cụm



Hình 2-1. Mô hình TCP-3DF dùng UAV trong 6G IoT

người dùng. Bài toán đặt ra là xác định nội dung lưu trữ, mức công suất truyền, vận tốc bay, độ cao và chuỗi dừng tối ưu của UAV.

Bảng 2-1. Các ký hiệu về thông số được sử dụng trong mô hình TCP-3DF

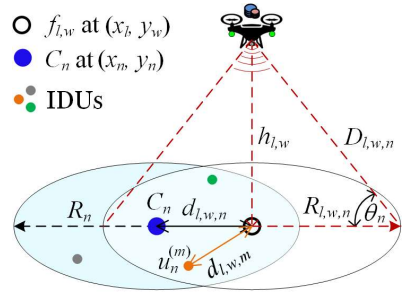
Ký hiệu	Ý nghĩa của ký hiệu
R, B	Bán kính vùng phủ triển khai, băng thông hệ thống
σ^2	Công suất nhiễu trắng Gaussian
ρ_n, M_n	Mật độ IDU, số lượng IDU ở cụm n có bán kính R_n , $n = 1, 2, \dots, N$

$M_L \times M_W$	3×4 điểm dừng phân bố trong lưới bay RFG
$o_{l,w}$	Tọa độ điểm dừng của UAV tại (x_l, y_w) trong lưới bay RFG, $l = 1, 2, \dots, M_{L,w} = 1, 2, \dots, M_W$ và tại cao độ $h_{l,w}$
$f_{l,w}$	Chỉ số dừng của UAV tại vị trí (x_l, y_w) , $f_{l,w} \in \{0, 1\}$
$M_{l,w,n}$	Số lượng IDUs trong cụm n được phủ sóng bởi UAV tại điểm dừng $o_{l,w}$
$u_n^{(m)}$	Tọa độ $(x_n^{(m)}, y_n^{(m)})$ của IDU thứ m trong cụm n , $m = 1, 2, \dots, M_n$
s_i, p_i	Kích cỡ và độ phổ biến của nội dung thứ i
P_b, P_s	Công suất của UAV để truyền nội dung i và khi đứng yên

2.3. TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ CỦA HỆ THỐNG THEO MÔ HÌNH TCP-3DF

2.3.1. Phạm vi phủ sóng của UAV

Trong cụm n có bán kính R_n tại tâm $C_n = (x_n, y_n)$, số lượng IDU có cùng nội dung quan tâm là $M_n = \lfloor \rho_n \pi R_n^2 \rfloor$. Như Hình 2-2, UAV dừng lại tại (x_l, y_w) cách C_n một khoảng cách $\sqrt{(x_n - x_l)^2 + (y_n - y_w)^2}$. Số lượng IDU được UAV phủ sóng thực sự là: $M_{l,w,n} = \lfloor \rho_n A_{l,w,n} \rfloor$ (2.1), trong đó, $A_{l,w,n}$ là diện tích giao nhau của hai đường tròn có bán kính R_n và $R_{l,w,n}$.



Hình 2-2. Mô hình vùng phủ sóng của UAV tại một điểm dừng

IDU thứ m , với $m = 1, 2, \dots, M_n$, nằm trong vùng giao nhau nếu thỏa các điều kiện khoảng cách: $d_{l,w,n} \leq R_n + R_{l,w,n}$ và $d_{l,w,m} \leq R_{l,w,n}$, trong đó $d_{l,w,m}$ là khoảng cách giữa điểm $f_{l,w}$ và IDU thứ m nằm tại vị trí $u_n^{(m)} = (x_n^{(m)}, y_n^{(m)})$. Vùng phủ sóng của UAV là khu vực hình tròn có bán kính $R_{l,w,n}$ ứng với độ cao $h_{l,w}$ và góc ngả θ_n : $R_{l,w,n} = h_{l,w} / \tan(\theta_n)$. (2.2)

2.3.2. Kênh không-đôi-đất (A2G)

Suy hao của kênh truyền LoS, NLoS giữa UAV và IDU m trong cụm n :

$$\psi_{l,w,n}^{\mathcal{A},(m)} = \left(4\pi f_c d(o_{l,w}, u_n^{(m)}) / c \right)^2 \eta_n^{\mathcal{A}} = L_{l,w,n}^{(m)} \eta_n^{\mathcal{A}}, \{\text{LoS, NLoS}\} \quad (2.3)$$

với f_c là tần số sóng mang, c là tốc độ ánh sáng, $\eta_n^{\mathcal{A}}$ là hệ số suy hao của kênh truyền LoS hoặc NLoS, và khoảng cách từ UAV đến IDU m trong cụm n là:

$$d(o_{l,w}, u_n^{(m)}) = \sqrt{(x_n^{(m)} - x_l)^2 + (y_n^{(m)} - y_w)^2 + (h_{l,w})^2} \quad (2.4)$$

Kết hợp xác suất xảy ra của kênh truyền LoS ($P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)}$) và NLoS ($P_{l,w,n}^{\text{NLoS},(m)} = 1 - P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)}$), suy hao đường truyền trung bình là:

$$\overline{\psi}_{l,w,n}^{(m)} = \psi_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)} P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)} + \psi_{l,w,n}^{\text{NLoS},(m)} P_{l,w,n}^{\text{NLoS},(m)} \quad (2.5)$$

$$= L_{l,w,n}^{(m)} \left[\eta_n^{\text{LoS}} P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)} + \eta_n^{\text{NLoS}} P_{l,w,n}^{\text{NLoS},(m)} \right]$$

$$\text{với xác suất kênh truyền LoS: } P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)} = \frac{1}{1 + \kappa_n \exp[-\nu_n (\xi_{l,w,n}^{(m)} - \kappa_n)]} \quad (2.6)$$

$$\text{trong đó, } \xi_{l,w,n}^{(m)} = \frac{180}{\pi} \arctan \left(h_{l,w} / \sqrt{(x_n^{(m)} - x_l)^2 + (y_n^{(m)} - y_w)^2} \right).$$

2.3.3. Tốc độ truyền dữ liệu trung bình

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR của kênh truyền nội dung i từ UAV tại $o_{l,w}$ đến IDU m trong cụm n tại $u_n^{(m)}$ và tốc độ phân phối nội dung tương ứng:

$$\gamma_{l,w,n}^{(i),(m)} = a_{i,n} \left(\bar{\psi}_{l,w,n}^{(m)} \right)^{-1} P_i / \sigma^2 \quad (2.7)$$

$$C_{l,w,n}^{(i),(m)} = B \log_2 (1 + \gamma_{l,w,n}^{(i),(m)}) \quad (2.8)$$

Hàm mục tiêu đầu tiên của bài toán TCP-3DF là tổng tốc độ phân phối dữ liệu trung bình điểm-đa điểm từ UAV đến tất cả các IDU trong mỗi cụm:

$$\bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_{l,w,n}} \sum_{i=1}^I p_i f_{l,w} C_{l,w,n}^{(i),(m)} \quad (2.9)$$

$$\text{Số lần dừng là: } N_T = \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} f_{l,w} \quad (2.10)$$

Đơn giản hàm mục tiêu (2.9) qua xét trường hợp xấu nhất của tổng tốc độ phân phối dữ liệu tại tất cả các IDU trong $A_{l,w,n}$ trên khoảng cách truyền

dài nhất là $d(o_{l,w}, u_n^{(m)}) = D_{l,w,n} = \sqrt{(R_{l,w,n})^2 + (h_{l,w})^2}$ như Hình 2-2.

Tốc độ phân phối nội dung trong trường hợp xấu nhất được xác định bởi:

$$C_{l,w,n}^{(i)} = C_{l,w,n|d(o_{l,w}, u_n^{(m)}) = D_{l,w,n}}^{(i),(m)} \quad (2.11)$$

$$(2.9) \text{ được rút gọn: } \bar{C} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} \sum_{n=1}^N M_{l,w,n} \sum_{i=1}^I p_i f_{l,w} C_{l,w,n}^{(i)} \quad (2.12)$$

2.3.4. Khoảng cách bay

Khoảng cách bay của UAV là hàm mục tiêu thứ 2 của bài toán: $d_T = \sum_{n_T=1}^{N_T} d_{n_T}$ (2.13), với d_{n_T} là khoảng cách từ điểm $(n_T - 1)$ đến điểm n_T trong chu trình bay $\mathcal{T}$, gọi là $d(\mathcal{T}_{n_T-1}, \mathcal{T}_{n_T})$, với $\mathcal{T}_0$ là vị trí ban đầu của UAV.

2.3.5. Thời gian phục vụ trung bình

Thời gian phục vụ là tổng thời gian chờ để mỗi cụm được UAV hoàn tất phục vụ, bao gồm thời gian bay và thời gian truyền. Thời gian bay qua chặng n_T :

$$t_{n_T} = d_{n_T} / v_{n_T} \quad (2.14)$$

Thời gian truyền tại $o_{l,w}$ để truyền nội dung i đến các IDU trong cụm n :

$$t_{l,w,n}^{(i)} = \begin{cases} f_{l,w} s_i / C_{l,w,n}^{(i)}, & \text{nếu } a_{i,n} = 1 \\ 0, & \text{nếu } a_{i,n} = 0 \end{cases} \quad (2.15)$$

Tổng thời gian truyền (T_S) và thời gian phục vụ trung bình trên mỗi cụm ($\bar{T}$):

$$T_S = \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I t_{l,w,n}^{(i)} \quad (2.16)$$

$$\text{và: } \overline{T} = \frac{1}{N} \left[\sum_{n_{\mathcal{T}}=1}^{N_{\mathcal{T}}} (N_{\mathcal{T}} - n_{\mathcal{T}} + 1) t_{n_{\mathcal{T}}} + \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{i=1}^I (N - n) t_{l,w,n}^{(i)} \right] \quad (2.17)$$

2.3.6. Mức sử dụng dung lượng lưu trữ và mức tiêu thụ công suất

$$\text{Mức sử dụng dung lượng lưu trữ: } S_C = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I a_{n,i} s_i \quad (2.18)$$

Tiêu thụ công suất của UAV được sử dụng cho truyền, dừng và bay.

Tổng công suất truyền (P_T) và tổng công suất bay (P_F):

$$P_T = \sum_{i=1}^I P_i \quad (2.19) \quad \text{và} \quad P_F = \sum_{n_{\mathcal{T}}=1}^{N_{\mathcal{T}}} P_{n_{\mathcal{T}}} \quad (2.20)$$

Với $P_{n_{\mathcal{T}}}$ là công suất bay UAV có 4-rotor tại vận tốc $v_{n_{\mathcal{T}}}$ theo công thức (1.7).

