

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**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC MÁY TÍNH

ĐÀ NẴNG, 2026

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 ngành: **9.48.01.01**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KHOA HỌC MÁY TÍNH

Người hướng dẫn khoa học: TS. VÕ NGUYỄN SƠN

ĐÀ NẴNG, 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan đề tài “NGHIÊN CỨU KỸ THUẬT LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU TỐI ƯU THỜI GIAN THỰC DÙNG UAV TRONG MẠNG 6G IoT” mà tôi thực hiện là công trình nghiên cứu của riêng tôi, dưới sự hướng dẫn trực tiếp của TS. Võ Nguyên Sơn.

Toàn bộ thông tin, cũng như các kết quả nghiên cứu và các kết luận trong luận án này là trung thực, không sao chép từ bất kỳ nguồn nào và dưới bất kỳ hình thức nào. Việc tham khảo các nguồn tài liệu đều đã được thực hiện trích dẫn và ghi nguồn tài liệu tham khảo đúng quy định. Nếu phát hiện bất cứ gian dối nào trong luận án, tôi xin chịu hoàn toàn trách nhiệm và nhận mọi sự xử lý, kỷ luật từ nhà trường.

Đà Nẵng, ngày tháng năm 2026

Tác giả

Lâm Chi Thương

LỜI CẢM ƠN

Luận án tiến sĩ này của tôi được hoàn thành với sự nỗ lực của bản thân, sự động viên giúp đỡ của người hướng dẫn khoa học, cùng sự ủng hộ của gia đình và bạn bè.

Tôi xin chân thành bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc đến TS. Võ Nguyên Sơn, Viện Nghiên cứu Khoa học Cơ bản và Ứng dụng – Đại học Duy Tân tại thành phố Hồ Chí Minh. Thầy đã tận tình chỉ bảo và hướng dẫn tôi trong suốt quá trình học tập, nghiên cứu và hoàn thành luận án tiến sĩ.

Tôi xin cảm ơn PGS. TS. Nguyễn Gia Như, Trường Khoa học máy tính và Trí tuệ nhân tạo – Đại học Duy Tân, thành phố Đà Nẵng. Thầy đã luôn định hướng và hỗ trợ kịp thời cho việc học tập – nghiên cứu của tôi trong suốt thời gian tham gia chương trình nghiên cứu sinh.

Xin cảm ơn Đại học Duy Tân đã cho tôi môi trường học tập và nghiên cứu giúp tôi hoàn thành luận án tiến sĩ này.

Cuối cùng, tôi xin cảm ơn gia đình đã hỗ trợ và đồng hành cùng tôi trong suốt thời gian thực hiện luận án này.

Mặc dù đã cố gắng hoàn thành luận án trong phạm vi và khả năng cho phép, nhưng chắc chắn sẽ không tránh khỏi những thiếu sót. Tôi rất mong nhận được sự góp ý của quý thầy cô và các nhà nghiên cứu.

Đà Nẵng, ngày tháng năm 2026

Tác giả

Lâm Chi Thương

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN.....	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT.....	vii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC.....	xi
DANH MỤC CÁC BẢNG	xiv
DANH MỤC CÁC HÌNH VÀ BIỂU ĐỒ	xv
MỞ ĐẦU	1
1. Lý do chọn đề tài	1
2. Mục tiêu, đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu	2
2.1. Mục tiêu nghiên cứu	2
2.2. Đối tượng nghiên cứu	3
2.3. Phạm vi nghiên cứu	3
2.4. Phương pháp nghiên cứu	3
3. Nhiệm vụ nghiên cứu và kết quả đạt được	4
3.1. Nhiệm vụ nghiên cứu.....	4
3.2. Kết quả đạt được.....	4
4. Bố cục luận án	5
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU	
TRONG MẠNG 6G IoT	7
1.1. MẠNG 6G VÀ 6G IoT	7
1.1.1. Giới thiệu mạng 6G	7
1.1.2. Giới thiệu mạng 6G IoT.....	9
1.1.3. Ứng dụng của mạng 6G IoT	11
1.1.4. Thách thức của mạng 6G IoT	13
1.2. LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU TRONG MẠNG 6G IoT	14

1.2.1. Lưu trữ và phân phối qua mạng D2D	14
1.2.2. Lưu trữ và phân phối qua trạm nền nhỏ	15
1.2.3. Lưu trữ và phân phối qua UAV	15
1.2.4. Lưu trữ và phân phối đa tầng.....	17
1.2.5. Phân tích và đánh giá các kết quả nghiên cứu liên quan	17
1.3. KHÁI NIỆM VÀ MÔ HÌNH TOÁN HỌC VỀ LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU DÙNG UAV TRONG MẠNG 6G IoT.....	24
1.3.1. Độ phổ biến của dữ liệu.....	24
1.3.2. Chỉ số yêu cầu, chỉ số lưu trữ và chỉ số liên kết U2C.....	24
1.3.3. Vùng phủ của UAV và xác suất của kênh truyền LoS	25
1.3.4. Mô hình công suất bay và vận tốc UAV	26
1.3.5. Mô hình kênh truyền.....	27
1.3.6. Thời gian phục vụ	27
1.3.7. Các giả thiết trong mô hình hệ thống	27
1.4. THIẾT KẾ TỐI ƯU THỜI GIAN THỰC DÙNG UAV TRONG MẠNG 6G IoT	28
1.4.1. Khái niệm về thiết kế tối ưu thời gian thực	28
1.4.2. Các yêu cầu thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV.....	29
1.4.3. Các thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV	30
1.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1	35
CHƯƠNG 2. TỐI ƯU LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU DÙNG UAV TRONG MẠNG 6G IoT	37
2.1. GIỚI THIỆU HỆ THỐNG	37
2.2. CẤU TRÚC VÀ HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG THEO MÔ HÌNH TCP-3DF	42
2.3. TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ CỦA HỆ THỐNG THEO MÔ HÌNH TCP-3DF	45
2.3.1. Phạm vi phủ sóng của UAV	46
2.3.2. Kênh không-đối-đất (A2G).....	47
2.3.3. Tốc độ truyền dữ liệu trung bình	48

2.3.4. Khoảng cách bay.....	49
2.3.5. Thời gian phục vụ trung bình	49
2.3.6. Mức sử dụng dung lượng lưu trữ.....	50
2.3.7. Mức tiêu thụ công suất	50
2.4. BÀI TOÁN TCP-3DF VÀ GIẢI PHÁP GA.....	51
2.4.1. Bài toán TCP-3DF	51
2.4.2. Giải bài toán TCP-3DF bằng GA	52
2.4.3. Độ phức tạp của GA cho bài toán TCP-3DF	55
2.5. ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT	58
2.5.1. Thiết lập thông số	58
2.5.2. Đánh giá hội tụ của GTS	61
2.5.3. Đánh giá hiệu năng của mô hình TCP-3DF	65
2.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2	71
CHƯƠNG 3. TỐI ƯU LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU THỜI GIAN	
THỰC DÙNG UAV BẦY ĐÀN TRONG MẠNG 6G IoT.....	72
3.1. GIỚI THIỆU HỆ THỐNG	72
3.2. CẤU TRÚC VÀ HOẠT ĐỘNG CỦA HỆ THỐNG THEO MÔ HÌNH	
RCD-CTR.....	75
3.3. TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ CỦA HỆ THỐNG THEO MÔ HÌNH	
RCD-CTR.....	77
3.3.1. Các công thức thiết lập cơ bản.....	78
3.3.2. Mô hình kênh truyền.....	78
3.3.3. Thông lượng kênh truyền	80
3.3.4. Thời gian phục vụ trung bình	81
3.3.5. Mức tiêu thụ tài nguyên.....	81
3.4. BÀI TOÁN RCD-CTR VÀ GIẢI PHÁP GA	82
3.4.1. Bài toán RCD-CTR.....	82
3.4.2. Giải bài toán RCD-CTR bằng GA.....	84
3.4.3. Độ phức tạp của GA cho bài toán RCD-CTR	90
3.5. ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT	90

3.5.1. Thiết lập thông số	90
3.5.2. Kết quả giải bài toán SRT bằng GA	92
3.5.3. Kết quả giải bài toán FLT bằng GA	96
3.5.4. Quỹ đạo bay	98
3.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3	100
KẾT LUẬN	101
1. Tóm tắt kết quả đạt được của luận án	101
2. Các đóng góp khoa học của luận án	101
3. Đối chiếu mục tiêu, nhiệm vụ và kết quả đạt được	102
4. Các hướng nghiên cứu tiếp theo	104
CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH	106
1. Công trình đã công bố của luận án	106
2. Công trình đã công bố khác	107
TÀI LIỆU THAM KHẢO	108

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

Từ viết tắt	Tiếng Anh	Tiếng Việt
3DF	3D Flight Trajectory	Quỹ đạo bay 3 chiều
5G	5th Generation	Mạng di động thế hệ thứ 5
6G	6th Generation	Mạng di động thế hệ thứ 6
A&S	Applications and Services	Ứng dụng và dịch vụ
A2G	Air-to-Ground	Kênh từ không đối đất
ACO	Ant Colony Optimization	Thuật toán tối ưu đàn kiến
B5G/6G	Beyond 5G/6G	Mạng di động thế hệ sau 5G/6G
CP	Content Provider	Nhà cung cấp nội dung
CPS	<u>C</u> aching, transmission and flight <u>P</u> ower allocation, and where to <u>S</u> top	Bài toán CPS
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh
CSO	Conventional Optimization Solution	Các giải pháp tối ưu hóa truyền thông
D2C	Device-to-Cloud	Truyền thông từ thiết bị đến đám mây
D2D	Device-to-Device	Truyền thông từ thiết bị đến thiết bị
D2G	Device-to-Gateway	Truyền thông từ thiết bị đến gateway
DRL	Deep Reinforcement Learning	Học tăng cường sâu
DT	Digital Twin	Bản sao số
EH	Energy Harvesting	Thu thập năng lượng
eMBB	enhanced Mobile Broadband	Truyền thông băng rộng tăng cường
eMBB +	enhanced Mobile Broadband Plus	eMBB thế hệ mới trong 6G
FANET	Flying Ad hoc Network	Mạng ad-hoc trên không
FBS	Femto Base Station	Trạm cơ sở nhỏ femtocell

FLT	Minimizing the <u>FL</u> ying <u>T</u> ime served by the UAVs	Bài toán FLT
GA	Genetic Algorithm	Giải thuật di truyền
GFS	GA with Full long Strings	GA với chuỗi nhiễm sắc thể đầy đủ
GTS	GA with Truncated String	GA với chuỗi nhiễm sắc thể được chia thành nhiều đoạn
HCN	Heterogeneous Cellular Networks	Mạng di động không đồng nhất
HSR	High-Speed Railway	Đường sắt cao tốc
IDU	IoT Devices and Users	Thiết bị và người dùng trong mạng IoT
IoT	Internet of Things	Internet vạn vật
ISP	Internet Service Provider	Nhà cung cấp dịch vụ Internet
LoS	Line of Sight	Tầm nhìn thẳng
MBS	Macro Base Station	Trạm gốc/ Trạm cơ sở
MCD	Multimedia Content Delivery	Phân phối nội dung đa phương tiện
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output	Hệ thống đa đầu vào – đa đầu ra
ML	Machine Learning	Học máy
mMTC +	massive Machine-Type Communications Plus	Truyền thông máy – máy quy mô cực lớn thế hệ 6G
MU	Mobile User	Người dùng di động
NAL	None Altitude	Mô hình không tối ưu cao độ
NFT	None Flight Trajectory	Mô hình không tối ưu quỹ đạo bay
NLoS	None Line of Sight	Tầm nhìn bị che chắn
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access	Truy cập đa kênh không trực giao
NPA	None Power Allocation	Mô hình không tối ưu về phân bổ công suất
NSC	None mode Selection-based Caching	Mô hình không tối ưu lưu trữ dựa trên chọn lựa mode truyền
OP	Optimization Problem	Bài toán tối ưu

OV	Optimization Variable	Biến tối ưu
PSNR	Peak Signal-to-Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu cực đại trên nhiễu
PSO	Particle Swarm Optimization	Thuật toán tối ưu bầy đàn
QoE	Quality of Experience	Chất lượng trải nghiệm
QoS	Quality of Service	Chất lượng dịch vụ
RCD-CTR	<u>R</u> real-Time <u>C</u> ooperative <u>C</u> ontent <u>C</u> aching and <u>D</u> elivery with <u>C</u> oordinated <u>T</u> Rajjectory	Mô hình RCD-CTR
RFG	Rectangular Flight Grid	Lưới bay hình chữ nhật
RTO	Real-Time Optimization	Tối ưu hóa thời gian thực
SBS	Small cell Base Station	Trạm cơ sở nhỏ
SCN	Small Cell Networks	Mạng di động sử dụng trạm nền nhỏ
SDE	Software-Defined Edge	Kỹ thuật biên được định nghĩa bằng phần mềm
SE	Spectral Efficiency	Hiệu suất phổ
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	Tỉ số tín hiệu trên can nhiễu và nhiễu trắng
SNR	Signal to Noise-Ratio	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu trắng
SRT	maximum Sum Rate and minimum Transmission time	Bài toán SRT
STP	ShorTest Path	Đường bay ngắn nhất
TC	Terminate Condition	Điều kiện kết thúc
TCP	service Time-aware Caching and Power allocation	Lưu trữ và phân bổ công suất có xét đến thời gian phục vụ
TCP-3DF	service Time-aware Caching, Power allocation, and 3DF	Lưu trữ, phân bổ công suất và điều hướng quỹ đạo bay 3D
TDMA	Time Division Multiple Access	Đa truy nhập phân chia theo thời gian
TFS	service Time-aware Flying Strategy	Chiến lược bay có xét đến thời gian dịch vụ

TFS-C&S	TFS with joint optimization of Caching and where to Stop	TFS với tối ưu lưu trữ và vị trí dừng
TFS-CSA	TFS with joint optimization of Caching, where to Stop, and Altitude	TFS với tối ưu lưu trữ, vị trí dừng và độ cao
TFS-NUL	TFS without any optimizations	TFS không có bất kỳ tối ưu nào
TFS-OOC	TFS with Only Optimal Caching	TFS chỉ có tối ưu lưu trữ
TX / RX	Transmitter/ Receiver	Thiết bị phát/ Thiết bị nhận
U2C	UAV-to-clusters	UAV đến cụm người dùng/thiết bị
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Máy bay không người lái
UDN	Ultra-Dense Network	Mạng siêu dày đặc
URLLC +	Ultra-Reliable and Low-Latency Communications Plus	Truyền thông siêu tin cậy, siêu độ trễ thấp thế hệ 6G
V2V	Vehicle-to-vehicle	Truyền thông giữa các xe
VAS	Video streaming Applications and Services	Ứng dụng và dịch vụ truyền video

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

Ký hiệu	Ý nghĩa
	NHÓM THÔNG SỐ HỆ THỐNG
$\mathcal{L}$	Tập hợp gồm L UAV trong mô hình RCD-CTR
L	Số lượng UAV trong tập hợp $\mathcal{L}$
$\mathcal{K}$	Tập hợp con của tập hợp $\mathcal{L}$ trong mô hình RCD-CTR, chứa số UAV tối ưu
K	Số lượng UAV trong tập hợp $\mathcal{K}$ trong mô hình RCD-CTR
$\mathcal{N}$	Tập hợp gồm N cụm
N	Số lượng cụm trong tập hợp $\mathcal{N}$
I	Số lượng nội dung
B	Bảng thông hệ thống
c	Tốc độ ánh sáng
f_c	Tần số sóng mang
α	Hệ số mũ độ lệch độ phổ biến giữa các nội dung
β_0	Độ lợi công suất kênh MBS đến IDU (kênh truyền M2I) trong RCD-CTR tại khoảng cách tham chiếu 1 m
β_1	Hệ số Rician của kênh truyền M2I trong RCD-CTR
γ_0	Hệ số mũ suy hao đường truyền M2I trong RCD-CTR
θ	Góc ngẩng để đạt độ phủ tối ưu của UAV
σ^2	Công suất nhiễu trắng Gaussian
$\mathcal{T}$	Chu trình bay của UAV
$N_{\mathcal{T}}$	Số lượng điểm dừng trong chu trình bay $\mathcal{T}$, với $N_{\mathcal{T}} \leq N$
$d_{\mathcal{T}}$	Khoảng cách bay của UAV tương ứng với chu trình bay $\mathcal{T}$
$\bar{C}$	Tốc độ phân phối dữ liệu trung bình cho mỗi cụm
F	Hàm phạt trong thuật toán GA
F_{FLT}	Hàm phạt trong bài toán FLT
F_{SRT}	Hàm phạt trong bài toán SRT
P_{F}	Tổng công suất bay trong TCP-3DF

P_F^*	Mức giới về tổng công suất bay trong TCP-3DF
P_T	Tổng công suất truyền trong TCP-3DF
P_T^*	Mức giới hạn về tổng công suất truyền trong TCP-3DF
P_T^{U2I}	Tổng công suất truyền của các UAV trong RCD-CTR
P_{T*}^{U2I}	Mức giới hạn về tổng công suất truyền của UAV trong RCD-CTR
P_T^{M2I}	Tổng công suất truyền của MBS trong RCD-CTR
P_{T*}^{M2I}	Mức giới hạn về tổng công suất truyền của MBS trong RCD-CTR
P_T^{FLY}	Tổng công suất bay của các UAV trong RCD-CTR
P_{T*}^{FLY}	Mức giới hạn về tổng công suất bay của UAV trong RCD-CTR
P_S	Công suất sử dụng khi đứng yên của UAV
R	Bán kính vùng phủ triển khai
S_C	Mức sử dụng dung lượng lưu trữ của UAV
S_C^*	Giới hạn về dung lượng lưu trữ của UAV
$\bar{T}$	Thời gian phục vụ trung bình trên mỗi cụm
T^*	Giới hạn về thời gian phục vụ trung bình
	NHÓM THÔNG SỐ UAV
C_d	Hệ số lực cản thân UAV ($N/(m/s)^2$)
C_m	Hệ số mô-men cản ($Nm/(rad/s)^2$)
C_t	Hệ số lực đẩy của UAV ($N/(rad/s)^2$)
g	Gia tốc trọng trường (m/s^2)
I_0	Cường độ dòng điện không tải (A)
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, $K_T = 9.55 K_E$
K_v	Hằng số tốc độ không tải danh định của động cơ (rpm/V)
m	Khối lượng của UAV (kg)
R_0	Điện trở của động cơ (Ω)
U_0	Điện áp không tải (V)
	NHÓM THÔNG SỐ GA
C_O	Chi phí tính toán hàm thích nghi
$d_{\max}$	Mức phạt một cá thể nếu UAV bay đến điểm dừng không hợp lệ: tăng thêm một quãng đường bay $d_{\max}$

N_G	Số lần lặp hay số thế hệ tiến hóa trong bài toán TCP-3DF
N_G^{FLT}	Số lần lặp hay số thế hệ tiến hóa của bài toán FLT
N_G^{SRT}	Số lần lặp hay số thế hệ tiến hóa của bài toán SRT
N_I	Số loại cá thể trong thuật toán GTS
N_p	Số cá thể trong quần thể trong bài toán TCP-3DF
N_p^{FLT}	Số cá thể trong quần thể của bài toán FLT
N_p^{SRT}	Số cá thể trong quần thể của bài toán SRT
P_G	Khoảng cách thế hệ của bài toán TCP-3DF
P_G^{FLT}	Khoảng cách thế hệ của bài toán FLT
P_G^{SRT}	Khoảng cách thế hệ của bài toán SRT
$PRECI$	Số bit biểu diễn độ chính xác của mỗi biến thực
$P_{C_{1,2,3,4,5}}$	Các xác suất lai chéo cho 05 loại biến của bài toán TCP-3DF
P_C^{SRT}	Xác suất lai chéo của bài toán SRT
$P_{CR}^{FLT}, P_{CB}^{FLT}, P_{CI}^{FLT}$	Các xác suất lai chéo của bài toán FLT
$P_{M_{1,2,3,4,5}}$	Các xác suất đột biến cho 05 loại biến của bài toán TCP-3DF
P_M^{SRT}	Xác suất đột biến của bài toán SRT
βd_p	Thành phần phạt bổ sung trong bài toán TCP-3DF, $\beta > 0$ là mức độ vi phạm
γ	Hệ số cân bằng, hiệu chỉnh thứ nguyên và thang đo
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$	Các hệ số phạt trong hàm phạt của giải thuật GA

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 1-1. So sánh các nghiên cứu hiện có với hướng nghiên cứu của luận án.....	22
Bảng 1-2. Các ký hiệu mô hình công suất bay và vận tốc của UAV	26
Bảng 2-1. Các ký hiệu về thông số được sử dụng trong mô hình TCP-3DF	44
Bảng 2-2. Các thông số của hệ thống cho mô hình TCP-3DF	58
Bảng 2-3. Các thông số đặc trưng của môi trường kênh truyền [103].....	60
Bảng 2-4. Biến tối ưu (OVs) của các phương pháp đối sánh	60
Bảng 2-5. Đánh giá TCP-3DF theo T_C ($\alpha = 1$, $PT^* = 10W$, $PF^* = 10kW$).....	66
Bảng 3-1. Các ký hiệu thông số trong mô hình RCD-CTR	76
Bảng 3-2. Các thông số hệ thống cho mô hình RCD-CTR.....	91
Bảng 3-3. Minh họa thời gian phục vụ của bầy đàn UAV theo số lượng UAV ($PT^* = 5KW$)	98
Bảng 4.1. Đối chiếu mục tiêu nghiên cứu, nhiệm vụ nghiên cứu, kết quả đạt được, công bố khoa học và đóng góp của luận án	102

DANH MỤC CÁC HÌNH VÀ BIỂU ĐỒ

Hình 1-1. Các chỉ số mục tiêu của mạng 6G [11].....	8
Hình 1-2. Viễn cảnh các ứng dụng IoT thế hệ mới dựa trên 6G [2]	12
Hình 1-3. Mô hình lưu trữ và phân phối dữ liệu hỗ trợ bởi UAV	16
Hình 1-4. Vùng phủ của UAV [101].....	25
Hình 1-5. Xu hướng các công bố liên quan đến việc sử dụng GA cho các thiết kế thời gian thực.....	31
Hình 2-1. Mô hình TCP-3DF cho MCD dùng UAV trong mạng 6G IoT	43
Hình 2-2. Mô hình vùng phủ sóng của UAV tại một điểm dừng trong không gian	46
Hình 2-3. Lưu đồ thuật toán GTS	54
Hình 2-4. Sự hội tụ của GA trong bài toán TCP-3DF	61
Hình 2-5. Độ ổn định của GTS theo các kích thước quần thể khác nhau	62
Hình 2-6. Độ chính xác của GTS theo các kích thước quần thể khác nhau.....	63
Hình 2-7. Độ ổn định và chính xác của GTS và GFS qua 100 lần thử	64
Hình 2-8. Dung lượng, khoảng cách bay và thời gian phục vụ theo α	65
Hình 2-9. Mức tiêu thụ dung lượng lưu trữ, công suất và năng lượng theo α	67
Hình 2-10. Các quỹ đạo bay khác nhau của UAV theo thời gian phục vụ T^*	69
Hình 2-11. Quỹ đạo của UAV khi lưới bay RFG có kích thước $M_W \times M_L = 3 \times 4$ ($C = 3,2\text{Gbps}$, $d = 537,2\text{m}$ và $T = 38,5\text{s}$)	70
Hình 2-12. Quỹ đạo của UAV khi lưới bay RFG có kích thước $M_W \times M_L = 4 \times 5$ ($C = 3,6\text{Gbps}$, $d = 515,5\text{m}$ và $T = 34,9\text{s}$).	70
Hình 3-1. Mạng 6G IoT hỗ trợ bởi UAV bày đàn với mô hình RCD-CTR	75
Hình 3-2. Vùng phủ sóng của UAV khi dừng trên cụm n	78
Hình 3-3. Sự hội tụ của thuật toán GA đối với bài toán SRT	92
Hình 3-4. Tính ổn định của thuật toán GA đối với bài toán SRT	93
Hình 3-5. Độ chính xác của thuật toán GA đối với bài toán SRT	93
Hình 3-6. Hiệu năng thông lượng hệ thống và thời gian truyền theo α	94
Hình 3-7. Dung lượng lưu trữ và mức tiêu thụ công suất theo α	95
Hình 3-8. Sự hội tụ của thuật toán GA đối với bài toán FLT	96
Hình 3-9. Độ ổn định và tính chính xác của thuật toán GA đối với bài toán FLT ...	97

Hình 3-10. Thời gian phục vụ theo $PT * FLY$ với các số lượng UAV khác nhau....	98
Hình 3-11. Quỹ đạo bay tối ưu với 3 UAV.....	99
Hình 3-12. Quỹ đạo bay với 1 UAV	99
Hình 3-13. Quỹ đạo bay với 2 UAV	99
Hình 3-14. Quỹ đạo bay với 4 UAV	99
Hình 3-15. Quỹ đạo bay với 5 UAV	99
Hình 3-16. Quỹ đạo bay với 6 UAV	100

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Trong bối cảnh mạng di động thế hệ B5G/6G đang không ngừng phát triển với các yêu cầu ngày càng cao cùng những tính năng vượt trội, nhiều thách thức mới đang được đặt ra cho cả nghiên cứu học thuật và ứng dụng, từ đó góp phần thúc đẩy sự phát triển mạnh mẽ của công nghệ toàn cầu. Các chủ đề nghiên cứu liên quan đến mạng 6G bao gồm: Kết nối băng thông rộng toàn vùng phủ sóng; các hệ thống tự hành và đa kết nối; các thiết kế có độ trễ dưới mili-giây, độ tin cậy cao và nhạy cảm với thời gian; các dịch vụ và ứng dụng cho xã hội số hóa trong tương lai; các dịch vụ cảm biến với độ chính xác vị trí cao và độ phân giải cao; máy học; các nghiên cứu về độ tin cậy, bảo mật và tính riêng tư; các công nghệ 6G, các dịch vụ và ứng dụng cho các thành phố thông minh; các giải pháp biên thông minh (edge intelligence); mạng truyền thông tin (gọi tắt là “truyền thông”) dải tần Terahertz; đa kết nối số lượng cực lớn trong các hệ thống thông tin liên lạc; các mô hình và kỹ thuật truyền thông giữa UAV với mặt đất, giữa UAV với UAV; kỹ thuật định hướng búp sóng 3D (3D beamforming) cho các UAV kết nối mạng di động; UAV hỗ trợ cho eMBB+, mMTC+ và URLLC+; kỹ thuật phối hợp của nhiều UAV trong truyền thông; kỹ thuật truyền thông với rất nhiều anten MIMO / Kỹ thuật truyền thông sóng ngắn milimet cho các UAV kết nối mạng di động [1], v.v.

Trong không gian rộng lớn của công nghệ mạng 6G, mảng công nghệ 6G IoT hứa hẹn mang lại rất nhiều lợi ích, bao gồm những ứng dụng trong công nghiệp và sản xuất thông minh; y tế số và chăm sóc sức khỏe từ xa; giao thông thông minh và phương tiện tự hành; UAV [2]; truyền thông qua vệ tinh; và các công nghệ và ứng dụng khác như: truyền thông holographic, tần số Terahertz, mã hóa lượng tử, cảm biến toàn diện, tích hợp AI, bảo vệ môi trường [3], v.v.

Bên cạnh những lợi ích tiềm năng to lớn, việc triển khai các công nghệ 6G IoT vào thực tiễn vẫn đang đối diện không ít thách thức kỹ thuật như: thiếu hụt phổ tần; các rào cản về xử lý lưu lượng và dung lượng mạng [4]; các yêu cầu thời gian thực và liên lạc có độ trễ siêu thấp trở nên bắt buộc đối với các ứng dụng quan trọng như giao thông thông minh, IoT tự hành và mạng cảm biến trên không [5]; hạn chế về

phần cứng của thiết bị IoT, với yêu cầu khắt khe về năng lượng, dung lượng bộ nhớ, độ bền và chi phí sản xuất [6]. Hiệu quả năng lượng trở thành một trong những thách thức cốt lõi trong môi trường có hàng tỷ thiết bị IoT [7]; việc tích hợp mạng vệ tinh và mặt đất đặt ra bài toán về độ trễ truyền dài, tính linh hoạt của liên kết và sự thay đổi nhanh chóng của cấu trúc mạng [8]; việc dự đoán tốc độ dữ liệu gặp nhiều khó khăn do ảnh hưởng phức tạp từ môi trường truyền, tính di động cao và sự thay đổi cấu trúc mạng; thách thức về an ninh và quyền riêng tư; thiếu vắng các tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất cho mạng 6G IoT [2].

Từ những thông tin trên, có thể nhận thấy rõ là tiềm năng nghiên cứu về 6G IoT còn rất lớn khi nhiều vấn đề mới chỉ dừng ở tiếp cận ban đầu và chưa được giải quyết. Trong đó, nghiên cứu tích hợp các mô hình và kỹ thuật truyền thông UAV vào mạng 6G IoT là một hướng còn nhiều tiềm năng. Đặc biệt, năng lực thu thập, lưu trữ và phân phối dữ liệu thông qua UAV trong mạng 6G IoT vẫn chưa được khai thác hiệu quả vì phần lớn các nghiên cứu hiện nay chủ yếu tập trung vào các thành phần mạng trên mặt đất, vốn được thiết kế phục vụ cho các ISP và CP. Các nghiên cứu về lưu trữ và phân phối tại UAV trong mạng 5G/6G hiện cũng chưa xét đến yếu tố thời gian thực do tính linh động và giới hạn năng lượng của UAV cũng như nhu cầu truy cập những ứng dụng và dịch vụ tức thời của IDU. Hơn nữa, các công trình nghiên cứu về tối ưu thời gian thực với mạng sử dụng UAV lại chưa xét đến kỹ thuật lưu trữ và phân phối nội dung trên UAV nhằm cung cấp QoS/QoE với độ trễ thấp nhất và độ khả dụng truyền thông cao cho các IDU.

Vì vậy, cần phát triển các kỹ thuật, mô hình phân tích và thiết kế tối ưu, cùng các tiêu chuẩn mới nhằm đáp ứng yêu cầu cao và phức tạp của quá trình thu thập, lưu trữ và phân phối dữ liệu trong mạng 6G IoT. Trên cơ sở đó, luận án đề xuất mô hình kết hợp kỹ thuật lưu trữ và phân phối dữ liệu tối ưu thời gian thực dùng UAV trong mạng 6G IoT. Mô hình này xem xét các tham số quan trọng của hệ thống, bao gồm tốc độ phân phối dữ liệu, thời gian bay, tài nguyên lưu trữ và công suất, trong mối liên hệ chặt chẽ với các đặc trưng của IDU, dữ liệu và môi trường truyền. Mục tiêu của mô hình là cực tiểu hóa thời gian phục vụ (service time), đồng thời tối ưu hiệu quả sử dụng tài nguyên của UAV và hạ tầng mạng 6G IoT.

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

2.1. Mục tiêu nghiên cứu

- **Mục tiêu tổng quát**

Mục tiêu tổng quát của đề tài 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 cung cấp trải nghiệm thời gian đáp ứng dịch vụ tốt nhất cho IDU, đồng thời sử dụng tài nguyên mạng hiệu quả.

- **Mục tiêu cụ thể**

- Mục tiêu 1: Đề xuất các cơ chế kết hợp lưu trữ và phân phối dữ liệu đến IDU có xét đến thời gian dịch vụ dùng UAV trong mạng 6G IoT.
- Mục tiêu 2: Mô hình toán học của hệ thống, phân tích và xây dựng các bài toán tối ưu, và đề xuất các giải thuật.
- Mục tiêu 3: Xây dựng các tiêu chí đánh giá thời gian dịch vụ, dung lượng phân phối và tài nguyên mạng.
- Mục tiêu 4: Đánh giá hiệu quả hệ thống.

2.2. Đối tượng nghiên cứu

- Hệ thống/ mạng và người dùng: tập trung vào UAV trong mạng 6G IoT và IDU.
- Dịch vụ và ứng dụng: tập trung vào các dịch vụ và ứng dụng phân phối dữ liệu.
- Công cụ và giải thuật: tập trung vào các công cụ hỗ trợ tính toán mô phỏng và các giải thuật heuristics.

2.3. Phạm vi nghiên cứu

- Mô hình: công suất - vận tốc của UAV, kênh truyền và mức độ phổ biến nội dung.
- Kỹ thuật: lưu trữ và phân phối dữ liệu kết hợp với phân bổ công suất và điều phối bay.
- Bộ tiêu chí đánh giá: thời gian dịch vụ, dung lượng phân phối dữ liệu của hệ thống và hiệu quả sử dụng tài nguyên.

2.4. Phương pháp nghiên cứu

NCS áp dụng hai phương pháp nghiên cứu chính trong luận án để hoàn thành các mục tiêu đề ra bao gồm:

- **Phương pháp phân tích - tổng hợp:** Trong phương pháp này, NCS sẽ thực hiện theo các bước phân tích vấn đề, tổng hợp nhận diện những điểm chung, khác biệt, những ưu - nhược điểm và đưa ra nhận xét, đánh giá, kết luận. Từ

đó, NCS đề xuất mô hình, giải pháp và kỹ thuật mới nhằm cải thiện và nâng cao hiệu quả của hệ thống so với các kỹ thuật hiện tại.

- **Phương pháp nghiên cứu định lượng:** Dựa trên những mô hình hệ thống được đề xuất, NCS tiếp cận các phương pháp tính toán để mô hình toán hệ thống được lượng hoá bởi các biểu thức tính toán liên quan. Các mô hình toán cụ thể cho phép NCS thực hiện mô phỏng, so sánh, đánh giá nhằm kiểm chứng hiệu suất cũng như tính đúng đắn của các mô hình được đề xuất.

3. Nhiệm vụ nghiên cứu và kết quả đạt được

3.1. Nhiệm vụ nghiên cứu

- **Nhiệm vụ nghiên cứu 1:** Nghiên cứu tổng quan về các mô hình lưu trữ, phân phối dữ liệu trong mạng 6G IoT và các kết quả nghiên cứu liên quan đến sử dụng UAV để lưu trữ, phân phối dữ liệu trong mạng 6G IoT. Nhiệm vụ nghiên cứu 1 là tiền đề để hoàn thành các mục tiêu đề ra của luận án.
- **Nhiệm vụ nghiên cứu 2:** Xây dựng mô hình hệ thống, cơ chế hoạt động, lập mô hình bài toán tối ưu về lưu trữ, phân phối, quỹ đạo bay và các yếu tố liên quan như công suất phát dữ liệu, công suất bay (vận tốc bay),... để phân phối dữ liệu dùng UAV trong mạng 6G IoT. Giải bài toán tối ưu hóa này để đạt mức cực đại về dung lượng phân phối dữ liệu có xét đến thời gian phục vụ các IDU, đồng thời đảm bảo sử dụng tài nguyên hiệu quả. Nhiệm vụ nghiên cứu 2 đáp ứng các mục tiêu 1, 2 và 4.
- **Nhiệm vụ nghiên cứu 3:** Mở rộng bài toán của nhiệm vụ 2, hướng đến thiết kế hệ thống tổng quát kết hợp MBS và nhiều UAV, sau đó giải bài toán tối ưu này với yêu cầu tiến đến đáp ứng thời gian thực. Nhiệm vụ nghiên cứu 3 đáp ứng các mục tiêu 2, 3 và 4.

3.2. Kết quả đạt được

Trong quá trình nghiên cứu và hoàn thành luận án, NCS đã có 04 công bố quốc tế (01 công bố trên tạp chí ISI và 03 bài hội nghị quốc tế), cùng 01 công bố trên tạp chí trong nước, với các kết quả cụ thể như sau:

- **Kết quả 1:** Từ nhiệm vụ nghiên cứu 1 và 2, luận án đề xuất mô hình TCP-3DF nhằm tối ưu lưu trữ, phân phối dữ liệu, phân bổ công suất và quỹ đạo bay 3D có xét đến thời gian phục vụ trong phân phối dữ liệu qua mạng 6G IoT hỗ trợ bởi UAV.

- **Kết quả 2:** Từ nhiệm vụ nghiên cứu 1 và 3, luận án đề xuất mô hình RCD-CTR nhằm tối ưu kết hợp lưu trữ, phân phối dữ liệu, phân bổ công suất, chọn lựa cơ chế truyền và điều phối quỹ đạo bay thời gian thực cho mạng 6G IoT hỗ trợ bởi UAV bay đàn.

4. Bố cục luận án

Luận án được bố cục gồm phần Mở đầu, Chương 1, Chương 2, Chương 3 và Kết luận, cụ thể như sau:

Chương 1: Tổng quan về lưu trữ và phân phối dữ liệu trong mạng 6G IoT

Chương 1 giới thiệu về 6G và 6G IoT, những ứng dụng và thách thức của 6G IoT. Đồng thời, tổng hợp các mô hình, kỹ thuật về lưu trữ và phân phối dữ liệu trong mạng di động thế hệ tiếp theo, trong đó, tập trung phân tích các cơ chế lưu trữ và phân phối dữ liệu của truyền thông UAV để biết cách thức hoạt động, lợi ích và những vấn đề cần cải tiến, là cơ sở để đề xuất các cơ chế mới cho việc lưu trữ và phân phối dữ liệu trong mạng 6G IoT sử dụng UAV. Trong chương này, các khái niệm và định nghĩa liên quan được trình bày, đồng thời, các kỹ thuật tối ưu thời gian thực trong hệ thống truyền thông UAV cũng được tìm hiểu, trong đó thuật giải di truyền (GA) cũng được giới thiệu với những đặc điểm phù hợp với việc giải các bài toán tối ưu trong Chương 2 và Chương 3.

Chương 2: Tối ưu lưu trữ và phân phối dữ liệu dùng UAV trong mạng 6G IoT

Chương 2 đề xuất mô hình lưu trữ - phân phối dữ liệu của một UAV trong mạng 6G IoT nhằm nâng cao độ khả dụng dịch vụ; mô hình toán học của hệ thống; xây dựng bài toán tối ưu; chọn lựa giải thuật; mô phỏng và đánh giá hiệu quả của mô hình đề xuất. Các thông số của hệ thống được tính toán để xây dựng bài toán tối ưu nhằm cực đại dung lượng phân phối dữ liệu của hệ thống đến các IDU có xét đến thời gian phục vụ cũng như quỹ đạo bay của UAV. Bài toán tối ưu được giải bằng thuật giải di truyền (GA), các mô phỏng tính toán được thực thi trên Matlab để đánh giá cơ chế được đề xuất và so sánh với các cơ chế khác.

Chương 3: Tối ưu lưu trữ và phân phối dữ liệu thời gian thực dùng UAV bay đàn trong mạng 6G IoT

Dựa vào các mô hình hệ thống, mô hình các thông số đánh giá, mô hình về độ khả dụng dịch vụ được tìm hiểu ở Chương 1 và Chương 2, Chương 3 sẽ nghiên cứu để kết nối các UAV kết hợp với trạm gốc MBS thành một mạng lưu trữ - phân phối

dữ liệu cộng tác trong mạng 6G-IoT nhằm rút ngắn thời gian phục vụ tiến đến thời gian thực, đảm bảo dung lượng phân phối dữ liệu cao, cũng như nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên hệ thống. Các mô hình hệ thống, mô hình toán, bài toán tối ưu, nghiên cứu giải thuật và mô phỏng đánh giá giải pháp đề xuất cũng được thực hiện trong Chương 3. Các thông số của hệ thống được tính toán để xây dựng bài toán tối ưu nhằm tối thiểu hóa thời gian phục vụ tiến đến thời gian thực, cực đại dung lượng phân phối dữ liệu của hệ thống đến các IDU, cũng như tối ưu quỹ đạo bay của UAV bày đàn. Bài toán tối ưu được giải bằng thuật giải di truyền (GA), các mô phỏng tính toán được thực thi trên Matlab để đánh giá cơ chế được đề xuất và so sánh với các cơ chế khác.

Kết luận

Trình bày về các kết quả đạt được của luận án và hướng nghiên cứu tiếp theo.

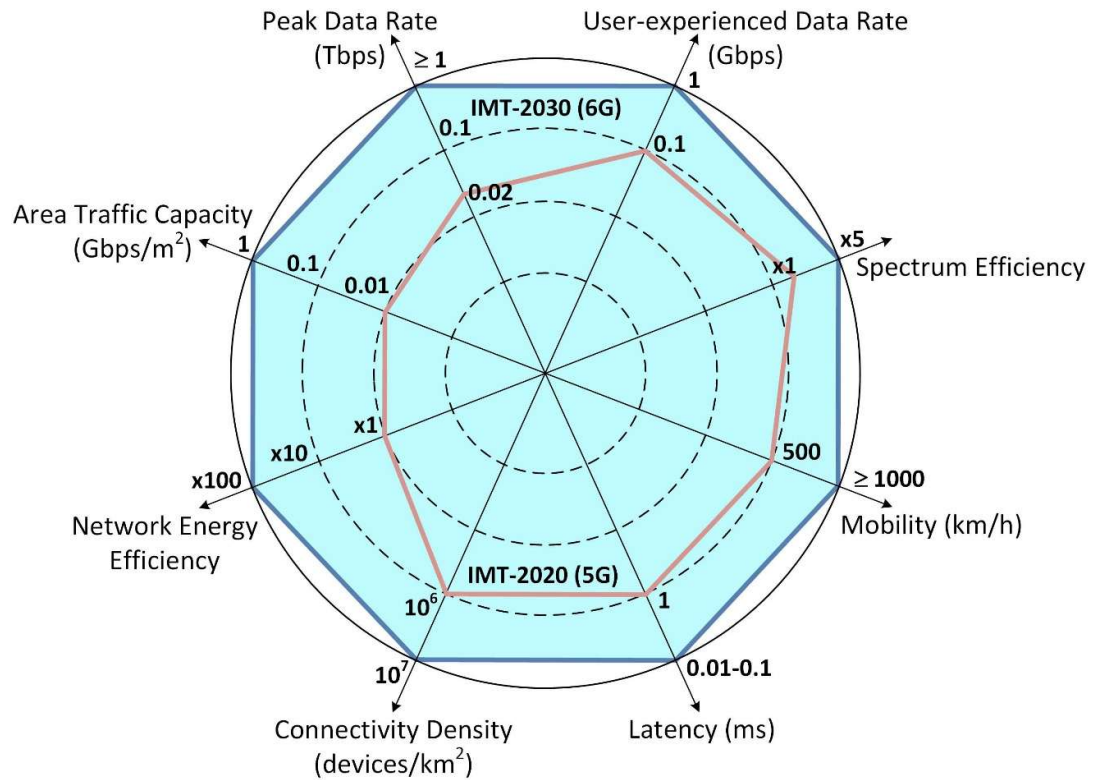
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI DỮ LIỆU TRONG MẠNG 6G IoT

Tóm tắt: Chương 1 sẽ giới thiệu về mạng 6G và 6G IoT, những ứng dụng và thách thức của mạng 6G IoT. Đồng thời, giới thiệu về các mô hình lưu trữ và phân phối dữ liệu, là đối tượng nghiên cứu thường gặp của các thế hệ mạng di động B5G/6G. Trong đó, các ưu điểm và hạn chế của từng mô hình sẽ được trình bày. Đặc biệt, chương này sẽ tập trung vào trình bày các vấn đề ứng dụng và thách thức liên quan đến lưu trữ và phân phối dữ liệu trong truyền thông sử dụng thiết bị bay không người lái (UAV), cùng các nghiên cứu - công bố liên quan cũng được khảo sát và tổng hợp. Ngoài ra, các thuật toán thường được sử dụng trong thiết kế tối ưu thời gian thực cũng được tìm hiểu và đánh giá. Các khái niệm và công thức liên quan cũng được phân tích. Từ đó, làm cơ sở cho việc đề xuất các cơ chế mới trong các chương tiếp theo, sẵn sàng cho việc áp dụng thiết lập các mô hình toán và đưa vào phân tích hiệu quả của các cơ chế đề xuất.

1.1. MẠNG 6G VÀ 6G IoT

1.1.1. Giới thiệu mạng 6G

Nghiên cứu về mạng không dây 6G (hay còn gọi là viễn thông di động toàn cầu 2030 [9] và mạng 2030 [10]) đã được thêm vào các chương trình nghị sự của liên minh viễn thông thế giới ITU để đáp ứng các yêu cầu đối với xã hội thông tin thông minh của năm 2030 [11]. Trung Quốc đã khởi động dự án “Truyền thông băng thông rộng và Mạng mới” cho năm 2030 và hơn thế nữa. Chương trình Horizon 2020 của Ủy ban Châu Âu đã tài trợ cho một số dự án sau 5G (B5G), chẳng hạn như TERRANOVA (kết nối không dây Tb/s thông qua các công nghệ sáng tạo THz để cung cấp chất lượng trải nghiệm (QoE) trong hệ thống B5G). Tại Hoa Kỳ, Tập đoàn nghiên cứu chất bán dẫn đã tài trợ cho nghiên cứu về sự hội tụ của các công nghệ cảm biến và truyền thông THz cho cơ sở hạ tầng di động trong tương lai. Ủy ban truyền thông liên bang Hoa Kỳ (FCC) đã bắt đầu nghiên cứu mạng 6G và đã mở băng tần THz. Nhóm nghiên cứu lĩnh vực tiêu chuẩn hóa viễn thông của liên minh viễn thông quốc tế (ITU-T) đã thành lập nhóm công nghệ tập trung ITU-T cho mạng 2030. Phần Lan đã tài trợ cho dự án 6G đầu tiên, 6Genesis [12] và tổ chức hội nghị thượng đỉnh không dây 6G đầu tiên trên thế giới.



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

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 [11], độ trễ và tính di động [13], như minh họa ở Hình 1-1. Các mục tiêu kỹ thuật chi tiết bao gồm:

- Tốc độ dữ liệu cao nhất tối thiểu là 1 Tb/s [14], gấp 100 lần tốc độ của 5G. Đối với một số tình huống đặc biệt, chẳng hạn như mạng không dây THz backhaul và fronthaul (x-haul), tốc độ dữ liệu cao nhất dự kiến đạt tới 10 Tb/s.
- Tốc độ dữ liệu do người dùng trải nghiệm là 1 Gb/giây, gấp 10 lần tốc độ của 5G. Nó cũng dự kiến sẽ cung cấp tốc độ dữ liệu theo trải nghiệm người dùng lên đến 10 Gb/giây cho một số trường hợp, chẳng hạn như các điểm phát sóng trong nhà.
- Độ trễ cực thấp (10–100 μ s) và tính di động cao (≥ 1000 km/h). Điều này sẽ cung cấp QoE có thể chấp nhận được cho các tình huống di chuyển tốc độ cao như đường sắt cao tốc (HSR) và hệ thống hàng không.
- Mật độ kết nối gấp 10 lần 5G. Điều này sẽ đạt tới 10⁷ thiết bị/km² và lưu lượng truy cập trong khu vực lên đến 1 Gb/s/m² cho các điểm nóng (hotspot).
- Hiệu suất năng lượng gấp 10–100 lần và hiệu suất phổ gấp 5–10 lần 5G.

Các nghiên cứu hiện đại của mạng 6G đang tập trung vào các chủ đề sau đây [1]:

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Kết nối băng thông rộng toàn vùng phủ sóng - Các hệ thống tự hành và đa kết nối - Các thiết kế có độ trễ dưới mili giây, độ tin cậy cao và nhạy cảm với thời gian - Các dịch vụ và ứng dụng chuyên ngành phục vụ xã hội số hóa trong tương lai - Các dịch vụ cảm biến với độ chính xác vị trí cao và độ phân giải cao - Máy học - Độ tin cậy, bảo mật và tính riêng tư - Các công nghệ 6G, các dịch vụ và ứng dụng cho các thành phố thông minh - Các giải pháp biên thông minh (edge intelligence) - Mạng truyền thông dải tần THz | <ul style="list-style-type: none"> - Đa kết nối số lượng cực lớn trong các hệ thống thông tin liên lạc - Các mô hình và kỹ thuật truyền thông giữa UAV với mặt đất, giữa UAV với UAV - Kỹ thuật định hướng búp sóng 3D (3D beamforming) cho các UAV kết nối mạng di động - UAV hỗ trợ cho eMBB+, mMTC+ và URLLC+ - Kỹ thuật phối hợp của nhiều UAV trong truyền thông - Kỹ thuật truyền thông với rất nhiều anten MIMO / Kỹ thuật truyền thông sóng ngắn milimet cho các UAV kết nối mạng di động |
|--|---|

1.1.2. Giới thiệu mạng 6G IoT

IoT đại diện cho các tình huống trong đó nhiều đối tượng từ thiết bị điện tử cá nhân đến máy công nghiệp và cảm biến được phép kết nối không dây với Internet, trao đổi và sử dụng dữ liệu thông qua kết nối mạng và khả năng tính toán. Mục đích của việc kết hợp các công nghệ IoT và mạng không dây là để giám sát và điều khiển nhiều thiết bị trong một kịch bản quy mô lớn của IoT trong giao tiếp không dây. Trên thực tế, sự kết hợp của các công nghệ, như mạng dựa trên IP, phân tích dữ liệu, điện toán đám mây và điện toán sương mù, đang đưa IoT đến gần hơn với các hệ thống truyền thông không dây. Việc triển khai IoT có thể sử dụng các mô hình kết nối kỹ thuật khác nhau, mỗi mô hình đều có tính linh hoạt riêng. Có 04 mô hình chung bao gồm device-to-device (D2D), device-to-cloud (D2C), device-to-gateway (D2G) và back-end data sharing [15]. Tiềm năng chuyển đổi của IoT một khi được hiện thực hóa có thể mang lại một mạng siêu kết nối. Đây là một minh họa về kiến trúc Internet

hiện đại, cung cấp khả năng kết nối không giới hạn của các ứng dụng hoặc dịch vụ cho một số lượng lớn các thiết bị.

Mô hình kết nối IoT là rất quan trọng trong nhiều lĩnh vực kỹ thuật và truyền thông không dây [16]. Một loạt các sản phẩm, máy móc, điện thoại thông minh và cảm biến được nối mạng thông qua công nghệ này dưới sự tiến bộ của sức mạnh tính toán và kết nối mạng để cung cấp các khả năng không dây mới. Điều này dẫn đến nhiều vấn đề mở cho các hệ thống truyền thông không dây và các cơ hội thị trường mới cho khả năng tương tác kỹ thuật cao [15].

IoT là một trong những mô hình kết nối thịnh hành nhất trong 5G và có rất nhiều tiềm năng trong 6G [17]. Trong các hệ thống IoT, cảm biến, phương tiện và thiết bị được kết nối thông qua liên kết Internet, tạo thành nhiều dịch vụ để thích ứng với các hoạt động của con người, chẳng hạn như thành phố thông minh, nhà thông minh, tự động hóa, giám sát môi trường, chăm sóc sức khỏe hoặc thậm chí là phòng thí nghiệm từ xa, theo dõi kỹ thuật số tự động trong giai đoạn bệnh do Coronavirus 2019 (COVID-19) [18], [19], [20]. Theo Cisco [21], đến năm 2030 sẽ có đến 500 tỷ thiết bị IoT được kết nối vào Internet. Theo báo cáo di động của Ericsson, khi số lượng kết nối IoT tăng mạnh thì tỷ trọng lớn sẽ là công nghệ IoT diện rộng quy mô lớn (Massive IoT) [22]. Việc triển khai Massive IoT được tạo thành từ hàng trăm đến hàng triệu thiết bị IoT được kết nối với thông lượng thấp, điện năng rất thấp và độ trễ thấp. Rõ ràng, các mạng di động truyền thống không đủ khả năng kết nối với tất cả các thiết bị trong các kịch bản Massive IoT. Dưới góc nhìn này, 6G sẽ trở thành yếu tố then chốt cho các mạng và ứng dụng IoT trong tương lai, vì nó sẽ cung cấp khả năng phủ sóng không dây toàn diện theo mọi chiều và tích hợp đầy đủ các chức năng, bao gồm: cảm biến, truyền dẫn, tính toán, nhận thức và điều khiển hoàn toàn tự động. Thực tế, so với mạng di động 5G, thế hệ 6G tiếp theo được kỳ vọng sẽ mang lại khả năng phủ rộng lớn hơn và tính thích ứng cao hơn nhằm hỗ trợ tốt hơn việc kết nối IoT và cung cấp dịch vụ [21]. Vì thế, sự phát triển của công nghệ mạng di động 6G kết hợp với IoT tạo thành kiến trúc 6G IoT là một giải pháp đầy hứa hẹn cho vấn đề Massive IoT.

Với các đặc điểm đang được nghiên cứu, mạng truyền thông không dây 6G được hình thành để cách mạng hóa các dịch vụ và ứng dụng khách hàng thông qua IoT hướng tới một tương lai của các hệ thống hoàn toàn thông minh và tự trị [2]. Kiến trúc 6G IoT sẽ là phiên bản kế thừa mở rộng từ mô hình phân lớp của 5G IoT: lớp

cảm biến (sensor layer), lớp mạng (network layer), lớp truyền thông (communication layer), lớp kiến trúc (architecture layer) và lớp ứng dụng (application layer) [23], với xu hướng mở rộng, kết hợp các yêu cầu - năng lực - công nghệ mới nổi như trí tuệ nhân tạo (AI), năng lực tính toán phân tán, khả năng thấu hiểu ngữ nghĩa - nhận thức và đáp ứng bản sao số (digital twin) thời gian thực.

1.1.3. Ứng dụng của mạng 6G IoT

Kiến trúc 6G IoT, với khả năng kết nối siêu tốc, độ trễ siêu thấp và độ tin cậy cao, sẽ tạo ra bước đột phá khi được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực, từ công nghiệp, y tế, giao thông, an ninh, đến bảo vệ môi trường và truyền thông trong không gian [2], [3], như được minh họa trong Hình 1-2.

- **Ứng dụng 6G IoT trong công nghiệp và sản xuất thông minh:** Trong lĩnh vực sản xuất, 6G IoT sẽ thúc đẩy sự phát triển của nhà máy thông minh, nơi robot tự động, cảm biến thông minh và AI được tích hợp sâu nhằm tối ưu hóa chuỗi cung ứng và quy trình sản xuất. Công nghệ mMTC (massive Ultra-Reliable Low-Latency Communication) đảm bảo đáp ứng các yêu cầu nghiêm ngặt về độ trễ và độ chính xác trong dây chuyền công nghiệp [2].

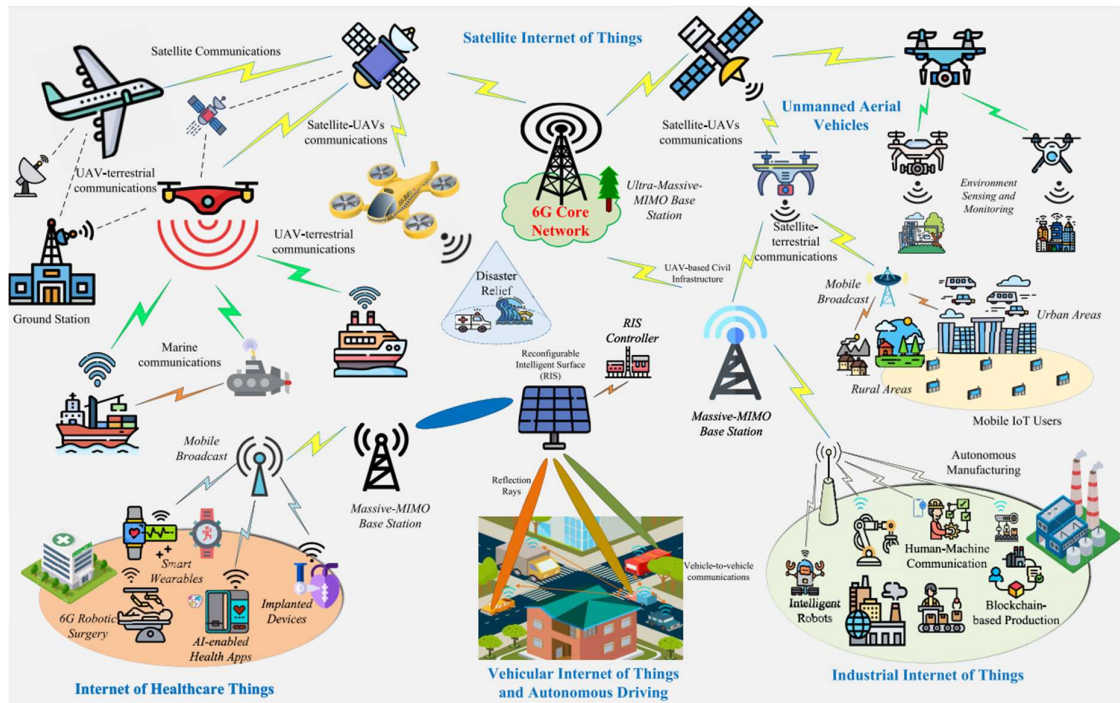
- **Ứng dụng 6G IoT trong y tế số và chăm sóc sức khỏe từ xa:** 6G IoT cho phép triển khai phẫu thuật từ xa, giám sát sức khỏe theo thời gian thực và hỗ trợ y tế từ xa với độ bảo mật cao. Các cảm biến thông minh kết hợp trí tuệ biên (edge intelligence) giúp phân tích dữ liệu sức khỏe tức thời, nâng cao độ chính xác chẩn đoán và điều trị [2].

- **Ứng dụng 6G IoT trong giao thông thông minh và phương tiện tự hành:** Kết nối V2X (Vehicle-to-Everything) trên nền 6G IoT giúp phương tiện giao tiếp với nhau và với hạ tầng giao thông, giảm thiểu tai nạn và tối ưu hóa luồng phương tiện. AI và học máy tại biên mạng tăng khả năng ra quyết định của xe tự hành trong các tình huống phức tạp [2].

- **Ứng dụng 6G IoT trong thiết bị bay không người lái (UAV):** 6G IoT hỗ trợ UAV với truyền dữ liệu tốc độ cao và kết nối liên tục với trạm điều khiển. Ứng dụng gồm giám sát an ninh, tìm kiếm cứu nạn, giao hàng thông minh; blockchain có thể được tích hợp để đảm bảo tính toàn vẹn dữ liệu [2].

- **Ứng dụng 6G IoT trong truyền thông qua vệ tinh:** Hệ thống vệ tinh kết hợp 6G IoT mở rộng vùng phủ sóng đến khu vực hẻo lánh, hỗ trợ giám sát môi trường,

viễn thám và thông tin liên lạc khẩn cấp [2], [3]. Khái niệm IoT vệ tinh SIoT (satellite IoT) cho phép triển khai IoT toàn cầu.



Hình 1-2. Viễn cảnh các ứng dụng IoT thế hệ mới dựa trên 6G [2]

- **6G IoT trong các công nghệ và ứng dụng khác [3]:**

- **Truyền thông holographic:** Công nghệ 6G IoT có thể hỗ trợ truyền thông 3D chân thực với độ trễ cực thấp, giúp cải thiện ứng dụng trong hội nghị thực tế ảo và y học từ xa.
- **Tần số THz:** 6G IoT dự kiến sẽ sử dụng tần số THz để đạt tốc độ truyền dữ liệu cực cao, phục vụ giám sát sản xuất chính xác.
- **Mã hóa lượng tử:** Mạng 6G IoT sẽ sử dụng mã hóa lấy cảm hứng từ công nghệ lượng tử để nâng cao bảo mật, đặc biệt là trong lĩnh vực tài chính và chăm sóc sức khỏe.
- **Cảm biến toàn diện:** Mạng 6G IoT sẽ giúp tối ưu hóa năng lượng, quản lý giao thông và cải thiện dịch vụ công cộng thông qua cảm biến và xử lý dữ liệu theo thời gian thực.
- **Tích hợp AI:** 6G sẽ thúc đẩy sự tích hợp AI vào hệ sinh thái IoT, cho phép thiết bị tự động ra quyết định và thích ứng với môi trường theo thời gian thực.

- **Bảo vệ môi trường:** 6G IoT sẽ hỗ trợ quản lý tài nguyên và giám sát các vấn đề môi trường như ô nhiễm, biến đổi khí hậu và thiên tai.

1.1.4. Thách thức của mạng 6G IoT

Mạng 6G IoT mở ra những cơ hội đột phá về tốc độ dữ liệu, độ trễ siêu thấp, độ tin cậy cao và hỗ trợ hàng tỷ thiết bị kết nối. Tuy nhiên, quá trình hiện thực hóa tầm nhìn này đang phải đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật phức tạp và đa chiều. Một trong những rào cản lớn nhất là xử lý lưu lượng và dung lượng mạng, khi mà hạ tầng mạng hiện tại, bao gồm truy cập vô tuyến, mạng lõi và kết nối tuyến trực (backhaul), không đủ năng lực để phục vụ lượng dữ liệu khổng lồ do các thiết bị IoT tạo ra [24]. Đồng thời, thiếu hụt phổ tần cũng trở nên nghiêm trọng hơn trong bối cảnh phổ tần hiện tại không đủ để đáp ứng tốc độ truyền cao và mật độ kết nối lớn, đặc biệt là khi tích hợp mạng phi mặt đất (Non-Terrestrial Network – NTN) [4].

Về mặt kỹ thuật, các yêu cầu thời gian thực và liên lạc có độ trễ siêu thấp trở nên bắt buộc đối với các ứng dụng quan trọng như giao thông thông minh, IoT tự hành và mạng cảm biến trên không [2], [5]. Một vấn đề đáng lưu ý khác là hạn chế về phần cứng của thiết bị IoT, với yêu cầu khắt khe về năng lượng, dung lượng bộ nhớ, độ bền và chi phí sản xuất [6]. Do đó, hiệu quả năng lượng trở thành một trong những thách thức cốt lõi trong môi trường có hàng tỷ thiết bị IoT, đặc biệt trong các hệ thống hoạt động liên tục ở vùng sâu, vùng xa [2], [7].

Kiến trúc mạng mới lấy thiết bị làm trung tâm đòi hỏi tư duy lại toàn diện về thiết kế và vận hành mạng [2], [7]. Đồng thời, việc tích hợp mạng vệ tinh và mặt đất đặt ra bài toán về độ trễ truyền dài, tính linh hoạt của liên kết và sự thay đổi nhanh chóng của cấu trúc mạng [8]. Trong bối cảnh ứng dụng Internet vạn vật cho phương tiện giao thông (Vehicle IoT), việc dự đoán tốc độ dữ liệu gặp nhiều khó khăn do ảnh hưởng phức tạp từ môi trường truyền, tính di động cao và sự thay đổi cấu trúc mạng [2]. Ngoài ra, an ninh và quyền riêng tư là vấn đề nổi bật, đặc biệt tại các nút biên và liên kết UAV - IoT - vệ tinh. Các mối đe dọa bao gồm nghe lén, chiếm quyền điều khiển, giả mạo và tấn công từ chối dịch vụ (DoS), có thể làm gián đoạn nghiêm trọng hoạt động của hệ thống [2], [4].

Cuối cùng, sự thiếu vắng các tiêu chuẩn kỹ thuật thống nhất cho mạng 6G IoT có thể trở thành rào cản lớn đối với việc triển khai thương mại. Các tiêu chuẩn mới cần bao phủ toàn bộ chuỗi kết nối từ không gian - không khí - mặt đất - dưới nước, nhằm

đảm bảo tính tương thích, khả năng mở rộng và độ tin cậy của hệ thống [2]. Những thách thức kể trên cho thấy việc xây dựng một hệ sinh thái 6G IoT bền vững và hiệu quả không chỉ đòi hỏi tiến bộ về công nghệ truyền dẫn mà còn cần các giải pháp tích hợp đa lớp - từ kiến trúc hệ thống, thiết kế giao thức đến các cơ chế bảo mật, tiêu chuẩn hóa và tối ưu hóa năng lượng.

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

Trong mọi thế hệ mạng di động, các nhà mạng luôn phải đối mặt với vấn đề làm thế nào để cung cấp cho sự gia tăng của người dùng di động (MU) với QoS và hiệu quả sử dụng tài nguyên cao. Các công nghệ 5G mới nổi chủ yếu giải quyết các vấn đề về tốc độ dữ liệu cao, độ trễ thấp, kết nối phổ biến và lớn, v.v., nhưng việc triển khai tốn kém do thay đổi và nâng cấp kiến trúc hệ thống. Do đó, thế hệ tiếp theo B5G/6G sẽ đặt ưu tiên cao hơn vào các giải pháp thông minh hơn có thể cải thiện QoS trong khi không thay đổi kiến trúc hệ thống. Các giải pháp đã được nghiên cứu kỹ lưỡng trong mạng 5G và tiếp tục được phát triển thêm trong mạng B5G/6G là:

- Truyền thông từ thiết bị đến thiết bị (D2D) [25]
- Lưu trữ và phân phối qua trạm nền nhỏ
- Lưu trữ và phân phối qua UAV
- Lưu trữ và phân phối đa tầng

1.2.1. Lưu trữ và phân phối qua mạng D2D

Truyền thông D2D cho phép truyền trực tiếp giữa hai MU qua một chặng ở gần nhau. Cách này không chỉ giảm thiểu hiệu quả khối lượng công việc ở cả trạm gốc MBS và trạm gốc SBS mà còn cải thiện dung lượng hệ thống để đáp ứng tốc độ dữ liệu cao của các ứng dụng và dịch vụ tiên tiến. Các lợi ích của truyền thông D2D bao gồm: tăng hiệu suất phổ, năng lượng và vùng phủ [26]; kết nối cao và thời gian truyền thấp [27]; và QoS cao [28].

Ngoài ra, trong các mạng di động truyền thống, tất cả các thông tin liên lạc phải thông qua MBS hoặc SBS nếu tốt hơn. Cơ chế này không hoàn toàn hợp lý với mạng B5G/6G, nơi có mật độ MU dày đặc. MU thường sử dụng các ứng dụng và dịch vụ dữ liệu tốc độ cao (ví dụ: mạng xã hội và học tập điện tử, y tế điện tử, chia sẻ video và trò chơi, v.v.) và chúng có thể được đặt gần nhau. Trong bối cảnh này, các MU ở gần nhau có thể lưu trữ và chia sẻ nội dung trực tiếp với nhau thông qua kết nối D2D được cho là tốt hơn nhiều so với khoảng cách xa hơn từ MBS hoặc SBS [25].

1.2.2. Lưu trữ và phân phối qua trạm nền nhỏ

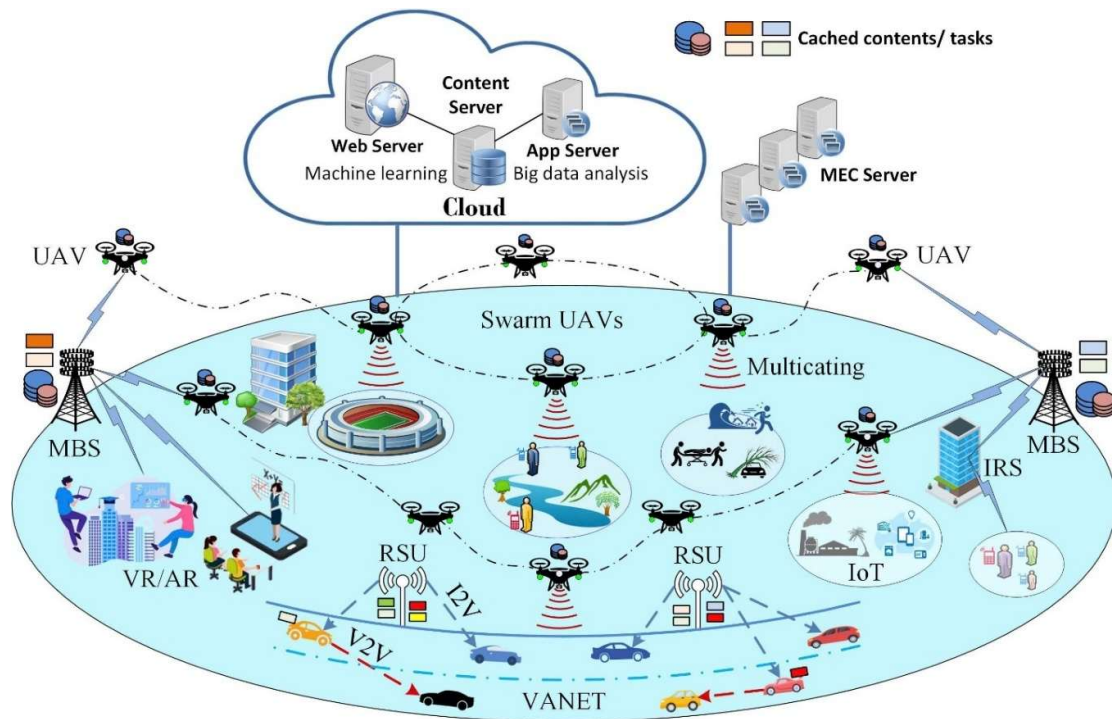
Sự bùng nổ dữ liệu di động, đặc biệt từ video, đã thúc đẩy mạng di động phát triển theo hướng mạng không đồng nhất (Heterogeneous Cellular Networks – HCN), nơi các trạm nền nhỏ (Small cell Base Station – SBS) như pico/femto-cells được triển khai bổ sung bên cạnh các trạm MBS nhằm cải thiện hiệu quả sử dụng phổ và thông lượng tổng thể [29]. Tuy nhiên, trong môi trường SBS dày đặc, kết nối backhaul thường trở thành nút thắt hiệu suất do hạn chế về dung lượng và chi phí [30]. Để khắc phục, lưu trữ nội dung tại SBS nổi lên như một giải pháp hiệu quả [31].

Về phân phối dữ liệu, hệ thống sử dụng nhiều cơ chế: truyền nội dung được lưu trữ tại SBS [32], truyền qua backhaul khi nội dung không có trong cache (cache miss) [33] và truyền dẫn hợp tác (joint/parallel transmission) [34]. Lưu trữ tại SBS mang lại nhiều lợi ích như: giảm tải backhaul [29], giảm độ trễ [31], tăng thông lượng [33], tiết kiệm năng lượng [30] và nâng cao QoE [35]. Tuy nhiên, lưu trữ tại SBS cũng gặp các thách thức gồm: bộ nhớ giới hạn [35], tính di động người dùng [29], nhiễu xuyên ô giữa các trạm nền nhỏ hoạt động trên cùng phổ tần [36], sự thay đổi phân bố nội dung và ràng buộc phải sử dụng kênh truyền backhaul khi nội dung không có trong cache [30].

1.2.3. Lưu trữ và phân phối qua UAV

Trong các vùng đô thị với nhiều tòa nhà cao, trong các vùng có chất lượng sóng di động yếu nhưng có nhu cầu truyền thông khẩn cấp, hoặc trong các trường hợp liên lạc cứu hộ cứu nạn và khắc phục sau thiên tai - những nơi mà các thành phần mạng bị tê liệt, đặc biệt là các MU trong vùng có mật độ dày đặc như trong mạng giao thông tốc độ cao, những MU này cần có cấu trúc mạng linh động hơn nhằm có chất lượng dịch vụ và trải nghiệm tốt hơn. UAV cho thấy rõ khả năng phục vụ hiệu quả cho các MU trong các trường hợp nói trên. UAV đóng vai trò là các trạm nền linh hoạt có thể thực hiện thu thập, lưu trữ và phân phối, nên nó là thành phần quan trọng cho việc cung cấp một cách hoàn thiện các ứng dụng của mạng 6G IoT. Mô hình tổng quát của hệ thống lưu trữ và phân phối qua UAV như Hình 1-3.

Truyền thông UAV có thể thiết lập môi trường nhìn thẳng (LoS) bằng các quỹ đạo bay hợp lý nhằm nâng cao dung lượng kênh truyền. Các UAV có thể lưu trữ trước các nội dung phổ biến và phân phối các nội dung này đến các MU có nhu cầu, hoặc thu thập thông tin, lưu trữ và truyền về trung tâm xử lý.



Hình 1-3. Mô hình lưu trữ và phân phối dữ liệu hỗ trợ bởi UAV

Lưu trữ tại UAV gồm 2 nhiệm vụ cơ bản: lưu trữ tác vụ (task caching model) và lưu trữ nội dung (content caching model) [37]. Trong lưu trữ tác vụ, UAV lưu trữ các tác vụ đã hoàn thành và dữ liệu liên quan đến các tác vụ. Các tác giả của [38], [39], [40], [41] đề cập đến UAV và các máy chủ tại biên (MEC server) cùng kết hợp thực hiện công việc tính toán và lưu trữ tài nguyên cho các MU. Mục tiêu của các mô hình đề xuất này là giảm thiểu độ trễ trong cung cấp dịch vụ cho tất cả các MU và năng lượng tiêu thụ của UAV. Trong mô hình lưu trữ tác vụ, các tác vụ và nội dung liên quan được tải xuống, sau đó được lưu vào bộ nhớ đệm và thực thi tại máy chủ MEC, EC (Edge Cloud), hoặc/và tại chính các MU với sự hỗ trợ của UAV. Các quyết định về lưu trữ và giảm tải tác vụ dựa trên 03 khía cạnh quan trọng bao gồm độ trễ, năng lượng tiêu thụ và năng lượng còn lại được tính toán dựa trên kích thước nội dung, chu kỳ CPU yêu cầu, tần số xung nhịp CPU và độ lợi đường truyền vô tuyến.

Trong lưu trữ nội dung, UAV bổ sung cho các kỹ thuật lưu trữ tại MBS, SBS và tại các MU nhằm nâng cao QoE/QoS hệ thống. Mô hình này tập trung giải quyết 02 vấn đề chính: vị trí đặt nội dung lưu trữ và cách phân phối các nội dung này [42]. Quyết định UAV nào thực hiện công việc lưu trữ nội dung nào tùy thuộc vào độ phổ biến của nội dung và khả năng lưu trữ của UAV. Sau đó kỹ thuật phân phối nội dung lưu trữ kết hợp từ các nơi lưu trữ ở mặt đất và UAV để phân phối nội dung đến cho

các MU với QoE/QoS cao và năng lượng tiêu thụ thấp [43]. Trong mô hình này, quỹ đạo bay của UAV đóng vai trò quan trọng để đưa ra các thuật toán khác nhau nhằm đạt được các yêu cầu đã đề cập ở trên. Với các tiềm năng về tối ưu để đáp ứng linh hoạt cho nhu cầu truyền thông đa dạng, truyền thông UAV kết hợp lưu trữ sẽ tiếp tục được nghiên cứu chi tiết hơn để khai thác tốt trong mạng 6G-IoT.

1.2.4. Lưu trữ và phân phối đa tầng

Lưu trữ đa tầng (multi-tier caching) là một kỹ thuật then chốt trong kiến trúc tính toán đa tầng của mạng di động 6G, nhằm giảm độ trễ truyền dữ liệu và hạn chế sự di chuyển dữ liệu không cần thiết trong mạng [44]. Điểm cốt lõi của kỹ thuật này là lưu trữ tại nhiều tầng khác nhau như thiết bị đầu cuối, trạm gốc femtocell (FBS), MBS, UAV hoặc vệ tinh, từ đó tối ưu hóa việc cung cấp nội dung và dịch vụ. Trong mạng vô tuyến siêu dày đặc, các tầng này hỗ trợ truyền video chất lượng cao thông qua giao tiếp D2D hoặc từ các trạm FBS và MBS [45].

Đặc biệt, trong các ứng dụng như mô phỏng DT thời gian thực đòi hỏi truyền thông siêu tin cậy, độ trễ cực thấp, dung lượng kết nối cực lớn mMURLLC, các tầng lưu trữ bao gồm thiết bị di động, bộ định tuyến và trạm gốc Massive-MIMO đều có vai trò quan trọng trong đảm bảo QoS nghiêm ngặt [44]. Ngoài ra, kiến trúc mạng tích hợp UAV-vệ tinh-phương tiện [46] cũng khai thác khả năng lưu trữ đa tầng để cải thiện độ tin cậy và hiệu suất truyền thông.

Gần đây, các nghiên cứu cũng đã đề xuất nhiều kỹ thuật để vượt qua các thách thức như phân bổ tài nguyên tối ưu, định vị UAV, bảo đảm QoS với các ràng buộc trễ và xác suất lỗi [47]. Một số kỹ thuật nổi bật gồm: caching cộng tác liên tầng [48], phân loại nội dung theo độ phổ biến và tích hợp với mã hóa khối hữu hạn FBC (Finite Blocklength Coding) [44]. Trong mạng hỗ trợ bởi UAV, kỹ thuật hybrid edge caching – phân tách nội dung phổ biến và ít phổ biến giúp nâng cao hiệu suất phổ SE (Spectral Efficiency) [49]. Các mô hình toán học dựa trên phân bố Poisson và lý thuyết trò chơi cũng được áp dụng để tối ưu hóa chiến lược caching trong mạng tích hợp vệ tinh-UAV [50]. Kết hợp với công nghệ NOMA, việc truy cập và phân phối nội dung trong các mạng này có thể đạt hiệu quả cao hơn [50].

1.2.5. Phân tích và đánh giá các kết quả nghiên cứu liên quan

Có thể thấy rằng, để nâng cao hiệu năng truyền thông, việc tổ chức lưu trữ có thể thực hiện tại SBS [29], thiết bị người dùng D2D [36], UAV được trang bị bộ nhớ

cache [32], hoặc kết hợp tại nhiều tầng thiết bị [44]. Cùng với các yêu cầu khắt khe của các ứng dụng thế hệ mới, như truyền video thời gian thực hay DT thời gian thực, đặc biệt trong mạng 6G sẽ có sự tham gia của UAV, vệ tinh và các thiết bị biên thông minh, việc phát triển được các cơ chế phối hợp tối ưu hóa lưu trữ và phân phối sẽ giúp nâng cao hiệu năng của hệ thống truyền thông. Giải pháp tối ưu hóa lưu trữ và phân phối dữ liệu có sự hỗ trợ của UAV là sự kết hợp được tất cả lợi ích của mô hình lưu trữ và phân phối qua D2D, SBS, UAV, lần lưu trữ và phân phối đa tầng. Chính vì vậy, đây là hướng đề tài nghiên cứu mà NCS lựa chọn thực hiện trong luận án này.

Về truyền thông sử dụng hỗ trợ của các thiết bị bay không người lái UAV, có nhiều nghiên cứu đã được triển khai, từ các vấn đề cơ bản của UAV, cho đến các nghiên cứu về kỹ thuật lưu trữ và phân phối tại UAV cũng đã được nhiều nhà nghiên cứu quan tâm, cụ thể như sau:

- Các nghiên cứu cơ bản về UAV trong mạng 5G/6G: tập trung vào các vấn đề tổng quát như lợi ích, đặc điểm, các thuật toán định tuyến và cơ chế cải thiện hiệu quả năng lượng (energy efficiency) [51]; nhu cầu, tiềm năng, ứng dụng, thách thức, công nghệ hứa hẹn và các vấn đề mở [52], [53], [54], [55]; các khía cạnh thực tế, chuẩn hóa, quy định và thách thức an ninh [56]; những xu hướng phát triển [57], [58].

- Các nghiên cứu chi tiết về truyền thông có sự hỗ trợ của UAV: mô hình kênh [59], [60], [61], truyền thông từ UAV đến các đầu cuối khác (UAV-to-X) [62], các giao thức định tuyến [63], [64], [65], mạng UAV chuyển tiếp [66].

- Các nghiên cứu về lưu trữ và phân phối nội dung có sự hỗ trợ của UAV: các tác giả của [67], [68] đưa ra thuật toán để tối ưu hóa nơi lưu trữ và năng lượng tiêu thụ với quỹ đạo bay của UAV là ngẫu nhiên. Với quỹ đạo bay cố định của các UAV, các nghiên cứu [69], [70] đề xuất giải pháp xác định vị trí lưu trữ với kỹ thuật phân bổ tài nguyên phổ và năng lượng. Trong khi đó, kỹ thuật đa truy cập không trực giao (non-orthogonal multiple access – NOMA) trong [71], [72] có thể giúp giảm tối thiểu độ trễ trong việc phân phối nội dung. Nghiên cứu [73] đề xuất kỹ thuật thu thập năng lượng (energy harvesting) để cực đại QoE. Trong [74], các tác giả đưa ra mô hình client - server đối với UAV nhằm cân bằng giữa xác suất để xác định vị trí các dịch vụ và chi phí truyền dẫn của mạng UAV. Các tác giả đã chứng minh có thể đạt được nhiều lợi ích hơn của lưu trữ nội dung trên UAV để phân phối trong mạng IoT bằng cách tích hợp với các kỹ thuật mới nổi khác như phân bổ tài nguyên [75], [76], [77], thu thập

năng lượng (truyền tải năng lượng không dây) [78], [79], [80], lập lịch và gây nhiễu [81], [82], [83], truyền đa hướng [84], [85], NOMA [77], [78], [79], truyền thông chuyển tiếp và hợp tác [86], [87], [88] và cảm biến [89].

- Cụ thể, một trong những giải pháp quan trọng nhất cho lưu trữ dùng UAV là kết hợp tối ưu vị trí lưu trữ, quỹ đạo bay và công suất truyền được nghiên cứu trong [75]. Các tác giả đã triển khai nhiều UAV để phục vụ các IDU bằng cách lưu trữ tối ưu các nội dung phổ biến trước, xác định tọa độ 2D có độ cao cố định và tìm công suất truyền. Mục tiêu là cực đại thông lượng đến các IDU do UAV phục vụ. Không giống như [75], các tác giả trong [76] đã xem xét nhà cung cấp mạng di động và CP có thể phân bổ các tài nguyên tính toán lẫn nhau để chuyển mã từng video thành các phiên bản tốc độ bit khác nhau. Các video phổ biến có phiên bản tốc độ bit cao nhất (chất lượng cao nhất) được lưu trữ trong UAV. Sau đó, UAV bay đến phục vụ các thuê bao của CP tại các điểm phát sóng, ở độ cao dừng tối ưu là 3DF, tương ứng với vị trí đạt được bán kính phủ sóng tối ưu của UAV, để tối đa hóa số lượng video được phục vụ.

- Bên cạnh việc áp dụng phân bổ tài nguyên, trong [77], các tác giả đã triển khai NOMA trong mạng FANET (flying ad-hoc network) của nhiều UAV. FANET hợp tác với MBS và MU trong các khu vực chức năng để lưu trữ đệm, sau đó chuyển tiếp các thông tin điều khiển và nội dung đến các IDU ở các khu vực không phục vụ (non-functional area). Hệ thống tiếp tục áp dụng kỹ thuật NOMA phân tán để tăng cường tốc độ tổng hợp và tốc độ truy cập của các IDU trong các mạng IoT không đồng nhất được hỗ trợ bởi UAV. Chỉ triển khai một UAV với bộ nhớ lưu trữ nhưng được hỗ trợ bởi phân bổ năng lượng, NOMA và thu năng lượng, nghiên cứu [78] giới thiệu một giải pháp tối ưu hóa ràng buộc chung để cực đại thông lượng. Tác động của vị trí UAV đối với hiệu suất hệ thống được nghiên cứu để đánh giá đầy đủ về thiết kế tối ưu.

- Ngoài ra, các tác giả cũng có những nghiên cứu về bảo mật trong truyền thông bằng UAV. Trong hầu hết các ứng dụng và dịch vụ A&S cụ thể như quản lý an toàn công cộng, quân sự và y tế điện tử [37], nội dung được truyền đến IDU cần được bảo mật. Về vấn đề này, các tác giả trong [81] đã đề xuất một thiết kế kết hợp giữa lưu trữ, phân bổ công suất, gây nhiễu và quỹ đạo 2D. Có 02 UAV trong đó UAV đầu tiên dùng để lưu trữ và truyền dữ liệu, trong khi UAV còn lại dùng để gây nhiễu. Các MU được sử dụng làm nút chuyển tiếp để cung cấp cho IDU thông tin liên lạc hai chặng, tức là từ UAV đến MU và từ MU đến IDU qua thông tin liên lạc giữa thiết bị với thiết bị. Theo

cách này, có thể tối đa hóa tỷ lệ bí mật (secrecy rate) khi có kẻ nghe lén. Sử dụng các kỹ thuật tương tự với [78], các tác giả trong [79] đã áp dụng thêm lược đồ ghép nối người dùng để cải thiện hiệu suất của NOMA đồng thời giảm độ trễ.

- Không những thế, khả năng của UAV có thể phục vụ tốt cho các mô hình mạng thay đổi tùy theo tình trạng thực tế. Việc điều khiển UAV có thể phụ thuộc rất nhiều vào các cảm biến, thiết bị giao tiếp, sức mạnh xử lý tích hợp và thích hợp với các mô hình hiện có. Các UAV hoạt động trên không gian thường di chuyển theo tập hợp có tổ chức được lập trình sẵn trong không gian ba chiều với sự thay đổi quỹ đạo mạng nhanh chóng: sự thay đổi vị trí tương đối của các UAV dẫn đến một số UAV có thể bị mất quỹ đạo đã xác định ban đầu, một số UAV có thể bay sai quỹ đạo hoặc không hoạt động do nguồn năng lượng dự trữ đã hết làm thay đổi vị trí các nút mạng hay gián đoạn mạng. Điều này có nghĩa là các giao thức định tuyến của UAV cần xác định các thay đổi theo thời gian và sử dụng nhiều năng lượng hơn để kéo dài sự ổn định của mạng [90]. Hay nói cách khác các thuật toán áp dụng cho mạng B5G/6G có UAV cần có khả năng tối ưu hóa theo thời gian thực.

- Ngoài ra, thiết kế của công trình trong [82] đã xem xét bộ nhớ đệm UAV với quỹ đạo 2D để phân phối nội dung trong các hệ thống giao thông thông minh. Mặc dù cách này có thể tối đa hóa lợi ích giảm tải xử lý (off-loading), nhưng vấn đề là nếu không tối ưu hóa độ cao của UAV, nó không thể thích ứng với các đặc điểm đa dạng của môi trường truyền không dây và mật độ IDU để có được hiệu suất cao hơn. Để thích ứng tốt hơn với mật độ IDU, các tác giả trong [87] đã xem xét thêm việc tối ưu hóa độ cao trong không gian ba chiều 3DF của UAV để tối đa hóa thông lượng. Tuy nhiên, lưu trữ, truyền và bay của UAV không thể cải thiện đáng kể hiệu suất hệ thống nếu kích thước nội dung để lưu trữ, công suất truyền từng nội dung và công suất bay qua mỗi chặng là cố định. Từ các phân tích trên về các công trình liên quan, có thể thấy rằng các tác giả đã tập trung vào nhiều khía cạnh khác nhau của lưu trữ đệm bằng UAV như mô hình hệ thống, kỹ thuật, IDU, nội dung, quỹ đạo, tài nguyên và số liệu hiệu suất liên quan. Tuy nhiên, điểm hạn chế của các công trình này là kích thước của nội dung là cố định và UAV được triển khai theo quỹ đạo 2D (hoặc thậm chí không có quỹ đạo trong trường hợp triển khai FANET), ngoại trừ công trình trong [78] xem xét nhiều phiên bản video có kích thước khác nhau và 3DF.

- Về thiết kế hệ thống thời gian thực cho mạng IoT được hỗ trợ bởi UAV, các

nghiên cứu hiện tại chủ yếu tập trung vào mô hình đảm bảo độ chính xác và độ trễ thấp [91], ra quyết định trong khi bay [92], [93], xử lý và phân tích dữ liệu dựa trên dịch vụ lưu trữ đệm [94], lập kế hoạch đường bay và lập lịch phân phối nội dung [95], lập kế hoạch quỹ đạo để cập nhật và thu thập dữ liệu [96], [97], [98]. Đặc biệt, các tác giả trong [91] đã đề xuất một khuôn khổ phân công nhiệm vụ chung, lựa chọn mô hình và phân bổ tài nguyên cho các mạng IoT được hỗ trợ bởi UAV đạt được độ trễ thấp trong khi vẫn đáp ứng nghiêm ngặt các ràng buộc về độ chính xác thông qua mô hình mạng nơ-ron học sâu thời gian thực. Công trình trong [92] đã thiết kế một thuật toán lập kế hoạch đường bay UAV để tối ưu hóa mức tiêu thụ năng lượng và rủi ro trong mạng IoT. Một mô hình máy học được áp dụng để giúp UAV đưa ra quyết định thời gian thực để điều chỉnh vị trí của các nút ảo. Trong [93], cùng với việc ra quyết định dỡ tải nhiệm vụ theo thời gian thực, một phương pháp tối ưu hóa kết hợp về số lượng và vị trí 3D của các nút tính toán trên UAV (UAV cloudlets) đã được phát triển để đạt được hiệu suất gần như tối ưu với độ phức tạp thấp cho các mạng IoT quy mô lớn hỗ trợ các dịch vụ nhạy cảm với độ trễ.

- Thực tế hơn, một khuôn khổ cung cấp dịch vụ được hỗ trợ bởi UAV với lưu trữ đệm đã được nghiên cứu cho các mức dịch vụ thời gian thực khác nhau trong mạng IoT [94]. Để đạt được hiệu suất lưu trữ đệm thời gian thực cao, một mạng deep Q-network được triển khai để cập nhật vị trí của UAV và cung cấp điều kiện tiên quyết cần thiết cho dịch vụ lưu trữ đệm. Công trình trong [95] đề xuất một giải thuật kết hợp để lập kế hoạch đường bay và lập lịch phân phối dữ liệu cho nhiều UAV để thiết lập mô hình điện toán biên di động trong mạng IoT với các bề mặt thông minh có thể cấu hình lại. Thuật toán này hiệu quả về mặt tính toán và dễ dàng triển khai cho hoạt động thời gian thực. Nhằm hỗ trợ các ứng dụng cập nhật, thu thập và giám sát dữ liệu thời gian thực, các tác giả trong [96], [97], [98] đã nghiên cứu các vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu cho mạng IoT được hỗ trợ bởi UAV. Các nghiên cứu này kết hợp tối ưu hóa việc lập kế hoạch quỹ đạo bay, tốc độ dữ liệu, độ tuổi của thông tin hoặc/và mức tiêu thụ năng lượng bằng cách sử dụng các thuật toán học tăng cường sâu và tối ưu hóa thời gian thực.

- Từ Bảng 1-1 có thể nhận thấy rằng các nghiên cứu gần đây về lưu trữ dữ liệu và tối ưu hóa quỹ đạo UAV trong mạng 6G IoT đã đạt được nhiều kết quả đáng chú ý. Tuy nhiên, phần lớn các công trình chỉ tập trung giải quyết từng bài toán riêng lẻ

như lưu trữ, tối ưu quỹ đạo, phân bổ công suất hoặc quản lý tài nguyên vô tuyến. Chỉ có một số ít nghiên cứu xem xét đồng thời nhiều yếu tố tối ưu, trong khi hầu như chưa có công trình nào tích hợp đầy đủ quỹ đạo bay 3D, cơ chế lưu trữ, dung lượng lưu trữ trên UAV, phân bổ công suất, quản lý tài nguyên vô tuyến và thời gian phục vụ trong một mô hình tối ưu thống nhất.