2.4. BÀI TOÁN TCP-3DF VÀ GIẢI PHÁP GA

2.4.1. Bài toán TCP-3DF

Mục tiêu của mô hình TCP-3DF là tối ưu; 1) tập hợp nội dung được lưu trữ trong UAV (c_i); 2) công suất truyền cho nội dung i (P_i) và công suất bay qua chặng $n_{\mathcal{T}}$ ($P_{n_{\mathcal{T}}}$); 3) quỹ đạo bay 3DF bao gồm nơi dừng ($f_{l,w}$) ở độ cao nào ($h_{l,w}$) và chuỗi dừng $\mathcal{T}$. Mục tiêu là cực đại tổng dung lượng phân phối dữ liệu trung bình $\overline{C}$, bay qua $N_{\mathcal{T}}$ điểm dừng với đường bay ngắn nhất STP, đồng thời thỏa mãn các ràng buộc về thời gian phục vụ trung bình (T^*), dung lượng lưu trữ (S_C^*), tổng mức tiêu thụ công suất truyền (P_T^*) và tổng mức tiêu thụ công suất bay (P_F^*). Bài toán TCP-3DF bao gồm 02 bài toán tối ưu có mối quan hệ phụ thuộc lẫn nhau: 1) Bài toán tối ưu CPS: Tối ưu lưu trữ, phân bổ công suất truyền và bay, và vị trí điểm dừng ở độ cao nào để đạt giá trị $\overline{C}$ cực đại; và 2) Bài toán tối ưu STP: tìm chuỗi dừng tối ưu để đường bay ngắn nhất.

2.4.1.1. Bài toán tối ưu CPS

Bài toán tối ưu hóa CPS được mô hình như công thức (2.21).

$$\text{2.4.1.2. Bài toán tối ưu hóa STP} \quad \max \overline{C} \quad (2.21a)$$

Với $f_{l,w}$ và $N_{\mathcal{T}}$ tìm được từ phương trình (2.21a), bài toán tối ưu hóa STP giúp xác định trình tự dừng tối ưu $\mathcal{T}$ để tối thiểu hóa khoảng cách bay theo công thức (2.22):

$$\min_{\mathcal{T}} d_{\mathcal{T}} \quad (2.22)$$

Giải (2.22) tương đương việc tìm $\mathcal{T}$ tốt nhất trong không gian tìm kiếm của $N_{\mathcal{T}}!$ các hoán vị của $\mathcal{T}_s = \{1, 2, \dots, N_{\mathcal{T}}\}$ làm tối thiểu hóa $d_{\mathcal{T}}$.

$$\text{s.t. } c_i, f_{l,w}, P_i, P_{n_{\mathcal{T}}}, h_{l,w} \quad (2.21b)$$

$$\overline{T} \leq T^* \quad (2.21c)$$

$$S_C \leq S_C^* \quad (2.21d)$$

$$P_T \leq P_T^* \quad (2.21e)$$

$$P_F \leq P_F^* \quad (2.21f)$$

$$P_{TL} \leq P_i \leq P_{TU} \quad (2.21g)$$

$$P_{FL} \leq P_{n_{\mathcal{T}}} \leq P_{FU} \quad (2.21h)$$

$$H_{FL} \leq h_{l,w} \leq H_{FU} \quad (2.21i)$$

2.4.2. Giải bài toán TCP-3DF bằng GA

NCS áp dụng GA để giải bài toán tối ưu TCP-3DF. Trong đó, sẽ áp dụng hàm phạt, khi đó sẽ viết lại các ràng buộc phức tạp thành:

$$\begin{cases} \Delta_N = N - N_T \geq 0, \\ \Delta_T = T^* - \bar{T} \geq 0, \\ \Delta_S = S_C^* - S_C \geq 0, \\ \Delta_{P_T} = P_T^* - P_T \geq 0, \\ \Delta_{P_F} = P_F^* - P_F \geq 0. \end{cases} \quad (2.23)$$

Và hàm phạt khi đó sẽ được biểu diễn bởi công thức:

$$F = \lambda_1(\min\{0, \Delta_N\})^2 + \lambda_2(\min\{0, \Delta_T\})^2 + \lambda_3(\min\{0, \Delta_S\})^2 + \lambda_4(\min\{0, \Delta_{P_T}\})^2 + \lambda_5(\min\{0, \Delta_{P_F}\})^2 \quad (2.24)$$

với $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$: các hệ số phạt vi phạm ràng buộc được lựa chọn hợp lý.

Nên GA được sử dụng để giải bài toán tối ưu CPS không ràng buộc:

$$\max_{c_i, f_{l,w}, P_i, P_{n_T}, h_{l,w}} \bar{C}_F = \bar{C} - F \quad (2.25)$$

Với bài toán tối ưu STP, cũng áp dụng hàm phạt để phạt một cá thể một đại lượng khoảng cách $d_{\max}$ nếu nó khiến UAV bay đến điểm dừng không hợp lệ $\mathcal{T}_{n_T}$. Khoảng cách bay với hình phạt từ $\mathcal{T}_{n_T-1}$ đến $\mathcal{T}_{n_T}$ là:

$$d_{n_T} = \begin{cases} d(\mathcal{T}_{n_T-1}, \mathcal{T}_{n_T}), & \text{nếu } \mathcal{T}_{n_T} \in \mathcal{T}_S, \mathcal{T}_S = \mathcal{T}_S \setminus \mathcal{T}_{n_T} \\ d_{\max}, & \text{nếu } \mathcal{T}_{n_T} \notin \mathcal{T}_S \end{cases} \quad (2.26)$$

NCS thêm một lượng hình phạt βd_p vào (2.22) và bài toán STP trở thành: $\min_{\mathcal{T}}(d_{\mathcal{T}} + \beta d_p)$ (2.27), trong đó $\beta > 0$ là mức độ vi phạm và d_p , ban đầu bằng 0, sau đó tăng thêm 1 bất cứ khi nào xảy ra điểm dừng không hợp lệ.

Bài toán tối ưu TCP-3DF được kết hợp bài toán tối ưu CPS (2.25) và STP (2.27) thành bài toán tổng hợp sau:

$$\max_{c_i, f_{l,w}, P_i, P_{n_T}, h_{l,w}, \mathcal{T}} \bar{C}_F = \bar{C} - \gamma(F + d_{\mathcal{T}} + \beta d_p) \quad (2.28)$$

Trong (2.28), γ được sử dụng để tối đa $\bar{C}_F$ đồng thời tối thiểu hóa $d_{\mathcal{T}}$.

Thuật toán 2.1. Giải thuật GTS cho bài toán TCP-3DF

Đầu vào: Các thông số được liệt kê trong Bảng 2-2 và Bảng 2-3.

$Gen = 1$: đếm số thế hệ

Đầu ra: $\bar{C}_F^*(c_i^*, f_{l,w}^*, P_i^*, P_{n_T}^*, h_{l,w}^*, \mathcal{T}^*)$

Bước 1: tạo ngẫu nhiên các giá trị và cá thể như sau

1.1) Sinh ngẫu nhiên N_p chuỗi con $\{X_1^z\}$, $z = 1, 2, \dots, N_p$, mỗi chuỗi gồm $(I + M_W \times M_L)$ bit để biểu diễn một nghiệm tiềm năng cho c_i và $f_{l,w}$.

Trong đó:

- I bit đầu tiên tạo thành một mảng: $X_{1,I}^z$
- $M_W \times M_L$ bit cuối cùng tạo thành ma trận $M_W \times M_L$: $X_{1, M_W \times M_L}^z$

1.2) Sinh ngẫu nhiên N_p chuỗi con $\{X_2^z\}$, mỗi chuỗi gồm $I \times PRECI$ bit để

biểu diễn nghiệm tiềm năng cho I biến thực của P_i .

1.3) Sinh ngẫu nhiên N_P chuỗi con $\{X_3^Z\}$, mỗi chuỗi gồm $N \times PRECI$ bit để biểu diễn nghiệm tiềm năng cho N biến thực của P_{n_T} .

1.4) Sinh ngẫu nhiên N_P chuỗi con $\{X_4^Z\}$, mỗi chuỗi gồm $N \times PRECI$ bit để biểu diễn nghiệm tiềm năng cho N biến thực của $h_{l,w}$.

1.5) Sinh ngẫu nhiên N_P chuỗi con $\{X_5^Z\}$, mỗi chuỗi gồm N chữ số trong hệ cơ số N để biểu diễn nghiệm tiềm năng cho T .

Trong đó:

- Các chuỗi X_2^Z, X_3^Z và X_4^Z được chuyển đổi sang các giá trị thực tương ứng là $X_{2,R}^Z, X_{3,R}^Z$ và $X_{4,R}^Z$ thông qua phép chuyển đổi b2r [145].
- Trong bước 3), 4) và 5), do chỉ cần N_T điểm dừng hợp lệ, nên $(N - N_T)$ phần tử cuối bị bỏ qua.
- Việc sinh các chữ số trong hệ cơ số N (giá trị từ 0 đến $N - 1$) sẽ cộng thêm 1, để đảm bảo $T_{n_T} \in T_s$.

Bước 2: Tính N_P giá trị hàm thích nghi (fitness) theo phương trình (2.28) để thu được $\bar{C}_F^Z$, tức là $\bar{C}_F^Z(X_{1,I}^Z, X_{1,M_W \times M_L}^Z, X_{2,R}^Z, X_{3,R}^Z, X_{4,R}^Z, X_5^Z)$

Bước 3: Khi điều kiện dừng (TC) chưa được thỏa, thực hiện vòng lặp:

Bước 3.1: Tập hợp các cá thể $\{X_{ALL}^Z\} = [\{X_1^Z\} \{X_2^Z\} \{X_3^Z\} \{X_4^Z\} \{X_5^Z\}]$ kèm theo giá trị $\bar{C}_F^Z$ đưa vào bộ chọn lọc (mating pool) để xếp hạng

Bước 3.2: Chọn $N_{PG} = N_P \times P_G$ cá thể tốt nhất có giá trị fitness cao hơn để làm cha mẹ bằng cách lấy mẫu phổ quát ngẫu nhiên [145], thu được: $\{X_{ALL}^t\} = [\{X_1^t\} \{X_2^t\} \{X_3^t\} \{X_4^t\} \{X_5^t\}]$, $t = 1, 2, \dots, N_{PG}$

Bước 3.3: Chọn một cặp cha mẹ để tạo ra các cá thể con bằng cách:

- Dùng phép lai ghép đa điểm (multiple-point crossover) với xác suất: P_{c_1}, P_{c_4} và P_{c_5} cho $\{X_1^t\}$, $\{X_4^t\}$ và $\{X_5^t\}$,
- Dùng phép lai ghép một điểm (single-point crossover) với xác suất: P_{c_2} và P_{c_3} cho $\{X_2^t\}$ và $\{X_3^t\}$