Bảng 1-1. So sánh các nghiên cứu hiện có với hướng nghiên cứu của luận án

Ref.	Techniques and methods										Objectives		Solutions			
	No. UAV	Trajectory	2D/3D	Caching	Power allocation			RTO design		MS	SR	TA	Algorithm	Convergence	Accuracy	Stability
					MBS	UAV transmit	UAV flight	RTA	RTI							
[77]	1		3D								✓	✓	COS			
[78]	1		3D			✓					✓	✓	COS	✓		
[87]	1		3D	✓							✓		COS	✓	✓	
[76]	1		3D	✓							✓	✓	COS	✓		
[71]	1		3D	✓					✓			✓	RL	✓		
[72]	1		3D	✓					✓			✓	DRL	✓		
[84]	1	✓	2D								✓	✓	COS	✓		
[92]	1	✓	2D					✓				✓	ML	✓	✓	
[97]	1	✓	2D					✓			✓	✓	DRL	✓		
[82]	1	✓	2D	✓				✓			✓	✓	DRL	✓		
[73]	1	✓	2D	✓		✓		✓				✓	DRL	✓	✓	
[83]	1	✓	2D			✓	✓	✓			✓	✓	DRL	✓		
Ch2	1	✓	3D	✓		✓	✓				✓	✓	GA	✓	✓	✓
[62]	Swarm		3D								✓		COS	✓		
[93]	Swarm		3D									✓	COS	✓		
[86]	Swarm		3D								✓	✓	Analysis			
[89]	Swarm		3D					✓				✓	DL	✓	✓	
[85]	Swarm		3D					✓			✓	✓	COS	✓		
[79]	Swarm		3D			✓						✓	COS			
[80]	Swarm		3D			✓					✓	✓	COS			
[74]	Swarm		3D	✓									COS	✓		
[67]	Swarm		3D	✓							✓		COS			
[88]	Swarm		3D	✓				✓			✓		COS	✓	✓	
[68]	Swarm		3D	✓							✓		COS	✓	✓	
[69]	Swarm		3D	✓				✓			✓	✓	ML	✓	✓	
[91]	Swarm		3D					✓				✓	DRL	✓	✓	
[94]	Swarm		2D	✓				✓	✓		✓	✓	DRL	✓	✓	
[95]	Swarm	✓	3D					✓				✓	COS			
[96]	Swarm	✓	3D					✓			✓	✓	COS	✓		
[81]	Swarm	✓	3D			✓					✓	✓	COS	✓		
[75]	Swarm	✓	2D	✓		✓					✓	✓	COS	✓		
Ch3	Swarm, OPT	✓	3D	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	GA	✓	✓	✓

Ghi chú về các từ viết tắt sử dụng trong bảng:

OPT = *Optimized*

MS = *Mode Selection*

COS = *Conventional Optimization Solution*

SR = *Sum Rate*

RTO = *Real Time Optimization*

TA = *Time-aware*

RTA = *RTO Algorithm*

Ch2 = *Chương 2*

RTI = *RTO Implementation*

Ch3 = *Chương 3*

- Đối với mô hình hệ thống, đa số các nghiên cứu được xây dựng trên một UAV hoặc nhiều UAV hoạt động độc lập. Các nghiên cứu về UAV bày đàn chủ yếu tập trung vào một số chức năng riêng lẻ, trong khi cơ chế phối hợp giữa các UAV trong quá trình thu thập, lưu trữ và phân phối dữ liệu thời gian thực vẫn chưa được nghiên cứu đầy đủ. Đặc biệt, việc phối hợp giữa UAV bày đàn và trạm gốc MBS nhằm nâng cao hiệu quả phân phối dữ liệu cho các thiết bị IoT còn rất hạn chế.

- Về phương pháp giải, các phương pháp tối ưu truyền thống COS (conventional optimization solution) vẫn chiếm ưu thế và thường dựa trên các kỹ thuật như xấp xỉ lồi liên tiếp (successive convex approximation), đối ngẫu Lagrange, tối ưu luân phiên theo từng khối, lý thuyết đồ thị cùng các thuật toán heuristic và metaheuristic. Trong khi đó, ML, RL và DRL chủ yếu được áp dụng cho các bài toán đơn lẻ, chưa đáp ứng hiệu quả yêu cầu tối ưu đồng thời nhiều biến quyết định trong môi trường thời gian thực do không gian trạng thái và chi phí tính toán rất lớn. Một vấn đề quan trọng đó là các phương pháp giải vẫn chưa đánh giá toàn diện về sự hội tụ, chính xác và ổn định để đảm bảo độ tin cậy.

- Xuất phát từ những khoảng trống nghiên cứu trên, luận án được phát triển theo hai bước. Trong Chương 2, luận án xây dựng mô hình tối ưu cho hệ thống một UAV, tích hợp quỹ đạo bay 3D, cơ chế lưu trữ đệm, dung lượng lưu trữ, phân bổ công suất và mục tiêu tối thiểu thời gian phục vụ, nhằm nâng cao hiệu quả phân phối dữ liệu. Trên cơ sở đó, Chương 3 mở rộng thành mô hình tổng quát cho hệ thống UAV bày đàn có sự phối hợp với trạm gốc MBS, đồng thời hướng tới bài toán tối ưu thời gian thực thông qua việc phối hợp thu thập, lưu trữ và phân phối dữ liệu trong môi trường động của mạng 6G IoT. Cả hai mô hình đều sẽ được giải bằng thuật toán di truyền GA cải tiến nhằm tìm nghiệm gần tối ưu với chi phí tính toán hợp lý, bảo đảm khả năng hội tụ, độ chính xác và tính ổn định của nghiệm.

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

Để có được các mô hình yêu cầu và lưu trữ dữ liệu, mức độ phổ biến của dữ liệu cần được xem xét. Mỗi loại dữ liệu hoặc nội dung (ví dụ như: video, âm thanh, cảm biến, cập nhật phần mềm/chương trình, bản đồ, định vị, v.v.) có mức độ phổ biến hoặc tỷ lệ truy cập khác nhau, dẫn đến tần suất phân phối khác nhau, ảnh hưởng lớn đến hiệu suất hệ thống. Để biểu diễn phân bố độ phổ biến của I nội dung khác nhau, mô hình phân phối Zipf-like [99] được sử dụng. Theo đó, mức độ phổ biến p_i của nội dung thứ i được xác định theo công thức:

$$p_i = \frac{i^{-\alpha}}{\sum_{l=1}^I l^{-\alpha}} \quad (1.1)$$

trong đó $\alpha \geq 0$ là hệ số mũ đặc trưng cho sự chênh lệch của phân bố độ phổ biến giữa I nội dung. Giá trị α càng cao thì mức độ phổ biến chênh lệch càng cao giữa các nội dung.

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

- Số lượng cụm có IDU yêu cầu nội dung i sẽ tỷ lệ thuận với p_i [100], được thể hiện dưới dạng:

$$N_i = \lfloor p_i N \rfloor \quad (1.2)$$

trong đó, toán tử $\lfloor \cdot \rfloor$ được sử dụng để làm tròn một giá trị thực thành số nguyên gần nhất. Hơn nữa, để tránh kết quả là $\sum_{i=1}^I N_i \neq N$ do toán tử làm tròn gây ra, thực hiện điều chỉnh trong mảng $\{N_i\}$ như sau:

- Nếu $\sum_{i=1}^I N_i < N$, số nhỏ nhất đầu tiên trong mảng sẽ tăng thêm 1, ví dụ, nếu $\{N_i\} = \{3, 3, 2, 1, 1\}$ và $N = 11$, thì $\{N_i\} = \{3, 3, 2, 2, 1\}$.
- Nếu $\sum_{i=1}^I N_i > N$, số lớn nhất cuối cùng trong mảng giảm đi 1, ví dụ, nếu $\{N_i\} = \{3, 3, 2, 1, 1\}$ và $N = 9$, thì $\{N_i\} = \{3, 2, 2, 1, 1\}$.

- Giả sử $q_{n,i} \in \{0, 1\}$ là chỉ số yêu cầu để chỉ ra rằng có ít nhất một trong các IDU trong cụm n yêu cầu nội dung i ($q_{n,i} = 1$) hoặc không có ($q_{n,i} = 0$) sao cho $N_i = \sum_{n=1}^N q_{n,i}$, mối quan hệ giữa N và $q_{n,i}$ được đưa ra bởi:

$$N = \sum_{i=1}^I N_i = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N q_{n,i} \quad (1.3)$$

- Định nghĩa $c_i \in \{0, 1\}$ là chỉ số lưu trữ để chỉ ra rằng UAV quyết định lưu trữ

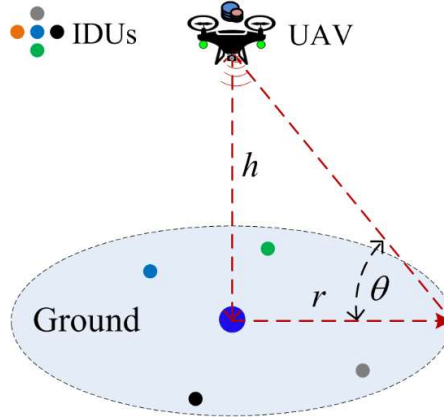
nội dung i ($c_i = 1$) hay không ($c_i = 0$). Vì vậy, chỉ số liên kết U2C ($a_{n,i} \in \{0, 1\}$), được sử dụng để liên kết chỉ số lưu trữ của UAV và chỉ số yêu cầu của IDU trong các cụm, được thể hiện như sau:

$$a_{n,i} = c_i q_{n,i} \quad (1.4)$$

Dựa trên (1.4), kênh truyền giữa nội dung i được lưu trong bộ nhớ đệm UAV và IDU trong cụm n được thiết lập phù hợp để lưu trữ và phân phối nội dung tối ưu.

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

1.3.3.1. Vùng phủ của UAV



Hình 1-4. Vùng phủ của UAV [101]

Theo [102], giá trị góc ngẩng tối ưu θ được xác định tương ứng với đặc tính của từng môi trường truyền sóng nhằm cực đại hóa bán kính phủ sóng. Tương ứng với từng loại môi trường, giá trị góc ngẩng θ được xác định lần lượt là $20,34^\circ$ đối với khu vực ngoại ô (suburban), $42,44^\circ$ đối với khu vực đô thị (urban), $54,62^\circ$ đối với khu vực đô thị đông đúc (dense urban) và $75,52^\circ$ đối với khu vực đô thị cao tầng (high-rise urban). Giá trị góc ngẩng tối ưu θ được xác định bởi công thức sau:

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

Trong đó, h là độ cao để tối ưu hóa vùng phủ sóng và r là bán kính vùng phủ sóng tối đa của UAV như được mô tả trong Hình 1-4.

1.3.3.2. Xác suất của kênh truyền LoS

Xác suất để xuất hiện đường truyền LoS của IDU m phụ thuộc vào độ cao h của UAV và khoảng cách theo phương ngang từ vị trí của UAV đến IDU thứ m , được xác định bởi công thức $r_m = \sqrt{(x_D - x_m)^2 + (y_D - y_m)^2}$ với (x_m, y_m) là vị trí của IDU m và (x_D, y_D) là vị trí của UAV. Xác suất xuất hiện kênh truyền LoS khi đó được xác

định bởi [103] như sau:

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

trong đó, κ_n và ν_n là các hằng số tương ứng với môi trường n của vị trí đặt IDU [103]

và $\xi_m = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{h}{r_m}\right)$.

1.3.4. Mô hình công suất bay và vận tốc UAV

Theo [104], mô hình công suất bay và vận tốc của UAV được xác lập theo các công thức sau:

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

trong đó, $c_0 = I_0^2 R_0$, $c_1 = 30I_0 K_E / \pi$, $c_2 = 2I_0 R_0 C_m / K_T$, $c_3 = 30K_E C_m / (\pi K_T)$, $c_4 = R_0 C_m^2 / K_T^2$ và:

$$V_{n_T} = (m^2 g^2 + C_d^2 v_{n_T}^4) / C_t^2 \quad (1.8)$$

Với các ký hiệu trong công thức (1.7) và (1.8) được định nghĩa theo Bảng 1-2.

Bảng 1-2. 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 $\mathcal{T}$, tức là $N_T \leq N$
v_{n_T}	Vận tốc của UAV trên chặng n_T , $n_T = 1, 2, \dots, N_T$
P_{n_T}	Công suất của UAV được sử dụng để bay qua chặng n_T
I_0	Cường độ dòng điện không tải (A)
R_0	Điện trở của động cơ (Ω)
U_0	Điện áp không tải (V)
K_v	Hằng số tốc độ không tải danh định của động cơ (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	Khối lượng của UAV (kg)
g	Gia tốc trọng trường (m/s^2)
C_m	Hệ số mô-men cản ($Nm/(rad/s)^2$)
C_d	Hệ số lực cản thân UAV ($N/(m/s)^2$)
C_t	Hệ số lực đẩy của UAV ($N/(rad/s)^2$)

1.3.5. Mô hình kênh truyền

Theo [105], ta có giá trị tỷ số tín hiệu trên nhiễu SINR nhận được bởi IDU m tại vị trí có tọa độ (x,y) và được phục vụ bởi UAV k trong trường hợp tổng quát được xác định bởi công thức:

$$\gamma_{k,m}(x,y) = \frac{P_{k,m}(x,y)}{I_{k,m}(x,y) + \sigma^2} \quad (1.9)$$

trong đó, giá trị $P_{k,m}(x,y)$ là công suất thu được tại IDU m , $I_{k,m}(x,y) = \beta \sum_{j \neq m} P_j(x,y)$ là giá trị nhiễu mà IDU m tại vị trí (x,y) nhận được từ các UAV khác với UAV k . Ta định nghĩa giá trị $0 \leq \beta \leq 1$ là trọng số để điều khiển mức độ can nhiễu nhận được. Trong đó, $\beta = 0$ và $\beta = 1$ là hai giá trị cực tham chiếu cho 2 trường hợp xét đến tương ứng là trường hợp không có can nhiễu và trường hợp bị can nhiễu đầy đủ. Từ đó, ta có công thức về dung lượng của kênh truyền đến IDU m được phục vụ bởi UAV k như sau:

$$C_{k,m}(x,y) = B \log_2 (1 + \gamma_{k,m}(x,y)) \quad (1.10)$$

với B là băng thông hệ thống.

1.3.6. Thời gian phục vụ

Khác với các nghiên cứu trước chủ yếu sử dụng các chỉ tiêu như tỉ lệ truy xuất nội dung thành công (hit rate) hoặc thông lượng, luận án đề xuất đánh giá hiệu năng dựa trên tập tiêu chí kết hợp gồm thông lượng, thời gian phục vụ và quỹ đạo bay của UAV. Trong đó, thời gian phục vụ được định nghĩa là tổng thời gian chờ để mỗi cụm được UAV hoàn tất phục vụ, bao gồm thời gian bay và thời gian truyền. Chỉ tiêu này khắc phục hạn chế của các thước đo truyền thống khi chưa phản ánh trực tiếp mức độ đáp ứng dịch vụ, do một hệ thống có thông lượng cao vẫn có thể tồn tại độ trễ lớn. Thời gian phục vụ phản ánh trực tiếp hiệu quả cung cấp dịch vụ và chịu ảnh hưởng bởi quỹ đạo bay của UAV. Việc tối thiểu hóa đại lượng này góp phần cải thiện các chỉ tiêu QoS như độ trễ và khả năng đáp ứng thời gian thực, đồng thời nâng cao QoE thông qua giảm thời gian chờ và đảm bảo tính liên tục của dịch vụ. Do đó, kết hợp các tiêu chí trên cho phép đánh giá và thiết kế hệ thống một cách toàn diện hơn.

1.3.7. Các giả thiết trong mô hình hệ thống

- Giả thiết về chu trình bay: các UAV được điều phối bay được trang bị khả năng tránh va chạm (bằng cách điều phối trung tâm hoặc cảm biến cục bộ), sau khi tránh, các UAV trở lại chu trình bay đã được thiết kế sẵn.

- Giả thiết về thông tin kênh truyền: thông tin kênh truyền được ước lượng và thu thập định kỳ bởi MBS để phục vụ cho việc xây dựng các bài toán tối ưu.

- Giả thiết về can nhiễu: các UAV được cấp phát một kênh truyền thông như những thiết bị di động thông thường, tận dụng khả năng xuất hiện kênh truyền LoS cao, quá trình truyền thông của UAV đến các IDU được xem là không có can nhiễu.

- Giả thiết về thông số thiết lập hệ thống: các thông số được lựa chọn nhằm mục đích kiểm chứng các mô hình đề xuất ở mức độ khái niệm và thiết kế hệ thống, thay vì mô phỏng một cách chặt chẽ theo đặc tả lớp vật lý 6G hoàn chỉnh, vốn hiện vẫn đang trong quá trình tiêu chuẩn hóa. Các mô hình và kết quả được xem xét trong nghiên cứu của luận án có tính mở rộng và có thể được áp dụng cho các kịch bản B5G/6G bằng cách sử dụng các thiết lập tham số đặc trưng hơn, chẳng hạn như tần số sóng mang cao hơn, mật độ thiết bị dày đặc hơn, số lượng nội dung nhiều hơn,... Khi sử dụng UAV để truyền thông đến IDU trên mặt đất, luận án vẫn xác lập thông số tần số hoạt động ở mức 2 GHz và băng thông 10 MHz để giảm thiểu sự suy hao do tần số cao theo khoảng cách, và chưa tiếp cận đánh giá các mô hình với băng tần cao THz đặc trưng của thế hệ di động 6G.

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

1.4.1. Khái niệm về thiết kế tối ưu thời gian thực

Với sự tăng trưởng nhanh chóng của các thiết bị cảm tay và các kết nối phổ biến, việc cập nhật trạng thái theo thời gian thực đã trở thành một yêu cầu truyền thông quan trọng và phổ biến. Trung tâm giám sát giao thông cần phải nắm vững tốc độ của ô tô trên đường, môi trường xung quanh, điều kiện giao thông, vị trí và áp suất lốp xe để cảnh báo người lái kịp thời phòng ngừa tai nạn. Máy dò được lắp đặt trong rừng có thể ngăn chặn đám cháy kịp thời dựa trên nồng độ khói, nhiệt độ không khí và độ ẩm. Và ta có thể tìm thấy người đang trò chuyện với mình qua điện thoại di động hoặc đồng hồ thông minh. Các tình huống này có chung một mô tả: người giám sát muốn nhận được thông tin kịp thời nhất có thể từ điều khiển từ xa. Do đó, nghiên cứu về hệ thống cập nhật thời gian thực là rất quan trọng để có được thông tin mới nhất.

Để đánh giá hiệu suất của mạng không dây, các thuật toán tối ưu hóa đã được triển khai [17]. Tối ưu hóa được xem là cầu nối giữa toán học và kỹ thuật vì nó sử dụng các nghiên cứu toán học để giải quyết các vấn đề thực tế trong kỹ thuật. Từ quan điểm

tối ưu hóa, việc thiết kế tối ưu thời gian thực các vấn đề kỹ thuật được xử lý dễ dàng và hiệu quả bằng cách xây dựng các bài toán tối ưu (optimization problem – OP) và tìm ra các phương pháp để giải quyết chúng. Nhiệm vụ của thiết kế tối ưu thời gian thực thuộc về một trong các dạng: lựa chọn giải thuật tối ưu để rút ngắn thời gian tính toán (tính toán hoặc thực thi giải thuật theo thời gian thực), hoặc triển khai kết quả tối ưu thời gian thực thông qua tìm cách rút ngắn thời gian hoàn thành nhiệm vụ để đạt đáp ứng thời gian thực, hoặc kết hợp cả hai để đáp ứng thời gian thực một cách tốt nhất theo yêu cầu của từng ứng dụng cụ thể.

1.4.2. Các yêu cầu thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV

Trong các mạng tích hợp truyền thông UAV, thiết kế tối ưu thời gian thực là yếu tố then chốt nhằm đáp ứng các yêu cầu động và khắt khe của môi trường triển khai [96], [106]. Thiết kế này nhằm tối ưu hóa đa mục tiêu trong khi tuân thủ nghiêm ngặt các ràng buộc thời gian, tài nguyên và vật lý của UAV.

Các yêu cầu trong thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV đồng thời cũng là các mục tiêu tối ưu, bao gồm: (i) giảm tổng độ trễ mạng [106]; (ii) tăng hiệu suất [107]; (iii) rút ngắn thời gian hoàn thành nhiệm vụ [96]; (iv) giảm tiêu thụ năng lượng của UAV và thiết bị người dùng [108], [109], [110]; (v) tối đa hóa thông lượng và tốc độ dữ liệu [111], [112]; (vi) giảm độ trễ thông tin (age of information - AoI) [113], [114]; và (vii) tối ưu hóa trải nghiệm người dùng (QoE) [115].

Độ phức tạp bài toán tối ưu thường rất cao (phi lỗi, nhiều biến) nên cần các kỹ thuật giải quyết hiệu quả. Các chiến lược tiêu biểu gồm: (i) phân rã bài toán thành các bài toán con [106]; (ii) tối ưu hóa phân tán [106]; (iii) sử dụng phương pháp xấp xỉ như tối ưu lỗi liên tiếp hay khai triển Taylor [116]; (iv) áp dụng thuật toán heuristic/metaheuristic, bao gồm thuật toán di truyền (GA) [106]; hoặc áp dụng thuật toán AI và ML như học tăng cường sâu DRL (Deep Reinforcement Learning) [117], [118], [119].

Các ràng buộc cần đáp ứng khi thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV bao gồm: (i) yêu cầu thời gian thực nghiêm ngặt - giải pháp phải được tính toán và thực thi trong thời gian rất ngắn (ms) [96], [106]; (ii) giới hạn động lực học của UAV như tốc độ tối đa [111], [112]; (iii) giới hạn năng lượng của UAV [110], [112]; (iv) ràng buộc tài nguyên: khả năng tính toán, băng thông, công suất truyền [108], [109]; và (v) tránh các vùng cấm bay hoặc chướng ngại vật [107].

Tổng thể, thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV đòi hỏi sự kết hợp giữa lý thuyết tối ưu, kỹ thuật truyền thông, thiết kế điều khiển UAV, và lựa chọn các thuật toán phù hợp nhằm đạt được các mục tiêu và yêu cầu trong giới hạn của các ràng buộc cụ thể. Các ứng dụng tiêu biểu bao gồm thu thập và phân phối dữ liệu trong các mạng IoT, liên lạc khẩn cấp và giám sát môi trường [107], [108], [120].

1.4.3. Các thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV

1.4.3.1. Thiết kế dựa vào thuật toán

Các thuật toán sau thường được sử dụng trong các công trình nghiên cứu về thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV :

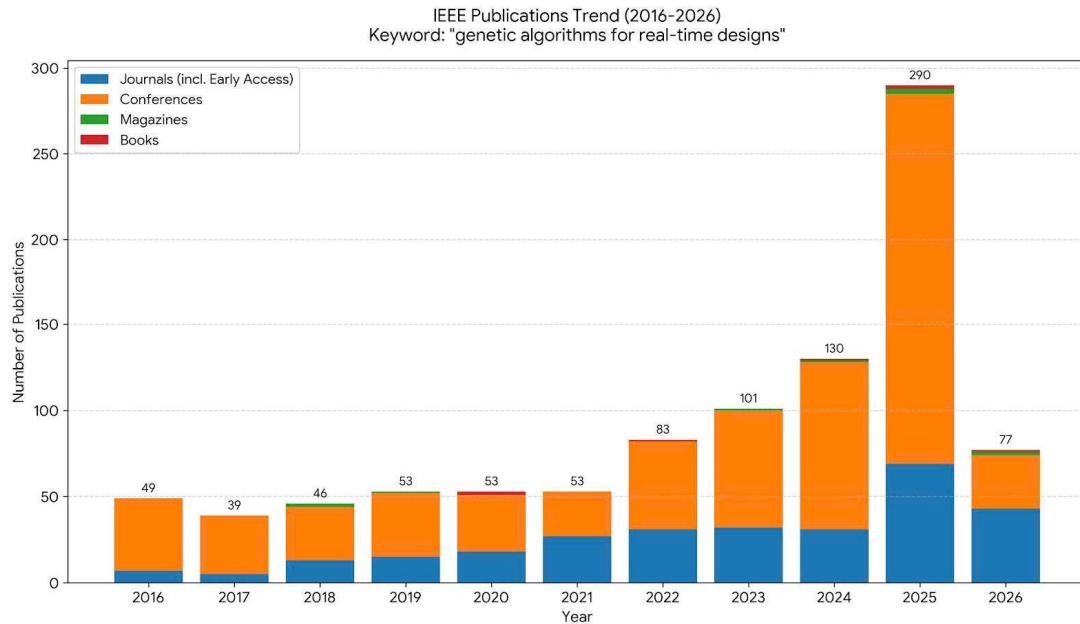
- Thuật toán tối ưu lỗi:

- Tối ưu lỗi có nhiều ưu điểm so với tối ưu phi tuyến, nhờ sự tồn tại của các thuật toán hiệu quả có thể tìm được nghiệm tối ưu toàn cục với độ tin cậy cao. Vì thế, tối ưu lỗi phù hợp với các ứng dụng yêu cầu xử lý thời gian thực [121].
- Lý thuyết tối ưu lỗi đã chứng tỏ vai trò quan trọng trong hệ thống xử lý tín hiệu và truyền thông không dây. Sự đa dạng của các mô hình bài toán tối ưu lỗi đã tạo điều kiện cho việc ứng dụng chúng trong một số lượng lớn các bài toán tối ưu truyền thông không dây. Cùng với sự bùng nổ của truyền thông không dây, tối ưu hóa lỗi đã trở thành xu hướng tiềm năng cho việc thiết kế, phân tích và triển khai cơ sở hạ tầng không dây [90].
- Tối ưu lỗi đóng vai trò then chốt trong thiết kế các giải pháp tối ưu thời gian thực cho hệ thống truyền thông có UAV hỗ trợ. Ưu điểm nổi bật của kỹ thuật này là khả năng giải quyết hiệu quả các bài toán tối ưu có tính chất lỗi, nhờ đó đảm bảo hội tụ nhanh và chính xác [96], [122].
- Kỹ thuật tối ưu lỗi và các biến thể tạo thành công cụ cơ bản cho việc xử lý các bài toán tối ưu hóa thời gian thực đơn giản trong truyền thông UAV, với ưu thế về tính hiệu quả, độ ổn định và khả năng thích ứng trong môi trường động [96], [111], [116].

- Các thuật toán heuristic và metaheuristic:

- Bên cạnh tối ưu lỗi, các thuật toán heuristic và metaheuristic được áp dụng rộng rãi để tìm lời giải gần tối ưu cho các bài toán khó, đặc biệt khi không tồn tại phương pháp giải chính xác trong giới hạn thời gian thực.

- Các phương pháp tối ưu hóa truyền thống dựa trên các thuật toán lặp để giải bài toán tối ưu thường có hiệu năng hạn chế trong các hệ thống quy mô lớn, do độ phức tạp tính toán tăng đáng kể theo quy mô của hệ thống [17]. Thay vào đó, ngày nay, các phương pháp tối ưu hóa mô phỏng các hành vi tự nhiên của động vật như tối ưu hóa bầy đàn (PSO), thuật toán di truyền (GA), thuật toán tối ưu hóa cá voi (WOA) được áp dụng rộng rãi [123].



Hình 1-5. Xu hướng các công bố liên quan đến việc sử dụng GA cho các thiết kế thời gian thực

- Trong đó, GA là một công cụ mạnh trong các kịch bản có nhiều biến và không gian nghiệm phức tạp. Hình 1-5 là thống kê cho thấy các công trình nghiên cứu trong các năm gần đây có xu hướng tăng cường sử dụng GA trong các thiết kế thời gian thực (kết quả khảo sát theo từ khóa “genetic algorithms for real-time designs” trên trang <https://ieeexplore.ieee.org/> vào ngày 21/6/2026). Một trong những ưu điểm quan trọng của GA là dựa trên cơ chế tiến hóa mô phỏng chọn lọc tự nhiên và biến dị di truyền, cho phép GA có khả năng khám phá hiệu quả không gian nghiệm rộng lớn và tìm được nghiệm tối ưu toàn cục chính xác hoặc gần đúng đối với cả bài toán tối ưu có hàm mục tiêu đơn cực trị lẫn đa cực trị. Nói cách khác, GA có thể tránh các giải pháp tối ưu cục bộ bằng cách xem xét nhiều cực trị cùng một lúc [124], [125]. Nhờ

đặc tính tiến hóa quần thể, GA có thể tìm ra lời giải chất lượng cao mà không cần tri thức tiên nghiệm chi tiết.

- Các giải thuật metaheuristic và cụ thể là GA nhìn chung mang tính linh hoạt cao, có thể xử lý bài toán với nhiều biến số, môi trường phi tuyến và nhiều ràng buộc phức tạp. Tuy nhiên, hạn chế của chúng là thường yêu cầu tinh chỉnh tham số để đạt hiệu quả cao [106].

- Phương pháp tối ưu hóa dùng học máy ML: Trí tuệ nhân tạo AI cùng với ML có thể học, dự đoán và đưa ra quyết định với dữ liệu lớn được huấn luyện. Nhờ đó, các kỹ thuật này có tiềm năng thay thế hoặc cải tiến nhiều bài toán thiết kế tối ưu trong mạng không dây vốn trước đây phụ thuộc nhiều vào mô hình toán học phức tạp và kiến thức chuyên môn sâu. Đồng thời, AI và ML còn giúp nâng cao hiệu suất của các hệ thống mạng không dây trong những điều kiện thông tin không hoàn hảo [11]. Do đó, AI và ML sẽ cung cấp một phương pháp mới để thiết kế mạng không dây và sẽ là một công nghệ đổi mới cho 6G, dẫn đến hiệu suất vượt trội.

- Trong thập kỷ gần đây, các phương pháp ML, đặc biệt là học tăng cường (RL) và học tăng cường sâu (DRL), nổi lên như công cụ mạnh mẽ cho thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV. Ưu điểm nổi bật của RL và DRL là khả năng thích ứng với môi trường động mà không cần mô hình toán học chính xác [126], [127].
- Điểm mạnh của hướng tiếp cận này là tính tự động hóa cao và khả năng học hỏi từ dữ liệu thực tế, giúp UAV đưa ra quyết định trong các tình huống chưa từng gặp [119]. Hạn chế chủ yếu là chi phí tính toán và yêu cầu dữ liệu huấn luyện lớn, đặc biệt trong môi trường thời gian thực [122], [128].

- Các phương pháp khác: Ngoài các nhóm chính trên, nhiều kỹ thuật đặc thù và biện pháp kết hợp cũng được khai thác để đáp ứng yêu cầu thiết kế tối ưu thời gian thực:

- Lý thuyết trò chơi cung cấp khuôn khổ phân tích và tối ưu hóa trong các hệ thống phân tán, nơi nhiều tác nhân (UAV hoặc người dùng) có mục tiêu và chiến lược riêng. Cách tiếp cận dựa trên lý thuyết trò chơi đặc biệt phù hợp khi không thể áp đặt một bộ điều khiển trung tâm [106], [109].

- Phân rã bài toán (problem decomposition): Các bài toán lớn, phi lỗi thường được chia thành các tiểu bài toán con (ví dụ: phân cụm, đặt cache, phân bổ công suất), sau đó giải độc lập hoặc phân tán để giảm độ phức tạp [106], [111].
- Nhìn chung, các kỹ thuật này bổ sung linh hoạt cho những phương pháp chính, giúp truyền thông UAV đạt hiệu quả cao hơn trong môi trường có độ phức tạp tính toán và yêu cầu phản ứng nhanh.

1.4.3.2. Thiết kế dựa vào mô hình triển khai

Các thiết kế thường được sử dụng trong các nghiên cứu về tối ưu thời gian thực trong quyền thông UAV dựa vào mô hình triển khai bao gồm:

- Thiết kế sử dụng 1 UAV: có khá nhiều công trình nghiên cứu sử dụng thiết kế dùng 1 UAV đơn để tham gia thực hiện các chức năng truyền thông, trong đó thực hiện các mục tiêu tối ưu hóa quỹ đạo bay [92], [97], tối đa hóa hiệu quả năng lượng [121], tối thiểu hóa thời gian hoàn thành nhiệm vụ [122], [132], hay tối đa hóa tốc độ dữ liệu [135], v.v.
- Thiết kế sử dụng nhiều UAV: nhiều tác giả đã phát triển mô hình thiết kế truyền thông UAV sử dụng nhiều UAV cùng tham gia phối hợp thực hiện các chức năng truyền thông, với các mục tiêu như giảm thiểu mức tiêu thụ năng lượng [96], tối ưu số lượng UAV được triển khai [93], tối thiểu AoI [125], tối ưu hóa QoE của người dùng [137], v.v.
- Thiết kế đa tầng sử dụng kết hợp UAV và vệ tinh: một số tác giả đã phát triển hướng nghiên cứu thiết kế kết hợp vệ tinh - UAV - mặt đất [116] nhằm mục tiêu tối ưu thông số tổng độ trễ mạng cho tất cả người dùng mặt đất.

1.4.3.3. Ứng dụng trong các nghiên cứu liên quan

- Một số ứng dụng của tối ưu lỗi trong các nghiên cứu về truyền thông UAV:
 - Trong các công trình [115], [129], với các yêu cầu liên quan phân bổ tài nguyên mạng, điều khiển quỹ đạo UAV hoặc tối ưu hóa hệ thống tích hợp UAV - mặt đất, tối ưu lỗi được áp dụng sau khi biến đổi hoặc nói lỏng bài toán ban đầu vốn phi lỗi thành dạng gần đúng lỗi. Trong công trình [115], tác giả đã giải quyết bài toán tối ưu lỗi thu được sau bước xấp xỉ bằng cách áp dụng phương pháp hạ dốc gradient (gradient descent).
 - Các tác giả trong các công trình [111], [116] đã áp dụng kỹ thuật xấp xỉ

dẫn bài toán phi lồi thành một chuỗi các bài toán lồi giải được, thông qua khai triển Taylor bậc nhất, tạo thành phương pháp tối ưu lồi liên tiếp (successive convex optimization) khá phổ biến.

- Một số ứng dụng của các thuật toán heuristic và metaheuristic trong các công trình nghiên cứu về truyền thông UAV:

- Trong truyền thông UAV, GA đã được ứng dụng để giải quyết bài toán tìm vị trí lưu trữ tối ưu [106] và lựa chọn vị trí UAV [114].
- Ngoài ra, GA còn được sử dụng để giải các bài toán tối ưu hóa phức tạp trong nhiều hệ thống khác nhau [130], từ truyền thông [131], [132], [133] đến các A&S đa phương tiện [124], [125], [134], [135].
- Trong công trình [136], một biến thể khác cũng được áp dụng trong thiết kế tối ưu thời gian thực trong truyền thông UAV là thuật toán PSO dùng để tối ưu quỹ đạo UAV theo thời gian thực và định vị chính xác trong nhóm UAV.

- Một số ứng dụng của các thuật toán học máy trong các công trình nghiên cứu về truyền thông UAV:

- DRL được sử dụng cho mô hình sử dụng 1-UAV: công trình [119] sử dụng mô hình như DQN (Deep Q-Network) để tối ưu hóa lập kế hoạch quỹ đạo và phân bổ tài nguyên trong điều kiện kênh truyền thay đổi nhanh. Trong công trình [127], DRL cũng được triển khai trực tiếp trên UAV để xử lý quyết định trong thời gian thực.
- Thuật toán học tăng cường đa tác tử MADRL (multi-agent DRL) có đặc điểm phù hợp với hệ thống multi-UAV, cho phép các UAV phối hợp hành động để đạt mục tiêu tối ưu hóa chung, như kiểm soát quỹ đạo 3D, theo dõi nhiều mục tiêu động, hoặc offloading trong MEC [108], [117], [118].
- Thuật toán DRL còn được sử dụng kết hợp với các kỹ thuật khác, ví dụ như Bayesian optimization kết hợp với DRL được sử dụng trong công trình [119] cho phép tìm giải pháp tốt hơn trong lập kế hoạch quỹ đạo.
- Ngoài ra, trong công trình [128], mạng nơ-ron nhân tạo ANN (artificial neural network) cũng được sử dụng để dự đoán và hỗ trợ lập kế hoạch đường bay của UAV.

1.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 1

Chương 1 đã giới thiệu tổng quan về 6G IoT với những ứng dụng nổi bật cũng như những thách thức cần nghiên cứu. Đồng thời, các cơ chế lưu trữ và phân phối dữ liệu trong 6G IoT cũng được trình bày một cách tổng quát. Trong đó, hướng lưu trữ và phân phối có sự hỗ trợ của thiết bị bay không người lái UAV được nhận định là phương án kết hợp tất cả ưu điểm của các cơ chế lưu trữ và phân phối dữ liệu qua mạng D2D, lưu trữ và phân phối qua trạm nền nhỏ, hay lưu trữ và phân phối đa tầng. Chương 1 trình bày chi tiết các kết quả nghiên cứu liên quan đến lưu trữ và phân phối dữ liệu có sự hỗ trợ của UAV. Các ưu điểm và hạn chế của các công trình nghiên cứu liên quan cũng được phân tích và đánh giá chi tiết. Các phân tích và đánh giá này cho thấy:

- Hướng nghiên cứu về các mô hình và kỹ thuật truyền thông UAV vào mạng 6G IoT là hướng nghiên cứu có không gian nghiên cứu còn khá rộng mở, đặc biệt là hướng nghiên cứu sâu về khai thác năng lực thu thập, lưu trữ và phân phối dữ liệu thông qua UAV để ứng dụng vào mạng 6G IoT còn rất tiềm năng khi hầu hết các nghiên cứu về kỹ thuật lưu trữ, thu thập và phân phối dữ liệu được thực hiện với các thành phần mạng được đặt trên mặt đất phục vụ chủ yếu cho mạng của các ISP, CP.
- Các nghiên cứu về lưu trữ và phân phối tại UAV trong mạng B5G/6G hiện cũng chưa xét đến yếu tố thời gian thực do tính linh động và giới hạn năng lượng của UAV cũng như nhu cầu truy cập những ứng dụng và dịch vụ tức thời của IDU.
- Và các bài báo nghiên cứu về tối ưu hóa thời gian thực với mạng sử dụng UAV lại chưa xét đến kỹ thuật lưu trữ và phân phối nội dung trên UAV nhằm cung cấp QoS/QoE với độ trễ thấp nhất và độ khả dụng truyền thông cao cho các IDU.
- Đặc biệt, các nghiên cứu liên quan chưa đề xuất cơ chế kết hợp lưu trữ và phân phối giữa trạm gốc MBS và các UAV để đạt các chỉ số truyền thông hiệu quả.

Từ những vấn đề còn tồn đọng trong các nghiên cứu liên quan như trên, luận án đề xuất các cơ chế lưu trữ và phân phối dữ liệu có sự hỗ trợ của UAV trong không gian 3D, nhằm hướng đến đạt được mức tốc độ phân phối dữ liệu tối đa trong thời gian phân phối dữ liệu ngắn nhất đến các IDU được phục vụ, đồng thời đạt được số UAV cùng quỹ đạo bay tối ưu cho các UAV. Hướng nghiên cứu của luận án sẽ xử lý bài toán tối ưu hóa thời gian thực với các kích cỡ nội dung khác nhau, kết hợp tối ưu nhiều yếu tố liên quan đến UAV như cao độ bay, công suất bay (vận tốc bay), công

suất truyền dữ liệu, v.v. để đảm bảo sử dụng tài nguyên hiệu quả. Các mô hình đề xuất sẽ mở rộng từ chỉ sử dụng một UAV, đến mô hình kết hợp MBS và nhiều UAV để đạt mức thời gian phục vụ cho người dùng ngắn nhất, tiến đến mục tiêu phục vụ theo thời gian thực, nhằm nâng trải nghiệm QoE cho người dùng trong mạng 6G IoT được hỗ trợ bởi UAV. Ngoài ra, Chương 1 cũng giới thiệu các phương pháp, giải thuật tối ưu thời gian thực thường được áp dụng trong các bài toán truyền thông UAV, như thuật toán tối ưu hóa lồi, các thuật toán metaheuristic như giải thuật di truyền, thuật giải tối ưu hóa bầy đàn, v.v. hay phương pháp chia nhỏ bài toán tối ưu hóa ban đầu thành các bài toán thành phần, v.v. là những phương pháp sẽ được xem xét triển khai, so sánh và áp dụng để giải các bài toán tối ưu cho các mô hình lưu trữ và phân phối dữ liệu bằng UAV được đề xuất trong Chương 2 và Chương 3.

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

Tóm tắt: Trong Chương 2, nghiên cứu sinh (NCS) đề xuất một giải pháp tối ưu hóa lưu trữ, phân bổ công suất và quỹ đạo bay 3D có nhận thức thời gian phục vụ trong quá trình phân phối dữ liệu qua mạng IoT được hỗ trợ bởi UAV. Giải pháp dựa trên mô hình tích hợp các kỹ thuật biên được định nghĩa bằng phần mềm SDE (software-defined edge) vào UAV nhằm cực đại dung lượng phân phối dữ liệu trong mạng IoT. UAV được trang bị khả năng lưu trữ, phân bổ công suất, truyền điểm – đa điểm và điều khiển quỹ đạo bay 3 chiều 3DF (3D flight trajectory) để phục vụ các IDU (IoT devices and users) - thiết bị và người dùng IoT trong các cụm khác nhau. Từ đó, NCS xây dựng một bài toán tối ưu có xét đến thời gian phục vụ (service time-aware) cho 03 yếu tố chính: lưu trữ nội dung, phân bổ công suất và điều hướng quỹ đạo bay 3D, gọi tắt là TCP-3DF (service time-aware caching, power allocation, and 3DF). Bài toán TCP-3DF được giải bằng GA nhằm tìm ra kết quả tối ưu: (1) nội dung cần lưu trữ, (2) công suất cần phân bổ để truyền từng nội dung điểm – đa điểm và điều khiển UAV bay qua từng chặng và (3) các vị trí dừng trong không gian 3D cũng như thứ tự dừng tương ứng. GA được cải tiến thông qua hàm phạt và cơ chế tách nhiệm sắc thể nhằm đảm bảo hội tụ chính xác và ổn định để giải bài toán này một cách hiệu quả, trong các điều kiện ràng buộc về tài nguyên lưu trữ, năng lượng và thời gian phục vụ cần đáp ứng của các ứng dụng và dịch vụ khác nhau. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình TCP-3DF mang lại hiệu suất cao về tốc độ truyền, thời gian phục vụ và quãng đường bay, đồng thời tối ưu việc sử dụng tài nguyên lưu trữ và năng lượng. Nội dung chính của Chương 2 được phát triển từ kết quả nghiên cứu đã được công bố trên tạp chí IEEE Transactions on Vehicular Technology [C3]. Bên cạnh các nội dung đã công bố, Chương 2 của luận án được bổ sung nội dung phân tích độ phức tạp tính toán của thuật toán GA nhằm bảo đảm tính đầy đủ và logic của luận án.

2.1. GIỚI THIỆU HỆ THỐNG

Theo dự báo dữ liệu của Ericsson, dự kiến trong kỷ nguyên mạng di động thế hệ thứ sáu (6th Generation – 6G), sẽ có khoảng 39 tỷ kết nối Internet vạn vật IoT (Internet of

Things) vào năm 2029 [22]. Điều này thúc đẩy sự phát triển của gần 300 triệu ứng dụng và dịch vụ (applications and services – A&S) trong những năm tới [37]. Nhu cầu ngày càng tăng của các IDU - thiết bị và người dùng IoT (IoT devices and users) diện rộng, di động và tầm ngắn đối với nhiều A&S dẫn đến sự gia tăng mạnh mẽ các hoạt động đo lường, giám sát, tự động hóa, hướng dẫn và truyền thông giải trí, đặc biệt là nội dung đa phương tiện tốc độ dữ liệu cao. Chắc chắn, lưu lượng dữ liệu toàn cầu, vốn đã tăng theo cấp số nhân [137], [138], không chỉ gây ra tình trạng tắc nghẽn cực độ của tất cả các liên kết truyền dẫn mà còn làm giảm việc sử dụng tài nguyên trong mạng 6G. Do đó, các nhà cung cấp dịch vụ Internet (Internet Service Providers – ISP) và nhà cung cấp nội dung (Content Providers – CP) phải đối mặt với thách thức lớn về cách sử dụng các tài nguyên hệ thống khả dụng để cung cấp cho IDU chất lượng dịch vụ (quality of service – QoS) cao trong khi vẫn đảm bảo linh hoạt thời gian dịch vụ theo yêu cầu của nhiều A&S đa phương tiện. Trong bối cảnh này, mặc dù mạng 6G được trang bị các khả năng truyền thông, cảm biến, tính toán và trí tuệ mạnh mẽ hơn, nhu cầu cấp thiết về các giải pháp đột phá hiệu quả để giải quyết thách thức này đang được thúc đẩy mạnh mẽ.

Để giải quyết thách thức đã đề cập ở trên, các ISP và CP có thể phát triển các kiến trúc mạng và công nghệ đột phá cho các liên kết truyền dẫn tốc độ cao, nhưng đây là khoản đầu tư tốn kém. Ngoài ra, có thể áp dụng mức độ ưu tiên cao hơn cho các kỹ thuật biên được xác định bằng phần mềm (software-defined edge – SDE) để cung cấp nội dung đa phương tiện. Một trong những kỹ thuật hiệu quả nhất, cho phép các ISP và CP sử dụng tài nguyên hệ thống và cơ sở hạ tầng có sẵn để đáp ứng nhu cầu cao của IDU với chi phí thấp, là lưu trữ trên mặt đất [45], [139]. Tuy nhiên, trong nhiều trường hợp, các IDU nằm ở các điểm nóng đông đúc, giờ cao điểm và các sự kiện quan trọng được bao quanh bởi các tòa nhà chọc trời dày đặc hoặc ở các khu vực mà kết nối truyền thông lại không hoạt động hay các tình huống khẩn cấp [37], [90], [140], do đó các kỹ thuật lưu trữ trên mặt đất trở nên không hiệu quả. Để giải quyết hạn chế này, hướng hợp tác kỹ thuật lưu trữ đệm trên mặt đất với nền tảng động lưu trữ đệm trên không được hỗ trợ bởi các phương tiện bay không người lái (unmanned aerial vehicles – UAV) [37], [141] đã được triển khai. Các kỹ thuật lưu trữ trên UAV không chỉ mang nội dung đa phương tiện đến gần hơn với các IDU mà còn 1) lập kế hoạch cho một quỹ đạo tối ưu để hưởng lợi từ sự lan truyền theo đường nhìn thẳng (line-of-sight – LoS), 2) nắm bắt hành vi của các IDU (tính di động, mật độ, lợi ích chung và mối quan hệ xã hội) và 3) mở rộng vùng

phủ sóng chức năng để cung cấp cho nhiều IDU hơn với mức chất lượng dịch vụ QoS tốt hơn.

Một trong những giải pháp quan trọng nhất cho lưu trữ bằng UAV với các kỹ thuật tiên tiến là tối ưu hóa kết hợp vị trí lưu trữ, quỹ đạo bay và công suất truyền, được nghiên cứu trong [75]. Các tác giả đề xuất tối ưu hóa kết hợp vị trí lưu trữ, quỹ đạo bay và công suất truyền của nhiều UAV nhằm cực đại thông lượng cho các IDU, thông qua lưu trữ trước nội dung phổ biến và xác định vị trí UAV ở độ cao cố định. Trong khi đó, [76] xem xét sự phối hợp giữa nhà mạng và CP trong phân bổ tài nguyên tính toán và chuyển mã video, với các video phổ biến chất lượng cao được lưu trữ trên UAV, đồng thời tối ưu độ cao dừng theo quỹ đạo bay 3D để tối đa hóa số lượng video được phân phối.

Bên cạnh việc áp dụng phân bổ tài nguyên, trong [77], các tác giả đã triển khai NOMA trong mạng FANET (flying ad hoc network) gồm nhiều UAV. FANET hợp tác với trạm gốc MBS (Macro Base Station) và người dùng di động (Mobile Users – MU) trong các khu vực chức năng (là các khu vực thuộc vùng phủ sóng) để lưu trữ, sau đó chuyển tiếp các thông điệp điều khiển và nội dung đến các IDU ở các khu vực không chức năng (là các khu vực mà hệ thống không thể phục vụ). Hệ thống còn sử dụng kỹ thuật NOMA phân tán để nâng cao tốc độ truyền và tỷ lệ truy cập của các IDU trong mạng IoT không đồng nhất được hỗ trợ bởi UAV. Trong [78], với chỉ một UAV được trang bị bộ nhớ đệm nhưng có sự hỗ trợ của phân bổ công suất, NOMA và kỹ thuật thu năng lượng, các tác giả đã đề xuất một bài toán tối ưu hóa ràng buộc kết hợp nhằm tối đa thông lượng. Ảnh hưởng của vị trí UAV đến hiệu năng hệ thống cũng được phân tích nhằm làm rõ thiết kế tối ưu.

Trong hầu hết các A&S chuyên biệt như quản lý công cộng, an toàn, quân sự và y tế điện tử (e-health) [37], các nội dung được truyền đến các IDU cần được bảo mật. Liên quan đến vấn đề này, các tác giả trong [81] đã đề xuất một thiết kế kết hợp gồm lưu trữ đệm, phân bổ công suất, gây nhiễu (jamming) và quỹ đạo bay 2D. Có 02 UAV trong hệ thống: một UAV đảm nhiệm việc lưu trữ và truyền dữ liệu, UAV còn lại thực hiện chức năng gây nhiễu. Các MU được sử dụng làm các nút chuyển tiếp (relay) để cung cấp liên lạc hai chặng (two-hop) cho các IDU, tức là từ UAV đến MU và từ MU đến IDU thông qua giao tiếp thiết bị với thiết bị (device-to-device – D2D). Cách tiếp cận này nhằm tối đa tốc độ bảo mật (secrecy rate) trong điều kiện có kẻ nghe lén. Sử dụng các kỹ thuật

tương tự như trong [78], các tác giả trong [79] còn áp dụng thêm sơ đồ ghép cặp người dùng (user pairing scheme) nhằm nâng cao hiệu suất của NOMA đồng thời giảm độ trễ.

Với một thiết kế đơn giản nhưng hiệu quả, công trình trong [82] đã xem xét việc lưu trữ nội dung bằng UAV kết hợp với quỹ đạo bay hai chiều 2D để phân phối dữ liệu trong các hệ thống giao thông thông minh. Mặc dù cách tiếp cận này có thể tối đa hiệu suất phân phối dữ liệu, vấn đề đặt ra là: nếu không tối ưu độ cao bay của UAV thì hệ thống không thể thích ứng với các đặc điểm đa dạng của môi trường truyền dẫn không dây và mật độ của các IDU, từ đó khó đạt được hiệu suất cao hơn. Nhằm thích ứng tốt hơn với mật độ IDU (nhưng chưa xét đến môi trường truyền), các tác giả trong [87] đã tiếp tục xem xét việc tối ưu độ cao UAV trong quỹ đạo 3DF để tối đa thông lượng. Tuy nhiên, việc lưu trữ, truyền nội dung và hoạt động bay của UAV sẽ không cải thiện đáng kể hiệu năng hệ thống nếu kích thước nội dung cần lưu trữ, công suất truyền cho mỗi nội dung và công suất bay qua từng chặng đều là các giá trị cố định.

Từ các phân tích về các công trình liên quan nêu trên, có thể thấy rằng các tác giả đã tập trung vào nhiều khía cạnh khác nhau của lưu trữ nội dung bằng UAV, chẳng hạn như mô hình hệ thống, kỹ thuật triển khai, các IDU, nội dung, quỹ đạo bay, tài nguyên và các chỉ số hiệu năng liên quan. Tuy nhiên, hạn chế chung của các công trình này là: kích thước nội dung được giả định là cố định và UAV được triển khai theo quỹ đạo bay 2D, hoặc thậm chí không có quỹ đạo rõ ràng trong trường hợp triển khai FANET. Ngoài ra là công trình [78], trong đó có xét đến nhiều phiên bản video với kích thước khác nhau và quỹ đạo 3DF. Hơn nữa, các tác giả chưa áp dụng: (1) cơ chế kết nối UAV-người dùng di động U2C (UAV-to-cluster), (2) phân bổ công suất truyền cho từng nội dung và phân bổ công suất bay cho từng chặng, (3) kỹ thuật phát điểm - đa điểm (multicasting), (4) đặc điểm đa dạng của cả môi trường truyền không dây và mật độ IDU, và (5) thuật toán xấp xỉ đường đi ngắn nhất nhằm tối đa hóa tổng tốc độ phân phối, đồng thời tiết kiệm tài nguyên lưu trữ và công suất, cũng như đảm bảo thời gian phục vụ.

Trong chương này, NCS đề xuất một hệ thống tích hợp các kỹ thuật SDE, gọi là giải pháp tối ưu hóa kết hợp các thành phần: lưu trữ có xét đến thời gian phục vụ, phân bổ công suất TCP (service time-aware caching, power allocation) và quỹ đạo 3DF (3D flight trajectory), nhằm phân phối nội dung đa phương tiện trong mạng IoT hỗ trợ bởi UAV. Đối với TCP, lưu trữ đệm UAV được tích hợp với kỹ thuật phân bổ công suất. Một mặt, NCS áp dụng phân bổ công suất truyền cho từng nội dung liên quan đến các

khía cạnh cụ thể của nội dung và các đặc điểm đa dạng của môi trường truyền thông không dây. Đối với kênh truyền, lợi ích của các IDU trong cụm có cùng sở thích nội dung đa phương tiện được sử dụng bằng cách phát điểm - đa điểm. Mặt khác, công suất bay (hoặc tốc độ bay) phân bổ cho từng chặng bay tùy thuộc vào thời gian dịch vụ mà các A&S đa phương tiện khác nhau được yêu cầu. Đối với 3DF, liên kết U2C được thiết lập để UAV có thể tìm tọa độ 3D của các điểm dừng và trình tự dừng dựa trên các tính năng IDU để phục vụ chúng hiệu quả hơn.

Lưu trữ tại UAV, phân bổ công suất, truyền điểm - đa điểm và quỹ đạo 3DF dựa trên liên kết U2C sau đó được tổng hợp thành và xây dựng thành một bài toán tối ưu hóa TCP-3DF, với các ràng buộc về tài nguyên lưu trữ và công suất, được xử lý hiệu quả theo yêu cầu về thời gian phục vụ. Để làm cho mô hình TCP-3DF trở nên thực tế với hiệu suất tối ưu cao hơn, NCS kết hợp các khía cạnh của nội dung đa phương tiện (kích thước và phân bố mức độ phổ biến), các tính năng IDU (mật độ và sự quan tâm cùng nội dung) và các đặc điểm đa dạng của môi trường truyền quảng bá không dây (ngoại ô, đô thị, đô thị đông đúc và đô thị cao tầng). Bằng cách sử dụng thuật toán di truyền GA, bài toán tối ưu TCP-3DF được giải để có kết quả tối ưu của lưu trữ, công suất truyền và công suất bay, tọa độ 3D của các điểm dừng và chuỗi dừng. Mục tiêu là cung cấp dịch vụ phân phối nội dung đa phương tiện (multimedia content delivery – MCD) cho nhiều IDU hơn với tổng tốc độ truyền tối đa, đồng thời sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ và công suất và đảm bảo thời gian phục vụ yêu cầu với đường bay gần như ngắn nhất. Hơn nữa, do tính phức tạp của bài toán tối ưu TCP-3DF, GA thông thường được sửa đổi bằng cách áp dụng hàm phạt và cơ chế nhiễm sắc thể được tách thành nhiều đoạn (chuỗi) nhằm đảm bảo kết quả tối ưu là chính xác và ổn định. Mô hình TCP-3DF đã cung cấp những đóng góp chính như sau:

- Cung cấp mô hình TCP-3DF cho MCD trong các mạng IoT có hỗ trợ UAV. Khi đó, UAV bay theo đường bay gần như ngắn nhất để phục vụ được nhiều IDU hơn với tổng tốc độ truyền tối đa và thời gian phục vụ phù hợp. Đồng thời, phương pháp này mang lại lợi ích cho các nhà cung cấp dịch vụ Internet ISP và các nhà cung cấp nội dung CP thông qua việc sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ, công suất và cơ sở hạ tầng sẵn có.

- Mô hình TCP-3DF áp dụng nhiều kỹ thuật SDE khác nhau bao gồm lưu trữ tại UAV, phân bổ công suất truyền và bay, truyền điểm – đa điểm và quỹ đạo 3DF. Các

khía cạnh thực tế của nội dung đa phương tiện, các tính năng IDU, liên kết U2C, đặc điểm của môi trường truyền không dây, tài nguyên lưu trữ và công suất, và thời gian phục vụ cần thiết được xem xét để xây dựng một bài toán tối ưu TCP-3DF đa mục tiêu có ràng buộc. So với các mô hình đối sánh khác, mô hình TCP-3DF đạt được hiệu suất tối ưu cao nhất về mặt tổng tốc độ phân phối dữ liệu, thời gian phục vụ, sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ và công suất, và khoảng cách bay. Cần lưu ý rằng bằng cách phân bổ công suất bay và truyền, giải pháp có thể kiểm soát cả thời gian bay và thời gian truyền của UAV để đáp ứng thời gian phục vụ theo yêu cầu.

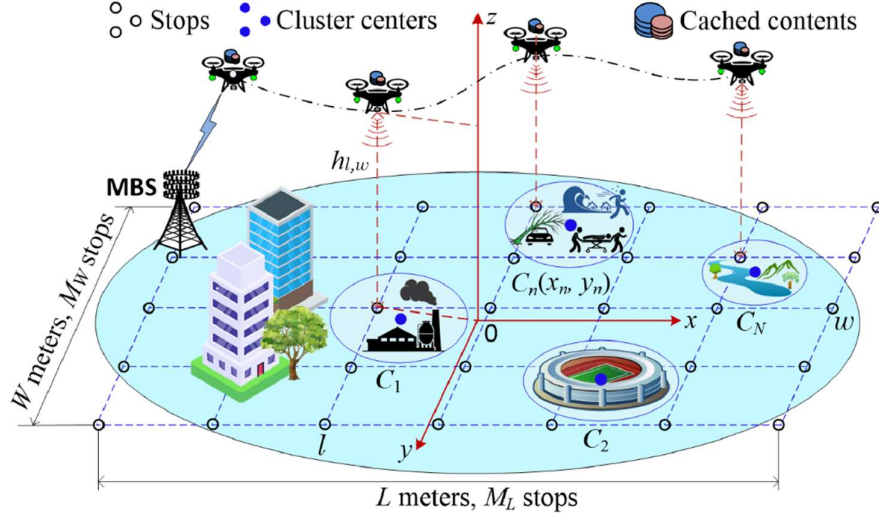
- Thuật toán GA có sửa đổi nhằm đảm bảo hoạt động tốt với nhiều loại biến tối ưu (optimization variables – OV) và các ràng buộc phức tạp của bài toán tối ưu TCP-3DF. Đặc biệt, bài toán tối ưu hóa TCP-3DF có 03 loại gồm 06 OV: 1) loại biến nhị phân để lưu trữ đệm và chỉ mục dừng trong lưới bay hình chữ nhật (rectangular flight grid – RFG) hai chiều theo mặt phẳng ngang, 2) loại biến thực cho công suất truyền, công suất bay và độ cao, và 3) loại biến số nguyên cho chuỗi dừng. Vì mỗi loại (hoặc OV) có thể yêu cầu các toán tử lai và đột biến khác nhau, nên NCS chia nhỏ chuỗi gốc của một cá thể thành các chuỗi con, mỗi chuỗi đại diện cho một loại OV hoặc một OV để làm cho GA hội tụ chính xác và ổn định với các cá thể tốt nhất ở thế hệ cuối cùng. Để giải quyết các ràng buộc phức tạp, tức là không chỉ dưới dạng giới hạn dưới và giới hạn trên, NCS áp dụng hàm phạt để chuyển đổi bài toán tối ưu có ràng buộc thành bài toán không ràng buộc mà GA có thể giải quyết khả thi.

- Kết quả mô phỏng chứng minh tính khả thi của GA với chuỗi nhiễm sắc thể được tách thành nhiều đoạn (GA with truncated string – GTS) và lợi ích của mô hình TCP-3DF so với các phương pháp truyền thống khác. Các phân tích và thảo luận chi tiết về kết quả mô phỏng cung cấp những hiểu biết giá trị cho việc thiết kế các kỹ thuật SDE sử dụng UAV trong phân phối MCD trong mạng IoT.

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

Trong chương này, NCS đề xuất một hệ thống phân phối MCD hỗ trợ bởi UAV trong mạng IoT với mô hình TCP-3DF như thể hiện trong Hình 2-1. Hệ thống bao gồm một MBS, một UAV, N cụm và I nội dung, trong một khu vực hình tròn có bán kính R . Cụm n , $n = 1, 2, \dots, N$, có một số IDU phân bố theo mật độ ρ_n . Nội dung i , $i = 1, 2, \dots, I$, có kích thước là s_i (Mbit) với mức độ phổ biến là p_i . Các kênh giữa MBS

và IDU không đủ tin cậy để truyền dữ liệu do có các chướng ngại vật ở giữa, nhưng chúng có thể được sử dụng đủ để thu thập thông tin cần thiết từ IDU để xây dựng và giải bài toán tối ưu TCP-3DF. Trạm gốc MBS điều khiển UAV để lưu trữ các nội dung được yêu cầu, bay và phân phối chúng đến các IDU thông qua liên kết U2C có độ tin cậy cao hơn. Các ký hiệu chính được sử dụng để xây dựng hệ thống được liệt kê trong Bảng 1-2 và Bảng 2-1.



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

Để dễ dàng cho việc đánh giá các quỹ đạo bay, NCS triển khai một lưới bay RFG của $M_W \times M_L$ điểm dừng với tọa độ ngang (x_l, y_w) ở độ cao $h_{l,w}$, được định nghĩa là $o_{l,w} = (x_l, y_w, h_{l,w})$, $l = 1, 2, \dots, M_L$ và $w = 1, 2, \dots, M_W$ [83]. UAV bay đến dừng tại $o_{l,w}$ và phân phối dữ liệu được lưu trữ trước đó. Giả thiết này tuy có nhược điểm là làm mất tính tập trung khi phục vụ các IDU trong từng cụm (bị lệch ra khỏi tâm cụm C_n), nhưng cũng mang lại những ưu điểm như: dễ dàng triển khai và đánh giá quỹ đạo bay, quản lý các nút dừng (cho phép hoặc không cho phép dừng ở những nút trong lưới tùy vào địa hình phức tạp khác nhau ở từng cụm). Tìm một tập hợp các tọa độ trong không gian 3D là $o_{l,w}$ để xác định nơi dừng $f_{l,w}$ trong lưới bay RFG ở độ cao $h_{l,w}$. Trong đó, $f_{l,w} \in \{0, 1\}$ là chỉ số dừng để quyết định rằng UAV dừng tại (x_l, y_w) nếu $f_{l,w} = 1$, ngược lại thì $f_{l,w} = 0$. Khi MBS dự đoán rằng có một lượng lớn nội dung được yêu cầu bởi các IDU trong giờ cao điểm, tại các điểm nóng tập trung đông đúc, sự kiện quan trọng, khu vực ngoài vùng phủ sóng cung cấp dịch vụ và các tình huống khẩn cấp [37], [90], [140], hệ thống sẽ thực hiện 03 giai đoạn như mô tả dưới đây:

- **Giai đoạn chuẩn bị:** MBS thu thập thông tin của IDU và nhóm thành N cụm

[85]. Cụm n có M_n IDU phân bố theo mật độ ρ_n trong một vùng hình tròn bán kính R_n . Những IDU trong một cụm, có mối quan hệ vật lý và xã hội chặt chẽ, có cùng sở thích về nội dung để chia sẻ, hướng dẫn, thực hiện, hoàn thành nhiệm vụ và thậm chí là giải trí cùng nhau. Sau đó, MBS xây dựng và giải bài toán tối ưu TCP-3DF để có kết quả lưu trữ c_i tối ưu; công suất truyền P_i cho nội dung i và công suất bay P_{n_T} cho chặng n_T , $n_T = 1, 2, \dots, N_T$; và các vị trí dừng $f_{l,w}$ bao gồm N_T điểm dừng, ở độ cao $h_{l,w}$ theo trình tự dừng T cho quỹ đạo bay 3DF.

- **Giai đoạn triển khai:** Dựa trên kết quả tối ưu, UAV lưu trữ nội dung phù hợp, bay đến đúng điểm dừng tại tọa độ tối ưu và truyền nội dung với công suất truyền tối ưu. UAV cũng di chuyển qua các chặng với công suất bay (vận tốc bay) tối ưu và theo trình tự điểm dừng tối ưu.
- **Giai đoạn chờ:** Tại điểm dừng cuối cùng, sau khi hoàn tất truyền tải các nội dung, UAV sẽ dừng lại trong một thời gian ngắn để tiếp nhận nhiệm vụ tiếp theo từ MBS nếu có. Cuối cùng, UAV bay đến trạm sạc gần đó và chuyển sang chế độ chờ.

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

Ký hiệu	Ý nghĩa của ký hiệu
N	Số lượng cụm
I	Số lượng nội dung
R	Bán kính vùng phủ triển khai
B	Bảng thông hệ thống
σ^2	Công suất nhiễu trắng Gaussian
N_i	Số lượng cụm yêu cầu nội dung i , $i = 1, 2, \dots, I$
ρ_n	Mật độ IDU ở cụm n , $n = 1, 2, \dots, N$
M_n	Số lượng IDU ở cụm n có bán kính R_n
M_L	Chiều dài của M_L điểm dừng trong lưới bay RFG
M_W	Chiều rộng của M_W điểm dừng 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, $f_{l,w} \in \{0, 1\}$, dùng để xác định UAV có dừng tại vị trí (x_l, y_w) hay không.
$M_{l,w,n}$	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	Kích cỡ của nội dung thứ i
p_i	Mức độ phổ biến của nội dung thứ i
α	Hệ số mũ độ lệch độ phổ biến giữa các nội dung
$q_{n,i}$	Chỉ số yêu cầu $q_{n,i} \in \{0, 1\}$: xác định các IDU trong cụm n có yêu cầu nội dung i hay không.
c_i	Chỉ số lưu trữ của UAV, $c_i \in \{0, 1\}$, dùng để xác định UAV có lưu trữ nội dung i hay không.
$a_{n,i}$	Chỉ số liên kết U2C ($a_{n,i} \in \{0, 1\}$)
$N_{\mathcal{T}}$	Số lượng điểm dừng trong chuỗi dừng $\mathcal{T}$, với $N_{\mathcal{T}} \leq N$
$v_{n_{\mathcal{T}}}$	Vận tốc của UAV trên chặng $n_{\mathcal{T}}$, $n_{\mathcal{T}} = 1, 2, \dots, N_{\mathcal{T}}$
$P_{n_{\mathcal{T}}}$	Công suất của UAV được sử dụng để bay qua chặng $n_{\mathcal{T}}$
P_i	Công suất của UAV được sử dụng để truyền nội dung i
P_s	Công suất sử dụng khi đứng yên của UAV

Cần lưu ý rằng trong hệ thống này, để nâng cao hiệu năng của cơ chế có xét đến thời gian phục vụ, NCS xem xét đến tốc độ bay tương ứng đến mức tiêu thụ công suất bay được tính toán dựa trên điện áp và dòng điện chạy qua động cơ điện của UAV [104]. Điều này có nghĩa là có thể điều khiển tốc độ của UAV tại các chặng bay khác nhau để đáp ứng yêu cầu về thời gian phục vụ bằng cách điều chỉnh công suất bay. Thực tế hơn, NCS còn khai thác các đặc điểm đa dạng của môi trường truyền sóng vô tuyến cho các liên kết U2C khác nhau. Cách tiếp cận này thúc đẩy UAV bay theo quỹ đạo 3DF tối ưu và phục vụ các IDU một cách hiệu quả hơn.

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

Ngoài các thông số về độ phổ biến của nội dung p_i theo (1.1), hay các chỉ số yêu cầu $q_{n,i}$, chỉ số lưu trữ c_i và chỉ mục liên kết U2C $a_{n,i}$ theo (1.4) như đề cập tổng quát

trong Chương 1, mô hình TCP-3DF còn được xác lập từ các thông số và công thức tính toán được trình bày như sau.

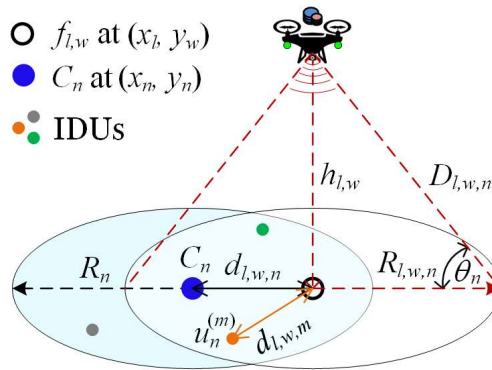
2.3.1. Phạm vi phủ sóng của UAV

Trong cụm n là khu vực hình tròn có bán kính R_n và tâm C_n tại tọa độ (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 thể hiện trong 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 được xác định theo công thức:

$$M_{l,w,n} = \lfloor \rho_n A_{l,w,n} \rfloor \quad (2.1)$$

trong đó, $A_{l,w,n}$ là diện tích giao nhau của hai đường tròn có bán kính R_n và $R_{l,w,n}$. Thực tế, 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 $u_n^{(m)} = (x_n^{(m)}, y_n^{(m)})$. Vì vậy, biểu thức (2.1) được tính bằng cách kiểm tra các điều kiện khoảng cách của toàn bộ M_n IDU trong cụm n . Để đảm bảo chất lượng QoS của các liên kết U2C từ UAV đến IDU thuộc tập $A_{l,w,n}$, NCS xét đến vùng phủ sóng của UAV, được định nghĩa là một khu vực hình tròn có bán kính $R_{l,w,n}$ tương ứng với độ cao $h_{l,w}$ và góc ngả θ_n [102], được biểu diễn như sau:

$$R_{l,w,n} = \frac{h_{l,w}}{\tan(\theta_n)} \quad (2.2)$$



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

Để thực hiện các tính toán liên quan đến phạm vi phủ sóng, mỗi cụm IDU n được đặt vào một môi trường truyền sóng cụ thể (được chọn ngẫu nhiên từ các khu vực: ngoại ô, đô thị, đô thị đông đúc, hoặc đô thị cao tầng). Cụm IDU n sẽ được phân bố với mật độ ρ_n tại các vị trí ngẫu nhiên trong một vùng có bán kính khảo sát R_n . Sau

đó, với một góc nâng θ_n tối ưu của UAV cho từng môi trường của cụm n , một bán kính vùng phủ $R_{l,w,n}$ của UAV sẽ được xác định tương ứng với độ cao $h_{l,w}$ và nút lưới $f_{l,w}$ tối ưu. Từ bán kính vùng phủ $R_{l,w,n}$ này (2.2), số lượng IDU thông qua công thức (2.1) sẽ được xác định cùng với vị trí của chúng dựa vào phân diện tích giao nhau với vùng có bán kính khảo sát R_n cho trước (Hình 2-2).

2.3.2. Kênh không-đối-đất (A2G)

Trong hệ thống này, kênh truyền A2G được xem xét là kênh từ UAV tại vị trí $o_{l,w}$ đến các IDU để phân phối dữ liệu. Áp dụng mô hình suy hao đường truyền theo xác suất, vốn được sử dụng rộng rãi cho kênh A2G [105], [142], [143], [144]. Mô hình này bao gồm các liên kết có đường truyền thẳng LoS và đường truyền bị che chắn NLoS. Suy hao đường truyền của các liên kết LoS và NLoS giữa UAV và IDU m trong cụm n được xác định như sau:

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

trong đó 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 kênh truyền NLoS, và khoảng cách từ UAV đến IDU m trong cụm n được xác định bởi:

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

Bằng cách xem xét thêm các xác suất xảy ra của kênh truyền LoS ($P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)}$) và của kênh truyền NLoS ($P_{l,w,n}^{\text{NLoS},(m)} = 1 - P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)}$), có thể suy ra mức suy hao đường truyền trung bình như sau:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{l,w,n}^{(m)} &= \psi_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)} P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)} + \psi_{l,w,n}^{\text{NLoS},(m)} P_{l,w,n}^{\text{NLoS},(m)} \\ &= L_{l,w,n}^{(m)} [\eta_n^{\text{LoS}} P_{l,w,n}^{\text{LoS},(m)} + \eta_n^{\text{NLoS}} P_{l,w,n}^{\text{NLoS},(m)}] \end{aligned} \quad (2.5)$$

trong đó, $L_{l,w,n}^{(m)} = \left(\frac{4\pi f_c d(o_{l,w}, u_n^{(m)})}{c} \right)^2$ và xác suất xuất hiện đường truyền LoS được xác định theo công thức:

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

trong đó, κ_n và ν_n là hằng số tương ứng với môi trường của cụm n [103] và $\xi_{l,w,n}^{(m)} =$

$$\frac{180}{\pi} \arctan \left(\frac{h_{l,w}}{\sqrt{(x_n^{(m)} - x_l)^2 + (y_n^{(m)} - y_w)^2}} \right).$$

2.3.3. Tốc độ truyền dữ liệu trung bình

Giả định rằng UAV, được xem như một người dùng di động thông thường, được phân bổ một tài nguyên phổ đường xuống (downlink) để truyền dữ liệu. Trong điều kiện không có nhiễu, tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR của kênh truyền nội dung i từ UAV tại vị trí $o_{l,w}$ đến IDU m trong cụm n tại vị trí $u_n^{(m)}$ được xác định bởi công thức theo [105] như sau:

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

trong đó P_i là công suất truyền dữ liệu của UAV được tiêu thụ để phân phối nội dung i . Từ (2.7), xác định được tốc độ phân phối nội dung tương ứng theo công thức:

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

với B là băng thông hệ thống.

Cuối cùng, tổng tốc độ phân phối dữ liệu trung bình điểm – đa điểm từ UAV đến tất cả các IDU trong mỗi cụm, cũng là hàm mục tiêu đầu tiên của bài toán tối ưu TCP-3DF, được xác định bởi công thức:

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

trong đó $f_{l,w} \in \{0, 1\}$ là chỉ số dừng được sử dụng để chỉ ra rằng UAV dừng tại (x_l, y_w) nếu $f_{l,w} = 1$, còn ngược lại thì $f_{l,w} = 0$. Vì vậy, số lần dừng được biểu thị là:

$$N_{\mathcal{T}} = \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} f_{l,w} \quad (2.10)$$

Nhằm mục đích giảm độ phức tạp của hàm mục tiêu (2.9) nhưng không mất tính tổng quát, NCS xem xét trường hợp xấu nhất của giá trị tổng tốc độ phân phối dữ liệu đo được tại tất cả các IDU trong $A_{l,w,n}$ trên khoảng cách truyền dài nhất là

$$d(o_{l,w}, u_n^{(m)}) = D_{l,w,n} = \sqrt{(R_{l,w,n})^2 + (h_{l,w})^2}, \text{ được thể hiện trong Hình 2-2.}$$

Tốc độ phân phối dữ liệu trong trường hợp xấu nhất khi đó được xác định bởi công thức:

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

Do đó, công thức (2.9) được rút gọn lại như sau:

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

2.3.4. Khoảng cách bay

Khoảng cách bay của UAV, là hàm mục tiêu thứ 2 của bài toán tối ưu TCP-3DF, được tính toán đơn giản như sau:

$$d_{\mathcal{T}} = \sum_{n_{\mathcal{T}}=1}^{N_{\mathcal{T}}} d_{n_{\mathcal{T}}} \quad (2.13)$$

trong đó, $d_{n_{\mathcal{T}}}$ là khoảng cách từ điểm dừng $(n_{\mathcal{T}} - 1)$ đến điểm dừng $n_{\mathcal{T}}$ trong chu trình bay $\mathcal{T}$, gọi là $d(\mathcal{T}_{n_{\mathcal{T}}-1}, \mathcal{T}_{n_{\mathcal{T}}})$, với $\mathcal{T}_0$ biểu diễn vị trí ban đầu của UAV.

2.3.5. Thời gian phục vụ trung bình

Thời gian phục vụ được định nghĩa là tổng thời gian chờ để mỗi cụm được UAV hoàn tất phục vụ, bao gồm thời gian bay và thời gian truyền. Đầu tiên, thời gian bay qua chặng $n_{\mathcal{T}}$, được xác định bởi công thức:

$$t_{n_{\mathcal{T}}} = \frac{d_{n_{\mathcal{T}}}}{v_{n_{\mathcal{T}}}} \quad (2.14)$$

trong đó, $v_{n_{\mathcal{T}}}$ là tốc độ của UAV qua chặng bay $n_{\mathcal{T}}$ trong quỹ đạo $\mathcal{T}$.

Tiếp theo, thời gian truyền (hoặc dừng) tại $o_{l,w}$ để truyền nội dung i đến các IDU trong cụm n được thể hiện như sau:

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

Trong công thức (2.15), các IDU trong cùng một cụm đều nhận dữ liệu đến trong trường hợp xấu nhất của tốc độ phân phối dữ liệu (với khoảng cách truyền dài nhất), vì vậy công thức này không phụ thuộc vào vị trí của IDU trong cụm n . Ngoài ra, phương thức truyền điểm-đa điểm (multicast) được áp dụng để tận dụng đặc trưng của các IDU có chung mối quan tâm về nội dung (hoặc loại dữ liệu) trong cùng một cụm. Do đó, dữ liệu được truyền một lần cho tất cả các IDU mà không phụ thuộc vào số lượng IDU trong cụm.

Vì vậy, tổng thời gian truyền (T_s) và thời gian phục vụ trung bình trên mỗi cụm ($\bar{T}$) lần lượt được xác định bởi các công thức:

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

và:

$$\begin{aligned} \bar{T} = & \frac{1}{N} \left[\sum_{n_T=1}^{N_T} (N_T - n_T + 1) t_{n_T} \right. \\ & \left. + \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} \sum_{n=1}^{N-1} \sum_{i=1}^I (N - n) t_{l,w,n}^{(i)} \right] \end{aligned} \quad (2.17)$$

Công thức (2.17) gồm hai thành phần: thành phần thời gian chờ cho việc bay và thành phần thời gian chờ cho việc truyền để được phục vụ. Cả hai thành phần này được cộng dồn theo từng chặng và từng cụm, sau đó được tính trung bình theo số cụm N . Công thức này sẽ được đưa vào ràng buộc của bài toán tối ưu TCP-3DF để đáp ứng yêu cầu về thời gian phục vụ tùy theo từng ứng dụng và dịch vụ khác nhau.

2.3.6. Mức sử dụng dung lượng lưu trữ

Để đảm bảo hiệu quả lưu trữ, mức tiêu thụ dung lượng lưu trữ không chỉ phụ thuộc vào kích thước nội dung s_i mà còn phụ thuộc vào chỉ mục lưu trữ c_i và chỉ mục yêu cầu $q_{n,i}$ được biểu thị bởi liên kết U2C (1.4), được tính theo công thức sau:

$$S_C = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I a_{n,i} s_i \quad (2.18)$$

2.3.7. Mức tiêu thụ công suất

Tiêu thụ công suất của UAV được sử dụng cho truyền, dừng và bay. Vì công suất dừng P_S tại các điểm là giống nhau, nghĩa là không có tối ưu hóa tại tất cả các điểm dừng, nên chỉ xem xét công suất truyền P_i và công suất bay P_{n_T} được phân bổ cho nội dung i và chặng bay n_T tương ứng. Với I nội dung và N_T điểm dừng, tổng công suất truyền (P_T) và tổng công suất bay (P_F) được xác định bởi công thức:

$$P_T = \sum_{i=1}^I P_i \quad (2.19)$$

và:

$$P_F = \sum_{n_T=1}^{N_T} P_{n_T} \quad (2.20)$$

trong đó, P_{n_T} là công suất bay của UAV có 4-rotor tại vận tốc v_{n_T} được tính theo công

thức (1.7) trong Chương 1.

Tổng công suất truyền và tổng công suất bay được giới hạn trong bài toán tối ưu TCP-3DF để việc phân bổ công suất được tối ưu và tài nguyên công suất được sử dụng hiệu quả. Việc phân bổ tối ưu công suất truyền trên từng điểm dừng và công suất bay trên từng chặng sẽ điều khiển tối ưu thời gian truyền $t_{l,w,n}^{(i)}$ và tốc độ bay (hoặc thời gian bay t_{n_T}) để giảm thiểu $\bar{T}$ (2.17), nhằm hướng đến thoả mãn ràng buộc về thời gian phục vụ. Nghĩa là, để giảm thiểu $\bar{T}$, công suất phát trên từng điểm dừng và công suất bay trên từng chặng phải được phân bổ sao cho $t_{l,w,n}^{(i)}$ và t_{n_T} được phân bổ tỷ lệ nghịch với $(N - n)$ và $(N_T - n_T + 1)$ tương ứng, đồng thời thoả mãn ràng buộc về tổng công suất cho trước.

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 tìm cách tối ưu 1) tập hợp nội dung sẽ được lưu trữ trong UAV (được biểu diễn qua biến tối ưu c_i); 2) công suất truyền cho nội dung i (P_i) và công suất bay qua chặng n_T (P_{n_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 $\bar{C}$, bay qua N_T điểm dừng với đường bay ngắn nhất STP (shortest path), đồng thời thoả 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, phân bổ công suất bay và vị trí điểm dừng ở độ cao nào để đạt giá trị $\bar{C}$ cực đại, đồng thời thoả mãn điều kiện về thời gian phục vụ (thời gian bay và thời gian truyền dữ liệu); và 2) Bài toán tối ưu STP: xác định chuỗi dừng tối ưu để đạt đường bay ngắn nhất, được trình bày chi tiết trong phần tiếp theo.

2.4.1.1. Bài toán tối ưu CPS

Bài toán tối ưu hóa CPS được mô hình như sau:

$$\max \bar{C} \quad (2.21a)$$

$$c_i, f_{l,w}, P_i, P_{n_T}, h_{l,w}$$

$$\text{s.t.} \quad N_T \leq N \quad (2.21b)$$

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

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

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

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

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

$$P_{FL} \leq P_{n_T} \leq P_{FU} \quad (2.21h)$$

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

trong đó: (2.21b) là để đảm bảo rằng số điểm dừng không thể lớn hơn số cụm; P_{TL} và P_{TU} (2.21g), P_{FL} và P_{FU} (2.21h), H_{FL} và H_{FU} (2.21i) lần lượt là giới hạn dưới và giới hạn trên của công suất truyền, công suất bay và độ cao của UAV, $i = 1, 2, \dots, I$; $l = 1, 2, \dots, M_L$; $w = 1, 2, \dots, M_W$ và $n_T = 1, 2, \dots, N_T$.

2.4.1.2. Bài toán tối ưu STP

Với $f_{l,w}$ và N_T tìm được bằng cách giải phương trình (2.21a), bài toán tối ưu hóa STP, được xây dựng giúp xác định trình tự dừng tối ưu $\mathcal{T}$ để tối thiểu hóa khoảng cách bay, được biểu thị như sau:

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

Giải (2.22) tương đương với việc tìm $\mathcal{T}$ tốt nhất trong không gian tìm kiếm của $N_T!$ các hoán vị của $\mathcal{T}_s = \{1, 2, \dots, N_T\}$ làm tối thiểu hóa khoảng cách bay $d_{\mathcal{T}}$. Ví dụ, nếu $N_T = 3$ và $\mathcal{T} = \{\mathcal{T}_1, \mathcal{T}_2, \mathcal{T}_3\} = \{2, 1, 3\}$ là giải pháp tốt nhất được chọn từ 6 hoán vị của $\mathcal{T}_s = \{1, 2, 3\}$, UAV sẽ bay theo trình tự đến các điểm dừng 2, 1 và 3.

2.4.2. Giải bài toán TCP-3DF bằng GA

Bài toán TCP-3DF có độ phức tạp cao khi đồng thời xét đến 06 biến tối ưu thuộc 03 kiểu biến khác nhau (nhị phân, nguyên và thực), cùng nhiều ràng buộc và thành phần phi tuyến. Những đặc điểm này phù hợp với khả năng tìm kiếm hiệu quả của GA trên các không gian nghiệm lớn và phức tạp. Do vậy, trong chương này, NCS áp dụng thuật toán GA [145] để giải bài toán tối ưu TCP-3DF. Tuy nhiên, đối với bài toán tối ưu CPS (2.21a), GA được thiết kế phù hợp cho các ràng buộc đơn giản như (2.21g), (2.21h) và (2.21i). Với các ràng buộc phức tạp khác, tức là (2.21b), (2.21c), (2.21d), (2.21e) và (2.21f), NCS sẽ áp dụng hàm phạt [124], khi đó sẽ phải viết lại các ràng buộc phức tạp này như sau:

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

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

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

với $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ và λ_5 là các mức độ vi phạm ràng buộc được lựa chọn hợp lý để trừng phạt các cá thể trong thế hệ hiện tại nếu chúng vi phạm các ràng buộc.

Kết quả là, GA có thể được sử dụng để giải bài toán tối ưu CPS không ràng buộc được đưa ra bởi công thức:

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

Đối với bài toán tối ưu STP, để giải bài toán này bằng GA, NCS 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 $\mathcal{T}_{n_T}$ trong quá trình tìm kiếm chuỗi dừng $\mathcal{T}$. Điểm dừng không hợp lệ xảy ra vì GA tạo ra một số cá thể ngẫu nhiên, tức là các chuỗi dừng ngẫu nhiên, để tạo ra quần thể ban đầu. Trong một chuỗi dừng ngẫu nhiên, ví dụ, $\mathcal{T} = \{2, 2, 3\}$, điều kiện cho $\mathcal{T}_{n_T} \neq \mathcal{T}_{m_T}, n_T \neq m_T$, không thể được coi là hợp lệ. Khoảng cách bay với hình phạt từ $\mathcal{T}_{n_T-1}$ đến $\mathcal{T}_{n_T}$ được xác định theo công thức:

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

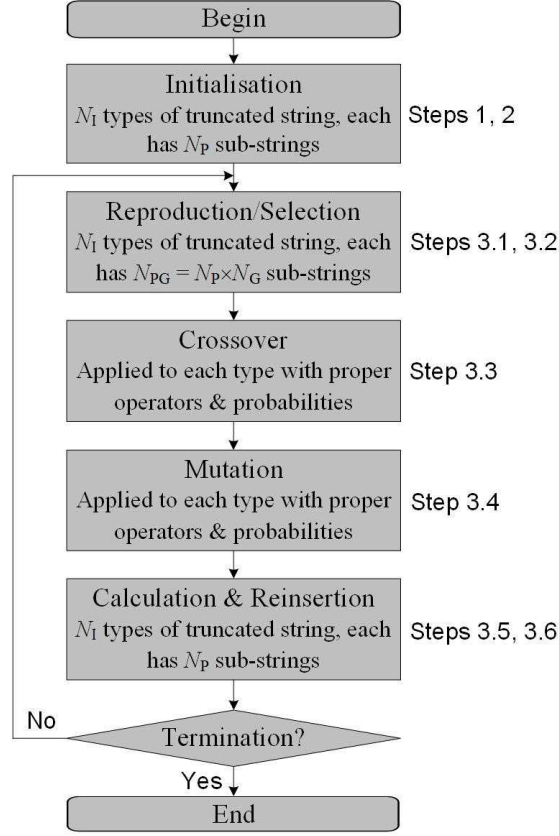
trong đó $\mathcal{T}_s = \{1, 2, \dots, N_T\}$ là tập hợp các điểm dừng hợp lệ và $\mathcal{T}_s = \mathcal{T} \setminus \mathcal{T}_{n_T}$ được áp dụng để đảm bảo rằng sau khi bay đến một điểm dừng hợp lệ, điểm dừng này được xóa khỏi $\mathcal{T}_s$. Để xác nhận quá trình trừng phạt, NCS thêm một lượng hình phạt βd_p vào (2.22) để công thức của bài toán STP được viết lại thành:

$$\min_{\mathcal{T}} (d_{\mathcal{T}} + \beta d_p) \quad (2.27)$$

trong đó $\beta > 0$ là mức độ vi phạm, còn d_p có giá trị ban đầu bằng 0, sau đó tăng thêm 1 bất cứ khi nào xảy ra điểm dừng không hợp lệ. Theo cách này, chúng ta có thể quan sát thấy $d_{\mathcal{T}}$ đạt được giá trị tối thiểu nếu $d_p = 0$.

Đến đây, bài toán tối ưu hóa TCP-3DF được giải bằng cách kết hợp các bài toán tối ưu CPS (2.25) và STP (2.27) thành bài toán tổng hợp như sau:

$$\max_{c_i, f_{l,w}, p_i, p_{n_T}, h_{l,w}, T} \bar{C}_F = \bar{C} - \gamma(F + d_T + \beta d_p) \quad (2.28)$$



Hình 2-3. Lưu đồ thuật toán GTS

Trong hàm thích nghi (2.28), γ được sử dụng để cân bằng giữa $\bar{C}$ và $(F + d_T + \beta d_p)$ sao cho $\bar{C}_F$ đạt tối đa và d_T đạt tối thiểu, đồng thời đảm bảo F và d_p tiến về 0 nhằm thỏa mãn các ràng buộc của bài toán tối ưu. Nếu γ quá nhỏ, quá trình tối ưu có xu hướng ưu tiên quá mức việc cực đại $\bar{C}$, dẫn đến không quan tâm đến quỹ đạo bay tối ưu của UAV (cũng như các sai phạm về ràng buộc). Ngược lại, khi γ quá lớn, thuật toán sẽ khiến cho UAV bay đến ít điểm dừng hơn, làm suy giảm đáng kể $\bar{C}$. Như vậy, các hệ số γ cũng như $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ và λ_5 trong (2.24) và β trong (2.27) phải được lựa chọn cẩn thận thông qua quá trình điều chỉnh tham số dựa trên thực nghiệm. Các hệ số này ngoài vai trò được dùng để cân bằng trọng số nhằm đạt được kết quả tối ưu thỏa điều kiện ràng buộc, còn đóng vai trò như các hệ số hiệu chỉnh thứ nguyên và thang đo giữa các đại lượng không đồng nhất.

Tuy nhiên, việc giải bài toán này bằng GA lại gặp phải thách thức về một chuỗi

những 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 T). Điều này đòi hỏi một quy mô quần thể đủ lớn để đảm bảo GA hội tụ chính xác và ổn định. Hơn nữa, mỗi OV có các đặc điểm riêng liên quan đến các toán tử lai và đột biến cùng với các xác suất cụ thể tương ứng. Vì vậy, thay vì sử dụng các chuỗi dài cho các toán tử lai và đột biến chung, 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). Sơ đồ tổng quan của thuật toán GTS được mô tả trong Hình 2-3 tương ứng với các bước chi tiết trong Thuật toán 2.1, với N_I là số loại cá thể. GTS kết thúc khi đáp ứng một trong các điều kiện sau (TC):

1) Sai số của $\bar{C}_F$ giữa hai thế hệ ($Gen - 1$ và Gen) và giá trị trung bình của tổng hình phạt ($F + \beta d_p$) nhỏ hơn 10^{-3} trong 10 thế hệ liên tiếp.

2) $Gen = N_G$, tức là 100 thế hệ.

2.4.3. Độ phức tạp của GA cho bài toán TCP-3DF

Về cơ bản, độ phức tạp tính toán của Thuật toán 2.1 là $\mathcal{O}(N_P N_G)$ [131], [125]. Khi có xem xét đến chi phí tính toán hàm thích nghi (C_O) và bỏ qua chi phí cho các toán tử lựa chọn, lai ghép và đột biến, độ phức tạp tính toán của Thuật toán 2.1 sẽ là $\mathcal{O}(N_P N_G C_O)$. Tương tự như các thuật toán tìm kiếm theo phương pháp heuristic thích nghi khác, độ phức tạp của Thuật toán 2.1 phụ thuộc trực tiếp vào không gian tìm kiếm hay số cá thể trong quần thể (N_P) và số lần lặp hay số thế hệ tiến hóa (N_G). Độ phức tạp của Thuật toán 2.1 cũng ảnh hưởng bởi chi phí tính toán hàm thích nghi và các toán tử lựa chọn, lai ghép và đột biến. Trong đó, chi phí tính toán hàm thích nghi (C_O) phụ thuộc chủ yếu vào kích thước của mạng được xem xét, ví dụ như số cụm (N), số nội dung (I), số điểm lưới ($M_L \times M_W$), khiến cho nó có độ phức tạp cao hơn rất nhiều so với các toán tử lựa chọn, lai ghép và đột biến. Số IDU/cụm không tạo thêm độ phức tạp của Thuật toán 2.1 vì trong quá trình phân tích tính toán đã đơn giản biểu thức tính tổng theo số IDU từ công thức (2.9) thành trường hợp xấu nhất và được thay bằng phép nhân với số IDU theo công thức (2.12).