Bước 3.4: Thực hiện đột biến lên các cá thể con: $\{X_1^t\}$, $\{X_2^t\}$, $\{X_3^t\}$, $\{X_4^t\}$ và $\{X_5^t\}$ với xác suất tương ứng $P_{M_1}, P_{M_2}, P_{M_3}, P_{M_4}$ và P_{M_5} bằng cách sử dụng phép bù bit (complement operation). Với cách này, có thể giúp khôi phục các đặc điểm di truyền tốt có thể đã bị mất ở các bước trước. Kết quả thu được: $\{X_{ALL}^{t,*}\} = [\{X_1^{t,*}\} \{X_2^{t,*}\} \{X_3^{t,*}\} \{X_4^{t,*}\} \{X_5^{t,*}\}]$

Bước 3.5: Lặp lại Bước 2 để tính:

$$\bar{C}_F^{t,*}(X_{1,I}^{t,*}, X_{1,M_W \times M_L}^{t,*}, X_{2,R}^{t,*}, X_{3,R}^{t,*}, X_{4,R}^{t,*}, X_5^{t,*})$$

Bước 3.6: Đưa các cá thể con $\{X_{ALL}^{t,*}\}$ và giá trị fitness tương ứng $\bar{C}_F^{t,*}$ vào thể hệ hiện tại, để tạo ra bộ cá thể mới $\{X_{ALL}^Z\}$ và các giá trị $\{\bar{C}_F^Z\}$

Bước 3.7: Tăng số thế hệ: $Gen = Gen + 1$

Bước 4: Kết thúc vòng lặp khi điều kiện dừng (TC) được thỏa mãn

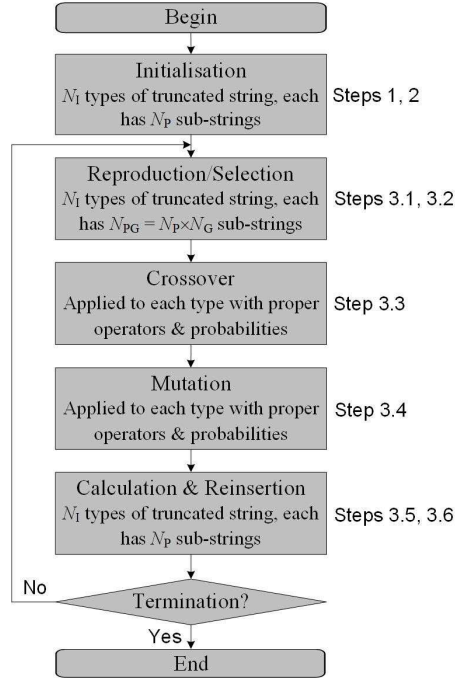
Bước 5: Tìm cá thể tốt nhất:

$$\bar{C}_F^*(c_i^*, f_{l,w}^*, P_i^*, P_{n_T}^*, h_{l,w}^*, \mathcal{T}^*) \in \{\bar{C}_F^Z(X_{1,L}^Z, X_{1,M_W \times M_L}^Z, X_{2,R}^Z, X_{3,R}^Z, X_{4,R}^Z, X_5^Z)\}$$

Việc giải bài toán này bằng GA gặp thách thức về một chuỗi nhiễm sắc thể cực kỳ dài được biểu diễn cho mỗi cá thể vì có nhiều OV khác nhau ($c_i, f_{l,w}, P_i, P_{n_T}, h_{l,w}$ và $\mathcal{T}$). NCS áp dụng cơ chế chia để trị bằng cách tách chúng thành các chuỗi con, mỗi chuỗi đại diện cho 1 hoặc 2 OV(s), tạo thành thuật toán GA cải tiến với chuỗi bị chia cắt GTS (GA with Truncated String), với các bước chi tiết của GTS theo Thuật toán 2.1.

2.5. ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT**2.5.1. Thiết lập thông số**

Các thông số của hệ thống được liệt kê trong Bảng 2-2. Ngoài ra, kích thước nội dung (s_i), bán kính cụm (R_n), mật độ IDU (ρ_n) được tạo ngẫu nhiên phân bố đều trong phạm vi [50, 250] Mbit, [10, 20]m và [0.01,0.1] IDU/m². UAV ban đầu bắt đầu ở toạ độ (100, 100, 75)m. Để làm cho quỹ đạo 3DF hiệu quả hơn, bộ thông số đặc tính kênh truyền ($\kappa_n, v_n, \eta_n^{\text{LoS}}, \eta_n^{\text{NLoS}}, \theta_n$) trong cụm n cũng được chọn ngẫu nhiên phân bố đều từ tập {1, 2, 3, 4} tương ứng với 4 loại môi trường (ngoại ô, đô thị, đô thị đông đúc, đô thị cao tầng) được đưa ra trong Bảng 2-3. NCS đánh giá hiệu suất của mô hình TCP-3DF bằng cách so sánh với các cơ chế khác: 1) chiến lược bay có xét thời gian dịch vụ với tối ưu kết hợp giữa lưu trữ, nơi dừng và độ cao (TFS-CSA), 2) TFS với tối ưu kết hợp giữa lưu trữ và nơi dừng (TFS-C&S), 3) TFS với chỉ có tối ưu lưu trữ (TFS-OOC), 4) TFS không có bất kỳ tối ưu nào (TFS-NUL).



Hình 2-2. Lưu đồ thuật toán GTS

Bảng 2-2. Các thông số của hệ thống cho mô hình TCP-3DF

Ký hiệu	Giá trị
$N, I, M_W \times M_L$	10 cụm, 10 nội dung, 3×4 điểm dừng
$B, f_c, \sigma^2, c, \alpha$	10 MHz, 2 GHz, 10^{-13} W, 3×10^8 m/s, 1
$P_{TL}, P_{TU}, P_{FL}, P_{FU}$	100 mW, 5000 mW, 300 W, 2000 W
P_S, H_{FL}, H_{FU}	250 W, 50 m, 150 m

T^*, S_C^*, N_I	50 s, 1 Gbits, 5 loại cá thể
N_P, N_G, P_G	5000 cá thể, 100 thế hệ, 0.9 (khoảng cách thế hệ)
$PREC_I$	8 bit biểu diễn độ chính xác của mỗi biến thực
$P_{C_{1,2,3,4,5}}$	0.6, 0.1, 0.1, 0.6, 0.9 cho xác suất lai chéo
$P_{M_{1,2,3,4,5}}$	10^{-9} , 10^{-12} , 10^{-12} , 10^{-9} , 10^{-9} cho xác suất đột biến
$d_{\max}, \gamma, \beta, \lambda_{1,2,3,4,5}$	200 m, 1.25, 10; 1, 1, 0.001, 0.2, 0.01

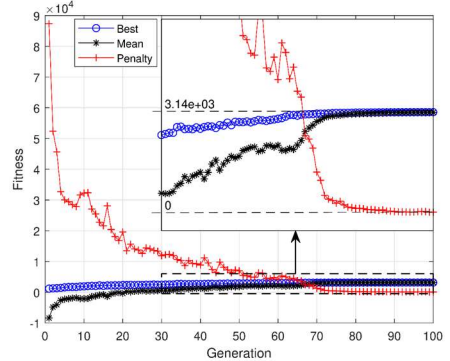
Bảng 2-3. Các thông số đặc trưng của môi trường kênh truyền [103]

Thông số Môi trường	κ_n	v_n	η_n^{LoS}	η_n^{NLoS}	θ_n
Vùng ngoại ô	4,88	0,43	0,1	21	20,34°
Thành thị	9,61	0,16	1	20	42,44°
Đô thị đông đúc	12,08	0,11	1,6	23	54,62°
Khu đô thị cao tầng	27,23	0,08	2,3	34	75,52°

2.5.2. Đánh giá hội tụ của GTS

Kết quả Hình 2-4 đến Hình 2-6: thuật toán GTS đạt hội tụ sau khoảng 70 thế hệ, kích thước quần thể tối ưu $N_P = 5000$ nhờ đảm bảo sự cân bằng giữa độ chính xác và độ phức tạp tính toán.

Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình TCP-3DF đạt khả năng hội tụ ổn định và cho hiệu năng vượt trội so với các cơ chế đối chứng. Cụ thể, mô hình đề xuất cải thiện đáng kể tổng dung lượng phân phối dữ liệu, giảm thời gian phục vụ và sử dụng hiệu quả hơn tài nguyên lưu trữ, công suất cũng như năng lượng UAV. Đồng thời, quỹ đạo bay thu được có chiều dài gần tối thiểu nhưng vẫn bảo đảm đáp ứng số lượng lớn IDU.



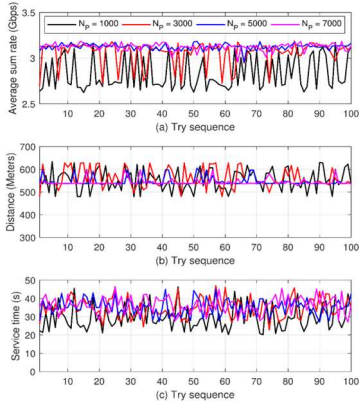
Hình 2-4. Sự hội tụ của GA trong bài toán TCP-3DF

Để hoàn thành đánh giá GTS, NCS triển khai thêm GA với chuỗi dài đầy đủ (GA with Full long Strings – GFS) và so sánh với GTS về độ chính xác và độ ổn định. Kết quả trong Hình 2-7 cho thấy, so với GFS thì GTS cho kết quả ổn định hơn và phù hợp với bài toán nhiều biến tối ưu.

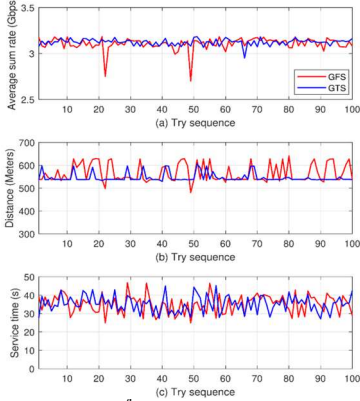
2.5.3. Đánh giá hiệu năng của mô hình TCP-3DF

2.5.3.1. Hiệu suất dung lượng

Tổng năng lượng trong Hình 2-9 (d) được xác định bởi công thức $E = \sum_{n_T=1}^{N_T} t_{n_T} P_{n_T} + T_S P_S + \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I t_{l,w,n}^i P_i$.