Việc tìm ra các giá trị thích hợp của N_P và N_G dựa trên 1) độ phức tạp của bài toán tối ưu hóa TCP-3DF, tức là độ phức tạp của hàm thích nghi (2.28) được định nghĩa là các hàm đa mục tiêu (2.21a) và (2.27), hàm phạt (2.24) và các OV cần được xử lý và 2) độ chính xác mà các A&S yêu cầu. Khi triển khai thực tế, GA được dùng ở giai

đoạn chuẩn bị như được trình bày trong mục 2.2 theo cơ chế offline/semi-online tùy vào đặc tính thống kê của hệ thống cũng như các A&S khác nhau. Bước chuẩn bị được thực hiện khi có nhu cầu hoặc cập nhật theo chu kỳ để sẵn sàng triển khai. GA thực hiện ở giai đoạn chuẩn bị là phù hợp với các đặc tính thống kê biến đổi chậm như độ phổ biến của nội dung thay đổi theo giờ (hourly pattern). Ngoài ra, mặc dù kênh truyền và sự di chuyển của các IDU có đặc tính thay đổi nhanh, nhưng khi xét trong từng cụm thuộc một khu vực có diện tích giới hạn sẽ có sự ổn định cao. Và như vậy, các kết quả tối ưu không trở nên “lỗi thời” khi triển khai. Điều này cho phép việc thiết kế thời gian thực tập trung đảm bảo ở giai đoạn triển khai các kết quả tối ưu.

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

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

$Gen = 1$: đếm số thế hệ

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

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 cả 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 một 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 $\mathcal{T}$.

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 (binary-to-real) theo tài liệu tham khảo [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 $T_{n_T} \in \mathcal{T}_s$.

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: Trong khi điều kiện dừng (TC) chưa được thỏa mãn, 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 ra $N_{PG} = N_P \times P_G$ cá thể tốt nhất có giá trị fitness cao hơn để làm cha mẹ bằng cách lấy mẫu phổ quát ngẫu nhiên (stochastic universal sampling) [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 (offsprings) 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 (mutation) 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 thế 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:

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

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 ($\kappa_n, \nu_n, \eta_n^{\text{LOS}}, \eta_n^{\text{NLOS}}, \theta_n$) 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) như trong Bảng 2-3. NCS đánh giá hiệu suất của mô hình TCP-3DF bằng cách so sánh với các cơ chế khác bao gồm 1) chiến lược bay có xét đến thời gian dịch vụ (TFS) với tối ưu kết hợp giữa lưu trữ, nơi dừng và độ cao (TFS-CSA) [87], 2) TFS với tối ưu kết hợp giữa lưu trữ và nơi dừng (TFS-C&S) [82], 3) TFS với chỉ có tối ưu lưu trữ (TFS-OOC) và 4) TFS không có bất kỳ tối ưu nào (TFS-NUL), như thể hiện trong Bảng 2-4.

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

Ký hiệu	Giá trị
N, I	10 cụm, 10 nội dung
$M_W \times M_L$	3×4 điểm dừng, phân bố trong một khu vực hình tròn bán kính $R = 100$ m
B, f_c	10 MHz, 2 GHz
σ^2, c, α	10^{-13} W, 3×10^8 m/s, 1
I_0, R_0, U_0	0.3 A, 0.4 Ω , 10 V
K_v, m, g	380 rpm/V, 3 Kg, 9.8 m/s ²
C_m, C_d, C_t	8.89×10^{-7} Nm/(rad/s) ² , 0.11 N/(m/s) ² , 4.85×10^{-5} N/(rad/s) ²
P_S	250 W
P_{TL}, P_{TU}	100 mW, 5000 mW
P_{FL}, P_{FU}	300 W, 2000 W
H_{FL}, H_{FU}	50 m, 150 m
T^*, S_C^*	50 s, 1 Gbits
N_P	5000 cá thể, tức là quy mô cá thể trong thuật toán GA
N_G	100 thế hệ
N_I	5 loại cá thể

P_G	0.9, khoảng cách thế hệ
$PRECI$	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
$d_{\max}, \gamma, \beta$	200 m, 1.25, 10
$\lambda_{1,2,3,4,5}^a$	1, 1, 0.001, 0.2, 0.01

^aPhương pháp để lựa chọn các giá trị thích hợp của $\lambda_{1,2,3,4,5}$ được trình bày trong tài liệu [125]. Theo đó, các giá trị λ tăng dần một cách thận trọng, từ các giá trị nhỏ ban đầu đến các giá trị lớn hơn. Ở giai đoạn khởi đầu, các λ được thiết lập bằng 10^{-3} và giá trị của hàm phạt được kiểm tra. Nếu giá trị hàm phạt còn lớn và tất cả các hạng tử trong (2.24) tương ứng với các λ đều khác 0, thì các λ sẽ được tăng lên theo hệ số 10. Một tham số λ sẽ không tiếp tục được tăng nếu hạng tử ràng buộc tương ứng của nó đã bằng 0. Quá trình này được lặp lại cho đến khi hàm phạt hội tụ về 0. Lưu ý rằng, ở các bước cuối cùng, hệ số tăng được điều chỉnh mịn hơn, cụ thể là 5 hoặc 2 thay vì 10, nhằm đảm bảo việc điều chỉnh các λ không gây ảnh hưởng đến các hạng tử khác đã có giá trị λ cố định ở các bước trước, đồng thời giúp hàm phạt tiến gần hơn đến 0 và cân bằng với hàm mục tiêu. Trong hàm phạt, các hệ số phạt λ được xác định dựa trên nguyên tắc chuẩn hóa theo thang đo của từng ràng buộc. Cụ thể, do các thành phần vi phạm có sự khác biệt về thứ nguyên và miền giá trị, việc sử dụng trực tiếp các giá trị này có thể dẫn đến hiện tượng một số ràng buộc chi phối toàn bộ hàm mục tiêu. Để khắc phục vấn đề này, các hệ số phạt λ được lựa chọn theo tỷ lệ nghịch với độ lớn điển hình của từng thành phần vi phạm, nhằm đưa các hạng phạt về cùng một thang đo so sánh. Độ lớn điển hình này có thể được xác định thông qua giá trị cực đại, giá trị trung bình, hoặc miền biến thiên của từng thành phần trong giai đoạn khởi tạo hoặc qua các lần chạy thử nghiệm ban đầu. Cách tiếp cận này đảm bảo rằng mức độ ảnh hưởng của các ràng buộc trong hàm phạt được cân đối một cách có hệ thống, đồng thời hạn chế việc phụ thuộc vào điều chỉnh kinh nghiệm (heuristic tuning). Nhờ đó, hàm mục tiêu duy trì được tính ổn định và khả năng hội tụ trong quá trình tối ưu.

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°
Đô 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°

Bảng 2-4. Biến tối ưu (OVs) của các phương pháp đối sánh

OVs Mô hình	c_i	$f_{l,w}$	$h_{l,w}$	P_i và P_{n_T}
TCP-3DF	Có	Có	Có	Có
TFS-CSA [87]	Có	Có	Có	Không ¹
TFS-C&S [82]	Có	Có	Không ²	Không ¹
TFS-OOC	Có	Không ³	Không ²	Không ¹
TFS-NUL	Không ⁴	Không ³	Không ²	Không ¹

Ghi chú: STP được áp dụng cho tất cả các phương pháp. Các bài toán tối ưu TFS-CSA, TFS-C&S và TFS-OOC được giải bằng cách sử dụng GA, nhưng kết quả của TFS-NUL được tính toán trung bình.

¹ $P_i = 1000\text{mW}$, $P_{n_T} = 1000\text{W}$, $\forall i, n_T$, công suất truyền và công suất bay của TFS-CSA là $P_{T_{\text{CSA}}}$ và $P_{F_{\text{CSA}}}$, được tính toán bằng (2.19) và (2.20) tương ứng. Sau đó, trong (2.21e) và (2.21f), đặt $P_T^* = P_{T_{\text{CSA}}}$ và $P_F^* = P_{F_{\text{CSA}}}$.

² $h_{l,w} = 125\text{m}$, $\forall l, w$.

³Lấy tất cả các hoán vị của việc chọn N_T điểm dừng trong số N điểm dừng. Sau đó, tất cả các số liệu đánh giá hiệu suất, bao gồm: tổng tốc độ phân phối dữ liệu, khoảng cách bay, thời gian phục vụ, dung lượng lưu trữ, công suất truyền, công suất bay và mức tiêu thụ năng lượng, được tính toán theo từng hoán vị. Cuối cùng, NCS tính toán giá trị trung bình của từng số liệu trên mỗi hoán vị đáp ứng các ràng buộc.

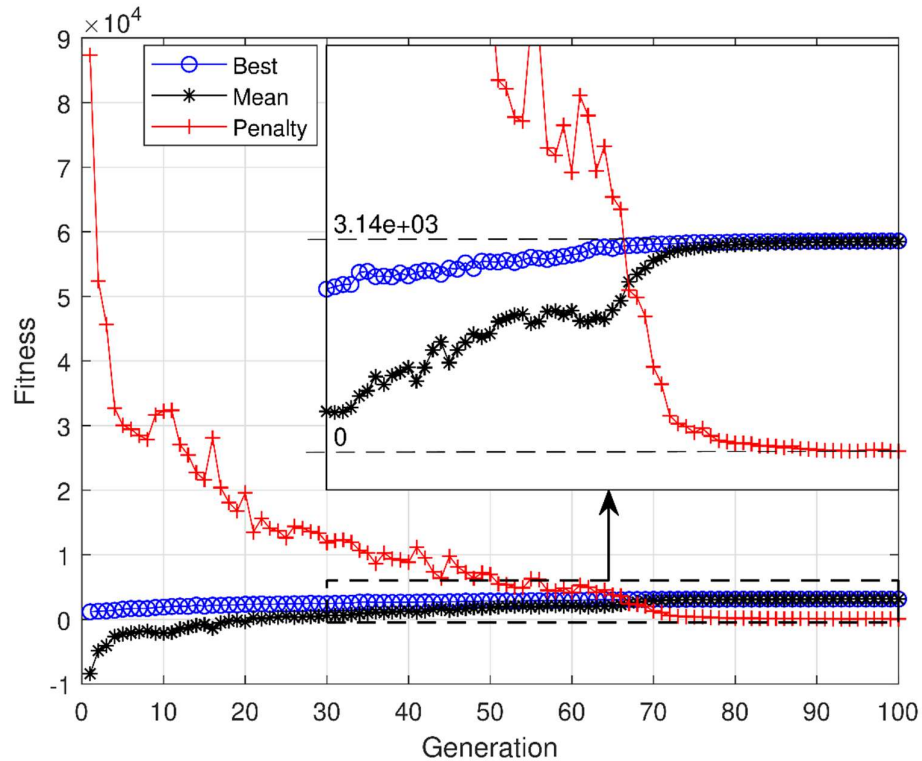
⁴Với số lượng nội dung được lưu trữ tối ưu theo mô hình TCP-3DF, cụ thể là $V^* = \sum_{i=1}^I c_i$, NCS tính toán tất cả các hoán vị của bộ nhớ đệm V^* trong số I nội dung. Sau đó, kết hợp với các hoán vị dừng, NCS tính toán giá trị trung bình của

mỗi số liệu trên mỗi cặp hoán vị dừng và lưu trữ.

Cần lưu ý rằng, các kết quả đạt được của $\bar{C}$ và $\bar{T}$ hiện tại đang được tính bằng cách chia trung bình cho N cụm. Mục đích của việc chia cho tổng số cụm N nhằm đảm bảo bài toán tối ưu không rơi vào giải pháp “tầm thường” khi UAV luôn bay đến phục vụ 1 cụm tốt nhất với $\bar{C}$ cao nhất và $\bar{T}$ thỏa điều kiện. Do đó, cần phải hiệu chỉnh bằng cách $\bar{C}N/N_T$ và $\bar{T}N/N_T$, với N_T được định nghĩa là số điểm dừng hay còn gọi là số cụm được phục vụ, để có được kết quả trung bình đúng với thực tế.

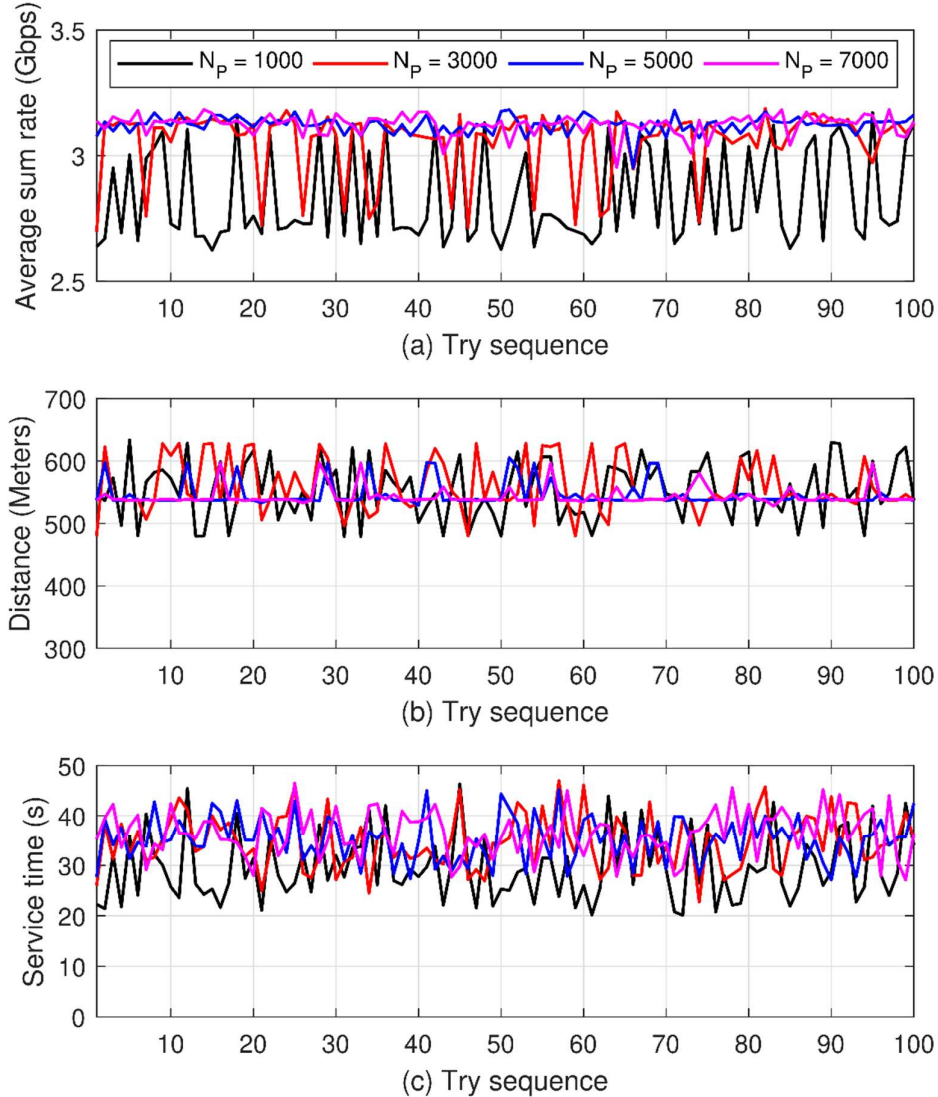
2.5.2. Đánh giá hiệu suất của GTS

Đầu tiên, NCS đánh giá hiệu suất của GTS bằng một tập hợp các tham số được trình bày trong Bảng 2-2. Hình 2-4 cho thấy sự hội tụ của GTS qua 100 thế hệ. Có thể thấy rằng GTS bắt đầu hội tụ sau 70 thế hệ và đáp ứng điều kiện dừng từ thế hệ thứ 90. Khi đạt hội tụ, chắc chắn rằng giá trị độ thích nghi trung bình (Mean) và giá trị độ thích nghi tốt nhất (Best) của tất cả các cá thể gần như giống nhau. Nói cách khác, hầu hết các cá thể ở các thế hệ cuối cùng sở hữu các đặc điểm di truyền tốt nhất theo nguyên lý tiến hóa. Hình 2-4 cũng chứng minh rằng giá trị hình phạt ($F + \beta d_p$) tiến tới 0 và do đó tất cả các ràng buộc đều được thỏa mãn.



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

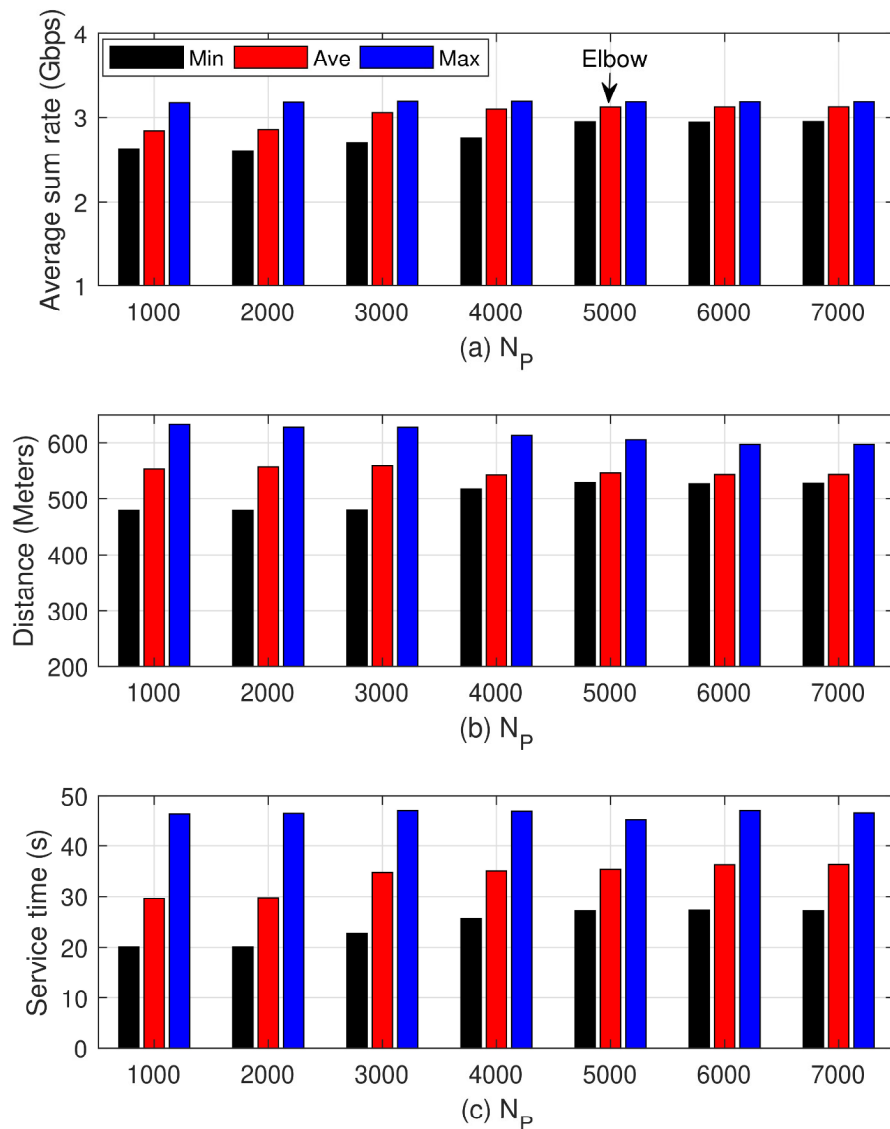
Liên quan đến độ chính xác và tính ổn định của GTS, GTS là ổn định nếu nó tạo ra càng nhiều giải pháp toàn cục chính xác càng tốt với số lần thử nhất định. Độ chính xác và tính ổn định có thể được cải thiện bằng cách tăng kích thước quần thể nhưng không quá lớn. Lý do là kích thước quần thể lớn gây ra độ phức tạp tính toán cao hơn trong khi không cải thiện đáng kể độ chính xác và tính ổn định thêm nữa. Trong khi đó, rõ ràng là kích thước quần thể nhỏ với độ phức tạp tính toán thấp không thể đảm bảo độ chính xác và tính ổn định.



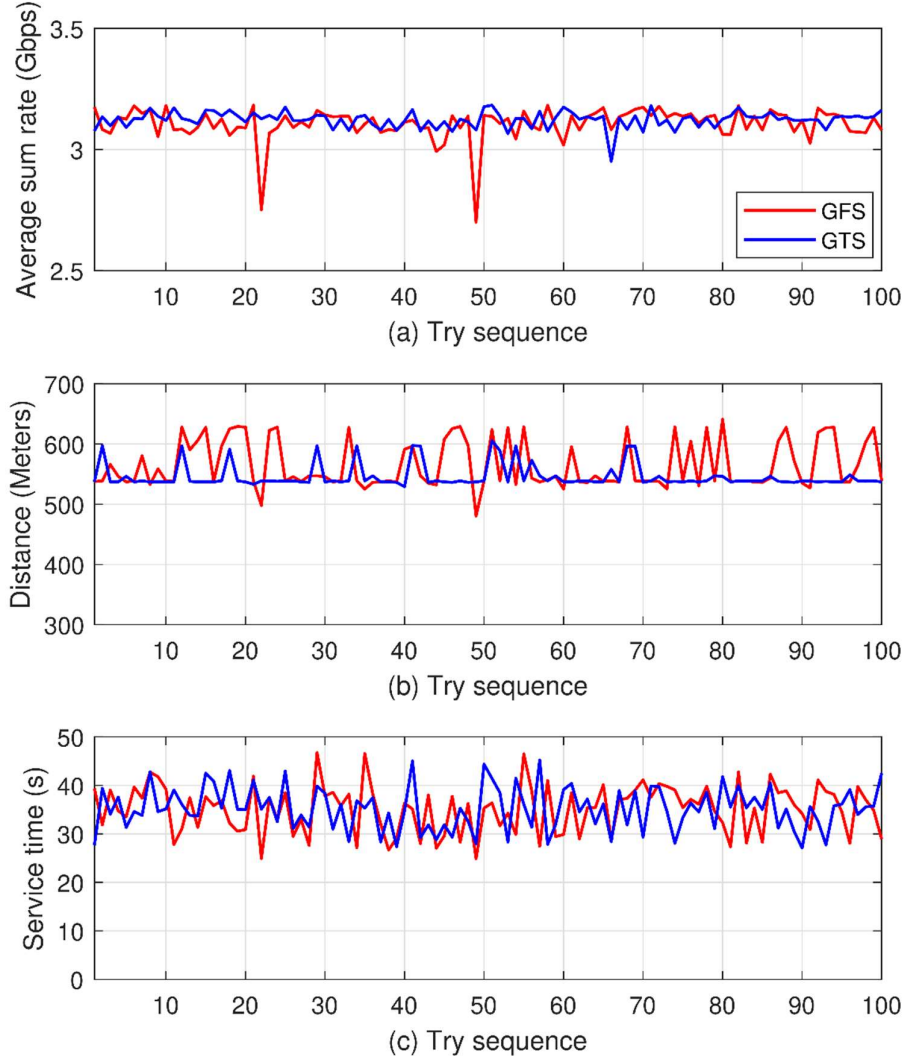
Hình 2-5. Độ ổn định của GTS theo các kích thước quần thể khác nhau

Để đảm bảo GTS hội tụ chính xác và ổn định trong độ phức tạp tính toán hợp lý, NCS lựa chọn cẩn thận kích thước quần thể. Đặc biệt, NCS thực hiện 100 lần thử GTS cho mỗi kích thước quần thể (N_p) trong tập $\{1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000\}$. Sau đó, vẽ biểu đồ kết quả của tổng tốc độ phân phối dữ liệu, khoảng

cách bay của UAV và thời gian phục vụ của mỗi lần thử như thể hiện trong Hình 2-5, rồi vẽ biểu đồ giá trị tối thiểu (Min), trung bình (Ave) và tối đa (Max) của 100 lần thử như thể hiện trong Hình 2-6. Có thể thấy rõ trong Hình 2-5 và Hình 2-6 rằng N_P thấp hơn 5.000 (1.000 và 3.000) khiến kết quả kém chính xác và kém ổn định hơn. Trong khi đó, $N_P = 7.000$ không cải thiện đáng kể độ chính xác và độ ổn định nhưng chắc chắn mang lại độ phức tạp tính toán cao hơn rất nhiều. Đặc biệt, Hình 2-6 chỉ ra rằng kích thước quần thể thích hợp là 5.000 (tại điểm “elbow”) khi giá trị trung bình Ave gần chạm tới mức giá trị tối đa Max, tức là, xuất hiện nhiều giải pháp toàn cục chính xác và độ ổn định cao của GTS đạt được trong vòng 100 lần thử.



Hình 2-6. Độ chính xác của GTS theo các kích thước quần thể khác nhau



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

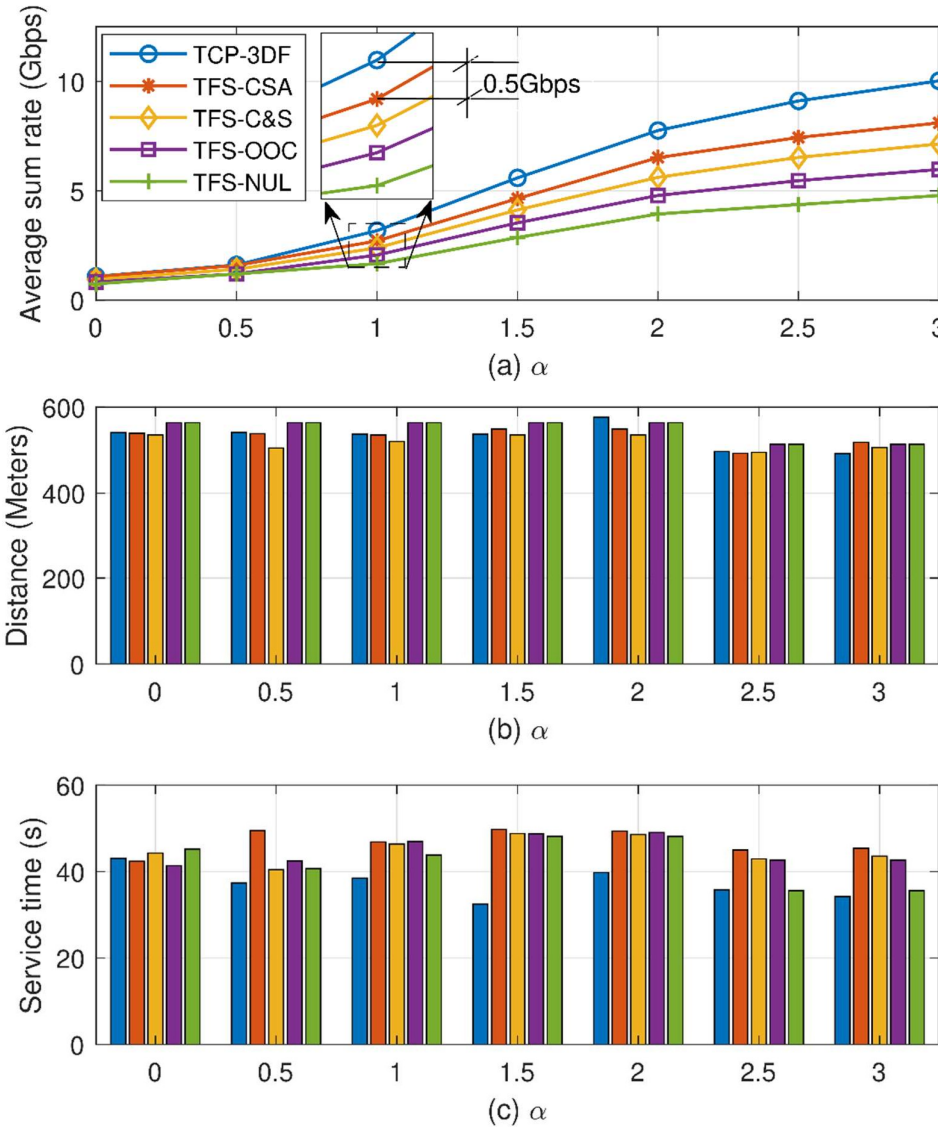
Để hoàn thành đánh giá GTS, NCS triển khai thêm GA với chuỗi dài đầy đủ (GA with Full long Strings – GFS) và so sánh nó với GTS về độ chính xác và độ ổn định. Không giống như GTS có 05 chuỗi con, GFS có 02 chuỗi con. Chuỗi con đầu tiên của GFS là chuỗi nối của 04 chuỗi con đầu tiên của GTS $\{X_1^Z\}\{X_2^Z\}\{X_3^Z\}\{X_4^Z\}$ và chuỗi con thứ hai của GFS là chuỗi con cuối cùng của GTS $\{X_5^Z\}$. Các tham số của GFS giống với GTS, ngoại trừ xác suất lai và đột biến được đặt thành 0,9 ($\max\{P_{C_1}; P_{C_2}; P_{C_3}; P_{C_4}; P_{C_5}\}$) và 10^{-12} ($\min\{P_{M_1}; P_{M_2}; P_{M_3}; P_{M_4}; P_{M_5}\}$), tương ứng, vì khi các chuỗi mã hóa có độ dài lớn thì cần thiết lập xác suất lai ở mức cao hơn, trong khi xác suất đột biến nên được giảm xuống. Theo cách này, độ phức tạp về bộ nhớ và thời gian của GTS và GFS là tương đương nhau. Kết quả trong Hình 2-7 cho thấy GTS ổn định hơn và do đó có nhiều khả năng chính xác hơn GFS. Nói cách khác, GA cho kết quả

không tốt khi kết hợp nhiều loại biến tối ưu OV khác nhau rồi áp dụng cùng một toán tử lai và đột biến cho chúng. Cuối cùng, có thể kết luận rằng GTS khả thi để giải bài toán phức tạp TCP-3DF về mặt độ chính xác, tính ổn định và tính phức tạp.

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

2.5.3.1. Hiệu suất dung lượng

Tiếp theo, NCS đánh giá các số liệu hiệu suất hệ thống của TCP-3DF, TFS-CSA, TFS-C&S, TFS-OOC và TFS-NUL bao gồm tổng tốc độ phân phối dữ liệu, khoảng cách bay của UAV, thời gian phục vụ, dung lượng lưu trữ, công suất truyền, công suất bay và mức tiêu thụ năng lượng. Hình 2-8 và Hình 2-9 biểu thị các số liệu hiệu suất của tất cả các phương pháp theo α .



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

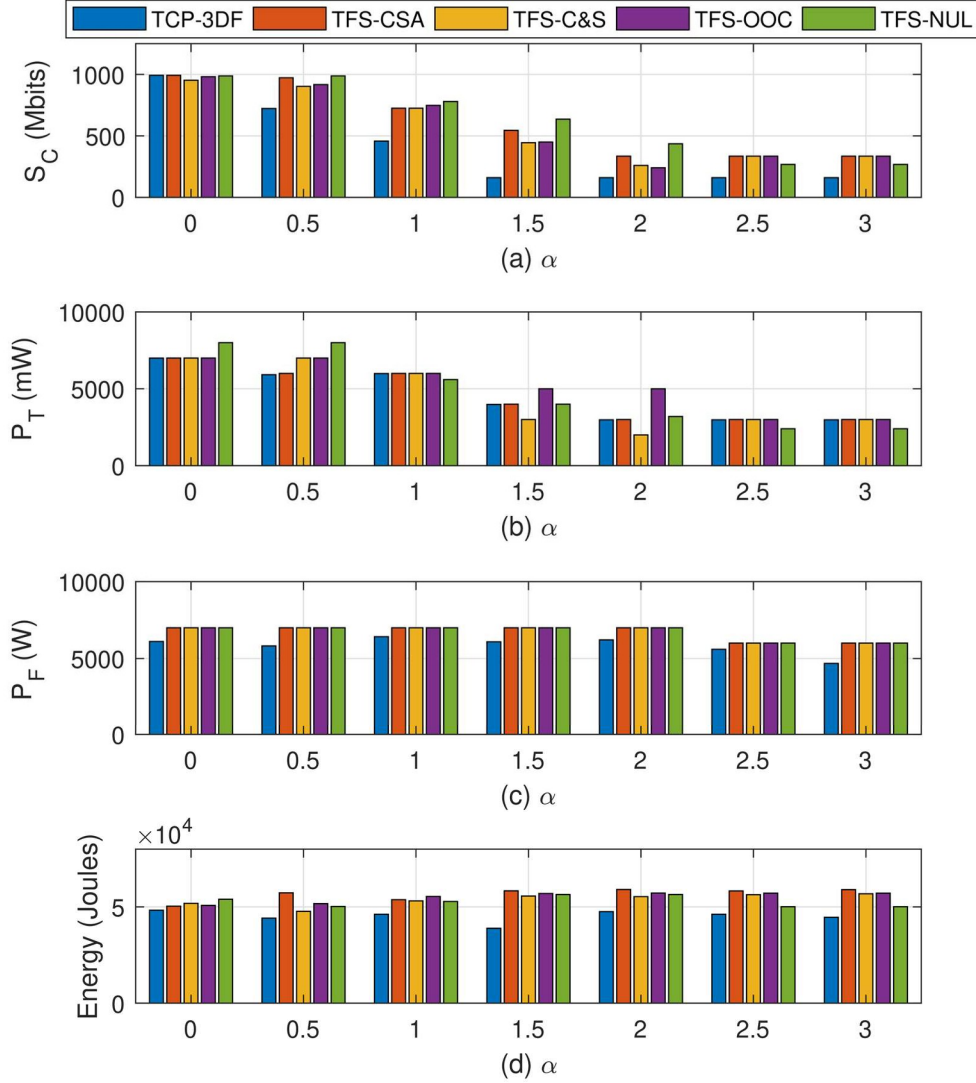
Trong Hình 2-8 (a), cần lưu ý rằng α đóng vai trò quan trọng trong việc đánh giá hiệu suất hệ thống. Vì α thấp hoặc bằng không, tất cả các nội dung đều có mức độ phổ biến tương tự hoặc giống nhau. Điều này khiến kỹ thuật lưu trữ không hiệu quả dẫn đến kết quả là các tối ưu hóa khác về chỉ số dừng, công suất truyền, công suất bay và độ cao không hoạt động tốt. Khi α tăng, các giá trị mức độ phổ biến bị lệch đáng kể hơn giữa các nội dung. Các nội dung được lưu trữ đệm có chọn lọc trong UAV và do đó tất cả các giải pháp tối ưu hóa có thể cùng hoạt động để làm cho TCP-3DF được đề xuất hiệu quả hơn so với các giải pháp khác. Đặc biệt, tại $\alpha = 1$, từ TFS-NUL, nếu cộng dần các OV từng biến một để có được các phương pháp khác nhau như thể hiện trong Bảng 2-4, thì tổng tốc độ phân phối dữ liệu tương ứng tăng lên theo một lượng lần lượt là 0,4Gbps, 0,3Gbps, 0,3Gbps và 0,5Gbps. Hiệu suất tăng giữa TCP-3DF và TFS-NUL lên tới 1,5Gbps. Điều quan trọng là, các kết quả trong Hình 2-8 (b) và Hình 2-8 (c) chứng minh rằng khoảng cách bay của TCP-3DF gần như là nhỏ nhất so với các phương pháp khác, trong khi thời gian phục vụ của TCP-3DF phần lớn thấp hơn. Khoảng cách bay gần như là nhỏ nhất của TCP-3DF thu được là do bản chất của GTS cung cấp các giải pháp tối ưu toàn cục chính xác hoặc gần đúng với quy mô cá thể hợp lý ($N_P = 5.000$).

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

Hình 2-9 cho thấy thêm các số liệu sử dụng tài nguyên của TCP-3DF, TFS-CSA, TFS-C&S, TFS-OOC và TFS-NUL. Xem xét tài nguyên lưu trữ trong Hình 2-9 (a), mô hình TCP-3DF tận dụng tối đa mức độ phổ biến lệch của nội dung để đạt được hiệu quả lưu trữ cao nhất. Mức độ phổ biến lệch càng cao thì TCP-3DF đạt được hiệu quả lưu trữ càng cao, tức là ít dung lượng lưu trữ được sử dụng để lưu trữ đệm các nội dung phổ biến nhất. Trong Hình 2-9 (b), Hình 2-9 (c) và Hình 2-9 (d), mô hình

TCP-3DF tiêu thụ công suất truyền hợp lý và công suất bay thấp nhất, do đó tổng năng lượng tiêu thụ là thấp nhất so với các phương pháp khác, nhờ giải pháp phân bổ công suất tối ưu. Lưu ý rằng tổng năng lượng trong Hình 2-9 (d) được xác định bởi công thức $E = \sum_{n_T=1}^{N_T} t_{n_T} P_{n_T} + T_S P_S + \sum_{l=1}^{M_L} \sum_{w=1}^{M_W} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I t_{l,w,n}^i P_i$, trong đó $P_S = 250W$ là công suất dừng của UAV [104] và T_S là tổng thời gian dừng (thời gian truyền) được xác định theo công thức trong (2.16).



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

Trong Bảng 2-5, NCS đánh giá tác động của ràng buộc thời gian dịch vụ (T^*) lên hiệu suất TCP-3DF, được thực hiện ở $\alpha = 1$. Để làm như vậy, NCS nói lỏng các ràng buộc về công suất truyền và công suất bay bằng cách đặt $P_T^* = 10.000mW$ và $P_F^* = 10.000W$. Chắc chắn rằng nếu thời gian phục vụ được yêu cầu nhanh hơn, hầu hết

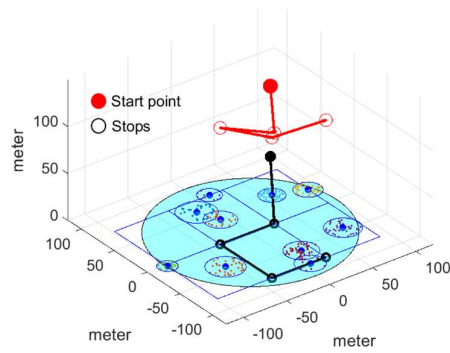
các số liệu hiệu suất hệ thống sẽ giảm tương ứng để phục vụ ít hơn. Tuy nhiên, mức tiêu thụ công suất truyền tải không thay đổi đáng kể. Lý do mức tiêu thụ công suất truyền không đổi là trong bất kỳ ràng buộc nào về thời gian dịch vụ, tài nguyên công suất truyền phải được sử dụng đầy đủ để giảm thời gian truyền càng nhiều càng tốt. Vì vậy, 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.

2.5.3.2. Quỹ đạo bay

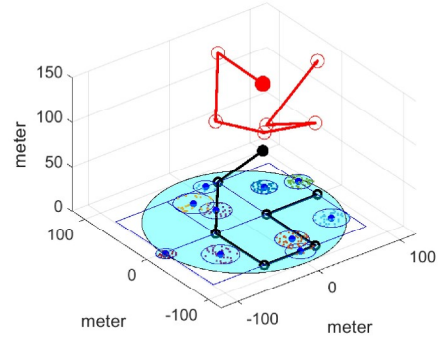
Cuối cùng nhưng không kém phần quan trọng, NCS khảo sát quỹ đạo của UAV với các kịch bản khác nhau như thể hiện trong Hình 2-10 và Hình 2-11. Theo kết quả trong Bảng 2-5, Hình 2-10 trình bày chi tiết về quỹ đạo của UAV so với các ràng buộc khác nhau về thời gian phục vụ T^* . Rõ ràng là việc nói lỏng T^* từ 10 giây đến 75 giây sẽ khuyến khích UAV bay nhiều điểm dừng hơn trên những khoảng cách dài hơn, từ 4 điểm dừng trên 339,6m đến 9 điểm dừng trên 709,9m. Vì vậy, UAV phân phối dữ liệu cho nhiều IDU hơn với tổng tốc độ dữ liệu cao hơn khi T^* tăng, rõ ràng là thỏa mãn ràng buộc công suất bay P_F^* . Hình 2-11 cho thấy độ cao của UAV được tìm tối ưu để khiến nó dừng lại ở đúng nơi theo các đặc điểm đa dạng của môi trường truyền thông và mật độ IDU khác nhau trong các cụm khác nhau để tăng tổng tốc độ dữ liệu so với bay ở độ cao cố định $h_{l,w} = 125\text{m}$. Tại đây, $h_{l,w} = 125\text{m}$ là độ cao tốt nhất được chọn trong phạm vi $[50, 150]\text{m}$ cho các phương pháp TFS-C&S, TFS-OOC và TFS-NUL. Cần lưu ý rằng do giới hạn về tài nguyên tính toán, các kết quả nêu trên đều được lấy từ quỹ đạo bay qua lưới RFG có $M_W \times M_L = 3 \times 4$ điểm dừng, như minh họa ở Hình 2-11.

Trên thực tế, lưới bay RFG được chia nhỏ thành nhiều điểm dừng hơn để UAV có thể bay đến gần các cụm chính xác hơn. Vì vậy, NCS đánh giá thêm một trường hợp mở rộng khi $M_W \times M_L = 4 \times 5$ như thể hiện trong Hình 2-12. So với kết quả trong Hình 2-11, quỹ đạo bay của UAV khi lưới bay mịn hơn trong Hình 2-12 đạt được tổng dung lượng truyền dữ liệu cao hơn (3,6Gbps so với 3,2Gbps), khoảng cách bay ngắn hơn (515,5m so với 537,2m) và thời gian phục vụ nhanh hơn (34,9 giây so với 38,5 giây), ngay cả khi UAV bay qua thêm một điểm dừng (8 điểm dừng so với 7 điểm dừng). Và do đó, mô hình TCP-3DF được đề xuất có thể được triển khai khả thi bởi một hệ thống có năng lực tính toán mạnh mẽ trong thực tế. Khi đó, mật độ lưới phải được chọn lựa cẩn thận (tỷ lệ thuận với mật độ IDU chung của toàn hệ thống)

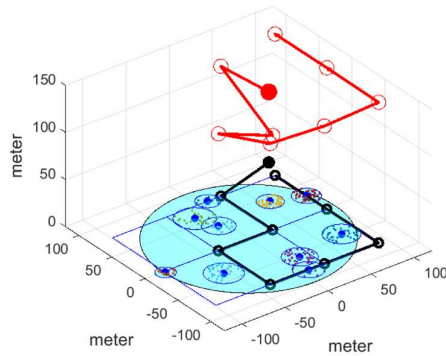
để vừa đảm bảo đạt được hiệu quả phục vụ cao và vừa không làm cho bài toán trở nên phức tạp.



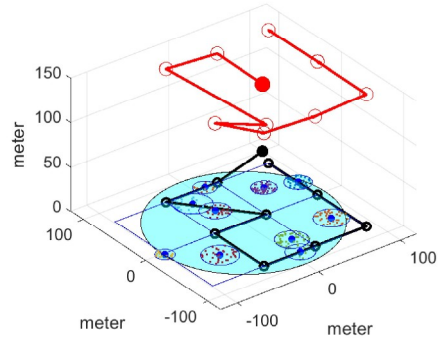
a) $T^* = 10\text{s}$



b) $T^* = 25\text{s}$

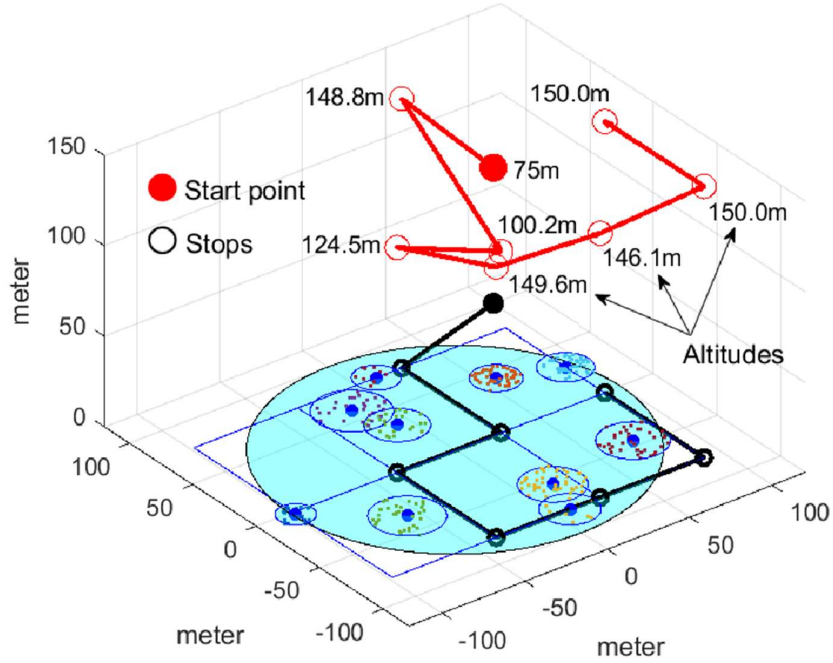


c) $T^* = 50\text{s}$

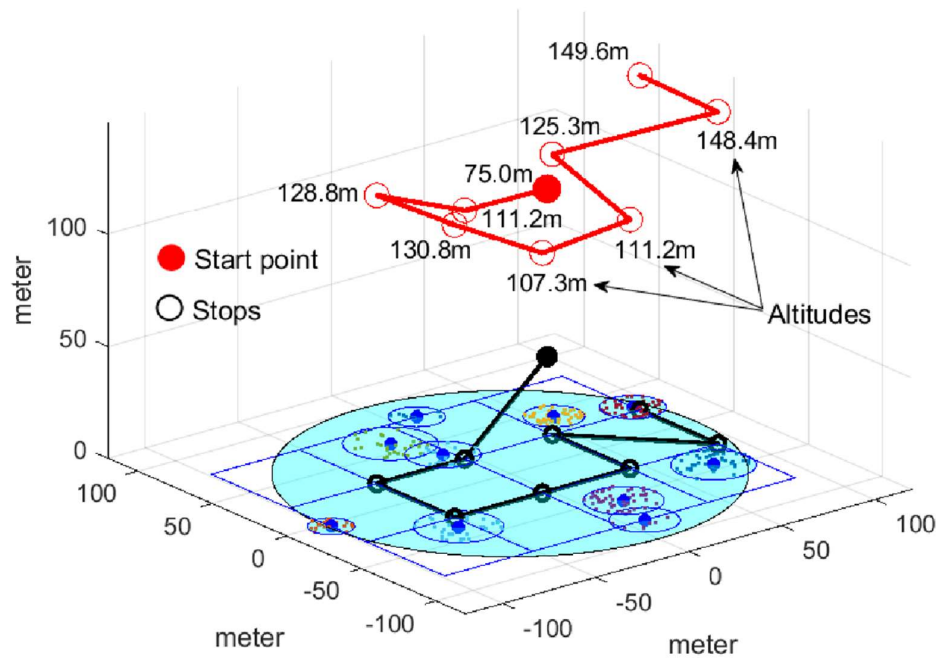


d) $T^* = 75\text{s}$

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



Hình 2-11. Quỹ đạo của UAV khi lưới bay RFG có kích thước $M_W \times M_L = 3 \times 4$ ($\bar{C} = 3,2\text{Gbps}$, $d = 537,2\text{m}$ và $\bar{T} = 38,5\text{s}$)



Hình 2-12. Quỹ đạo của UAV khi lưới bay RFG có kích thước $M_W \times M_L = 4 \times 5$ ($\bar{C} = 3,6\text{Gbps}$, $d = 515,5\text{m}$ và $\bar{T} = 34,9\text{s}$).