Hình 2-5. Độ ổn định của GTS theo N_p



Hình 2-7. Độ ổn định và chính xác của GTS và GFS qua 100 lần thử

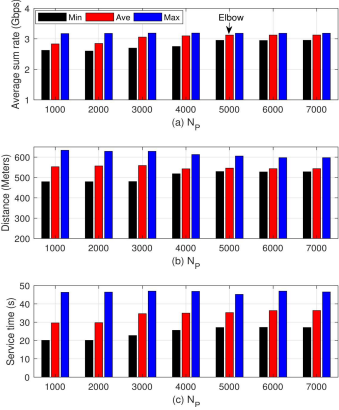
Trong Bảng 2-5, NCS đánh giá tác động của ràng buộc thời gian dịch vụ (T^*) lên hiệu suất của TCP-3DF, được thực hiện ở $\alpha = 1$. Qua đó thấy rằng, có thể điều chỉnh T^* một cách linh hoạt để đáp ứng thời gian phục vụ theo yêu cầu của các A&S đa phương tiện khác nhau.

Bảng 2-5. Đánh giá TCP-3DF theo T_C ($\alpha = 1$, $P_T^* = 10W$, $P_F^* = 10kW$)

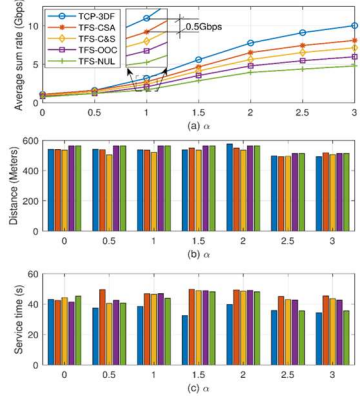
Thông số $T^*(s)$	Thông lượng (Mbps)	Khoảng cách bay (m)	Thời gian phục vụ (s)	P_T (mW)	P_F (W)	Chiếm dụng lưu trữ (Mbits)	Năng lượng tiêu thụ (J)
75	4251.6	709.9	72.9	9973	9353.3	707.5	66,321
50	3779.0	617.1	45.6	9988	8853.3	457.5	52,523
25	3010.5	518.3	24.9	9989	8773.3	457.5	45,912
10	2050.7	339.6	9.9	9989	8773.3	457.5	30,533

2.5.3.2. Quỹ đạo bay

Khảo sát quỹ đạo UAV trong các kịch bản khác nhau (Hình 2-10 đến Hình



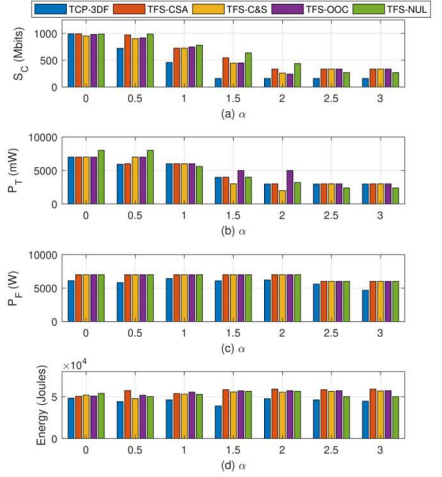
Hình 2-6. Độ chính xác của GTS theo N_p



Hình 2-8. Dung lượng, khoảng cách bay và thời gian phục vụ theo α

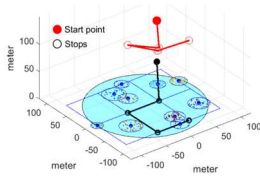
2-12). Khi nói lỏng ràng buộc T^* , UAV tăng số điểm dừng và khoảng cách bay, phục vụ nhiều IDU hơn và đạt tổng tốc độ dữ liệu cao hơn, vẫn thỏa mãn ràng buộc công suất. Ngoài ra, độ cao UAV được tối ưu theo đặc điểm môi trường và mật độ IDU giúp cải thiện thông lượng so với bay ở độ cao cố định.

Khi sử dụng lưới bay mịn hơn, hệ thống đạt hiệu năng tốt hơn: thông lượng tăng (3,6 Gbps so với 3,2 Gbps), khoảng cách bay giảm và thời gian phục vụ ngắn hơn, mặc dù số điểm dừng tăng.

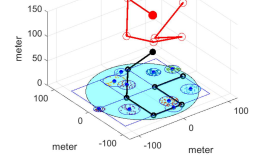


Hình 2-9. Mức tiêu thụ dung lượng lưu trữ, công suất và năng lượng theo α

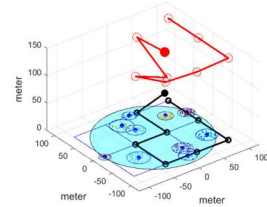
a)
 $T^* = 10s$



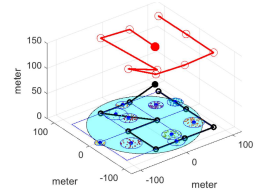
b)
 $T^* = 25s$



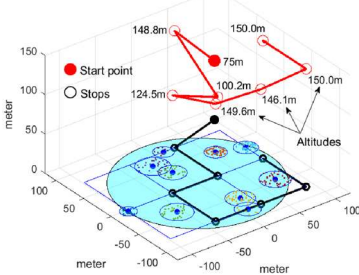
c)
 $T^* = 50s$



d)
 $T^* = 75s$

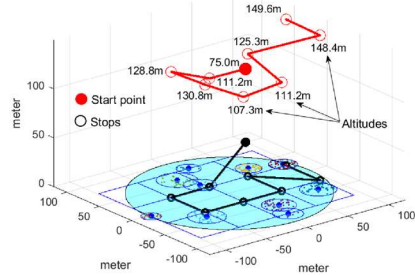


Hình 2-10. Các quỹ đạo bay khác nhau của UAV theo thời gian phục vụ T^*



Hình 2-11. Quỹ đạo của UAV

$M_W \times M_L = 3 \times 4$ ($\bar{C} = 3,2\text{Gbps}$, $d = 537,2\text{m}$ và $\bar{T} = 38,5\text{s}$).



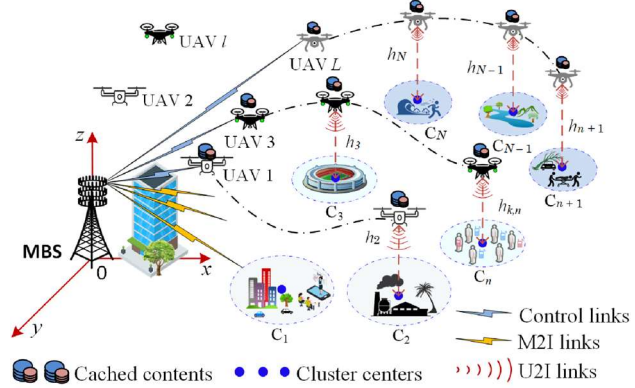
Hình 2-12. Quỹ đạo của UAV $M_W \times$

$M_L = 4 \times 5$ ($\bar{C} = 3,6\text{Gbps}$, $d = 515,5\text{m}$ và $\bar{T} = 34,9\text{s}$).

CHƯƠNG 3. TỐI ƯU LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU THỜI GIAN THỰC DÙNG UAV BẦY ĐÀN TRONG MẠNG 6G IoT

3.1. GIỚI THIỆU

Trong chương này, NCS đề xuất mô hình RCD-CTR nhằm tối ưu: (i) lưu trữ nội dung theo chế độ truyền phối hợp UAV-MBS, (ii) phân bổ công suất phát và công suất bay, (iii) độ cao UAV tại các điểm dừng và (iv) số lượng cùng quỹ



Hình 3-1. Mạng 6G IoT hỗ trợ bởi UAV bầy đàn với mô hình RCD-CTR

đạo bay của UAV bầy đàn. Mô hình xét đến sự phối hợp giữa MBS và UAV trong môi trường truyền không đồng nhất để phân phối nội dung đến các IDU. Bài toán tối ưu được xây dựng nhằm xác định các tham số trên dưới các ràng buộc về dung lượng lưu trữ và công suất UAV.

3.2. CẤU TRÚC VÀ HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG THEO MÔ HÌNH RCD-CTR

Hệ thống gồm một MBS và tập $\mathcal{L}$ UAV phối hợp phân phối I nội dung đến IDUs trong N cụm. Các IDU trong cụm n phân bố trong vùng tròn tâm C_n , bán kính R_n , mật độ ρ_n và có cùng nhu cầu nội dung. Mỗi nội dung i có kích thước s_i và độ phổ biến p_i . MBS và UAV phối hợp lưu trữ và phân phối nội dung theo thời gian thực qua ba giai đoạn: chuẩn bị, triển khai và chờ.

Bảng 3-1. Các ký hiệu thông số trong mô hình RCD-CTR

Ký hiệu	Ý nghĩa của ký hiệu
$\mathcal{K}$	Tập hợp con số UAV tối ưu thuộc $\mathcal{L}$
$K, \pi(k)$	Số phần tử UAV trong tập $\mathcal{K}$, Mã định danh của UAV $k \in \mathcal{K}$
$\mathcal{N}_k$	Tập hợp các cụm mà UAV k bay đến phục vụ
N_k	Số cụm có trong tập hợp $\mathcal{N}_k$
n_k	Ký hiệu của cụm n_k trong tập hợp $\mathcal{N}_k$ cụm, $n_k = 1, 2, \dots, N_k$
$\pi(n_k)$	Mã định danh của cụm $n_k \in \mathcal{N}_k$
h_n	Độ cao của UAV tại cụm n
T_k, v_k	Quỹ đạo bay của UAV k , vận tốc bay của UAV k
P_k^{FLY}	Công suất bay của UAV k
$P_{n,i}^{\text{U2I}}$	Công suất phát nội dung i từ UAV đến IDU trong cụm n

$P_{n,i}^{M2I}$	Công suất phát nội dung i từ MBS đến IDU trong cụm n
P_s	Công suất sử dụng khi đứng yên của UAV

3.3. TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ HỆ THỐNG

3.3.1. Các công thức thiết lập cơ bản

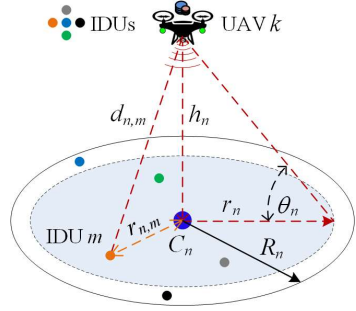
3.3.1.1. Chỉ số lựa chọn mode phục vụ

Chỉ số lựa chọn mode phục vụ $s_n \in \{0,1\}$ là mode được lựa chọn để phục vụ các IDUs trong cụm n : bởi UAV ($s_n = 1$) hoặc bởi MBS ($s_n = 0$). Chỉ số lưu trữ $c_{n,i}$ được tính dựa trên s_n và $q_{n,i}$ như sau:

$$c_{n,i} = q_{n,i} s_n \quad (3.1)$$

3.3.1.2. Phạm vi phủ sóng của UAV

Trong cụm n , có tất cả là $\lfloor \rho_n \pi R_n^2 \rfloor$ IDUs. Góc ngả thích hợp θ_n của các UAV trong các cụm khác nhau được lựa chọn tùy thuộc vào môi trường truyền sóng, được trình bày tại Hình 3-2.



Hình 3-2. Vùng phủ sóng của UAV khi dừng trên cụm n

3.3.2. Mô hình kênh truyền

3.3.2.1. Kênh truyền từ UAV đến IDU

Suy hao kênh truyền giữa UAV và IDU m trong cụm n :

$$\psi_{n,m}^{\mathcal{A}} = (4\pi f_c d_{n,m}/c)^2 \eta_n^{\mathcal{A}}, \mathcal{A} \in \{\text{LoS}, \text{NLoS}\} \quad (3.2)$$

trong đó $d_{n,m}$ là khoảng cách từ UAV đến IDU m trong cụm n .

Mức suy hao kênh truyền trung bình như công thức sau:

$$\bar{\psi}_{n,m} = \psi_{n,m}^{\text{LoS}} P_{n,m}^{\text{LoS}} + \psi_{n,m}^{\text{NLoS}} P_{n,m}^{\text{NLoS}} \quad (3.3)$$

$$= (4\pi f_c d_{n,m}/c)^2 [\eta_n^{\text{LoS}} P_{n,m}^{\text{LoS}} + \eta_n^{\text{NLoS}} P_{n,m}^{\text{NLoS}}]$$

$$\text{và xác suất xảy ra kênh truyền LoS: } P_{n,m}^{\text{LoS}} = \frac{1}{1 + \kappa_n \exp[-v_n(\xi_{n,m} - \kappa_n)]} \quad (3.4).$$

với κ_n và v_n là các hằng số liên quan đến môi trường của cụm n , $r_{n,m}$ là khoảng cách từ tâm C_n đến IDU m trong cụm n và $\xi_{n,m} = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{h_n}{r_{n,m}}\right)$.

3.3.2.2. Kênh truyền từ MBS đến IDU

Kênh truyền thông giữa MBS và IDU m trong cụm n :

$$H_{n,m}^{M2I} = \sqrt{\beta_0 (d_{n,m}^{M2I})^{-\gamma_0}} \left(\sqrt{\frac{\beta_1}{1 + \beta_1}} h_{n,m}^{M2I, \text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{1 + \beta_1}} h_{n,m}^{M2I, \text{NLoS}} \right) \quad (3.5)$$

với β_0 là độ lợi công suất kênh M2I tại khoảng cách 1m, γ_0 và β_1 là số mũ suy hao đường truyền và hệ số Rician, $d_{n,m}^{M2I}$ là khoảng cách giữa MBS và IDU m trong cụm n , $h_{n,m}^{M2I, \text{NLoS}} = \mathcal{CN}(0, 1)$ là hàm phân phối chuẩn phức có

trung bình bằng 0 và phương sai bằng 1 và: $h_{n,m}^{M2I, \text{LoS}} = e^{-j \frac{2\pi d_{n,m}^{M2I}}{\lambda}}$ (3.6).

3.3.3. Thông lượng kênh truyền

SINR và tốc độ phân phối nội dung i từ UAV đến IDU m trong cụm n :

$$\gamma_{n,m,i}^{U2I} = s_n q_{n,i} (\bar{\psi}_{n,m})^{-1} P_{n,i}^{U2I} / \sigma^2 \quad (3.7)$$

$$C_{n,m,i}^{U2I} = B \log_2(1 + \gamma_{n,m,i}^{U2I}) \quad (3.8)$$

Tổng tốc độ phân phối dữ liệu trung bình từ UAV đến IDU là:

$$\bar{C}_{U2I} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_n} \sum_{i=1}^I p_i C_{n,m,i}^{U2I} \quad (3.9)$$

SINR và tốc độ phân phối nội dung i từ MBS đến IDU m trong cụm n là:

$$\gamma_{n,m,i}^{M2I} = (1 - s_n) q_{n,i} P_{n,i}^{M2I} |H_{n,m}^{M2I}|^2 / \sigma^2 \quad (3.10)$$

$$C_{n,m,i}^{M2I} = B \log_2(1 + \gamma_{n,m,i}^{M2I}) \quad (3.11)$$

Tổng tốc độ phân phối dữ liệu trung bình từ MBS đến tất cả các IDU là:

$$\bar{C}_{M2I} = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^{M_n} \sum_{i=1}^I p_i C_{n,m,i}^{M2I} \quad (3.12)$$

Thông lượng hệ thống đạt được nhờ sự hợp tác giữa MBS và UAV:

$$\bar{C} = (\bar{C}_{U2I} + \bar{C}_{M2I}) / N \quad (3.13)$$

3.3.4. Thời gian phục vụ

Thời gian phục vụ được định nghĩa như trong Chương 2, trong chương này thời gian phục vụ có xét đến MBS. Thời gian bay của UAV k trên chặng từ điểm dừng tại cụm $n_k - 1$ đến điểm/ dừng tại cụm n_k :

$$T_{n_k}^{FLY} = d(n_k - 1, n_k) / v_k \quad (3.14)$$

với v_k là tốc độ của UAV k và điểm dừng “0” là vị trí ban đầu của UAV k .

Thời gian truyền của UAV k khi nó dừng ngay phía trên cụm n_k để truyền nội dung i được xác định theo công thức: $T_{n_k,i}^{U2I} = s_i / C_{n_k,i}^{U2I}$ (3.15), với $C_{n_k,i}^{U2I} = \min\{C_{n_k,m,i}^{U2I}, s_{\pi(n_k)} = 1, q_{\pi(n_k),i} = 1, \forall m, i\}$. Chọn dung lượng kênh xấu nhất giữa UAV k và các IDUs trong cụm n_k để truyền nội dung i .

Thời gian MBS truyền nội dung i đến các IDUs trong cụm $n \neq \pi(n_k)$:

$$T_{n,i}^{M2I} = s_i / C_{n,i}^{M2I} \quad (3.16), \text{ với } C_{n,i}^{M2I} = \min\{C_{n,m,i}^{M2I}, s_n = 0, q_{n,i} = 1, \forall m, i\}.$$

Thời gian phục vụ trung bình cho mỗi cụm là:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \left[\underbrace{\sum_{k=1}^K \sum_{n_k=1}^{N_k} \left((N_k - n_k + 1) T_{n_k}^{FLY} + (N_k - n_k) \sum_{i=1}^I T_{n_k,i}^{U2I} \right)}_{\text{Thời gian bay và truyền của UAVs}} + \underbrace{\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I T_{n,i}^{M2I}}_{\text{Thời gian truyền của MBS}} \right] \quad (3.17)$$

3.3.5. Tiêu thụ tài nguyên

3.3.5.1. Mức tiêu thụ dung lượng lưu trữ

Mức sử dụng dung lượng lưu trữ tối đa: $S_C = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I c_{n,i} s_i$ (3.18)

3.3.5.2. Mức tiêu thụ công suất

Mức tiêu thụ công suất của UAV được sử dụng cho việc truyền, dừng để phát và bay. Tổng công suất truyền (P_T^{U2I}) của các UAVs, tổng công suất truyền của MBS (P_T^{M2I}) và tổng công suất bay (P_T^{FLY}):

$$P_T^{U2I} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I P_{n,i}^{U2I} \quad (3.19)$$

$$P_T^{M2I} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I P_{n,i}^{M2I} \quad (3.20)$$

$$P_T^{FLY} = \sum_{k=1}^K P_k^{FLY} \quad (3.21)$$

với P_k^{FLY} là công suất bay của UAV k loại 4 cánh quạt khi đạt vận tốc v_k :

$$P_k^{FLY} = \frac{c_4 V_k}{4} + \frac{c_3 V_k^{3/4}}{2} + c_2 V_k^{1/2} + 2c_1 V_k^{1/4} + 4c_0 \quad (3.22)$$

Và: $c_0 = I_0^2 R_0$, $c_1 = 30 I_0 K_E / \pi$, $c_2 = 2 I_0 R_0 C_m / K_T$, $c_3 = 30 K_E C_m / (\pi K_T)$, $c_4 = R_0 C_m^2 / K_T^2$ và: $V_k = (m^2 g^2 + C_d^2 v_k^4) / C_t^2$. (3.23)

3.4. BÀI TOÁN RCD-CTR VÀ GIẢI PHÁP GA

3.4.1. Bài toán RCD-CTR

Nhằm cực đại tốc độ truyền dữ liệu trung bình đồng thời cực tiểu thời gian phục vụ, bài toán RCD-CTR được mô hình thành (3.24):

với $N_c = \sum_{n=1}^N s_n$ là tập hợp $\mathcal{N}_c$ gồm N_c cụm được phục vụ bởi K UAV

$$\max_{s_n, P_{n,i}^{U2I}, P_{n,i}^{M2I}, h_n, K, P_k^{FLY}, \mathcal{T}_k} \bar{C} - \gamma \bar{T} \quad (3.24a)$$

$$\text{s.t. } S_C \leq S_C^* \quad (3.24b)$$

$$P_T^{U2I} \leq P_{T*}^{U2I} \quad (3.24c)$$

$$P_T^{M2I} \leq P_{T*}^{M2I} \quad (3.24d)$$

$$P_{\min}^{U2I} \leq P_{n,i}^{U2I} \leq P_{\max}^{U2I}, \quad \forall n, i, \quad (3.24e)$$

$$P_{\min}^{M2I} \leq P_{n,i}^{M2I} \leq P_{\max}^{M2I}, \quad \forall n, i, \quad (3.24f)$$

$$h_{\min} \leq h_n \leq h_{\max}, \quad \forall n \quad (3.24g)$$

$$P_T^{FLY} \leq P_{T*}^{FLY} \quad (3.24h)$$

$$P_{\min}^{FLY} \leq P_k^{FLY} \leq P_{\max}^{FLY}, \quad \forall k \quad (3.24i)$$

$$1 \leq K \leq N_c \quad (3.24j)$$

$N_c = \sum_{k=1}^K N_k$, và γ là hệ số chuẩn hóa thứ nguyên hàm mục tiêu.

Do độ phức tạp của biểu thức (3.24), ta chia bài toán ban đầu thành 02 bài toán tối ưu thành phần. Việc tối thiểu hóa biểu thức (3.24) là tương đương với việc tối thiểu hóa biểu thức $\bar{C} - \bar{T}_T$ bằng cách tìm các giá trị của s_n , $P_{n,i}^{U2I}$, $P_{n,i}^{M2I}$, h_n , trong đó $\bar{T}_T$ được tính theo công thức sau:

$$\bar{T}_T = \frac{1}{N} \left[\sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I T_{n,i}^{U2I} + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I T_{n,i}^{M2I} \right] \quad (3.25)$$

và sau đó, kết quả của s_n , h_n và $T_{n,i}^{U2I}$ trong công thức (3.25) được tái sử dụng để tối thiểu hóa giá trị thời gian được phục vụ bởi UAV bằng cách tìm các giá trị của K , P_k^{FLY} và quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$

$$\bar{T}_F = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n_k=1}^{N_k} \left((N_k - n_k + 1) T_{n_k}^{FLY} + (N_k - n_k) \sum_{i=1}^I T_{n_k,i}^{U2I} \right) \quad (3.26)$$

Bài toán RCD-CTR (3.24) được chia thành 02 bài toán tối ưu hóa thành phần.