2.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Trong Chương này, NCS đã đề xuất một phương pháp tối ưu cho hệ thống MCD hỗ trợ bởi UAV trong mạng IoT. Về mặt kỹ thuật, UAV được tích hợp với các kỹ thuật SDE mới nổi gồm lưu trữ, phân bổ công suất truyền và công suất bay, truyền điểm – đa điểm và quỹ đạo 3DF dựa trên liên kết U2C từ UAV đến các cụm. Về các khía cạnh của nội dung đa phương tiện, IDU và môi trường truyền thông không dây, hệ thống xem xét 1) kích thước và mức độ phổ biến khác nhau của nội dung, 2) mật độ và sở thích chung của IDU và 3) môi trường ngoại ô, đô thị, đô thị đông đúc và đô thị cao tầng. Các kỹ thuật và khía cạnh này được tổng hợp và xây dựng thành một bài toán tối ưu TCP-3DF đa mục tiêu để có kết quả tối ưu kết hợp của 6 biến gồm: 2 biến nhị phân là lưu trữ và chỉ mục dừng, 3 biến số thực là công suất truyền, công suất bay và độ cao của UAV, cùng 1 biến số nguyên là chuỗi vị trí dừng, theo các ràng buộc về tài nguyên hệ thống và thời gian phục vụ. GA được sửa đổi để giải bài toán tối ưu TCP-3DF liên quan đến nhiều biến tối ưu và các ràng buộc phức tạp. Kết quả phân tích hiệu năng đã chứng minh rằng mô hình TCP-3DF vượt trội hơn các phương pháp thông thường khác để cung cấp cho IDU tổng tốc độ phân phối dữ liệu tối đa, thời gian dịch vụ theo yêu cầu của nhiều A&S đa phương tiện khác nhau trên đường bay gần như ngắn nhất, đồng sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ và năng lượng. Các phân tích và thảo luận đóng góp những hiểu biết có giá trị cho việc thiết kế các kỹ thuật SDE sử dụng UAV cho MCD trong mạng IoT.

Tuy nhiên, mô hình TCP-3DF vẫn còn những hạn chế và vấn đề cần đánh giá thêm như: 1) chỉ đang sử dụng 1 UAV để lưu trữ và phân phối dữ liệu, nên thời gian phục vụ chưa thể là tốt nhất; 2) chưa đánh giá được việc kết hợp tham gia lưu trữ và phân phối dữ liệu khi có sự tham gia của cả MBS và nhiều UAV thì hiệu năng của hệ thống sẽ được cải thiện như thế nào? và 3) có phải là càng nhiều UAV tham gia thì thời gian phục vụ sẽ càng rút ngắn, hay sẽ có một qui mô số lượng UAV tham gia là tối ưu? Những hạn chế và vấn đề nêu trên sẽ được khắc phục trong Chương 3 của luận án này.

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

Tóm tắt: Trong Chương 3 sẽ trình bày mô hình thiết kế tối ưu kết hợp lưu trữ – phân phối dữ liệu và điều phối quỹ đạo bay thời gian thực cho mạng 6G IoT hỗ trợ bởi UAV bầy đàn RCD-CTR (*real-time cooperative content caching and delivery with coordinated trajectory*). Mở rộng hơn so với mô hình TCP-3DF ở Chương 2, mô hình RCD-CTR tính đến vai trò của MBS trong việc hợp tác với UAV để truyền nội dung được yêu cầu đến các IDU trên các cụm khác nhau. Sau khi xác định được các cụm được phục vụ bởi MBS hoặc UAV, các UAV sẽ lưu trữ nội dung có liên quan và bay đến phục vụ các cụm được chỉ định theo thời gian thực. Để làm như vậy, mô hình RCD-CTR xây dựng một bài toán tối ưu và giải bằng GA để xác định (i) vị trí lưu trữ dựa trên lựa chọn chế độ truyền (transmission mode) tối ưu nhằm xác định xem MBS hay UAV sẽ phục vụ các IDU trong một cụm; (ii) công suất phát, công suất bay và cao độ bay; và (iii) xác định số lượng UAV và quỹ đạo tối ưu của mỗi UAV; ràng buộc bởi dung lượng lưu trữ và công suất của UAV nhằm cực tiểu thời gian phục vụ của hệ thống để phân phối dữ liệu đến các IDU theo thời gian thực, đồng thời đảm bảo tốc độ phân phối dữ liệu cao. Kết quả mô phỏng cho thấy mô hình RCD-CTR mang lại hiệu suất cao về thời gian phục vụ (thời gian bay và phân phối dữ liệu), tốc độ phân phối dữ liệu, đồng thời sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ và năng lượng. Chương 3 được phát triển trên cơ sở các kết quả nghiên cứu đã công bố trong bài báo hội nghị INISCOM 2026 [C5]. Trong đó, mô hình RCD-CTR của Chương 3 được phát triển từ bài toán tối ưu lựa chọn chế độ truyền để phối hợp MBS và UAV bầy đàn trong lưu trữ nội dung, đồng thời xác định số lượng và quỹ đạo bay tối ưu của các UAV, cùng các kết quả mô phỏng ban đầu của công bố [C5]. Cụ thể, Chương 3 bổ sung mô hình tối ưu tổng quát cho hệ thống kết hợp MBS và UAV bầy đàn; hoàn thiện bài toán tối ưu tích hợp bao gồm lựa chọn chế độ truyền, lưu trữ nội dung, phân bổ công suất phát, công suất bay, lựa chọn số lượng UAV, tối ưu quỹ đạo 3D phối hợp của nhiều UAV và cực tiểu thời gian phục vụ; đồng thời bổ sung các phân tích, đánh giá và kịch bản mô phỏng nhằm làm rõ hiệu quả của mô hình đề xuất.

3.1. GIỚI THIỆU HỆ THỐNG

Các ứng dụng và dịch vụ Internet vạn vật (IoT) thời gian thực trong mạng 6G đòi

hỏi tốc độ dữ liệu cực cao, độ trễ thấp, độ tin cậy cực cao và khả năng kết nối không lòe để hỗ trợ phân phối dữ liệu liên mạch trên các thiết bị và người dùng IoT không đồng nhất (IDU) [96], [146], [90]. Các ứng dụng mới nổi bao gồm xe tự hành, tự động hóa công nghiệp, chăm sóc sức khỏe từ xa và ứng dụng thực tế mở rộng, càng đòi hỏi tốc độ xử lý dữ liệu tức thời và cập nhật nội dung liên tục, trong điều kiện hạn chế tiêu thụ tài nguyên nghiêm ngặt. Với sự tích hợp của các kỹ thuật biên, công nghệ ở băng tần THz, cơ sở hạ tầng hỗ trợ bởi máy bay không người lái (UAV) quy mô lớn, các bề mặt phản xạ thông minh, cảm biến và truyền thông, trí tuệ nhân tạo và bản sao kỹ thuật số, mạng 6G IoT được dự đoán sẽ hiện thực hóa các chiến lược phân phối dữ liệu có khả năng thích ứng cao và nhận biết ngữ cảnh, có khả năng đáp ứng các nhu cầu đa dạng về ứng dụng và dịch vụ thời gian thực [2].

Về thiết kế hệ thống thời gian thực cho mạng IoT được hỗ trợ bởi UAV, các nghiên cứu hiện tại chủ yếu tập trung vào mô hình đảm bảo độ chính xác và độ trễ thấp [91], ra quyết định trong khi bay [92], [93], xử lý và phân tích dữ liệu dựa trên dịch vụ lưu trữ đệm [94], lập kế hoạch đường bay và lập lịch phân phối nội dung [95], lập kế hoạch quỹ đạo để cập nhật và thu thập dữ liệu [96], [97], [98]. Đặc biệt, các tác giả trong [91] đã đề xuất một cơ chế phân công nhiệm vụ kết hợp giữa lựa chọn mô hình và phân bổ tài nguyên cho các mạng IoT được hỗ trợ bởi UAV đạt được độ trễ thấp trong khi vẫn đáp ứng nghiêm ngặt các ràng buộc về độ chính xác thông qua mô hình mạng nơ-ron học sâu thời gian thực. Công trình [92] đã thiết kế một thuật toán lập kế hoạch đường bay UAV để tối ưu hóa mức tiêu thụ năng lượng và rủi ro trong mạng IoT. Một mô hình máy học được áp dụng để giúp UAV đưa ra quyết định thời gian thực để điều chỉnh vị trí của các nút ảo. Trong [93], cùng với việc ra quyết định giảm tải nhiệm vụ theo thời gian thực, một phương pháp tối ưu hóa kết hợp về số lượng và vị trí 3D của các nút tính toán trên UAV (UAV cloudlets) đã được phát triển để đạt được hiệu suất gần như tối ưu với độ phức tạp thấp cho các mạng IoT quy mô lớn hỗ trợ các dịch vụ nhạy cảm với độ trễ.

Thực tế hơn, một cơ chế cung cấp dịch vụ được hỗ trợ bởi UAV có lưu trữ đã được nghiên cứu cho các mức dịch vụ thời gian thực khác nhau trong mạng IoT [94]. Để đạt được hiệu suất lưu trữ thời gian thực cao, một DQN được triển khai để cập nhật vị trí của UAV và cung cấp điều kiện tiên quyết cần thiết cho dịch vụ lưu trữ. Công trình [95] đề xuất một giải thuật kết hợp để lập kế hoạch đường bay và lập lịch

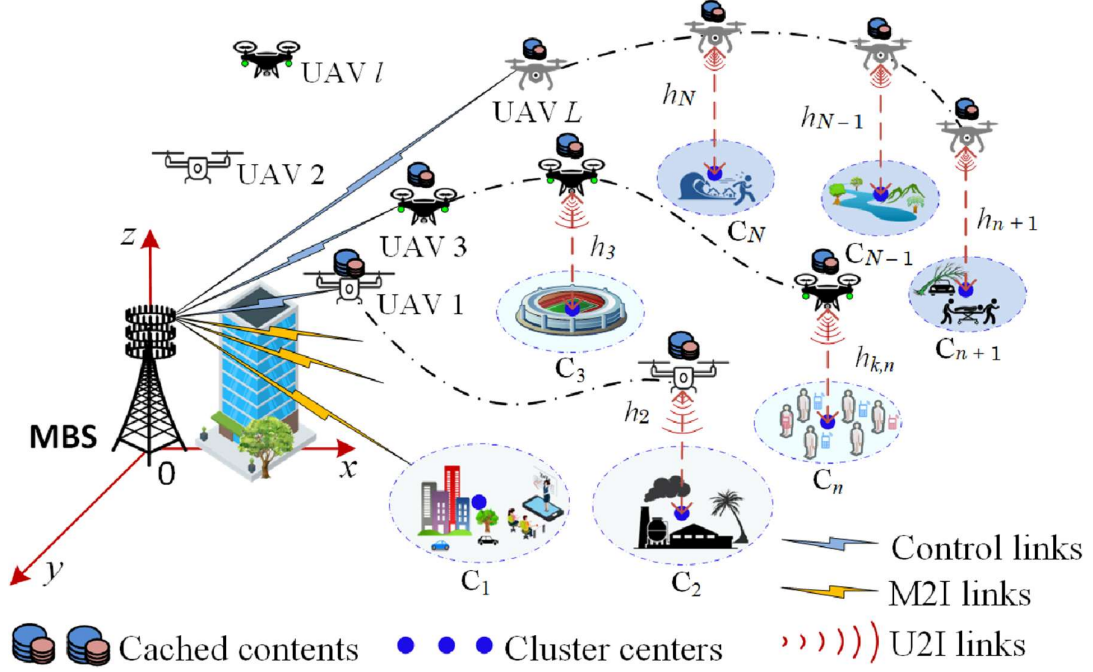
phân phối dữ liệu cho nhiều UAV để thiết lập mô hình điện toán biên di động trong mạng IoT với các bề mặt thông minh có thể cấu hình lại. Thuật toán này hiệu quả về mặt tính toán và dễ dàng triển khai cho hoạt động thời gian thực. Nhằm hỗ trợ các ứng dụng cập nhật, thu thập và giám sát dữ liệu thời gian thực, các tác giả trong [96], [97], [98] đã nghiên cứu các vấn đề tối ưu hóa đa mục tiêu cho mạng IoT được hỗ trợ bởi UAV. Các nghiên cứu này kết hợp tối ưu việc lập kế hoạch quỹ đạo bay, tốc độ dữ liệu, độ tuổi của thông tin (age of information) hoặc/và mức tiêu thụ năng lượng bằng cách sử dụng các thuật toán học tăng cường sâu và tối ưu hóa thời gian thực.

Có thể thấy rằng các nghiên cứu đã đề cập ở trên chủ yếu tập trung vào các thuật toán tối ưu thời gian thực hơn là triển khai phối hợp các quỹ đạo UAV bầy đàn để phân phối dữ liệu theo yêu cầu và đảm bảo thời gian thực, cụ thể là xác định số lượng UAV cần triển khai và quỹ đạo của từng UAV. Hơn nữa, việc hợp tác phân phối dữ liệu giữa các UAV và trạm gốc MBS chưa được xem xét để cung cấp cho các IDU tốc độ dữ liệu cao. Trong công trình [C4], NCS đã đề xuất một giải pháp tối ưu dung lượng và quỹ đạo bay có xét đến năng lượng cho các mạng phân phối nội dung biên được hỗ trợ bởi bầy đàn UAV, giúp tối đa hóa khả năng phân phối nội dung và giảm thiểu khoảng cách bay để rút ngắn thời gian dịch vụ. Tuy nhiên, trong [C4], vai trò của MBS chưa được kết hợp, việc phân bổ công suất phát và công suất bay chưa thực hiện, độ cao cố định, môi trường đồng nhất và không xác định số lượng UAV tối ưu, dẫn đến hạn chế khả năng phân phối dữ liệu (cả về tốc độ phân phối và thời gian dịch vụ) nhằm đảm bảo thời gian thực, cũng như không sử dụng hiệu quả tài nguyên (số lượng UAV, dung lượng lưu trữ và công suất tiêu thụ).

Trong chương này, NCS đề xuất một cơ chế nhằm (i) lưu trữ nội dung dựa trên lựa chọn chế độ truyền kết hợp giữa UAV và MBS, (ii) phân bổ công suất phát và công suất bay, (iii) xác định độ cao phù hợp tại các điểm dừng tương ứng với các môi trường khác nhau và (iv) tính toán số lượng UAV triển khai với quỹ đạo bay của bầy đàn của các UAV tối ưu, gọi tắt là mô hình RCD-CTR. Như vậy, giải pháp RCD-CTR tính đến vai trò của MBS trong việc hợp tác với UAV để truyền nội dung được yêu cầu đến các IDU trên các cụm khác nhau dưới tác động của các môi trường truyền không đồng nhất. Sau khi các cụm được xác định phục vụ bởi MBS hoặc UAV, mỗi UAV sẽ lưu trữ nội dung có liên quan và bay đến phục vụ các cụm được chỉ định của nó theo thời gian thực. Để làm như vậy, bài toán tối ưu RCD-CTR được xây dựng và

giải để xác định các giá trị tối ưu (i)-(iv) nêu trên với ràng buộc về dung lượng lưu trữ và công suất của UAV. Kết quả là, giải pháp RCD-CTR có thể cung cấp cho các IDU với thời gian phục vụ nhanh, tổng tốc độ phân phối dữ liệu cao, đảm bảo cho các ứng dụng và dịch vụ thời gian thực, đồng thời sử dụng hiệu quả tài nguyên bộ nhớ và công suất.

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



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

Mô hình bài toán đề xuất là một mạng 6G IoT được hỗ trợ bởi UAV bay đàn với mô hình RCD-CTR, như minh họa trong Hình 3-1. Các ký hiệu chính được sử dụng để xây dựng hệ thống được liệt kê trong Bảng 3-1. Để kiểm soát tốc độ của UAV, tốc độ bay được xác định dựa trên mức tiêu thụ công suất bay, được ước tính từ độ sụt áp (trên) và dòng điện (chạy qua) động cơ điện của nó, với các thông số chi tiết được cung cấp trong [104]. Hệ thống bao gồm một MBS và một tập hợp $\mathcal{L}$ của L thiết bị bay không người lái UAVs ($\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, L\}$), được triển khai hợp tác để phân phối nội dung đến các IDU trong một tập hợp $\mathcal{N}$ gồm N cụm cluster ($\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$). Các IDU trong cụm $n \in \mathcal{N}$, phân bố trong đường tròn có tâm tại tọa độ $C_n = (x_n, y_n)$ và bán kính R_n , với mật độ ρ_n và có cùng mối quan tâm đến nội dung $i, i = 1, 2, \dots, I$. Nội dung i có dung lượng là s_i (Mbit) và độ phổ biến là p_i . Trong mô hình này, trạm gốc MBS có dung lượng lưu trữ lớn, có khả năng lưu trữ toàn bộ nội dung, trong khi

UAV, với dung lượng lưu trữ hạn chế, chỉ có thể lưu trữ một số nội dung phù hợp. MBS và UAV theo quỹ đạo, sẽ phối hợp lưu trữ và phân phối dữ liệu đến các IDU theo thời gian thực thông qua 03 giai đoạn sau:

- Giai đoạn chuẩn bị: trạm gốc MBS thu thập thông tin về IDU và nhóm chúng thành N cụm [85]. Sau đó, MBS xây dựng và giải bài toán tối ưu RCD-CTR để xác định: (1) các quyết định lưu trữ tối ưu dựa trên chọn lựa chế độ truyền $c_{n,i}$, công suất truyền $P_{n,i}^{M2I}$ và $P_{n,i}^{U2I}$ lần lượt của MBS và UAV, cao độ h_n của UAV tại C_n , nhằm cực đại tổng tốc độ phân phối dữ liệu trong khi giảm thiểu thời gian truyền; và (2) tập hợp con tối ưu $\mathcal{K} \subseteq \mathcal{L}$ được chọn từ L UAVs, công suất bay P_k^{FLY} (hoặc vận tốc bay v_k) của UAV k và quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$, $k = 1, 2, \dots, K$, $K = |\mathcal{K}|$, nhằm cực tiểu thời gian bay và phục vụ. UAV k bay để phục vụ một tập hợp $\mathcal{N}_k$ cụm. Cụm n_k , $n_k = 1, 2, \dots, N_k$, $N_k = |\mathcal{N}_k|$ không thể được phục vụ bởi UAV $k' \neq k$. Lưu ý rằng các mã định danh (*identifiers*) thực tế của UAV $k \in \mathcal{K}$ và cụm $n_k \in \mathcal{N}_k$, được chọn tương ứng từ tập hợp $\mathcal{L}$ và tập hợp $\mathcal{N}$ lần lượt là $\pi(k)$ và $\pi(n_k)$. Trong đó, $\pi(k)$ sẽ ánh xạ k trong $\mathcal{K}$ thành l trong $\mathcal{L}$, $l = 1, 2, \dots, L$ và $\pi(n_k)$ sẽ ánh xạ n_k trong $\mathcal{N}_k$ thành n trong $\mathcal{N}$.

- Giai đoạn triển khai: Theo kết quả tối ưu của bước trước, các UAV sẽ phối hợp với MBS để thực hiện lưu trữ, bay, dừng và phân phối dữ liệu đến các IDU trong các cụm theo thời gian thực với giá trị tổng tốc độ phân phối dữ liệu cực đại.

- Giai đoạn chờ: Tại điểm dừng cuối, sau khi hoàn tất phân phối dữ liệu, UAV sẽ dừng chờ một khoảng thời gian ngắn để nhận nhiệm vụ tiếp theo từ MBS (nếu có). Cuối cùng, các UAV bay đến các trạm sạc gần đó và chuyển sang chế độ chờ.

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

Ký hiệu	Ý nghĩa của ký hiệu
I	Số lượng file nội dung
L	Số lượng UAV
$\mathcal{L}$	Tập hợp gồm L UAV
$\mathcal{K}$	Tập hợp con số UAV tối ưu thuộc $\mathcal{L}$
K	Số phần tử UAV trong tập $\mathcal{K}$
$\pi(k)$	Mã định danh của UAV $k \in \mathcal{K}$
N	Số lượng cụm
$\mathcal{N}$	Tập hợp gồm N cụm

$\mathcal{N}_k$	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 $n_k \in \mathcal{N}_k$
N_i	Số lượng cụm yêu cầu nội dung i , $i = 1, 2, \dots, I$
R_n	Bán kính của cụm n
s_n	Chỉ số lựa chọn mode phục vụ của cụm n
h_n	Độ cao của UAV tại cụm n
θ_n	Góc ngẩng để đạt độ phủ tối ưu của UAV tại cụm n
ρ_n	Mật độ IDU ở cụm n , $n = 1, 2, \dots, N$
α	Hệ số mũ độ lệch phổ biến giữa các nội dung
s_i	Kích cỡ của file nội dung thứ i
p_i	Mức độ phổ biến của nội dung thứ i
$c_{n,i}$	Chỉ số lưu trữ tối ưu dựa trên chọn lựa chế độ truyền video i cho IDU trong cụm n
$q_{n,i}$	Chỉ số yêu cầu $q_{n,i} \in \{0, 1\}$: xác định các IDU trong cụm n có yêu cầu nội dung i hay không
$\mathcal{T}_k$	Quỹ đạo bay của UAV k
v_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
$P_{n,i}^{\text{M2I}}$	Công suất phát nội dung i từ MBS đến IDU trong cụm n
P_s	Công suất sử dụng khi đứng yên của UAV
B	Băng thông hệ thống
σ^2	Công suất nhiễu trắng Gaussian

3.3. TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ CỦA HỆ THỐNG THEO MÔ HÌNH RCD-CTR

Trong phần này, để xây dựng bài toán tối ưu cho mô hình RCD-CTR, ngoài các biến như độ phổ biến p_i của nội dung i được cho bởi công thức (1.1), giá trị N_i biểu diễn số lượng cụm có IDU yêu cầu nội dung i theo công thức (1.2), mối quan hệ giữa $q_{n,i}$ với số cụm N theo công thức (1.3), bài toán tối ưu hóa của mô hình RCD-CTR

còn được thiết lập dựa trên các yếu tố bổ sung được mô tả trong phần tiếp theo.

3.3.1. Các công thức thiết lập cơ bản

3.3.1.1. Chỉ số lựa chọn mode phục vụ

Trong hệ thống này, chỉ số lựa chọn mode phục vụ được ký hiệu là $s_n \in \{0,1\}$. Mục tiêu của chỉ số này là dùng để xác định mode được lựa chọn để phục vụ các IDU trong cụm n : hoặc là phục vụ bởi UAV ($s_n = 1$) hoặc là phục vụ bởi trạm gốc MBS ($s_n = 0$), nhằm tối đa hóa tổng thông lượng của hệ thống.

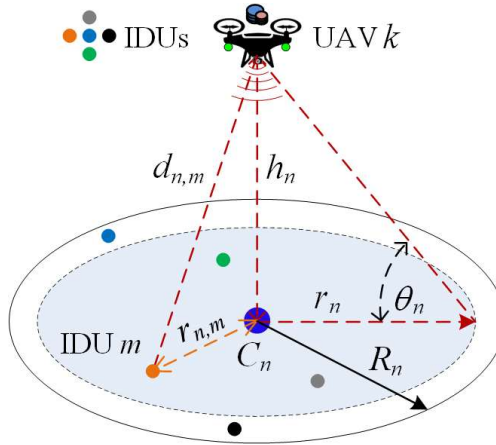
Khi chỉ số lựa chọn mode phục vụ $s_n = 1$, UAV phải bay đến (x_n, y_n, h_n) và cùng với $q_{n,i} = 1$ thì UAV phải lưu trữ nội dung i để phục vụ các IDU trong cụm n . Điều này có nghĩa là chỉ số lưu trữ $c_{n,i}$ có thể được tính toán dựa trên s_n và $q_{n,i}$ như sau:

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

Vì vậy, với một số lượng cụm cho trước và mô hình phổ biến của I nội dung, $q_{n,i}$ được tạo ngẫu nhiên theo (1.3). Sau đó, chỉ số lưu trữ dựa trên chọn chế độ truyền tối ưu $c_{n,i}$ có thể thu được bằng cách tìm s_n .

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 cẩn thận tùy thuộc vào môi trường truyền sóng, ví dụ như ngoại ô, đô thị, đô thị đông đúc và đô thị cao tầng, như được trình bày trong Hình 3-2 [102].



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

Trong kênh truyền từ không gian đến mặt đất (air-to-ground – A2G), một UAV tùy ý dừng tại tọa độ (x_n, y_n, h_n) để truyền nội dung đến các IDU trong cụm n . Áp

dụng mô hình kênh A2G được sử dụng rộng rãi, được xác định bởi mô hình xác suất suy hao đường truyền [105], [142], [143], [144]. Mô hình này bao gồm các kênh truyền tầm nhìn thẳng LoS và kênh truyền bị che chắn NLoS. Suy hao kênh truyền của các liên kết LoS và NLoS giữa UAV và IDU m trong cụm n được biểu thị bằng công thức:

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

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

Bằng cách xem xét thêm xác suất xảy ra của kênh truyền LoS ($P_{n,m}^{\text{LoS}}$) và NLoS ($P_{n,m}^{\text{NLoS}} = 1 - P_{n,m}^{\text{LoS}}$), thiết lập được mức suy hao kênh truyền trung bình như công thức sau:

$$\begin{aligned} \bar{\psi}_{n,m} &= \psi_{n,m}^{\text{LoS}} P_{n,m}^{\text{LoS}} + \psi_{n,m}^{\text{NLoS}} P_{n,m}^{\text{NLoS}} \\ &= \left(\frac{4\pi f_c d_{n,m}}{c} \right)^2 [\eta_n^{\text{LoS}} P_{n,m}^{\text{LoS}} + \eta_n^{\text{NLoS}} P_{n,m}^{\text{NLoS}}] \end{aligned} \quad (3.3)$$

với xác suất xảy ra kênh truyền LoS là:

$$P_{n,m}^{\text{LoS}} = \frac{1}{1 + \kappa_n \exp[-v_n(\xi_{n,m} - \kappa_n)]} \quad (3.4)$$

trong đó, κ_n và v_n là các hằng số liên quan đến môi trường của cụm n [103], $r_{n,m}$ 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

Khi MBS truyền nội dung đến các IDU trong cụm n , kênh truyền thông giữa MBS và IDU m trong cụm n [147], [148], được xác định bởi công thức:

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

trong đó, β_0 là độ lợi công suất kênh M2I tại khoảng cách tham chiếu 1m, γ_0 và β_1 lần lượt là số mũ suy hao đường truyền và hệ số Rician, $d_{n,m}^{\text{M2I}}$ là khoảng cách giữa MBS và IDU m trong cụm n , $h_{n,m}^{\text{M2I,NLoS}} = \mathcal{CN}(0, 1)$ là hàm phân phối chuẩn phức có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng 1, và:

$$h_{n,m}^{\text{M2I,LoS}} = e^{-j \frac{2\pi d_{n,m}^{\text{M2I}}}{\lambda}} \quad (3.6)$$

3.3.3. Thông lượng kênh truyền

Đối với các kênh U2I, giả sử mỗi UAV được coi là một người dùng di động thông thường và được phân bổ một tài nguyên phổ tần đường xuống để truyền thông. Tỷ số tín hiệu trên nhiễu của kênh để phân phối nội dung i từ UAV đến IDU m trong cụm n được xác định bởi công thức [105]:

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

với $P_{n,i}^{\text{U2I}}$ là công suất truyền của UAV được sử dụng để phân phối nội dung i đến các IDU trong cụm n . Từ công thức (3.7), ta có tốc độ phân phối dữ liệu tương ứng được biểu diễn theo công thức:

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

trong đó B là băng thông hệ thống.

Cuối cùng, tổng tốc độ phân phối dữ liệu trung bình cho mỗi nội dung được truyền điễm – đa điễm từ UAV đến các IDU trong tất cả các cụm được xác định theo công thức:

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

Đối với các kênh M2I, tỷ số tín hiệu trên nhiễu của kênh truyền dùng để phân phối nội dung i từ MBS đến IDU m trong cụm n được xác định bởi công thức:

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

trong đó, $P_{n,i}^{\text{M2I}}$ là công suất của MBS để truyền nội dung i đến các IDU trong cụm n . Từ (3.10), ta có tốc độ phân phối dữ liệu tương ứng được biểu diễn bởi:

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

Cuối cùng, tổng tốc độ phân phối dữ liệu trung bình cho mỗi nội dung được truyền điễm – đa điễm từ MBS đến tất cả các IDU được xác định bởi công thức:

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

Từ đó, giá trị thông lượng hệ thống, hay tổng tốc độ phân phối dữ liệu trung bình tổng thể cho mỗi cụm đạt được nhờ sự hợp tác giữa MBS và UAV được xác định bởi:

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

3.3.4. Thời gian phục vụ trung bình

Thời gian phục vụ được định nghĩa như trong Chương 2, trong chương này thời gian phục vụ có xét đến MBS. Giả sử $d(n_k - 1, n_k)$ biểu thị khoảng cách từ điểm dừng tại cụm $n_k - 1$ đến điểm dừng tại cụm n_k theo quỹ đạo k của UAV k , thời gian bay của UAV k trên chặng này được biểu thị bằng công thức:

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

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:

$$T_{n_k, i}^{\text{U2I}} = \frac{S_i}{C_{n_k, i}^{\text{U2I}}} \quad (3.15)$$

trong đó, $C_{n_k, i}^{\text{U2I}} = \min\{C_{n_k, m, i}^{\text{U2I}}, S_{\pi(n_k)} = 1, q_{\pi(n_k), i} = 1, \forall m, i\}$. Điều này có nghĩa là chọn dung lượng kênh xấu nhất giữa UAV k và các IDUs trong cụm n_k để truyền nội dung i .

Tương tự, thời gian truyền của MBS để phân phối nội dung i đến các IDUs trong cụm $n \neq \pi(n_k)$ là:

$$T_{n, i}^{\text{M2I}} = \frac{S_i}{C_{n, i}^{\text{M2I}}} \quad (3.16)$$

với $C_{n, i}^{\text{M2I}} = \min\{C_{n, m, i}^{\text{M2I}}, S_n = 0, q_{n, i} = 1, \forall m, i\}$.

Thời gian phục vụ trung bình cho mỗi cụm được xác định bởi công thức (3.17):

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

3.3.5. Mức tiêu thụ tài nguyên

3.3.5.1. Mức tiêu thụ dung lượng lưu trữ

Để đảm bảo hiệu quả lưu trữ đệm, mức chiếm dụng dung lượng lưu trữ trên UAV không chỉ phụ thuộc vào kích thước nội dung s_i mà còn phụ thuộc vào chỉ mục lưu

trữ dựa trên chọn lựa chế độ truyền $c_{n,i}$ (tức là chỉ mục yêu cầu $q_{n,i}$ và chỉ số lựa chọn chế độ phục vụ s_n), được xác lập bởi công thức:

$$S_C = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I c_{n,i} s_i \quad (3.18)$$

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. Do mức công suất dừng để phát hầu như giống nhau, nên không cần thiết phải tối ưu cho các UAV khác nhau. Vì vậy, mô hình sẽ chỉ xét việc phân bổ công suất $P_{n,i}^{U2I}$ cho UAV dừng để truyền nội dung i đến các IDUs trong cụm n và công suất P_k^{FLY} cho UAV k dừng để bay. Do đó, 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}) lần lượt được xác lập theo các công thức:

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

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

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

trong đó, P_k^{FLY} là công suất bay của UAV k loại 4 cánh quạt khi đạt vận tốc v_k được xác lập theo công thức [104]:

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

Với các giá trị: $c_0 = I_0^2 R_0$, $c_1 = 30 I_0 K_E / \pi$, $c_2 = 2 I_0 R_0 C_m / K_T$, $c_3 = 30 K_E C_m / (\pi K_T)$, $c_4 = R_0 C_m^2 / K_T^2$, và:

$$V_k = (m^2 g^2 + C_d^2 v_k^4) / C_t^2 \quad (3.23)$$

Các ký hiệu trong (3.22) và (3.23) được định nghĩa theo Bảng 1-2 và Bảng 3-1.

3.4. BÀI TOÁN RCD-CTR VÀ GIẢI PHÁP GA

3.4.1. Bài toán RCD-CTR

Một cách tổng quát, nhằm cực đại tốc độ truyền dữ liệu trung bình đồng thời cực

tiêu thời gian phục vụ, bài toán RCD-CTR được mô hình hóa toán học như sau:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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 hay $N_c = \sum_{k=1}^K N_k$, còn γ là hệ số cân bằng, đồng thời cũng được dùng để hiệu chỉnh thứ nguyên và thang đo hàm mục tiêu. Vì có một số cụm được phục vụ bởi MBS, nên ta có: $\mathcal{N}_1 \cup \mathcal{N}_2 \cup \dots \cup \mathcal{N}_K = \mathcal{N}_c$.

Trong công thức (3.24), các giá trị S_C^* , P_{T*}^{U2I} , P_{T*}^{M2I} và P_{T*}^{FLY} lần lượt là giới hạn về tổng dung lượng lưu trữ trên UAV, tổng công suất truyền của UAV, tổng công suất truyền của MBS và tổng công suất bay của UAV. $P_{\min}^{U2I}$ và $P_{\max}^{U2I}$, $P_{\min}^{M2I}$ và $P_{\max}^{M2I}$, $h_{\min}$ và $h_{\max}$, $P_{\min}^{FLY}$ và $P_{\max}^{FLY}$ lần lượt là các giới hạn trên và giới hạn dưới của công suất phân phối dữ liệu của UAV đến IDU, công suất phân phối dữ liệu của MBS đến IDU, độ cao khi bay của UAV và công suất bay của UAV.

Do độ phức tạp của biểu thức (3.24), ta chia bài toán ban đầu thành 02 bài toán tối ưu thành phần. Để thực hiện, ta có thể thấy rằng 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 phục vụ trung bình bởi UAV bằng cách tìm các giá trị của

K, P_k^{FLY} và quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$:

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

Vì vậy, bài toán tối ưu hóa RCD-CTR (3.24) có thể được chia thành 02 bài toán tối ưu hóa thành phần được trình bày trong phần tiếp theo.

3.4.1.1. Bài toán tối ưu SRT

Mục tiêu của bài toán tối ưu SRT là cực đại tổng tốc độ phân phối dữ liệu trung bình, đồng thời cực tiểu thời gian truyền bằng cách tìm các giá trị $s_n, P_{n,i}^{\text{U2I}}, P_{n,i}^{\text{M2I}}$ và h_n .

$$\max_{s_n, P_{n,i}^{\text{U2I}}, P_{n,i}^{\text{M2I}}, h_n} \bar{C} - \gamma \bar{T}_T \quad (3.27a)$$

$$\text{s.t.} \quad S_C \leq S_C^* \quad (3.27b)$$

$$P_T^{\text{U2I}} \leq P_{T^*}^{\text{U2I}} \quad (3.27c)$$

$$P_T^{\text{M2I}} \leq P_{T^*}^{\text{M2I}} \quad (3.27d)$$

$$P_{\min}^{\text{U2I}} \leq P_{n,i}^{\text{U2I}} \leq P_{\max}^{\text{U2I}}, \quad \forall n, i, \quad (3.27e)$$

$$P_{\min}^{\text{M2I}} \leq P_{n,i}^{\text{M2I}} \leq P_{\max}^{\text{M2I}}, \quad \forall n, i, \quad (3.27f)$$

$$h_{\min} \leq h_n \leq h_{\max}, \quad \forall n \quad (3.27g)$$

3.4.1.2. Bài toán tối ưu FLT

Kế thừa kết quả từ bài toán SRT, bài toán FLT sẽ tiếp tục thực hiện cực tiểu thời gian phục vụ của UAV bằng cách tìm các giá trị K, P_k^{FLY} và quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$ được mô hình toán như sau:

$$\min_{K, P_k^{\text{FLY}}, \mathcal{T}_k} \bar{T}_F \quad (3.28a)$$

$$\text{s.t.} \quad P_T^{\text{FLY}} \leq P_{T^*}^{\text{FLY}} \quad (3.28b)$$

$$P_{\min}^{\text{FLY}} \leq P_k^{\text{FLY}} \leq P_{\max}^{\text{FLY}}, \quad \forall k \quad (3.28c)$$

$$1 \leq K \leq N_c \quad (3.28d)$$

3.4.2. Giải bài toán RCD-CTR bằng GA

So với bài toán TCP-3DF ở Chương 2, bài toán RCD-CTR có mức độ phức tạp cao hơn do phải xử lý số lượng biến tối ưu lớn cùng nhiều ràng buộc đa dạng. Vì vậy,

NCS áp dụng phương pháp phân rã bài toán thành các bài toán con và sử dụng thuật toán GA cải tiến đã được xây dựng ở Chương 2 để giải bài toán RCD-CTR.

3.4.2.1. Giải bài toán SRT bằng GA

Đối với bài toán tối ưu SRT theo (3.27), GA được thiết kế cho các ràng buộc đơn giản như (3.27e), (3.27f) và (3.27g). Để giải quyết các ràng buộc phức tạp khác như (3.27b), (3.27c) và (3.27d), NCS sẽ áp dụng hàm phạt [124]. Khi đó, các ràng buộc này được biểu diễn lại 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:

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

với $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ là các mức độ vi phạm ràng buộc được lựa chọn hợp lý để trừng phạt các cá nhân trong thế hệ hiện tại nếu chúng vi phạm các ràng buộc.

Kết quả là, GA có thể được sử dụng để giải bài toán tối ưu SRT không ràng buộc 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): Các 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 $z = 1, 2, \dots, N_p^{SRT}$. Mỗi chuỗi gồm $B_b = N$ bit để biểu diễn s_n và $B_r = PRECI \times (2 \times N \times I + N)$ bit để biểu diễn $P_{n,i}^{U2I}, P_{n,i}^{M2I}$ và h_n . Trong đó, $PRECI$ là số bit biểu diễn 2^{PRECI} 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 [145].

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

Bước 3: Trong 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 $\bar{C}_{SRT}^z$ vào vào bộ chọn lọc (mating pool) để xếp hạng.

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

Bước 3.3: Chọn các cặp cá thể bố mẹ để tạo ra thế hệ con bằng lai ghép đa điểm (multiple-point crossover) 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 (complement operation). 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 $\bar{C}_{SRT}^{t,*}(X^{t,*})$.

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

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

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) $Gen = N_G^{SRT}$, tức là 100 thế hệ.

Lưu ý rằng khi giải bài toán (3.31), ta thu được các giá trị của $T_{n,i}^{U2I}$ và s_n , sau đó, 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

Trong GA, để tìm quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$ cho UAV k , NCS đề xuất phương pháp sau. Đầu tiên, định nghĩa một ma trận mặt nạ nhị phân có kích thước $L \times N_c$, đặt tên là ma trận $\mathbf{B}_{L \times N_c}$. Ma trận này được sử dụng để chọn K UAVs trong số L UAVs để bay

và xác định UAV sẽ dừng lại ở cụm nào trong quỹ đạo bay $\mathcal{T}_k$. Bằng cách này, nếu UAV k được chọn để phục vụ tập hợp các cụm $\mathcal{N}_k$, ta có: $N_k = \sum_{n_k=1}^{N_c} B_{\pi(k),n_k} \geq 1$. Và nếu UAV k dừng lại để phục vụ cụm n_k , ta có: $B_{\pi(k),n_k} = 1$ và ngược lại thì $B_{\pi(k),n_k} = 0$. Tiếp theo, ta định nghĩa thêm một ma trận số nguyên có kích thước $L \times N_c$, đặt tên là ma trận $\mathbf{I}_{L \times N_c}$. Từ đó, ta sẽ thu được ma trận quỹ đạo bay $\mathbf{T}_{L \times N_c}$ được xác định theo công thức:

$$\mathbf{T}_{L \times N_c} = \mathbf{B}_{L \times N_c} \circ \mathbf{I}_{L \times N_c} \quad (3.32)$$

trong đó, toán tử “ $\circ$ ” được sử dụng để biểu diễn cho phép toán: $\mathbf{T}_{l,n_k} = \mathbf{B}_{l,n_k} \mathbf{I}_{l,n_k}$, $\forall l = 1, 2, \dots, L, n_k = 1, 2, \dots, N_c$.

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

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

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

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

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

Tuy nhiên, có các vấn đề xuất hiện cần được giải quyết như sau:

1) có nhiều hơn một UAV bay đến cùng một điểm dừng (vi phạm giữa các UAV, tức là có một cột của ma trận $\mathbf{B}_{L \times N_c}$ chứa nhiều hơn một bit 1),

2) không có UAV nào dừng lại để phục vụ IDU trong cụm n_k (tức là có một cột của ma trận $\mathbf{B}_{L \times N_c}$ không chứa bit 1),

3) UAV không biết bay đến điểm dừng nào trước (vi phạm trong nội bộ quỹ đạo bay của một UAV, tức là có một hàng của ma trận $\mathbf{I}_{L \times N_c}$ có xuất hiện các số nguyên giống nhau), và

4) số lượng UAV tối ưu được triển khai là $1 \leq K \leq N_c$.

Vì vậy, để giải quyết 02 vấn đề đầu tiên, một hình phạt được áp dụng nếu $\sum_{l=1}^L \mathbf{B}_{l,n_k} \neq 1, \forall n_k = 1, 2, \dots, N_c$, với một lượng hình phạt là $\sum_{n_k=1}^{N_c} (\sum_{l=1}^L \mathbf{B}_{l,n_k} - 1)^2$.

Để giải quyết vấn đề thứ 3, một lượng hình phạt là khoảng cách $d_{\max}$ được thêm trực tiếp vào thời gian bay (3.14) sao cho:

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

và để giải quyết vấn đề cuối cùng, ta định nghĩa $b_{\pi(k)} = \min\{1, \sum_{n_k=1}^{N_c} \mathbf{B}_{\pi(k), n_k}\}$ với ý nghĩa UAV k là UAV đang hoạt động, tức là UAV k được chọn để bay nếu $b_{\pi(k)} = 1$ và ngược lại thì $b_{\pi(k)} = 0$. Vì vậy, mức phạt được áp dụng cho trường hợp này là $(\min\{0, \sum_{l=1}^L b_l - 1\})^2 + (\min\{0, N_c - \sum_{l=1}^L b_l\})^2$ để đảm bảo $1 \leq K = \sum_{l=1}^L b_l \leq N_c$, ở đây lưu ý rằng $b_l = b_{\pi(k)}$.

Hơn nữa, sẽ phát sinh thêm một giá trị phạt nếu ràng buộc (3.33b) không được thỏa mãn. Để xử lý điều này, ta viết lại ràng buộc (3.33b) dưới dạng hàm phạt như sau:

$$\Delta P_T^{\text{FLY}} = P_T^{\text{FLY}} - P_T^{\text{FLY}} \geq 0 \quad (3.35)$$

và giá trị phạt cho trường hợp này là $(\min\{0, \Delta P_T^{\text{FLY}}\})^2$.

Từ đó, giá trị tổng hàm phạt khi xét toàn bộ các thành phần bị phạt, được xác định như sau:

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

với $\lambda_4, \lambda_5, \lambda_6$ là các mức độ vi phạm ràng buộc được lựa chọn hợp lý.

Cuối cùng, bài toán tối ưu có ràng buộc FLT (3.33) được chuyển đổi thành bài toán không ràng buộc có thể được giải bằng GA như sau:

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

Đến đây, bài toán FLT có thể giải bằng GA có áp dụng phương pháp tách chuỗi nhiễm sắc thể tương tự ở Chương 2, được trình bày theo Thuật toán 3.2 như sau:

Thuật toán 3.2. GA cho bài toán FLT
Đầu vào (Input): Các tham số của 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 $PREC1 \times L$

bit để tạo ra một nghiệm ứng viên cho P_k^{FLY} . Ở đây, $PREC1$ là số bit biểu diễn 2^{PREC1} 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 $\bar{T}_{\text{FLT}}^Z$, tức là $\bar{T}_{\text{FLT}}^Z(X_R^Z, X_B^Z, X_I^Z)$.

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

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

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

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

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

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

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

Trong đó, điều kiện kết thúc TC của Thuật toán 3.2 xảy ra khi đáp ứng một trong các điều kiện sau:

- 1) Trung bình của tổng hình phạt F_{FLT} nhỏ hơn 10^{-3} trong 10 thế hệ liên tiếp.
- 2) $Gen = N_G^{\text{FLT}}$, tức là 100 thế hệ.