3.4.1.1. Bài toán tối ưu hóa SRT

Mục tiêu của bài toán
tối ưu SRT là cực đại
tổng tốc độ phân phối
dữ liệu trung bình và
cực tiểu thời gian
truyền $(S_n,$
 $P_{n,i}^{U2I}, P_{n,i}^{M2I}$ và $h_n)$.

$$\begin{aligned} \max_{s_n, P_{n,i}^{U2I}, P_{n,i}^{M2I}, h_n} \quad & \bar{C} - \gamma \bar{T}_T \quad (3.27a) \\ \text{s.t.} \quad & S_C \leq S_C^* \quad (3.27b) \\ & P_T^{U2I} \leq P_{T*}^{U2I} \quad (3.27c) \\ & P_T^{M2I} \leq P_{T*}^{M2I} \quad (3.27d) \\ & P_{\min}^{U2I} \leq P_{n,i}^{U2I} \leq P_{\max}^{U2I}, \forall n, i, \quad (3.27e) \\ & P_{\min}^{M2I} \leq P_{n,i}^{M2I} \leq P_{\max}^{M2I}, \forall n, i, \quad (3.27f) \\ & h_{\min} \leq h_n \leq h_{\max}, \forall n \quad (3.27g) \end{aligned}$$

3.4.1.2. Bài toán tối ưu hóa FLT

Từ kết quả bài toán SRT,
bài toán FLT tiếp tục cực
tiểu thời gian phục vụ của
UAV bằng cách tìm giá trị
 K, P_k^{FLY} và quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$:

$$\begin{aligned} \min_{K, P_k^{FLY}, \mathcal{T}_k} \quad & \bar{T}_F \quad (3.28a) \\ \text{s.t.} \quad & P_T^{FLY} \leq P_{T*}^{FLY} \quad (3.28b) \\ & P_{\min}^{FLY} \leq P_k^{FLY} \leq P_{\max}^{FLY}, \forall k \quad (3.28c) \\ & 1 \leq K \leq N_c \quad (3.28d) \end{aligned}$$

3.4.2. Giải bài toán RCD-CTR bằng GA

3.4.2.1. Giải bài toán SRT bằng GA

NCS áp dụng GA để giải bài toán tối ưu RCD-CTR. Và có áp dụng hàm phạt. Viết lại các ràng buộc phức tạp này như sau:

$$\begin{cases} \Delta S_C = S_C^* - S_C \geq 0, \\ \Delta P_T^{U2I} = P_{T*}^{U2I} - P_T^{U2I} \geq 0, \\ \Delta P_T^{M2I} = P_{T*}^{M2I} - P_T^{M2I} \geq 0. \end{cases} \quad (3.29)$$

Và hàm phạt khi đó sẽ được biểu diễn bởi công thức:

$$\begin{aligned} F_{SRT} = & \lambda_1 (\min\{0, \Delta S_C\})^2 + \lambda_2 (\min\{0, \Delta P_T^{U2I}\})^2 \\ & + \lambda_3 (\min\{0, \Delta P_T^{M2I}\})^2 \end{aligned} \quad (3.30)$$

với λ_1, λ_2 và λ_3 là các hệ số phạt vi phạm ràng buộc được lựa chọn hợp lý.

Khi đó, GA có thể sử dụng để giải bài toán tối ưu SRT như sau:

$$\max_{s_n, P_{n,i}^{U2I}, P_{n,i}^{M2I}, h_n} \bar{C}_{SRT} = \bar{C} - \gamma \bar{T}_T - F_{SRT} \quad (3.31)$$

Đến đây, bài toán SRT có thể áp dụng GA để tìm các giá trị $s_n, P_{n,i}^{U2I}, P_{n,i}^{M2I}$ và h_n theo Thuật toán 3.1 như sau:

Thuật toán 3.1. GA cho bài toán SRT

Đầu vào (Input): tham số của hệ thống trong Bảng 2-3 và Bảng 3-2

$Gen = 1$: đếm số thế hệ

Đầu ra (Output): $\bar{C}_{SRT}^*(s_n^*, P_{n,i}^{U2I,*}, P_{n,i}^{M2I,*}, h_n^*)$

Bước 1: Sinh ngẫu nhiên N_P^{SRT} chuỗi (cá thể) $\{X^z\}$, với $z = 1, 2, \dots, N_P^{\text{SRT}}$. Mỗi chuỗi gồm $B_b = N$ bit để biểu diễn s_n và $B_r = \text{PREC} \times (2 \times N \times I + N)$ bit để biểu diễn $P_{n,i}^{U2I}, P_{n,i}^{M2I}$ và h_n . PREC là số bit biểu diễn 2^{PREC} mức lượng tử hóa của các biến $P_{n,i}^{U2I}, P_{n,i}^{M2I}$ hoặc h_n . Các bit B_r sau đó được chuyển đổi sang giá trị thực bằng phép toán b2r.

Bước 2: Tính N_P^{SRT} giá trị hàm thích nghi (fitness) theo công thức (3.31) để thu được $\bar{C}_{\text{SRT}}^z$, tức là $\bar{C}_{\text{SRT}}^z(X^z)$.

Bước 3: Khi điều kiện dừng TC chưa thỏa mãn, thực hiện các bước sau:

Bước 3.1: Đưa các cá thể $\{X^z\}$ tương ứng với $\bar{C}_{\text{SRT}}^z$ vào vào bộ chọn lọc (mating pool) để xếp hạng.

Bước 3.2: Chọn $N_G^{\text{SRT}} = N_P^{\text{SRT}} \times P_G^{\text{SRT}}$ cá thể tốt nhất (có giá trị fitness cao hơn) để sinh sản bằng cách lấy mẫu ngẫu nhiên phổ quát (stochastic universal sampling) [145], nhằm thu được $\{X^t\}$, với $t = 1, 2, \dots, N_G^{\text{SRT}}$.

Bước 3.3: Chọn các cặp cá thể bố mẹ để tạo ra thế hệ con bằng lai ghép đa điểm với xác suất P_C^{SRT} , tạo ra các cá thể con $\{X^t\}$.

Bước 3.4: Thực hiện đột biến các cá thể con $\{X^t\}$ với xác suất P_M^{SRT} dùng phép toán bù. Bằng cách này, các đặc trưng di truyền tích cực có thể đã bị mất ở các bước trước có khả năng được phục hồi. Kết quả là thu được $\{X^{t,*}\}$.

Bước 3.5: Lặp lại Bước 2 để tính $\bar{C}_{\text{SRT}}^{t,*}(X^{t,*})$.

Bước 3.6: Đưa các cá thể $\{X^{t,*}\}$ và $\bar{C}_{\text{SRT}}^{t,*}$ vào thế hệ hiện tại để tạo ra tập cá thể mới $\{X^z\}$ và tập fitness $\{\bar{C}_{\text{SRT}}^z\}$.

Bước 3.7: Tăng số thế hệ $\text{Gen} = \text{Gen} + 1$.

Bước 4: Kết thúc vòng lặp khi điều kiện dừng (TC) được thỏa mãn.

Bước 5: Tìm fitness tốt nhất: $\bar{C}_{\text{SRT}}^*(s_n^*, P_{n,i}^{U2I,*}, P_{n,i}^{M2I,*}, h_n^*) \in \{\bar{C}_{\text{SRT}}^z(X^z)\}$.

Trong đó, điều kiện kết thúc (TC) của Thuật toán 3.1 xảy ra khi đáp ứng một trong các điều kiện sau: 1) Trung bình của tổng hình phạt F_{SRT} nhỏ hơn 10^{-3} trong 10 thế hệ liên tiếp; 2) $\text{Gen} = N_G^{\text{SRT}}$, tức là 100 thế hệ. Sau khi giải bài toán (3.31), ta thu được các giá trị của $T_{n,i}^{U2I}$ và s_n và các giá trị này được sử dụng lại để giải bài toán (3.33) trong phần tiếp theo.

3.4.2.2. Giải bài toán FLT bằng GA

Để tìm quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$ cho UAV k , định nghĩa ma trận mặt nạ nhị phân $\mathbf{B}_{L \times N_c}$, để chọn K UAVs bay trong số L UAVs và xác định UAV sẽ dừng lại ở cụm nào trong quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$ (nếu UAV k dùng để phục vụ cụm n_k thì $B_{\pi(k), n_k} = 1$ và ngược lại thì $B_{\pi(k), n_k} = 0$); ma trận số nguyên $\mathbf{I}_{L \times N_c}$ và ma

$$\text{trận quỹ đạo bay } \mathbf{T}_{L \times N_c}: \mathbf{T}_{L \times N_c} = \mathbf{B}_{L \times N_c} \circ \mathbf{I}_{L \times N_c} \quad (3.32)$$

với toán tử “ $\circ$ ” là: $\mathbf{T}_{l,n_k} = \mathbf{B}_{l,n_k} \mathbf{I}_{l,n_k}, \forall l = 1, 2, \dots, L, n_k = 1, 2, \dots, N_c$.

Trong ma trận $\mathbf{T}_{L \times N_c}$, UAV k không bay đến điểm dừng tại cụm n_k nếu $\mathbf{T}_{\pi(k),n_k} = 0$ và ngược lại, UAV bay đến điểm dừng theo thứ tự từ số nguyên nhỏ nhất đến số nguyên lớn nhất. Thay vì giải (3.28), ta giải bài toán:

$$\min_{P_k^{\text{FLY}}, \mathbf{B}_{L \times N_c}, \mathbf{I}_{L \times N_c}} \bar{T}_F \quad (3.33a)$$

$$\text{s.t. } P_T^{\text{FLY}} \leq P_{T*}^{\text{FLY}} \quad (3.33b)$$

$$P_{\min}^{\text{FLY}} \leq P_k^{\text{FLY}} \leq P_{\max}^{\text{FLY}}, \forall k \quad (3.33c)$$

$$1 \leq K \leq N_c \quad (3.33d)$$

Hình phạt khi có nhiều hơn một UAV bay đến cùng một điểm dừng, hoặc không có UAV nào dừng lại để phục vụ IDU trong cụm n_k là $\sum_{n_k=1}^{N_c} (\sum_{l=1}^L \mathbf{B}_{l,n_k} - 1)^2$; khi UAV bay lại đến điểm dừng nào trước đó của chính nó thì lượng phạt $d_{\max}$ được thêm vào thời gian bay (3.14):

$$T_{n_k}^{\text{FLY}} = \begin{cases} d(n_k - 1, n_k)/v_k, & \text{nếu } \mathbf{I}_{l,n_{k-1}} \neq \mathbf{I}_{l,n_k}, \forall l = 1, 2, \dots, L \\ d_{\max}/v_k, & \text{ngược lại} \end{cases} \quad (3.34)$$

và giá trị phạt $(\min\{0, \sum_{l=1}^L b_l - 1\})^2 + (\min\{0, N_c - \sum_{l=1}^L b_l\})^2$ để đảm bảo $1 \leq K = \sum_{l=1}^L b_l \leq N_c$. Biểu diễn ràng buộc (3.33b): $\Delta P_T^{\text{FLY}} = P_T^{\text{FLY}} - P_{T*}^{\text{FLY}} \geq 0$ (3.35) để thêm vào giá trị phạt $(\min\{0, \Delta P_T^{\text{FLY}}\})^2$ nếu vi phạm.

Tổng hàm phạt khi xét toàn bộ các thành phần bị phạt là:

$$F_{\text{FLT}} = \lambda_4 \sum_{n_k}^{N_c} (\sum_{l=1}^L \mathbf{B}_{l,n_k} - 1)^2 + \lambda_5 \left[(\min\{0, \sum_{l=1}^L b_l - 1\})^2 + (\min\{0, N_c - \sum_{l=1}^L b_l\})^2 \right] + \lambda_6 (\min\{0, \Delta P_T^{\text{FLY}}\})^2 \quad (3.36)$$

với λ_4, λ_5 và λ_6 là các hệ số phạt vi phạm ràng buộc được lựa chọn hợp lý.

Bài toán có ràng buộc FLT (3.33) trở thành bài toán không ràng buộc:

$$\min_{P_k^{\text{FLY}}, \mathbf{B}_{L \times N_c}, \mathbf{I}_{L \times N_c}} \bar{T}_{\text{FLT}} = \bar{T}_F - F_{\text{FLT}} \quad (3.37)$$

Bài toán FLT có thể giải bằng phương pháp GTS, theo Thuật toán 3.2:

Thuật toán 3.2. GA cho bài toán FLT

Đầu vào (Input): Các thông số hệ thống trong Bảng 2-3 và Bảng 3-2

$Gen = 1$: đếm số thế hệ

Đầu ra (Output): $\bar{T}_{\text{FLT}}^*(P_k^{\text{FLY},*}, \mathbf{B}_{L \times N_c}^*, \mathbf{I}_{L \times N_c}^*)$

Bước 1: Sinh ngẫu nhiên các chuỗi con (sub-strings):

1. N_P^{FLT} chuỗi con $\{X_R^z\}$, với $z = 1, 2, \dots, N_P^{\text{FLT}}$, mỗi chuỗi gồm $\text{PREC} \times L$ bit để tạo ra một nghiệm ứng viên cho P_k^{FLY} . Ở đây, PREC là số bit biểu diễn 2^{PREC} mức lượng tử hóa của P_k^{FLY} .
2. N_P^{FLT} chuỗi con $\{X_B^z\}$, mỗi chuỗi gồm $L \times N_c$ bit để tạo ra một nghiệm ứng viên cho $\mathbf{B}_{L \times N_c}$.
3. N_P^{FLT} chuỗi con $\{X_I^z\}$, mỗi chuỗi gồm $L \times N_c$ số nguyên để tạo ra một nghiệm ứng viên cho $\mathbf{I}_{L \times N_c}$.

Bước 2: Tính N_P^{FLT} giá trị hàm thích nghi (fitness) theo công thức (3.37) để thu được $\bar{T}_{FLT}^Z$, tức là $\bar{T}_{FLT}^Z(X_R^Z, X_B^Z, X_I^Z)$.

Bước 3: Khi điều kiện dừng TC chưa thỏa mãn, thực hiện các bước sau:

Bước 3.1: Đưa các chuỗi kết hợp $\{X_{ALL}^Z\} = [\{X_R^Z\}\{X_B^Z\}\{X_I^Z\}]$ tương ứng với $\bar{T}_{FLT}^Z$ vào mating pool để xếp hạng.

Bước 3.2: Chọn $N_{PG}^{FLT} = N_P^{FLT} \times P_G^{FLT}$ cá thể tốt nhất (có giá trị fitness cao hơn) để sinh sản bằng cách lấy mẫu ngẫu nhiên phổ quát [145], nhằm thu được $\{X_{ALL}^t\} = [\{X_R^t\}\{X_B^t\}\{X_I^t\}]$, $t = 1, 2, \dots, N_{PG}^{FLT}$.

Bước 3.3: Chọn một cặp cá thể bố mẹ để tạo ra thế hệ con bằng lai ghép đa điểm với các xác suất $P_{CR}^{FLT}, P_{CB}^{FLT}, P_{CI}^{FLT}$ tương ứng cho $\{X_R^t\}, \{X_B^t\}$ và $\{X_I^t\}$, và không thực hiện toán tử đột biến (mutation).

Bước 3.4: Lặp lại Bước 2 để thu được $\bar{T}_{FLT}^{t,*}(X_R^{t,*}, X_B^{t,*}, X_I^{t,*})$.

Bước 3.5: Đưa các cá thể $\{X_{ALL}^{t,*}\}$ và $\bar{T}_{FLT}^{t,*}$ vào thế hệ hiện tại để tạo ra các tập mới $\{X_{ALL}^Z\}$ và $\{\bar{T}_{FLT}^Z\}$.

Bước 3.6: Cập nhật số thế hệ: $Gen = Gen + 1$.

Bước 4: Kết thúc vòng lặp khi điều kiện dừng TC được thỏa mãn.

Bước 5: Tìm fitness tốt nhất: $\bar{T}_{FLT}^*(P_k^{FLY*}, \mathbf{B}_{L \times N_c}^*, \mathbf{I}_{L \times N_c}^*) \in \{\bar{T}_{FLT}^Z(X_R^Z, X_B^Z, X_I^Z)\}$.

Trong đó, điều kiện kết thúc TC của Thuật toán 3.2 tương tự Thuật toán 3.1.

3.5. ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT

3.5.1. Thiết lập thông số

Các thông số của hệ thống RCD-CTR được liệt kê trong Bảng 3-2. Kích thước nội dung (s_i), bán kính cụm (R_n), mật độ IDU (ρ_n) được tạo ngẫu nhiên phân bố đều trong các khoảng [100, 500] Mbit, [10, 20] m và [0,01, 0,1] IDU/m². MBS đặt tại (0, 0, 25) m, các UAV ban đầu cách MBS khoảng gần 500 m theo phương ngang với độ cao từ 5–50 m. Các tham số kênh truyền trong mỗi cụm được chọn ngẫu nhiên phân bố đều theo một trong bốn loại môi trường (ngoại ô, đô thị, đô thị dày đặc, đô thị cao tầng) theo Bảng 2-3.

Bảng 3-2. Các thông số hệ thống cho mô hình RCD-CTR

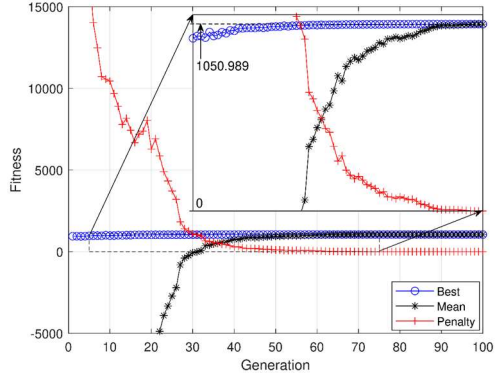
Ký hiệu	Giá trị
N, L, I	10 cụm, 10 UAV, 10 nội dung
$\beta_0, \beta_1, \gamma_0, h_{\min}, h_{\max}$	10^{-3} , 6, 4, 10 m, 100 m
$P_{\min}^{U2I}, P_{\max}^{U2I}, P_{\min}^{M2I}, P_{\max}^{M2I}$	0 W, 5 W; 0 W, 10 W
S_C^*	50%×tổng dung lượng của các nội dung
$P_{T*}^{U2I}, P_{T*}^{M2I}, P_S$	25%× $N \times P_{\max}^{U2I}$ (W), 25%× $N \times P_{\max}^{M2I}$ (W), 250W
$P_{\min}^{FLY}, P_{\max}^{FLY}, P_{T*}^{FLY}$	300 W, 2000 W, 5000 W

$B, f_c, \sigma^2, c, \alpha$	10 MHz, 2 GHz, 10^{-13} W, 3×10^8 m/s, 1
N_P^{SRT}, N_P^{FLT}	3000 cá thể, 5000 cá thể
N_G^{SRT}, N_G^{FLT}	100 thế hệ
P_G^{SRT}, P_G^{FLT}	0.9 (khoảng cách thế hệ)
$PRECI$	6 bit biểu diễn độ chính xác của mỗi biến thực
P_C^{SRT}, P_M^{SRT}	0.9, 10^{-10} (xác suất lai/ đột biến của bài toán SRT)
$P_{CR}^{FLT}, P_{CB}^{FLT}, P_{CI}^{FLT}$	0.9, 0.9, 0.9 xác suất lai của bài toán FLT
$d_{max}; \gamma; \lambda_{1,2,3,4,5,6}$	500 m; 1; 0.1, 10^4 , 100, 100, 1, 0.1

3.5.2. Kết quả giải bài toán SRT bằng GA

Kết quả tại Hình 3-3 đến Hình 3-5 cho thấy bài toán SRT hội tụ sau khoảng 60–70 thế hệ, với kích thước quần thể tối ưu khoảng 3.000. Phương pháp đề xuất đạt độ ổn định và độ chính xác cao hơn so với các cấu hình quần thể thấp.

NCS đánh giá hiệu suất của phương pháp SRT bằng cách so sánh với các cơ chế đối chứng gồm NPA (không tối ưu công



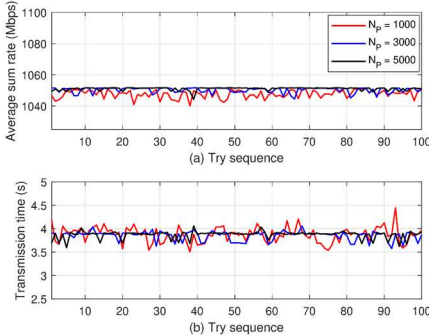
Hình 3-3. Sự hội tụ của GA (SRT)

suất), NAL (không tối ưu độ cao) và NSC (không tối ưu lựa chọn mode s_n).