3.4.3. Độ phức tạp của GA cho bài toán RCD-CTR

Độ phức tạp tính toán của bài toán RCD-CTR là sự kết hợp tuần tự từ hai bài toán thành phần SRT và FLT, được biểu diễn dưới dạng $\mathcal{O}(\text{RCD-CTR}) = \mathcal{O}(\text{SRT} + \text{FLT})$. Vì cả hai bài toán SRT và FLT đều được giải bằng các thuật toán tiến hóa (GA/GTS), tương tự như phân tích đối với bài toán TCP-3DF ở Chương 2, độ phức tạp tính toán của bài toán RCD-CTR có thể được xấp xỉ bởi $\mathcal{O}(\text{RCD-CTR}) = \mathcal{O}(N_P N_G C_0)$, trong đó bỏ qua chi phí của các toán tử di truyền như lựa chọn, lai ghép và đột biến. Ở đây, N_P là kích thước quần thể, N_G là số thế hệ tiến hóa, và C_0 là chi phí tính toán hàm mục tiêu.

Chi phí C_0 phụ thuộc trực tiếp vào quy mô của hệ thống mạng trong mô hình RCD-CTR, bao gồm số cụm N , số nội dung I , số UAV L , và số IDU trong mỗi cụm. Cụ thể, chi phí tính toán hàm mục tiêu có thể được ước lượng tỷ lệ với $N \times I \times L \times \max\{M_n\}$ với M_n là số lượng IDU trong cụm thứ n . Ngoài ra, việc đưa thêm biến quyết định liên quan đến số lượng UAV vào mô hình RCD-CTR làm gia tăng đáng kể số chiều của không gian tìm kiếm. Điều này dẫn đến yêu cầu tăng kích thước quần thể N_P và số thế hệ N_G nhằm đảm bảo khả năng hội tụ ổn định và chính xác của thuật toán tiến hóa.

Từ các phân tích trên, có thể thấy rằng bài toán RCD-CTR có độ phức tạp tính toán cao hơn đáng kể so với bài toán TCP-3DF, không chỉ do chi phí tính toán hàm mục tiêu lớn hơn mà còn do không gian tìm kiếm mở rộng. Do đó, để đảm bảo tính khả thi trong giải quyết bài toán, NCS đã lựa chọn cách tiếp cận phân rã bài toán RCD-CTR thành hai bài toán thành phần SRT và FLT như trình bày ở trên, qua đó giảm độ phức tạp và nâng cao hiệu quả tính toán. Tương tự bài toán TCP-3DF, khi triển khai thực tế, GA cho bài toán RCD-CTR được dùng ở giai đoạn chuẩn bị như được trình bày trong mục 3.2 theo cơ chế offline/semi-online tùy vào đặc tính thống kê của hệ thống cũng như các A&S khác nhau.

3.5. ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT

3.5.1. Thiết lập thông số

Các thông số hệ thống của mô hình 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 phạm vi [100, 500] Mbit, [10, 20] m và [0,01, 0,1] IDU/m². MBS đặt tại vị trí (0, 0, 25)m. N UAV ban đầu bắt đầu ở các vị trí cách MBS một khoảng gần 500m

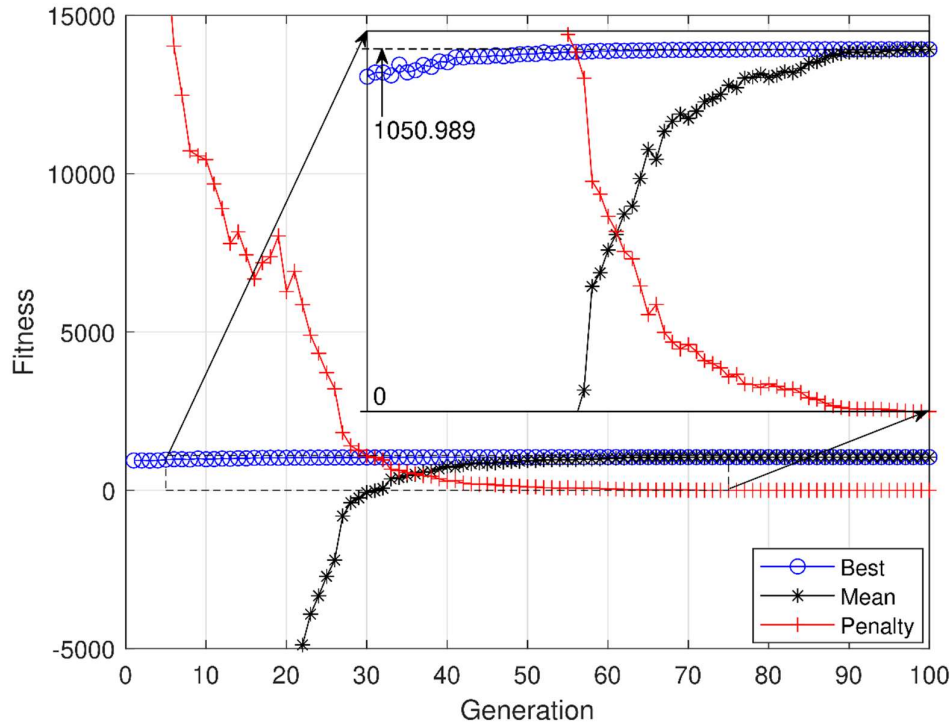
theo phương ngang, có cao độ từ 5m đến 50m. Để làm cho quỹ đạo bay ba chiều hiệu quả hơn, bộ thông số đặc tính kênh truyền (κ_n , ν_n , η_n^{LOS} , η_n^{NLOS} , θ_n) trong cụm n cũng được chọn ngẫu nhiên phân bố đều từ tập $\{1, 2, 3, 4\}$ tương ứng với 4 loại môi trường (ngoại ô, đô thị, đô thị đông đúc, đô thị cao tầng) như trong 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
$\beta_0, \beta_1, \gamma_0$	10^{-3} , 6, 4
$h_{\min}, h_{\max}$	10 m, 100 m
$P_{\min}^{\text{U2I}}, P_{\max}^{\text{U2I}}$	0 W, 5 W
$P_{\min}^{\text{M2I}}, P_{\max}^{\text{M2I}}$	0 W, 10 W
S_C^*	50%xtổng dung lượng của các nội dung
$P_{T^*}^{\text{U2I}}$	$25\% \times N_x P_{\max}^{\text{U2I}}$ (W)
$P_{T^*}^{\text{M2I}}$	$25\% \times N_x P_{\max}^{\text{M2I}}$ (W)
P_S	250 W
$P_{\min}^{\text{FLY}}, P_{\max}^{\text{FLY}}$	300 W, 2000 W
$P_{T^*}^{\text{FLY}}$	5000 W
B, f_c	10 MHz, 2 GHz
σ^2, c, α	10^{-13} W, 3×10^8 m/s, 1
I_0, R_0, U_0	0.3 A, 0.4Ω , 10 V
K_w, m, g	380 rpm/V, 3 Kg, 9.8 m/s^2
C_m, C_d, C_t	$8.89 \times 10^{-7} \text{ Nm/(rad/s)}^2$, 0.11 N/(m/s)^2 , $4.85 \times 10^{-5} \text{ N/(rad/s)}^2$
N_P^{SRT}	3000 cá thể, quy mô cá thể trong thuật toán GA cho bài toán SRT
N_P^{FLT}	5000 cá thể, quy mô cá thể trong thuật toán GA cho bài toán FLT
$N_G^{\text{SRT}}, N_G^{\text{FLT}}$	100 thế hệ
$P_G^{\text{SRT}}, P_G^{\text{FLT}}$	0.9, khoảng cách thế hệ
$PREC_I$	6 bit biểu diễn độ chính xác của mỗi biến thực
P_C^{SRT}	0.9 xác suất lai của bài toán SRT
P_M^{SRT}	10^{-10} xác suất 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}	500 m
$\gamma; \lambda_{1,2,3,4,5,6}$	1; 0.1, 10^4 , 100, 100, 1, 0.1

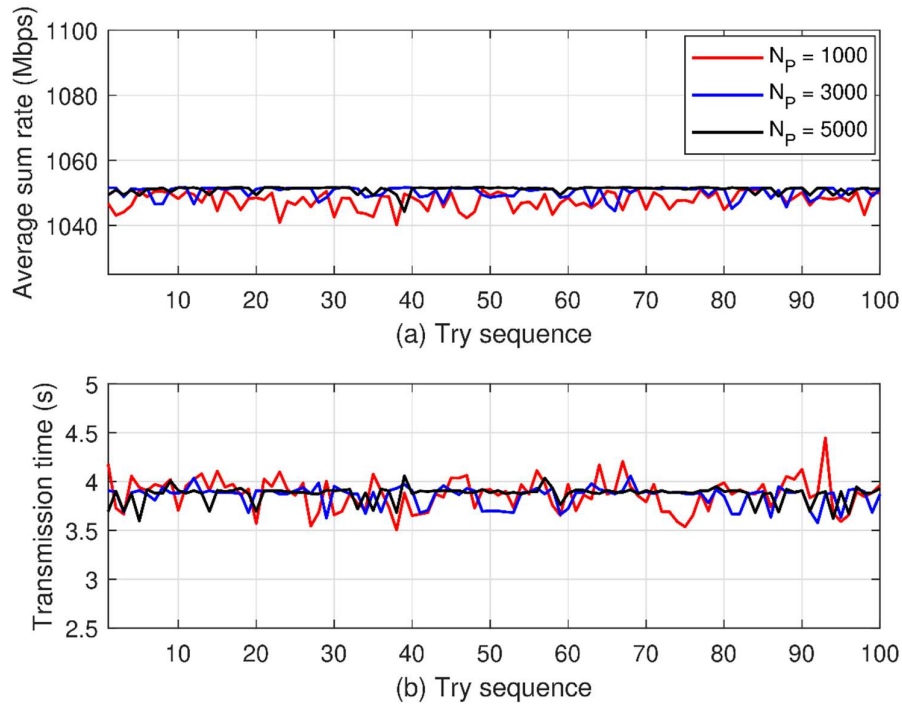
3.5.2. Kết quả giải bài toán SRT bằng GA



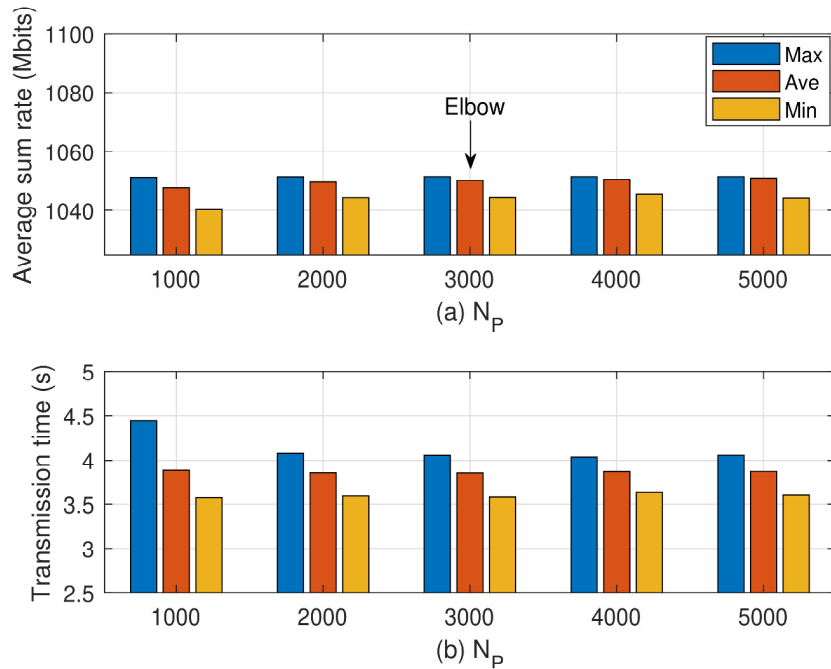
Hình 3-3. Sự hội tụ của thuật toán GA đối với bài toán SRT

Đầu tiên, NCS đánh giá hiệu suất của SRT bằng một tập hợp các tham số được trình bày trong Bảng 3-2. Hình 3-3 cho thấy sự hội tụ của SRT qua 100 thế hệ. Có thể thấy rằng SRT bắt đầu hội tụ sau 50 thế hệ và đáp ứng TC từ thế hệ thứ 65. Tại điểm hội tụ, giá trị độ thích nghi trung bình (Mean) và giá trị độ thích nghi tốt nhất (Best) của tất cả các cá thể gần như giống nhau. Điều này có nghĩa là, hầu hết các cá thể ở các thế hệ cuối cùng sở hữu các đặc điểm di truyền tốt nhất theo nguyên lý tiến hóa. Hình 3-3 cũng chứng minh rằng giá trị hàm phạt F_{SRT} tiến tới 0 và do đó tất cả các ràng buộc đều được thỏa mãn.

Như đã nhận thấy từ bài toán TCP-3DF ở Chương 2, độ chính xác và tính ổn định có thể được cải thiện bằng cách tăng kích thước quần thể nhưng không quá lớn. Kích thước quần thể lớn gây ra độ phức tạp tính toán cao hơn trong khi không cải thiện đáng kể độ chính xác và tính ổn định nữa. Và kích thước quần thể nhỏ với độ phức tạp tính toán thấp không thể đảm bảo độ chính xác và tính ổn định.



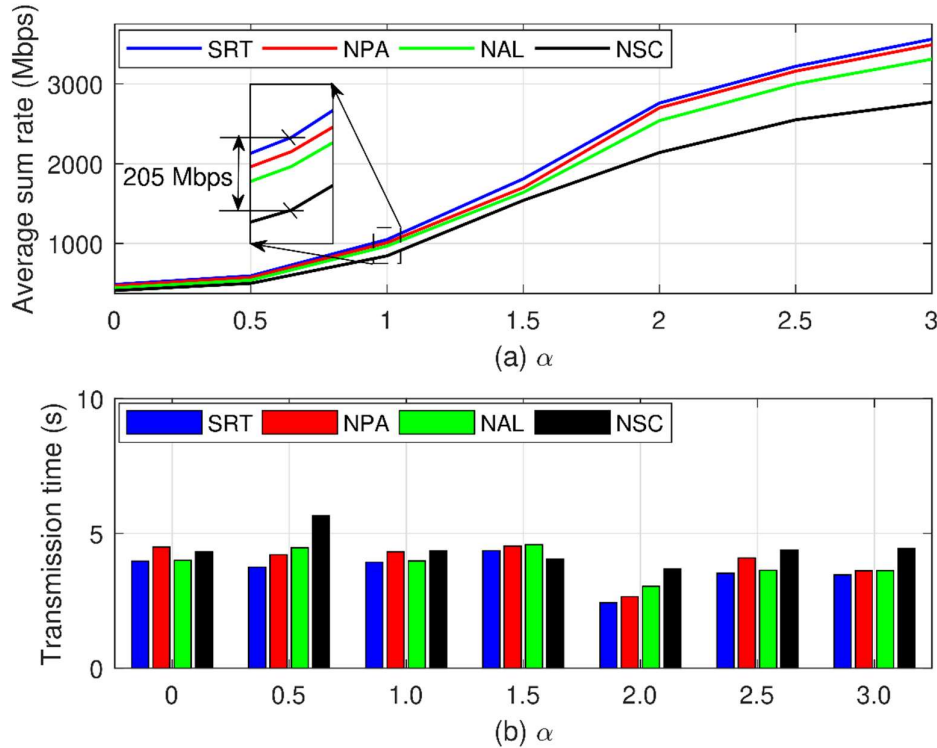
Hình 3-4. Tính ổn định của thuật toán GA đối với bài toán SRT



Hình 3-5. Độ chính xác của thuật toán GA đối với bài toán SRT

Để đảm bảo SRT hội tụ chính xác và ổn định trong độ phức tạp tính toán hợp lý, NCS chạy phân tích nhiều trường hợp để lựa chọn kích thước quần thể. Đặc biệt, NCS thực hiện 100 lần thử SRT cho mỗi kích thước quần thể (N_p) trong tập $\{1000, 3000, 5000\}$. Sau đó, vẽ biểu đồ kết quả của tổng tốc độ phân phối dữ liệu và thời

gian phát của mỗi lần thử như thể hiện trong Hình 3-4, rồi vẽ biểu đồ giá trị tối thiểu (Min), trung bình (Ave) và tối đa (Max) của 100 lần thử như thể hiện trong Hình 3-5. Có thể thấy rõ trong Hình 3-4 và Hình 3-5 rằng khi N_P thấp (1.000) khiến kết quả kém chính xác và kém ổn định hơn. Và với $N_P = 3.000$ thì bài toán SRT đạt được độ chính xác và độ ổn định tốt, trong khi $N_P = 5.000$ cũng không cải thiện độ chính xác và ổn định đáng kể. Hình 3-5 cũng chỉ ra rằng kích thước quần thể thích hợp là 3.000 khi giá trị trung bình Ave gần chạm tới mức giá trị tối đa Max đối với tổng tốc độ phân phối dữ liệu (Hình 3-5a) và Min đối với thời gian phát (Hình 3-5b), tức là, xuất hiện nhiều kết quả tối ưu toàn cục chính xác với độ ổn định cao đạt được trong 100 lần thử.

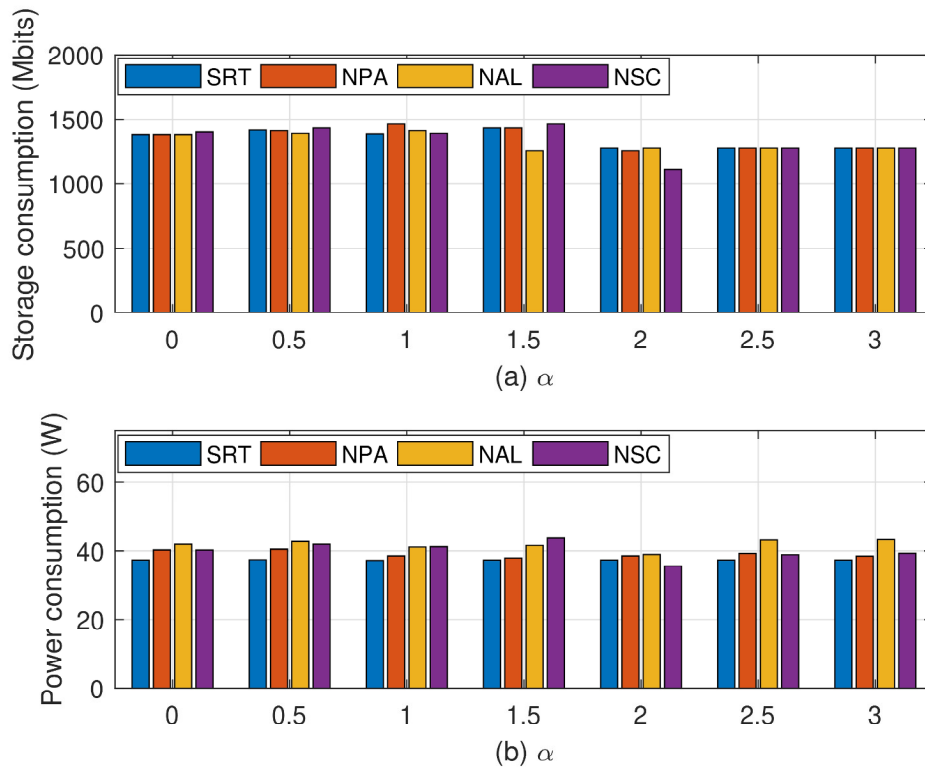


Hình 3-6. Hiệu năng thông lượng hệ thống và thời gian truyền theo α

NCS đánh giá hiệu suất của phương pháp SRT bằng cách so sánh với các cơ chế khác bao gồm 1) NPA (None Power Allocation) – trường hợp không có tối ưu về công suất phát; 2) NAL (None Altitude Optimization) – trường hợp không có tối ưu về độ cao của UAV; 3) NSC (None mode Selection-based Caching) – trường hợp hệ thống không có tối ưu chỉ số lựa chọn mode phục vụ s_n .

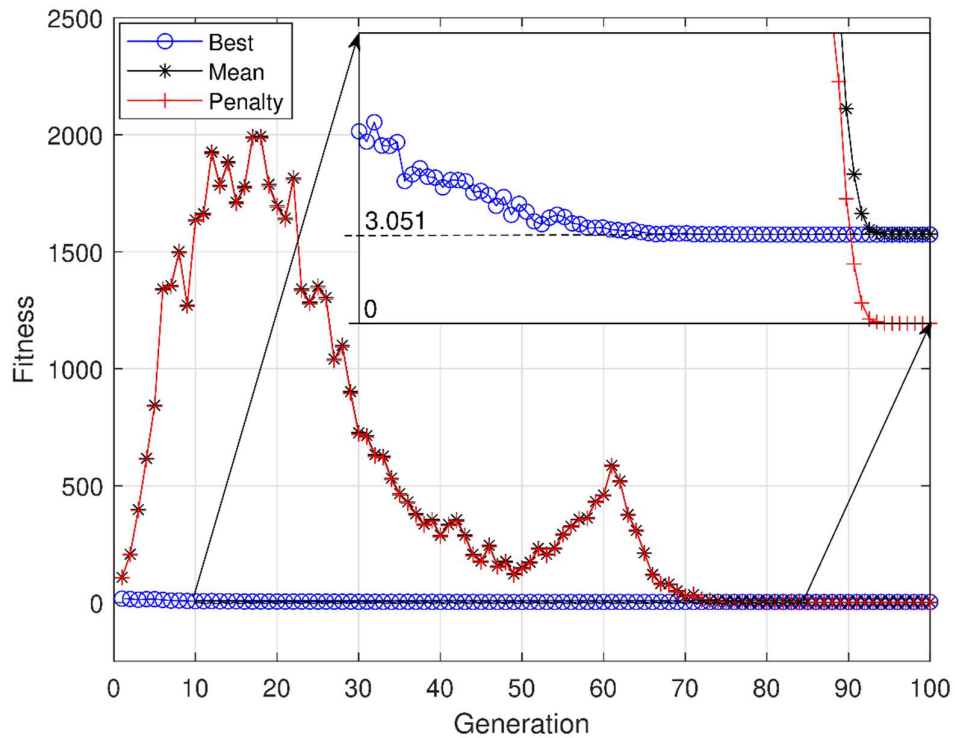
NCS đánh giá các số liệu hiệu suất hệ thống của SRT, NPA, NAL và NSC bao gồm tổng tốc độ phân phối dữ liệu, thời gian phát dữ liệu, dung lượng lưu trữ, công

suất tiêu thụ của hệ gồm MBS và các UAV bay đàn. Hình 3-6 và Hình 3-7 biểu thị các số liệu hiệu suất của các phương pháp trên theo α . Trong Hình 3-6a, có thể thấy khi α thấp hoặc bằng 0, tất cả các nội dung đều có mức độ phổ biến tương tự hoặc giống nhau. Điều này khiến kỹ thuật lưu trữ không hiệu quả, dẫn đến kết quả là các chỉ số tối ưu hóa không hoạt động tốt. Khi α tăng, các giá trị mức độ phổ biến bị lệch đáng kể hơn giữa các nội dung. Các nội dung được lưu trữ đệm có chọn lọc trong các UAV và do đó tất cả các giải pháp tối ưu hóa có thể cùng hoạt động để làm cho phương pháp SRT được đề xuất hiệu quả hơn so với các giải pháp khác. Đặc biệt, tại $\alpha = 1$, từ NSC, nếu tăng dần số biến tối ưu để có được các phương pháp khác nhau như NAL và NPA, thì tổng tốc độ phân phối dữ liệu tương ứng tăng lên và đến kỹ thuật SRT thì tốc độ dữ liệu tăng lên so với kỹ thuật NSC là 205 Mbps. Điều quan trọng là, kết quả trong Hình 3-6b chứng minh rằng thời gian phát nội dung của SRT luôn thấp hơn so với các phương pháp khác. Hình 3-7 cho thấy thêm các kết quả sử dụng tài nguyên của SRT, NPA, NAL và NSC. Đặc biệt, trong Hình 3-7b, phương pháp SRT tận dụng tối đa mức độ phổ biến của nội dung để đạt được hiệu quả tiêu thụ công suất tối ưu nhất.



Hình 3-7. Dung lượng lưu trữ và mức tiêu thụ công suất theo α

3.5.3. Kết quả giải bài toán FLT bằng GA

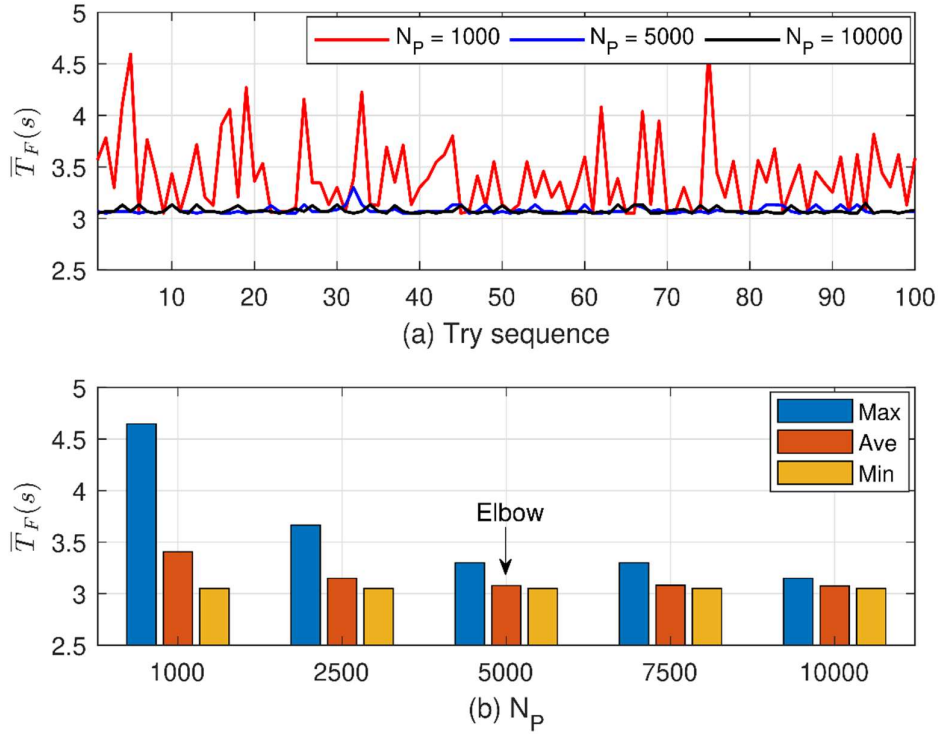


Hình 3-8. Sự hội tụ của thuật toán GA đối với bài toán FLT

Trong phần này, NCS đánh giá hiệu suất của bài toán FLT theo thông tin các tham số được trình bày trong Bảng 3-2. Hình 3-8 cho thấy sự hội tụ của bài toán FLT theo thuật toán GA qua 100 thế hệ. Theo đó, FLT hội tụ từ thế hệ thứ 75. Tương tự như mô hình hội tụ của bài toán SRT, tại điểm hội tụ của bài toán FLT thì giá trị độ thích nghi trung bình (Mean) và giá trị độ thích nghi tốt nhất (Best) của tất cả các cá thể gần như giống nhau. Đồng nghĩa, hầu hết các cá thể ở các thế hệ cuối cùng sở hữu các đặc điểm di truyền tốt nhất theo nguyên lý tiến hóa. Hình 3-8 cũng chứng minh rằng giá trị hàm phạt của bài toán FLT tiến tới 0 và do đó tất cả các ràng buộc đều được thỏa mãn.

NCS đánh giá mức độ hội tụ ổn định và chính xác của bài toán FLT bằng cách thực hiện phân tích nhiều trường hợp để lựa chọn kích thước quần thể. Theo đó, NCS đã thực hiện 100 lần thử FLT cho mỗi kích thước quần thể (N_P) trong tập $\{1000, 2500, 5000, 7500, 10000\}$. Sau đó, vẽ biểu đồ kết quả của thời gian bay và phục vụ của các UAV của mỗi lần thử như thể hiện trong Hình 3-9a, rồi vẽ biểu đồ giá trị tối thiểu (Min), trung bình (Ave) và tối đa (Max) của 100 lần thử theo các giá trị N_P như

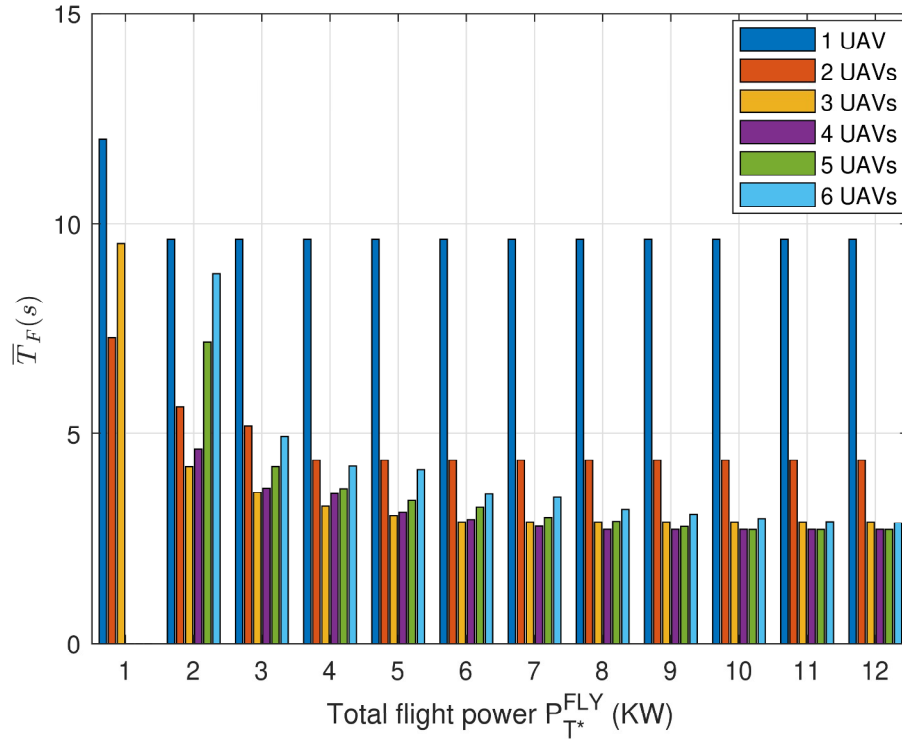
thể hiện trong Hình 3-9b. Theo đó, khi N_p thấp (1.000) khiến kết quả kém chính xác và kém ổn định hơn. Và với $N_p = 5.000$ hoặc $N_p = 10.000$ thì bài toán FLT đạt được độ chính xác và độ ổn định cao hơn. Hình 3-9b chỉ ra rằng kích thước quần thể thích hợp là 5.000 khi giá trị trung bình Ave tiến gần tới mức giá trị tối đa Max.



Hình 3-9. Độ ổn định và tính chính xác của thuật toán GA đối với bài toán FLT

NCS tiếp tục đánh giá hiệu năng của bài toán FLT thông qua giá trị tổng công suất bay P_T^{FLY} của các UAV theo các giá trị công suất giới hạn P_{T*}^{FLY} qua Hình 3-10. Theo đó, kết quả đã minh họa rõ nét cho ưu việt của bài toán FLT khi kết hợp nhiều UAV để xử lý phân phối dữ liệu hiệu quả cho các IDU trong nhiều cụm khác nhau. Khi giới hạn công suất P_{T*}^{FLY} thấp, thì số UAV tham gia vào phân phối dữ liệu sẽ bị hạn chế, vì không đủ công suất cho phép nhiều UAV cùng tham gia bay đến phân phối dữ liệu cho các IDU. Khi nâng mức công suất giới hạn P_{T*}^{FLY} lên thì có nhiều UAV cùng tham gia vào việc phân phối dữ liệu hơn, tuy nhiên kết quả phản ánh một điều rất thú vị: không phải là nhiều UAV tham gia thì đạt được giá trị thời gian bay và phục vụ thấp, mà là với một mức ngưỡng công suất tiêu thụ giới hạn P_{T*}^{FLY} , bài toán FLT luôn xác định được một số lượng tối ưu nhất các UAV tham gia phân phối dữ liệu đến IDU. Ví dụ ở mức giới hạn công suất $P_{T*}^{FLY} \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$ KW thì kết quả minh họa của bài toán FLT luôn cho thấy số lượng UAV tham gia phân phối dữ liệu

tối ưu tương ứng là 3 UAV. Khi tăng giới hạn công suất $P_{T*}^{FLY} \geq 7KW$, số lượng UAV tối ưu tham gia sẽ là 4. Đây chính là minh họa cho kết quả nổi bật về tối ưu hóa số lượng UAV tham gia phân phối dữ liệu đến các IDU của mô hình RCD-CTR.



Hình 3-10. Thời gian phục vụ theo P_{T*}^{FLY} với các số lượng UAV khác nhau

Tiếp theo Hình 3-10 thì Bảng 3-3 thể hiện rõ giá trị về số lượng UAV tối ưu tham gia phân phối dữ liệu trong bài toán FLT. Theo đó, có thể dễ dàng thấy được, với cùng mức giới hạn công suất P_{T*}^{FLY} là 5KW, thì mô hình bài toán FLT luôn xác định được giá trị thời gian bay và phục vụ tối ưu nhất, từ đó lựa chọn được số lượng UAV phù hợp để tham gia phân phối dữ liệu trong mô hình RCD-CTR.

Bảng 3-3. Minh họa thời gian phục vụ của bầy đàn UAV theo số lượng UAV

$$(P_{T*}^{FLY} = 5KW)$$

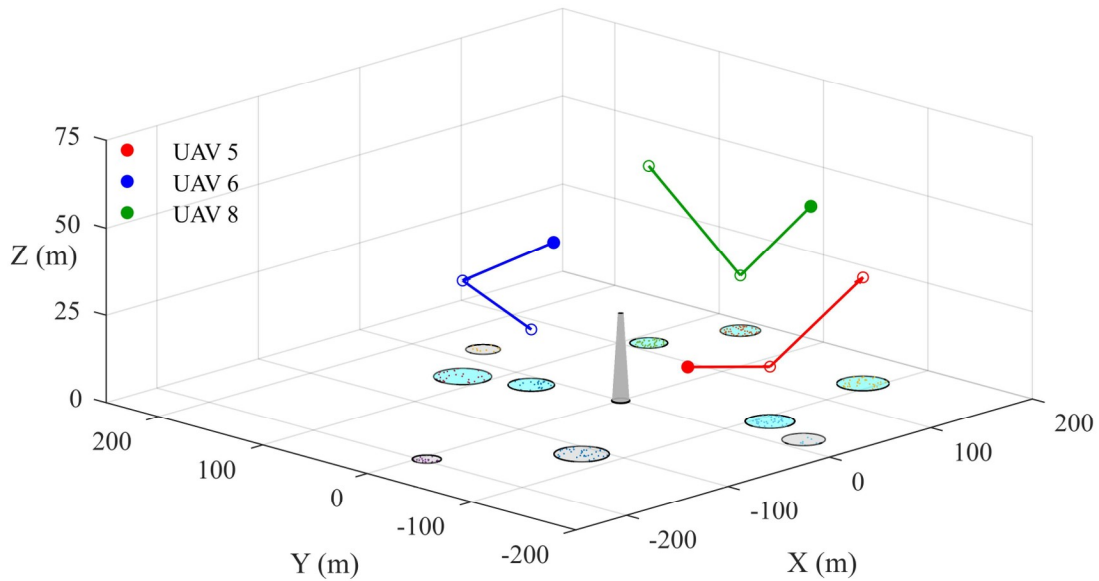
Số UAV	1	2	3	4	5	6
Thời gian phục vụ (s)	9.6135	4.3707	3.0509	3.1316	3.4108	4.1428

3.5.4. Quỹ đạo bay

Cũng tương tự như Chương 2, đối với mô hình đề xuất RCD-CTR, NCS thực hiện nghiên cứu quỹ đạo bay của các UAV trong kịch bản có sự tham gia của MBS. Theo kết quả trong Bảng 3-3, Hình 3-11 trình bày chi tiết về quỹ đạo của trường hợp 3

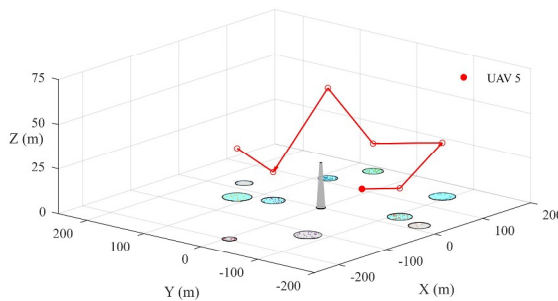
UAV tối ưu. Ngoài ra, NCS đồng thời thực hiện khảo sát quỹ đạo bay trong trường hợp ràng buộc số lượng UAV cùng tham gia phân phối dữ liệu, cụ thể theo minh họa tại các hình ảnh từ Hình 3-12 đến Hình 3-16 lần lượt thể hiện quỹ đạo bay khi có 1, 2, 4, 5, 6 UAV cùng tham gia lưu trữ và phân phối dữ liệu.

- Quỹ đạo bay tối ưu:

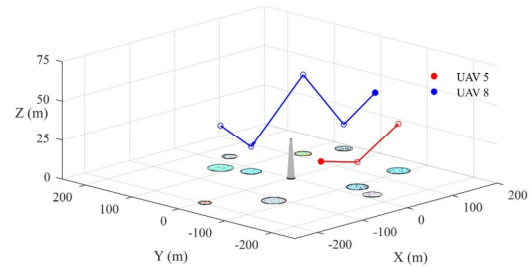


Hình 3-11. Quỹ đạo bay tối ưu với 3 UAV

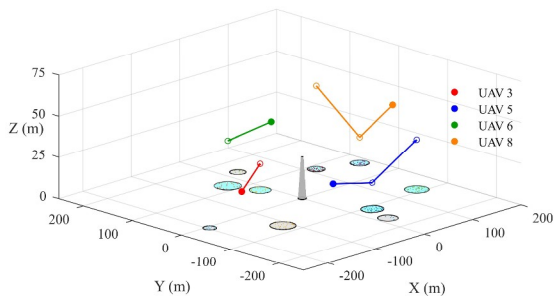
- Quỹ đạo bay khi bắt buộc bay với số lượng UAV định sẵn:



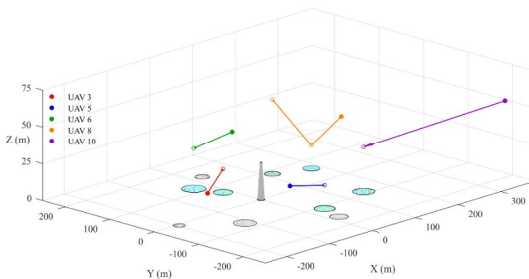
Hình 3-12. Quỹ đạo bay với 1 UAV



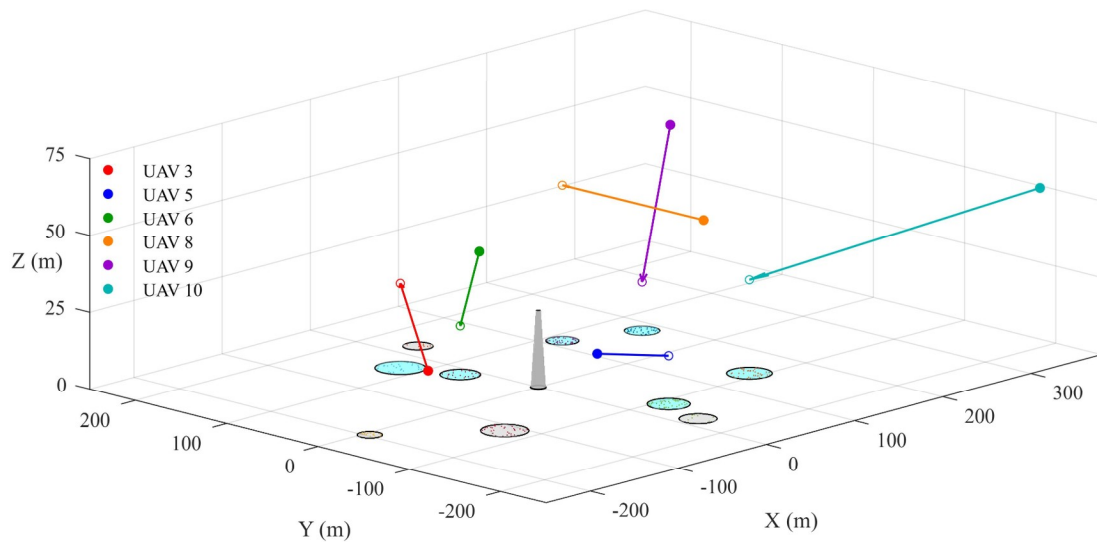
Hình 3-13. Quỹ đạo bay với 2 UAV



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

3.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Trong Chương 3, mô hình RCD-CTR đã được đề xuất và giải quyết trọn vẹn bằng GA và đã đạt được các kết quả như sau:

- Đề xuất mô hình tối ưu đa mục tiêu RCD-CTR cho mạng phân phối nội dung biên được hỗ trợ bởi hệ gồm MBS kết hợp các UAV bầy đàn, trong không gian 3D, với điều kiện kênh truyền tầm nhìn thẳng LoS lẫn N-LoS trong các môi trường không đồng nhất. Mô hình tối ưu đa mục tiêu RCD-CTR bao gồm 02 bài toán thành phần SRT và FLT liên quan đến nhiều loại biến tối ưu và ràng buộc phức tạp.

- Áp dụng GA để giải bài toán tối ưu RCD-CTR một cách khả thi, hội tụ tốt với độ chính xác cao và ổn định. Kết quả đạt được có khả năng cung cấp dung lượng phân phối dữ liệu tối đa với thời gian bay và phục vụ cực tiểu, đồng thời sử dụng hiệu quả tài nguyên về dung lượng lưu trữ và công suất tiêu thụ.

- Các phân tích và những phát hiện thú vị cung cấp đầy đủ thông tin quan trọng cho bài toán thiết kế UAV bầy đàn phối hợp cùng MBS nhằm phục vụ các IDU trong mạng 6G IoT một cách hiệu quả.

KẾT LUẬN

1. Tóm tắt kết quả đạt được của luận án

Luận án đã đạt được mục tiêu là xây dựng, phân tích, đánh giá và đề xuất các kỹ thuật lưu trữ và phân phối nội dung hỗ trợ bởi UAV trong mạng 6G-IoT nhằm cung cấp chất lượng trải nghiệm tốt nhất cho người sử dụng đáp ứng thời gian thực với tốc độ phân phối dữ liệu cao, đồng thời sử dụng tài nguyên mạng hiệu quả. Theo đó, từ đề xuất ban đầu là mô hình TCP-3DF sử dụng 1-UAV để xử lý nhiệm vụ lưu trữ - phân phối dữ liệu bằng UAV với quỹ đạo bay 3D tối ưu thỏa các giới hạn về thời gian phục vụ - dung lượng lưu trữ - công suất, luận án đã mở rộng lên mô hình kết hợp MBS và nhiều UAV là mô hình RCD-CTR, với kết quả tối ưu đạt được vượt trội hơn, cải thiện rõ nét về tối ưu thời gian phục vụ tiến đến đáp ứng phục vụ theo thời gian thực.

Các kết quả nghiên cứu được công bố trên các hội nghị quốc tế [C2, C4, C5], tạp chí trong nước [C1] và tạp chí quốc tế [C3], được liệt kê trong phần cuối của luận án. Trong đó, nội dung Chương 2 của Luận án được tổng hợp từ kết quả các công bố [C1], [C2] và [C3], còn nội dung Chương 3 được tổng hợp từ các công bố [C4], [C5] và phần mở rộng của [C5] (chưa công bố).

2. Các đóng góp khoa học của luận án

Về cụ thể, Luận án đã có những đóng góp như sau:

- Đóng góp 1: Luận án đã đề xuất 02 mô hình - cơ chế tối ưu hóa thời gian thực trong việc kết hợp thu thập - phân phối dữ liệu đến người sử dụng có sự tham gia hỗ trợ của thiết bị bay không người lái UAV trong mạng 6G IoT, đó là mô hình TCP-3DF có sự tham gia của 1 UAV và mô hình RCD-CTR với sự tham gia kết hợp của MBS và nhiều UAV. Cả 2 mô hình đều cung cấp các kết quả đánh giá độ cải thiện đạt được về thời gian bay và phục vụ cực tiểu với dung lượng phân phối dữ liệu tối đa của hệ thống đến IDU khi có sự tham gia hỗ trợ truyền thông của UAV là vượt trội.

- Đóng góp 2: Luận án đã xây dựng mô hình toán học của hệ thống cho cả 2 mô hình TCP-3DF và RCD-CTR, thực hiện phân tích chi tiết và xây dựng thành các bài toán tối ưu hoàn chỉnh, từ đó đề xuất thuật toán GA được cấu trúc phù hợp để giải quyết trọn vẹn các bài toán tối ưu được xác lập từ 2 mô hình TCP-3DF và RCD-CTR.

- Đóng góp 3: Luận án đã xây dựng các tiêu chí đánh giá chất lượng trải nghiệm, đó là 2 tiêu chí về “thời gian phục vụ” và “tốc độ phân phối dữ liệu”. Thông qua đánh giá 2 tiêu chí này, 2 mô hình đề xuất là TCP-3DF và RCD-CTR giúp nhận thấy được sự cải thiện hiệu suất hệ thống trong các ứng dụng và dịch vụ với những yêu cầu về thời gian thực khác nhau và nghiêm ngặt được đặt trong các ràng buộc về tài nguyên.

- Đóng góp 4: Luận án đã thực hiện đánh giá hiệu quả hệ thống, bao gồm đánh giá về hiệu quả cải thiện về các thông số như tốc độ phân phối dữ liệu, thời gian phục vụ, hiệu quả cải thiện trong sử dụng tài nguyên của hệ thống trong cả 2 mô hình TCP-3DF và RCD-CTR, đó là các tài nguyên về số lượng UAV, dung lượng lưu trữ của UAV, công suất bay, công suất phát và năng lượng tiêu thụ. Luận án cũng đã đánh giá hiệu quả tối ưu quỹ đạo bay ngắn nhất của các UAV khi cả 2 mô hình TCP-3DF và RCD-CTR đều cung cấp các kết quả quỹ đạo bay tối ưu của một UAV hoặc trường hợp tổng quát là nhiều UAV khi tham gia kết hợp cùng MBS.