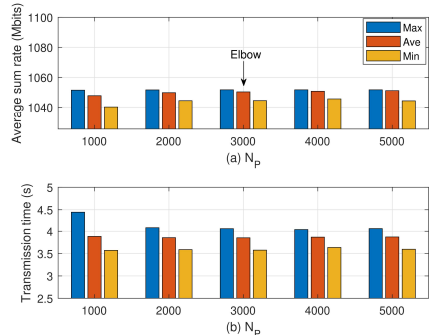
Kết quả cho thấy mô hình đề xuất vượt trội về tốc độ phân phối dữ liệu, thời gian phục vụ, cùng hiệu quả sử dụng tài nguyên công suất và lưu trữ.

3.5.3. Kết quả giải bài toán FLT bằng GA

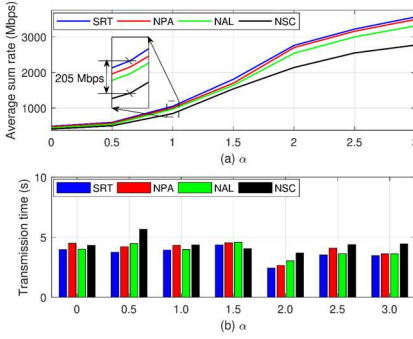
Kết quả tại Hình 3-8 và Hình 3-9 cho thấy bài toán FLT hội tụ ổn định sau khoảng 70–75 thế hệ. Kích thước quần thể tối ưu nằm trong khoảng 5.000, đảm bảo độ chính xác và tính ổn định của thuật toán.



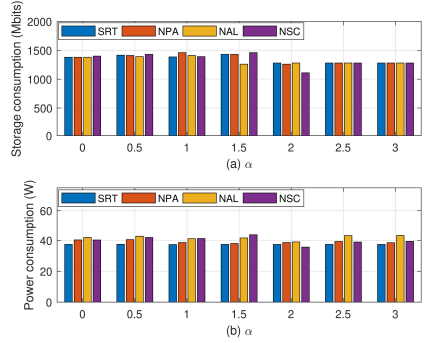
Hình 3-4. Ổn định của GA



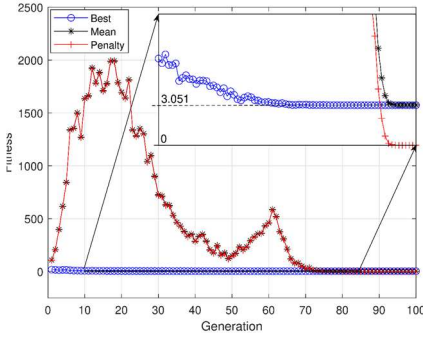
Hình 3-5. Độ chính xác của GA



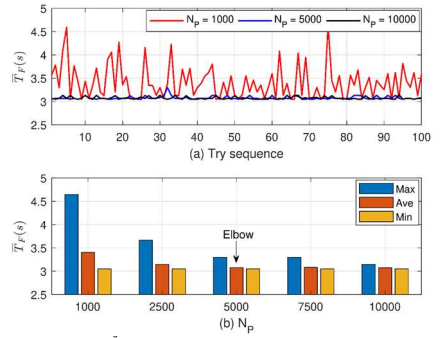
Hình 3-6. Hiệu năng theo α



Hình 3-7. Tài nguyên theo α



Hình 3-8. Hội tụ của GA

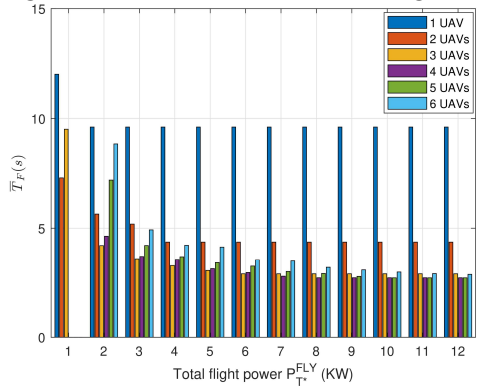


Hình 3-9. Ổn định & chính xác của GA

Kết quả tại Hình 3-10 và Bảng 3-3 cho thấy tồn tại một số lượng UAV tối ưu trong quá trình phân phối dữ liệu, phụ thuộc vào giới hạn công suất P_{T*}^{FLY} . Việc tăng số lượng UAV không luôn dẫn đến cải thiện hiệu năng, mà cần lựa chọn cấu hình phù hợp để đạt thời gian phục vụ tối thiểu.

3.5.4. Quỹ đạo bay

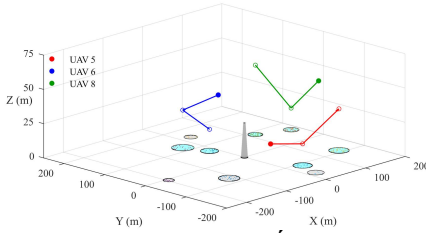
Các kết quả về quỹ đạo bay tại Hình 3-11 đến Hình 3-16 minh họa khả năng thích nghi của hệ UAV bày đàn trong các kịch bản khác nhau, đồng thời khẳng định hiệu quả của mô hình RCD-CTR trong tối ưu hóa phối hợp giữa UAV và MBS.



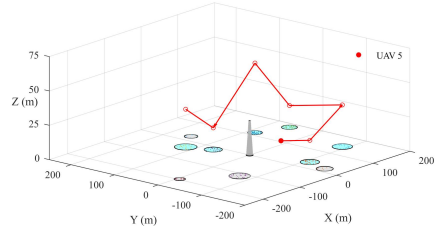
Hình 3-10. Thời gian phục vụ theo P_{T*}^{FLY}

Bảng 3-3. Thời gian phục vụ theo số lượng UAV ($P_{T*}^{FLY} = 5KW$)

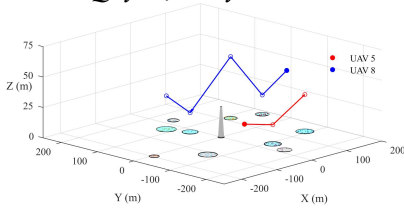
Số UAV	1	2	3	4	5	6
Thời gian phục vụ (s)	9.6135	4.3707	3.0509	3.1316	3.4108	4.1428



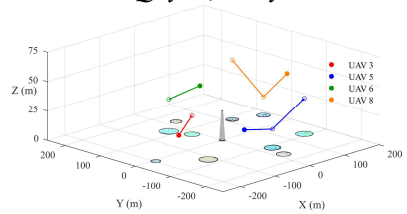
Hình 3-11. Quỹ đạo bay tối ưu với 3 UAV



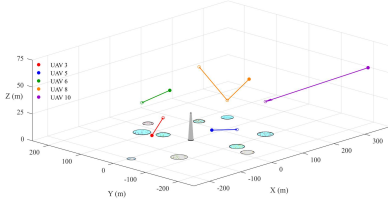
Hình 3-12. Quỹ đạo bay với 1 UAV



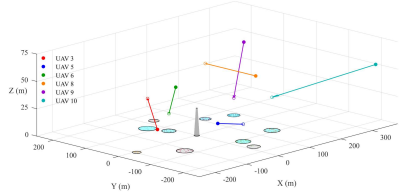
Hình 3-13. Quỹ đạo bay với 2 UAV



Hình 3-14. Quỹ đạo bay với 4 UAV



Hình 3-15. Quỹ đạo bay với 5 UAV



Hình 3-16. Quỹ đạo bay với 6 UAV

KẾT LUẬN

1. Kết quả đạt được

L luận án đã đề xuất hai mô hình TCP-3DF và RCD-CTR nhằm tối ưu lưu trữ, phân phối dữ liệu và quỹ đạo bay trong mạng 6G IoT. Kết quả cho thấy các mô hình đề xuất cải thiện đáng kể dung lượng hệ thống, giảm thời gian phục vụ và sử dụng hiệu quả tài nguyên. Đặc biệt, mô hình RCD-CTR với UAV bầy đàn đạt hiệu quả vượt trội trong các kịch bản thực tế. Các kết quả nghiên cứu được công bố trên các hội nghị quốc tế [C2, C4, C5], tạp chí trong nước [C1] và quốc tế [C3].

2. Các hướng nghiên cứu tiếp theo

- Tiếp tục cải tiến về mô hình hệ thống.
- Tiếp tục cải tiến thuật giải tối ưu để nâng cao độ chính xác và giảm thời gian thực thi, áp dụng các phương pháp mới như học máy và học tăng cường để đáp ứng yêu cầu thời gian thực toàn diện.

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NCS

STT	Tên công trình
[C1]	Nguyen-Son Vo, Thuong C. Lam , Minh-Phung Bui, Thanh-Minh Phan, and Quang-Nhat Tran, "UAV Assisted Video Multicasting in 6G Networks: A Joint Caching and Trajectory Optimisation," <i>Journal of Aviation Science & Technology</i> , vol. 1, no. 1, pp. 37-42, Mar. 2022.
[C2]	Thuong C. Lam , Nguyen-Son Vo, Thanh-Hieu Nguyen, Thanh-Minh Phan, and De-Thu Huynh, "Genetic Algorithms for Storage- and Energy-aware Caching and Trajectory Optimisation Problem in UAV-assisted Content Delivery Networks," in <i>Proc. of EAI International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems (INISCOM'23)</i> , Ho Chi Minh City, Vietnam, Aug. 2023, pp. 34-50.
[C3]	Thuong C. Lam , Nguyen-Son Vo, Minh-Phung Bui, Chan Dai Truyen Thai, Haejoon Jung, and Van-Ca Phan, "Service Time-aware Caching, Power Allocation, and 3D Trajectory Optimised Multimedia Content Delivery in UAV-assisted IoT Networks," <i>IEEE Trans. Veh. Technol.</i> , vol. 74, no. 4, pp. 6419-6432, Apr. 2025.
[C4]	Thuong C. Lam , Nguyen-Son Vo, Minh-Phung Bui, De-Thu Huynh, Thanh-Dung Tran, and Ha Duy Hung, "Genetic Algorithms for Swarm UAV-Assisted Edge Content Delivery Optimisation Problem" in <i>Proc. of IEEE International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future in Computing and Communication Technologies (RIVF'24)</i> , Danang City, Vietnam, Dec. 2024, pp. 188-193.
[C5]	Thuong C. Lam , Nguyen-Son Vo, Tan Do-Duy, Long D. Nguyen, Thanh-Minh Phan, Hung T. Nguyen, and De-Thu Huynh, "Transmission Mode Selection-based Content Caching for Real-time Swarm UAV-assisted 6G IoT Networks", in <i>Proc. of EAI International Conference on Industrial Networks and Intelligent Systems (INISCOM'26)</i> , Da Nang, Vietnam, Accepted, Feb. 2026.