3. Đối chiếu mục tiêu, nhiệm vụ và kết quả đạt được

Để làm rõ tính nhất quán giữa mục tiêu nghiên cứu, nhiệm vụ nghiên cứu, các kết quả đạt được, các công trình khoa học liên quan và những đóng góp của luận án, Bảng 4-1 trình bày mối quan hệ giữa các nội dung này. Có thể nhận thấy rằng toàn bộ các mục tiêu nghiên cứu đặt ra từ đầu luận án đều đã được hiện thực hóa thông qua các nhiệm vụ nghiên cứu tương ứng được triển khai trong Chương 2 và Chương 3. Các kết quả nghiên cứu đã được công bố trên các công trình khoa học [C1]-[C5].

Bảng 4.1. Đối chiếu mục tiêu nghiên cứu, nhiệm vụ nghiên cứu, kết quả đạt được, công bố khoa học và đóng góp của luận án

Mục tiêu nghiên cứu	Nhiệm vụ (NV) nghiên cứu	Nội dung thực hiện	Kết quả đạt được	Công trình liên quan	Đóng góp của luận án
Tổng quan	NV 1	Chương 1	Giới thiệu tổng quan về lưu trữ và phân phối dữ liệu dùng UAV và tổng hợp các nghiên cứu liên quan các mô hình sử	Chương 1 của luận án, các mục Giới thiệu và Các công trình nghiên cứu liên	Là tiền đề để hoàn thành các mục tiêu đề ra của luận án.

			dụng UAV để lưu trữ, phân phối dữ liệu trong mạng 6G IoT.	quan của [C1]-[C5]	
Mục tiêu 1: Đề xuất các cơ chế kết hợp lưu trữ và phân phối dữ liệu đến IDU có xét đến thời gian dịch vụ dùng UAV trong mạng 6G IoT	NV 2, 3	Chương 2, Chương 3	Đề xuất mô hình TCP-3DF và mô hình RCD-CTR	Các mục Mô hình hệ thống của [C1]-[C5]	- Đề xuất mô hình TCP-3DF tích hợp lưu trữ, phân bổ công suất và quỹ đạo bay 3D có xét đến thời gian phục vụ. - Đề xuất mô hình RCD-CTR mở rộng từ mô hình TCP-3DF khi có sự tham gia của nhiều UAV và phối hợp cùng MBS để thực hiện lưu trữ và phân phối dữ liệu tối ưu thời gian thực trong mạng 6G IoT.
Mục tiêu 2: Xây dựng mô hình toán học của hệ thống, phân tích và xây dựng các bài toán tối ưu, và đề xuất các giải thuật	NV 2, 3	Chương 2, Chương 3	Xây dựng hai mô hình TCP-3DF và RCD-CTR; thiết lập các bài toán tối ưu; xây dựng thuật toán GTS từ cải tiến thuật toán GA để giải 2 bài toán tối ưu này.	Các mục Mô hình toán hệ thống và Thiết kế bài toán tối ưu của [C1]-[C5]	Xây dựng bài toán tối ưu cho 02 mô hình TCP-3DF và RCD-CTR, áp dụng thuật toán GA một cách phù hợp tạo thành thuật toán GTS để giải hai bài toán này.
Mục tiêu 3: Xây dựng các tiêu chí đánh giá thời gian dịch vụ, dung lượng phân phối và	NV 2, 3	Chương 2, Chương 3	Thiết lập các tiêu chí thời gian phục vụ, tốc độ phân phối dữ liệu và hiệu quả sử	Các mục Mô hình toán hệ thống và Thiết kế bài toán	Đề xuất bộ tiêu chí đánh giá phù hợp cho 02 mô hình dùng UAV hỗ trợ lưu trữ và phân phối dữ liệu tối ưu thời

tài nguyên mạng			dụng tài nguyên	tối ưu của [C1]-[C5]	gian thực trong mạng 6G IoT.
Mục tiêu 4: Đánh giá hiệu quả hệ thống	NV 2, 3	Chương 2, Chương 3	Mô phỏng đánh giá hiệu quả của 2 mô hình TCP-3DF và RCD-CTR	Các mục Đánh giá hiệu quả của mô hình trong [C3] và [C5]	Chứng minh hiệu quả cải thiện về thời gian phục vụ, tốc độ phân phối dữ liệu, quỹ đạo bay và sử dụng tài nguyên (công suất, lưu trữ) của 02 mô hình TCP-3DF và RCD-CTR.

4. Các hướng nghiên cứu tiếp theo

Mặc dù Chương 3 đã có tính kế thừa, bổ sung và phát triển mở rộng mô hình của Chương 2 cho giải pháp tối toàn vẹn về ưu lưu trữ, công suất, độ cao, số lượng UAV triển khai và quỹ đạo bay 3D đáp ứng thời gian thực để phân phối dữ liệu với tốc độ cao trong mạng 6G IoT, tuy nhiên luận án vẫn còn các hạn chế mà trong tương lai cần nghiên cứu và phát triển thêm cụ thể như sau:

- Tiếp tục cải tiến về mô hình hệ thống: các mô hình đề xuất đang dựa trên một số giả định lý tưởng. Luận án giả định hệ thống có thể biết tương đối đầy đủ và chính xác vị trí người dùng, mức độ phổ biến của nội dung, trạng thái kênh truyền, trạng thái năng lượng của UAV và nhu cầu dịch vụ. Trong thực tế, các thông tin này thường biến động liên tục, không đầy đủ và khó dự đoán chính xác mặc dù nằm trong một cụm giới hạn. Các ràng buộc thực tế của UAV còn được đơn giản hóa trong mô hình toán học. Khi triển khai thực tế, hệ thống UAV phải đối mặt với nhiều yếu tố phức tạp khác nhau như suy giảm pin, điều kiện thời tiết, khả năng gián đoạn kết nối,... Luận án cũng đang được xây dựng với giả định bỏ qua ảnh hưởng của can nhiễu khi tính toán thông lượng và bỏ qua yếu tố liên quan đến khả năng xảy ra va chạm giữa các UAV trong mô hình có sự tham gia của nhiều UAV. Vì sử dụng UAV để truyền thông đến IDU trên mặt đất, nên luận án vẫn xác lập thông số tần số hoạt động ở mức 2 GHz và băng thông 10 MHz để giảm thiểu sự suy hao do tần số cao theo khoảng cách, nên chưa tiếp cận đánh giá các mô hình với băng tần cao THz đặc trưng của thế hệ di động 6G.

- Về thuật giải tối ưu: các bài toán tối ưu của mô hình TCP-3DF và RCD-CTR

theo đề xuất của luận án đều khá phức tạp và trong khả năng cũng như thời gian có hạn, NCS đã lựa chọn giải thuật thành thạo nhất là GA để tìm lời giải cho bài toán nghiên cứu. Do vậy, mặc dù luận án hướng đến tối ưu thời gian phục vụ và thời gian bay, thuật toán được sử dụng chủ yếu là GA, đây là phương pháp có thể cần nhiều vòng lặp để hội tụ. Khi triển khai thực tế, GA cần được bố trí như một bộ tối ưu offline hoặc semi-online, được thực hiện khi có yêu cầu hoặc cập nhật theo chu kỳ để sẵn sàng triển khai với cấu hình hoạt động gần tối ưu của hệ thống. Hiện tại, kết quả của luận án về yếu tố thời gian thực thì chủ yếu đề cập về thời gian bay và phục vụ để IDU nhận được nội dung mong muốn từ MBS và UAV, chưa đặt nặng đến yếu tố thời gian thực thi giải thuật. Để cải tiến, thuật toán GA được áp dụng trong luận án cần được nghiên cứu sâu hơn để đáp ứng tính chính xác và rút ngắn thời gian thực thi. Ngoài ra, trong các nghiên cứu tương lai, cần xem xét thêm các giải thuật mới nổi, điển hình như máy học, học sâu tăng cường áp dụng vào việc giải bài toán tối ưu, nhằm hướng đến mục tiêu đáp ứng thời gian thực cho cả giải thuật cùng với thời gian bay và phục vụ.

CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ CỦA NGHIÊN CỨU SINH

1. Công trình đã công bố của luận án

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.

2. Công trình đã công bố khác

STT	Tên công trình
[C6]	Quang-Nhat Tran, Nguyen-Son Vo, Thanh-Minh Phan, Thuong C. Lam , Antonino Masaracchia, "Multi-Rate Probabilistic Caching Optimized Video Offloading in Dense D2D Networks", <i>IEEE Communications Letters</i> , vol.27, no.4, pp.1240-1244, Feb. 2023.
[C7]	Thuong C. Lam , Nguyen-Son Vo, Viet V. Lam, Trang Hoang, Minh-Phung Bui, Trung Q. Duong , “Multi-rate selection and power allocation assisted probabilistic edge caching for cooperative video transmission in dense D2D networks”, <i>Alexandria Engineering Journal</i> , vol. 126, pp.555-564, July 2025.
[C8]	Quynh-Anh Nguyen, Nguyen-Son Vo, Thuong C. Lam , Tan Do-Duy, Haejoon Jung, Trung Q. Duong, “Joint Deterministic and Probabilistic Edge Caching Minimized Service Time for Cooperative Video Transmission in VANETs”, <i>IEEE Transactions on Network Science and Engineering</i> , September 2025.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] N. S. Vo, A. Masaracchia, Z. Sheng, and T. T. Nguyen, “Editorial: Towards 6G Networks: Technologies, Services and Applications,” *Mob. Networks Appl.*, vol. 28, no. 3, pp. 1142–1144, Jun. 2023, doi: 10.1007/S11036-023-02239-Y.
- [2] D. C. Nguyen *et al.*, “6G Internet of Things: A Comprehensive Survey,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 1, pp. 359–383, Jan. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3103320.
- [3] B. S. Rawat, A. Srivastava, V. Shrivastava, G. Singh, and N. Garg, “A Comprehensive Analysis of Applications in Internet of Things Networks in 5G and 6G,” *2024 2nd Int. Conf. Comput. Commun. Control. IC4 2024*, 2024, doi: 10.1109/IC457434.2024.10486565.
- [4] A. F. M. Shahen Shah, M. A. Karabulut, and K. Rabie, “Multiple Access Schemes for 6G Enabled NTN-Assisted IoT Technologies: Recent Developments, Prospects and Challenges,” *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 7, no. 1, pp. 48–54, Jan. 2024, doi: 10.1109/IOTM.001.2300234.
- [5] G. Kirubasri, S. Sankar, D. Pandey, B. K. Pandey, H. Singh, and R. Anand, “A Recent Survey on 6G Vehicular Technology, Applications and Challenges,” *2021 9th Int. Conf. Reliab. Infocom Technol. Optim. (Trends Futur. Dir. ICRITO 2021)*, 2021, doi: 10.1109/ICRITO51393.2021.9596147.
- [6] A. Almomani and F. Al-Turjman, “Challenges and Opportunities in Integrated 6G and IoT Paradigms: An Overview,” *Proc. - 2022 Int. Conf. Artif. Intell. Everything, AIE 2022*, pp. 140–145, 2022, doi: 10.1109/AIE57029.2022.00033.
- [7] K. Zheng, R. Xu, J. Mei, H. Yang, L. Lei, and X. Wang, “Ambient IoT towards 6G: Standardization, Potentials, and Challenges,” *IEEE Access*, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3474298.
- [8] X. Zhu and C. Jiang, “Integrated Satellite-Terrestrial Networks Toward 6G: Architectures, Applications, and Challenges,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 1, pp. 437–461, Jan. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3126825.
- [9] K. David and H. Berndt, “6G Vision and requirements: Is there any need for beyond 5g?,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 72–80, Sep. 2018,

doi: 10.1109/MVT.2018.2848498.

- [10] R. Li, “Network 2030: Market Drivers and Prospects,” in *Proc. 1st International Telecommunication Union Workshop on Network 2030*, New York, 2018.
- [11] Z. Zhang *et al.*, “6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, Sep. 2019, doi: 10.1109/MVT.2019.2921208.
- [12] M. Latva-aho, “Radio access networking challenges towards 2030,” in *Proc. 1st International Telecommunication Union Workshop on Network 2030*, New York, Oct. 2018. [Online]. Available: https://www.itu.int/en/ITU-T/Workshops-and-Seminars/201810/Documents/Matt_Latvaaho_Presentation.pdf
- [13] “Recommendation ITU-R M.2083-0 IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” *Int. Telecommun. Union – Radiocommun. Sect. Recomm. ITU-R M.2083-0*, 2015, [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>
- [14] A.-A. A. Boulogeorgos *et al.*, “Terahertz Technologies to Deliver Optical Network Quality of Experience in Wireless Systems Beyond 5G,” Mar. 2018, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1803.09060>
- [15] K. Rose, S. Eldridge, and L. Chapin, “THE INTERNET OF THINGS: AN OVERVIEW - Understanding the Issues and Challenges of a More Connected World,” *Internet Soc.*, 2015.
- [16] L. D. Nguyen and A. Kortun, “Real-time Optimisation for Industrial Internet of Things (IIoT): Overview, Challenges and Opportunities,” *EAI Endorsed Trans. Ind. Networks Intell. Syst.*, vol. 7, no. 25, pp. 1–7, 2020, doi: 10.4108/EAI.16-12-2020.167654.
- [17] B. T. Tinh, L. D. Nguyen, H. H. Kha, and T. Q. Duong, “Practical Optimization and Game Theory for 6G Ultra-Dense Networks: Overview and Research Challenges,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 13311–13328, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3146335.
- [18] H. Hejazi, H. Rajab, T. Cinkler, and L. Lengyel, “Survey of platforms for massive IoT,” *2018 IEEE Int. Conf. Futur. IoT Technol. Futur. IoT 2018*, vol.

- 2018-January, pp. 1–8, Mar. 2018, doi: 10.1109/FIOT.2018.8325598.
- [19] D. Pirrone, C. Fornaro, and D. Assante, “Open-source multi-purpose remote laboratory for IoT education,” *IEEE Glob. Eng. Educ. Conf. EDUCON*, vol. 2021-April, pp. 1462–1468, Apr. 2021, doi: 10.1109/EDUCON46332.2021.9454034.
- [20] L. Garg, E. Chukwu, N. Nasser, C. Chakraborty, and G. Garg, “Anonymity Preserving IoT-Based COVID-19 and Other Infectious Disease Contact Tracing Model,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 159402–159414, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3020513,.
- [21] Z. Qadir, K. N. Le, N. Saeed, and H. S. Munawar, “Towards 6G Internet of Things: Recent advances, use cases, and open challenges,” *ICT Express*, vol. 9, no. 3, pp. 296–312, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.ICTE.2022.06.006.
- [22] “Ericsson Mobility Report | Read the latest edition.” [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>
- [23] L. Chettri and R. Bera, “A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 1, pp. 16–32, Jan. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2019.2948888.
- [24] K. K. Vaigandla, “Communication Technologies and Challenges on 6G Networks for the Internet: Internet of Things (IoT) Based Analysis,” *Proc. 2nd Int. Conf. Innov. Pract. Technol. Manag. ICIPTM 2022*, pp. 27–31, 2022, doi: 10.1109/ICIPTM54933.2022.9753990.
- [25] A. Asadi, Q. Wang, and V. Mancuso, “A survey on device-to-device communication in cellular networks,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 1801–1819, 2014, doi: 10.1109/COMST.2014.2319555.
- [26] Z. Zhang, R. Q. Hu, and Y. Qian, “D2D communication underlay in uplink cellular networks with distance based power control,” *2016 IEEE Int. Conf. Commun. ICC 2016*, Jul. 2016, doi: 10.1109/ICC.2016.7511281.
- [27] H. L. J. K. and W. L. S. Han, “On the Connectivity in Opportunistic D2D Networks with Hierarchical and Non-Hierarchical Clustering,” in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. Workshops*, Washington, DC USA: IEEE, Dec. 2016.
- [28] S. Maghsudi and S. Stanczak, “Hybrid centralized-distributed resource allocation for device-to-device communication underlaying cellular networks,”

- IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 4, pp. 2481–2495, Apr. 2016, doi: 10.1109/TVT.2015.2423691.
- [29] K. Poularakis and L. Tassiulas, “Code, Cache and Deliver on the Move: A Novel Caching Paradigm in Hyper-Dense Small-Cell Networks,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 16, no. 3, pp. 675–687, Mar. 2017, doi: 10.1109/TMC.2016.2575837.
- [30] H. Wu, H. Lu, F. Wu, and C. W. Chen, “Energy and Delay Optimization for Cache-Enabled Dense Small Cell Networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 7, pp. 7663–7678, Jul. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2989033.
- [31] W. C. Ao and K. Psounis, “Fast Content Delivery via Distributed Caching and Small Cell Cooperation,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 17, no. 5, pp. 1048–1061, May 2018, doi: 10.1109/TMC.2017.2750143.
- [32] N. Zhao *et al.*, “Caching Unmanned Aerial Vehicle-Enabled Small-Cell Networks: Employing Energy-Efficient Methods That Store and Retrieve Popular Content,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 1, pp. 71–79, Mar. 2019, doi: 10.1109/MVT.2018.2881228.
- [33] A. Khreishah, J. Chakareski, and A. Gharaibeh, “Joint caching, routing, and channel assignment for collaborative small-cell cellular networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 8, pp. 2275–2284, Aug. 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2577199.
- [34] Z. Chen, J. Lee, T. Q. S. Quek, and M. Kountouris, “Cooperative Caching and Transmission Design in Cluster-Centric Small Cell Networks,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 16, no. 5, pp. 3401–3415, May 2017, doi: 10.1109/TWC.2017.2682240.
- [35] F. Song *et al.*, “Probabilistic Caching for Small-Cell Networks with Terrestrial and Aerial Users,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 9, pp. 9162–9177, Sep. 2019, doi: 10.1109/TVT.2019.2929839.
- [36] N. Zhao *et al.*, “Caching D2D Connections in Small-Cell Networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 12, pp. 12326–12338, Dec. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2877645.
- [37] T. Q. Duong, K. J. Kim, Z. Kaleem, M. P. Bui, and N. S. Vo, “UAV caching in 6G networks: A Survey on models, techniques, and applications,” *Phys.*

- Commun.*, vol. 51, Apr. 2022, doi: 10.1016/J.PHYCOM.2021.101532.
- [38] Z. Wang, T. Zhang, Y. Liu, and W. Xu, "Caching Placement and Resource Allocation for AR Application in UAV NOMA Networks," *Proc. - IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM*, 2020, doi: 10.1109/GLOBECOM42002.2020.9322556.
- [39] Z. Tan, H. Qu, J. Zhao, S. Zhou, and W. Wang, "UAV-aided edge/fog computing in smart IoT community for social augmented reality," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 6, pp. 4872–4884, Jun. 2020, doi: 10.1109/IIOT.2020.2971325.
- [40] T. Li, K. Ota, T. Wang, X. Li, Z. Cai, and A. Liu, "Optimizing the Coverage via the UAVs with Lower Costs for Information-Centric Internet of Things," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 15292–15309, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2894172.
- [41] V. Sharma, I. You, D. N. K. Jayakody, D. G. Reina, and K. K. R. Choo, "Neural-Blockchain-Based Ultrareliable Caching for Edge-Enabled UAV Networks," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 10, pp. 5723–5736, Oct. 2019, doi: 10.1109/TII.2019.2922039.
- [42] J. Yang, S. Xiao, B. Jiang, H. Song, S. Khan, and S. U. Islam, "Cache-Enabled Unmanned Aerial Vehicles for Cooperative Cognitive Radio Networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 155–161, Apr. 2020, doi: 10.1109/MWC.001.1900301.
- [43] T. Zhang, Y. Wang, Y. Liu, W. Xu, and A. Nallanathan, "Cache-Enabling UAV Communications: Network Deployment and Resource Allocation," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 11, pp. 7470–7483, Nov. 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.3011881.
- [44] X. Zhang, Q. Zhu, and H. V. Poor, "Multi-Tier Caching for Statistical-QoS Driven Digital Twins over mURLLC-Based 6G Massive-MIMO Mobile Wireless Networks Using FBC," *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.*, vol. 18, no. 1, pp. 34–49, Jan. 2024, doi: 10.1109/JSTSP.2024.3377007.
- [45] N. S. Vo, M. P. Bui, P. Q. Truong, C. Yin, and A. Masaracchia, "Multi-Tier Caching and Resource Sharing for Video Streaming in 5G Ultra-Dense Networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 7, pp. 1500–1504, Jul. 2020, doi:

10.1109/LCOMM.2020.2983408.

- [46] S. Gu, X. Sun, Z. Yang, T. Huang, W. Xiang, and K. Yu, “Energy-Aware Coded Caching Strategy Design with Resource Optimization for Satellite-UAV-Vehicle-Integrated Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 8, pp. 5799–5811, Apr. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3065664.
- [47] Y. Yin and T. Ohtsuki, “Multi-UAV-Assisted Emergency Caching Networks: UAV Location and NOMA Power Optimization,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, 2024, doi: 10.1109/VTC2024-FALL63153.2024.10757722.
- [48] A. Ahmad, A. Aldalbahi, F. Ahmad, and S. Ali, “Service Caching in Multi-Tier Fog Radio Access Networks,” *IEEE Access*, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3506747.
- [49] F. Zhou, N. Wang, G. Luo, L. Fan, and W. Chen, “Edge Caching in Multi-UAV-Enabled Radio Access Networks: 3D Modeling and Spectral Efficiency Optimization,” *IEEE Trans. Signal Inf. Process. over Networks*, vol. 6, pp. 329–341, 2020, doi: 10.1109/TSIPN.2020.2986360.
- [50] Z. Gao, A. Liu, X. Xu, X. Liang, C. Han, and X. Liu, “Sum Data Minimization in LEO Satellite-UAV Integrated Multi-Tier Computing Networks: A Game-Theoretic Multiple Access Approach,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 3, pp. 1701–1715, Mar. 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2023.3332932.
- [51] L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, “Survey of Important Issues in UAV Communication Networks,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1123–1152, Apr. 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2495297.
- [52] M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y. H. Nam, and M. Debbah, “A Tutorial on UAVs for Wireless Networks: Applications, Challenges, and Open Problems,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2334–2360, 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2902862.
- [53] Y. Zeng, J. Lyu, and R. Zhang, “Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 120–127, Feb. 2019, doi: 10.1109/MWC.2018.1800023.
- [54] D. Liu *et al.*, “Opportunistic UAV utilization in wireless networks: Motivations, applications, and challenges,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 5, pp. 62–68, May 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.1900687.

- [55] D. Mishra and E. Natalizio, "A survey on cellular-connected UAVs: Design challenges, enabling 5G/B5G innovations, and experimental advancements," *Comput. Networks*, vol. 182, p. 107451, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.COMNET.2020.107451.
- [56] A. Fotouhi *et al.*, "Survey on UAV Cellular Communications: Practical Aspects, Standardization Advancements, Regulation, and Security Challenges," Mar. 2019, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1809.01752>
- [57] B. Li, Z. Fei, and Y. Zhang, "UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 2241–2263, Apr. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2887086.
- [58] Y. Zeng, Q. Wu, and R. Zhang, "Accessing from the Sky: A Tutorial on UAV Communications for 5G and beyond," *Proc. IEEE*, vol. 107, no. 12, pp. 2327–2375, Dec. 2019, doi: 10.1109/JPROC.2019.2952892.
- [59] A. A. Khuwaja, Y. Chen, N. Zhao, M. S. Alouini, and P. Dobbins, "A survey of channel modeling for uav communications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 2804–2821, Oct. 2018, doi: 10.1109/COMST.2018.2856587.
- [60] C. Yan, L. Fu, J. Zhang, and J. Wang, "A Comprehensive Survey on UAV Communication Channel Modeling," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107769–107792, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2933173.
- [61] W. Khawaja, I. Guvenc, D. W. Matolak, U. C. Fiebig, and N. Schneckenburger, "A Survey of Air-to-Ground Propagation Channel Modeling for Unmanned Aerial Vehicles," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2361–2391, Jul. 2019, doi: 10.1109/COMST.2019.2915069.
- [62] S. Zhang, H. Zhang, B. Di, and L. Song, "Cellular UAV-To-X Communications: Design and Optimization for Multi-UAV Networks," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Feb. 2019, pp. 1346–1359. doi: 10.1109/TWC.2019.2892131.
- [63] M. Y. Arafat and S. Moh, "A Survey on Cluster-Based Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicle Networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 498–516, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2885539.

- [64] J. Jiang and G. Han, "Routing Protocols for Unmanned Aerial Vehicles," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 58–63, Jan. 2018, doi: 10.1109/MCOM.2017.1700326.
- [65] M. Y. Arafat and S. Moh, "Routing protocols for unmanned aerial vehicle networks: A survey," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99694–99720, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2930813.
- [66] B. Li, S. Zhao, R. Miao, and R. Zhang, "A survey on unmanned aerial vehicle relaying networks," *IET Commun.*, vol. 15, no. 10, pp. 1262–1272, Jun. 2021, doi: 10.1049/CMU2.12107.
- [67] O. Kalinagac, S. S. Kafiloglu, F. Alagoz, and G. Gur, "Caching and D2D sharing for content delivery in software-defined UAV networks," *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2019-September, Sep. 2019, doi: 10.1109/VTCFALL.2019.8891497.
- [68] M. G. Khoshkholgh, K. Navaie, H. Yanikomeroglu, V. C. M. Leung, and K. G. Shin, "Randomized Caching in Cooperative UAV-Enabled Fog-RAN," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Apr. 2019. doi: 10.1109/WCNC.2019.8885486.
- [69] M. Chen, W. Saad, and C. Yin, "Liquid State Machine Learning for Resource Allocation in a Network of Cache-Enabled LTE-U UAVs," *Proc. - IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM*, vol. 2018-January, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/GLOCOM.2017.8254746.
- [70] Y. Lan, X. Wang, D. Wang, Z. Liu, and Y. Zhang, "Task caching, offloading, and resource allocation in D2D-aided fog computing networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 104876–104891, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929075,.
- [71] T. Zhang, Z. Wang, Y. Liu, W. Xu, and A. Nallanathan, "Caching Placement and Resource Allocation for Cache-Enabling UAV NOMA Networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 11, pp. 12897–12911, Nov. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3015578.
- [72] Z. Wang, T. Zhang, Y. Liu, and W. Xu, "Deep Reinforcement Learning for Caching Placement and Content Delivery in UAV NOMA Networks," *12th Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. WCSP 2020*, pp. 406–411, Oct. 2020,

doi: 10.1109/WCSP49889.2020.9299784.

- [73] S. Chai and V. K. N. Lau, "Online trajectory and radio resource optimization of cache-enabled uav wireless networks with content and energy recharging," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 68, pp. 1286–1299, 2020, doi: 10.1109/TSP.2020.2971457.
- [74] T. Fang, H. Tian, X. Zhang, X. Chen, X. Shao, and Y. Zhang, "Context-aware caching distribution and UAV deployment: A game-theoretic approach," *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 10, Oct. 2018, doi: 10.3390/APP8101959.
- [75] J. Ji, K. Zhu, D. Niyato, and R. Wang, "Joint Cache Placement, Flight Trajectory, and Transmission Power Optimization for Multi-UAV Assisted Wireless Networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 19, no. 8, pp. 5389–5403, Aug. 2020, doi: 10.1109/TWC.2020.2992926.
- [76] B. Zhang, M. Wang, J. L. Yu, C. Guo, and Z. Han, "Joint 3-D Position Deployment and Traffic Offloading for Caching and Computing-Enabled UAV Under Asymmetric Information," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 7, pp. 6312–6323, Apr. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3223349.
- [77] M. Liu, J. Yang, and G. Gui, "DSF-NOMA: UAV-assisted emergency communication technology in a heterogeneous internet of things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 5508–5519, Jun. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2903165.
- [78] H. Li, J. Li, M. Liu, Z. Ding, and F. Gong, "Energy Harvesting and Resource Allocation for Cache-Enabled UAV Based IoT NOMA Networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 9, pp. 9625–9630, Sep. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3098351.
- [79] Y. Yin, G. Gui, M. Liu, H. Gacanin, H. Sari, and F. Adachi, "Joint User Pairing and Resource Allocation in Air-to-Ground Communication-Caching-Charging Integrated Network Based on NOMA," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 12, pp. 15819–15828, Dec. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3291174.
- [80] B. Ji, Y. Li, B. Zhou, C. Li, K. Song, and H. Wen, "Performance Analysis of UAV Relay Assisted IoT Communication Network Enhanced with Energy Harvesting," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 38738–38747, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2906088.

- [81] S. Zhang, Z. Shi, and J. Liu, "Joint Trajectory Design and Resource Allocation for Secure Air-Ground Integrated IoT Networks," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 23, pp. 20458–20471, Dec. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3286470.
- [82] A. Al-Hilo, M. Samir, C. Assi, S. Sharafeddine, and D. Ebrahimi, "UAV-Assisted Content Delivery in Intelligent Transportation Systems-Joint Trajectory Planning and Cache Management," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 8, pp. 5155–5167, Aug. 2021, doi: 10.1109/TITS.2020.3020220.
- [83] K. Zhang, J. Cao, L. Wang, and Y. Zhang, "Green Offloading and Trajectory Scheduling of Rechargeable UAVs in Aerial Edge Networks," *Proc. - IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM*, pp. 1752–1757, 2022, doi: 10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001727.
- [84] Y. Zeng, X. Xu, and R. Zhang, "Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2233–2246, Apr. 2018, doi: 10.1109/TWC.2018.2790401.
- [85] B. Wang, Y. Sun, Z. Sun, L. D. Nguyen, and T. Q. Duong, "UAV-Assisted Emergency Communications in Social IoT: A Dynamic Hypergraph Coloring Approach," *IEEE Internet Things J.*, vol. 7, no. 8, pp. 7663–7677, Aug. 2020, doi: 10.1109/JIOT.2020.2988445.
- [86] S. Zhang, J. Liu, and W. Sun, "Stochastic geometric analysis of multiple unmanned aerial vehicle-assisted communications over internet of things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 5446–5460, Jun. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2902162.
- [87] B. Jiang, J. Yang, H. Xu, H. Song, and G. Zheng, "Multimedia data throughput maximization in internet-of-things system based on optimization of cache-enabled UAV," *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 2, pp. 3525–3532, Apr. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2018.2886964.
- [88] X. Yu, D. Wu, D. Liu, H. Wang, and Z. Qin, "The Heterogeneous Demands Satisfaction in IoT Network: Air-Ground Collaborative Deployment," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 12, pp. 12713–12724, Dec. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3119936.
- [89] K. Rezaee *et al.*, "IoMT-Assisted Medical Vehicle Routing Based on UAV-

- Borne Human Crowd Sensing and Deep Learning in Smart Cities,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 21, pp. 18529–18536, Nov. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2023.3284056.
- [90] L. D. Nguyen, A. Kortun, and T. Q. Duong, “An Introduction of Real-time Embedded Optimisation Programming for UAV Systems under Disaster Communication,” *EAI Endorsed Trans. Ind. Networks Intell. Syst.*, vol. 5, no. 17, pp. 1–8, 2018, doi: 10.4108/EAI.19-12-2018.156080.
- [91] J. Xu, H. Yao, R. Zhang, T. Mai, and M. Guizani, “Low Latency and Accuracy-Guaranteed DNN Inference for UAV-Assisted IoT Networks,” *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, 2025, doi: 10.1109/TCCN.2025.3542443.
- [92] R. Liu, M. Xie, A. Liu, and H. Song, “Joint Optimization Risk Factor and Energy Consumption in IoT Networks with TinyML-Enabled Internet of UAVs,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 12, pp. 20983–20994, Jun. 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3348837.
- [93] R. Islambouli and S. Sharafeddine, “Optimized 3D Deployment of UAV-Mounted Cloudlets to Support Latency-Sensitive Services in IoT Networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 172860–172870, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2956150.
- [94] H. Yan, H. Li, X. Xu, and M. Bilal, “UAV-Enhanced Service Caching for IoT Systems in Extreme Environments,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 16, pp. 26741–26750, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3288200.
- [95] A. V. Savkin, C. Huang, and W. Ni, “Joint Multi-UAV Path Planning and LoS Communication for Mobile-Edge Computing in IoT Networks With RISs,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 3, pp. 2720–2727, Feb. 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3215255.
- [96] D. Van Huynh, T. Do-Duy, L. D. Nguyen, M. T. Le, N. S. Vo, and T. Q. Duong, “Real-Time Optimized Path Planning and Energy Consumption for Data Collection in Unmanned Ariel Vehicles-Aided Intelligent Wireless Sensing,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 18, no. 4, pp. 2753–2761, Apr. 2022, doi: 10.1109/TII.2021.3114358.
- [97] J. Pan, Y. Li, R. Chai, S. Xia, and L. Zuo, “Multiobjective Trajectory Planning for UAV-Assisted IoT Networks Based on DRL Approach,” *IEEE Internet*

- Things J.*, vol. 12, no. 11, pp. 15840–15852, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3533584.
- [98] Y. Hu, Y. Liu, A. Kaushik, C. Masouros, and J. S. Thompson, “Timely Data Collection for UAV-Based IoT Networks: A Deep Reinforcement Learning Approach,” *IEEE Sens. J.*, vol. 23, no. 11, pp. 12295–12308, Jun. 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3265935.
- [99] L. Breslau, P. Cao, L. Fan, G. Phillips, and S. Shenker, “Web caching and zipf-like distributions: Evidence and implications,” *Proc. - IEEE INFOCOM*, vol. 1, pp. 126–134, 1999, doi: 10.1109/INFCOM.1999.749260.
- [100] T. C. Lam, N. S. Vo, T. H. Nguyen, T. M. Phan, and D. T. Huynh, “Genetic Algorithms for Storage- and Energy-Aware Caching and Trajectory Optimisation Problem in UAV-Assisted Content Delivery Networks,” *Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Telecommun. Eng. LNICST*, vol. 531, pp. 34–50, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-47359-3_3.
- [101] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and S. Lardner, “Optimal LAP altitude for maximum coverage,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 3, no. 6, pp. 569–572, Dec. 2014, doi: 10.1109/LWC.2014.2342736.
- [102] M. Alzenad, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, “3-D Placement of an Unmanned Aerial Vehicle Base Station for Maximum Coverage of Users with Different QoS Requirements,” *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 38–41, Feb. 2018, doi: 10.1109/LWC.2017.2752161.
- [103] R. I. Bor-Yaliniz, A. El-Keyi, and H. Yanikomeroglu, “Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks,” *2016 IEEE Int. Conf. Commun. ICC 2016*, Jul. 2016, doi: 10.1109/ICC.2016.7510820.
- [104] B. Li, Q. Li, Y. Zeng, Y. Rong, and R. Zhang, “3D Trajectory Optimization for Energy-Efficient UAV Communication: A Control Design Perspective,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 21, no. 6, pp. 4579–4593, Jun. 2022, doi: 10.1109/TWC.2021.3131384.
- [105] W. Saad, M. Bennis, M. Mozaffari, and X. Lin, “Resource Management for UAV Networks,” in *Wireless Communications and Networking for Unmanned Aerial Vehicles*, Cambridge University Press, 2020, pp. 145–180. doi: 10.1017/9781108691017.007.

- [106] M. H. T. Nguyen *et al.*, “Real-Time Optimized Clustering and Caching for 6G Satellite-UAV-Terrestrial Networks,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 3009–3019, Mar. 2024, doi: 10.1109/TITS.2023.3287279.
- [107] J. Dai, W. Pu, J. Yan, Q. Shi, and H. Liu, “Multi-UAV Collaborative Trajectory Optimization for Asynchronous 3-D Passive Multitarget Tracking,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 61, 2023, doi: 10.1109/TGRS.2023.3239952.
- [108] Y. He, Y. Gan, H. Cui, and M. Guizani, “Fairness-Based 3-D Multi-UAV Trajectory Optimization in Multi-UAV-Assisted MEC System,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 13, pp. 11383–11395, Jul. 2023, doi: 10.1109/IIOT.2023.3241087.
- [109] Z. Ning, Y. Yang, X. Wang, Q. Song, L. Guo, and A. Jamalipour, “Multi-Agent Deep Reinforcement Learning Based UAV Trajectory Optimization for Differentiated Services,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 23, no. 5, pp. 5818–5834, May 2024, doi: 10.1109/TMC.2023.3312276.
- [110] J. Wang, Z. Na, and X. Liu, “Collaborative Design of Multi-UAV Trajectory and Resource Scheduling for 6G-Enabled Internet of Things,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 20, pp. 15096–15106, Oct. 2021, doi: 10.1109/IIOT.2020.3031622.
- [111] F. Zeng *et al.*, “Resource Allocation and Trajectory Optimization for QoE Provisioning in Energy-Efficient UAV-Enabled Wireless Networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 7, pp. 7634–7647, Jul. 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2986776.
- [112] X. W. Tang, Y. Huang, Y. Shi, X. L. Huang, and Q. Shi, “3D Trajectory Planning for Real-Time Image Acquisition in UAV-Assisted VR,” *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 23, no. 1, pp. 16–30, Jan. 2024, doi: 10.1109/TWC.2023.3274571.
- [113] Y. Long, W. Zhang, S. Gong, X. Luo, and D. Niyato, “AoI-aware Scheduling and Trajectory Optimization for Multi-UAV-assisted Wireless Networks,” *Proc. - IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM*, pp. 2163–2168, 2022, doi: 10.1109/GLOBECOM48099.2022.10001660.
- [114] C. Liu, Y. Guo, N. Li, and X. Song, “AoI-Minimal Task Assignment and

- Trajectory Optimization in Multi-UAV-Assisted IoT Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 21, pp. 21777–21791, Nov. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3182160.
- [115] G. Li, C. Zhuang, Q. Wang, Y. Li, X. Xu, and W. Zhou, “A UAV Real-time Trajectory Optimized Strategy for Moving Users,” *2019 11th Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. WCSP 2019*, Oct. 2019, doi: 10.1109/WCSP.2019.8927863.
- [116] X. Liu, B. Lai, B. Lin, and V. C. M. Leung, “Joint Communication and Trajectory Optimization for Multi-UAV Enabled Mobile Internet of Vehicles,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 23, no. 9, pp. 15354–15366, Sep. 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3140357.
- [117] Z. Wang *et al.*, “Dynamic Trajectory Design for Multi-UAV-Assisted Mobile Edge Computing,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 74, no. 3, pp. 4684–4697, 2025, doi: 10.1109/TVT.2024.3485182.
- [118] J. Moon, S. Papaioannou, C. Laoudias, P. Kolios, and S. Kim, “Deep Reinforcement Learning Multi-UAV Trajectory Control for Target Tracking,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 20, pp. 15441–15455, Oct. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3073973.
- [119] S. Gong, M. Wang, B. Gu, W. Zhang, D. T. Hoang, and D. Niyato, “Bayesian Optimization Enhanced Deep Reinforcement Learning for Trajectory Planning and Network Formation in Multi-UAV Networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8, pp. 10933–10948, Aug. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3262778.
- [120] X. Chen *et al.*, “Distributed Computation Offloading and Trajectory Optimization in Multi-UAV-Enabled Edge Computing,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 20, pp. 20096–20110, Oct. 2022, doi: 10.1109/JIOT.2022.3175050.
- [121] J. Mattingley and S. Boyd, “Automatic Code Generation for Real-Time Convex Optimization,” in *Convex Optimization in Signal Processing and Communications*, Y. C. E. (Eds. . Daniel P. Palomar, Ed., New York: Cambridge University Press, 2010, ch. 1, pp. 1–35.
- [122] T. Q. Duong, L. D. Nguyen, B. Narottama, J. A. Ansere, D. Van Huynh, and H. Shin, “Quantum-Inspired Real-Time Optimization for 6G Networks:

- Opportunities, Challenges, and the Road Ahead,” *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 3, pp. 1347–1359, 2022, doi: 10.1109/OJCOMS.2022.3195219.
- [123] E.K.P. Chong and S.H. Zak, *An Introduction to Optimization*, 4th Edition. Hoboken, New Jersey.: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [124] T. Fang and L. P. Chau, “GOP-based channel rate allocation using genetic algorithm for scalable video streaming over error-prone networks,” *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 15, no. 6, pp. 1323–1330, Jun. 2006, doi: 10.1109/TIP.2005.864159.
- [125] N. S. Vo, T. Q. Duong, H. D. Tuan, and A. Kortun, “Optimal Video Streaming in Dense 5G Networks With D2D Communications,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 209–223, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2761978.
- [126] L. Zhang, A. Celik, S. Dang, and B. Shihada, “Energy-Efficient Trajectory Optimization for UAV-Assisted IoT Networks,” *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 21, no. 12, pp. 4323–4337, Dec. 2022, doi: 10.1109/TMC.2021.3075083.
- [127] K. Li, W. Ni, E. Tovar, and M. Guizani, “Deep Reinforcement Learning for Real-Time Trajectory Planning in UAV Networks,” *2020 Int. Wirel. Commun. Mob. Comput. IWCMC 2020*, pp. 958–963, Jun. 2020, doi: 10.1109/IWCMC48107.2020.9148316.
- [128] S. Chai and V. K. N. Lau, “Multi-UAV Trajectory and Power Optimization for Cached UAV Wireless Networks with Energy and Content Recharging-Demand Driven Deep Learning Approach,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 39, no. 10, pp. 3208–3224, Oct. 2021, doi: 10.1109/JSAC.2021.3088694.
- [129] R. Wang, D. Li, Q. Wu, K. Meng, B. Feng, and L. Cong, “Rechargeable UAV Trajectory Optimization for Real-Time Persistent Data Collection of Large-Scale Sensor Networks,” *IEEE Trans. Commun.*, 2024, doi: 10.1109/TCOMM.2024.3493812.
- [130] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, “A review on genetic algorithm: past, present, and future,” *Multimed. Tools Appl.*, vol. 80, no. 5, pp. 8091–8126, Feb. 2021, doi: 10.1007/S11042-020-10139-6.
- [131] X. Qi, S. Khattak, A. Zaib, and I. Khan, “Energy Efficient Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks Using Genetic Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 160510–160520, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3131823.

- [132] H. Li, S. Wu, J. Jiao, X. H. Lin, N. Zhang, and Q. Zhang, “Energy-Efficient Task Offloading of Edge-Aided Maritime UAV Systems,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 1, pp. 1116–1126, Jan. 2023, doi: 10.1109/TVT.2022.3205127.
- [133] M. I. Mushtaq, O. Chughtai, Y. Zhang, A. H. Alenezi, and N. Alqahtani, “Framework for Optimized Resource Allocation in Multi-User, Multi-Service, Multi-Device Aerial Networks,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 54866–54878, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3384562.
- [134] H. Zhang, X. Cao, J. K. L. Ho, and T. W. S. Chow, “Object-Level Video Advertising: An Optimization Framework,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 13, no. 2, pp. 520–531, Apr. 2017, doi: 10.1109/TII.2016.2605629.
- [135] G. Lai, F. F. Leymarie, and W. Latham, “On Mixed-Initiative Content Creation for Video Games,” *IEEE Trans. Games*, vol. 14, no. 4, pp. 543–557, Dec. 2022, doi: 10.1109/TG.2022.3176215.
- [136] L. Sheng, H. Li, Y. Qi, and M. Shi, “Real Time Screening and Trajectory Optimization of UAVs in Cluster Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 81838–81851, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3300377.
- [137] B. Chen, L. Liu, M. Sun, and H. Ma, “IoTCache: Toward Data-Driven Network Caching for Internet of Things,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 6, no. 6, pp. 10064–10076, Dec. 2019, doi: 10.1109/JIOT.2019.2935442.
- [138] S. Liao, J. Wu, J. Li, and K. Konstantin, “Information-centric massive iot-based ubiquitous connected vr/ar in 6g: A proposed caching consensus approach,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 7, pp. 5172–5184, Apr. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3030718.
- [139] Q. N. Tran, N. S. Vo, T. M. Phan, T. C. Lam, and A. Masaracchia, “Multi-Rate Probabilistic Caching Optimized Video Offloading in Dense D2D Networks,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 4, pp. 1240–1244, Apr. 2023, doi: 10.1109/LCOMM.2023.3247894.
- [140] T. Do-Duy, L. D. Nguyen, T. Q. Duong, S. R. Khosravirad, and H. Claussen, “Joint Optimisation of Real-Time Deployment and Resource Allocation for UAV-Aided Disaster Emergency Communications,” *IEEE J. Sel. Areas*

- Commun.*, vol. 39, no. 11, pp. 3411–3424, Nov. 2021, doi: 10.1109/JSAC.2021.3088662.
- [141] Y. J. Chen, K. M. Liao, M. L. Ku, F. P. Tso, and G. Y. Chen, “Multi-agent reinforcement learning based 3D trajectory design in aerial-terrestrial wireless caching networks,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 8, pp. 8201–8215, Aug. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3094273.
- [142] A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, “Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments,” *Proc. - IEEE Glob. Commun. Conf. GLOBECOM*, pp. 2898–2904, 2014, doi: 10.1109/GLOCOM.2014.7037248.
- [143] ITU-R, “Rec. p.1410-2 propagation data and prediction methods for the design of terrestrial broadband millimetric radio access systems,” 2003.
- [144] M. H. T. Nguyen, E. Garcia-Palacios, T. Do-Duy, L. D. Nguyen, S. T. Mai, and T. Q. Duong, “Spectrum-Sharing UAV-Assisted Mission-Critical Communication: Learning-Aided Real-Time Optimisation,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 11622–11632, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3050522.
- [145] A. Chipperfield, P. Fleming, H. Pohlheim, and C. Fonseca, *Genetic Algorithm TOOLBOX For Use with MATLAB Version 1.2 User’s Guide*. University of Sheffield, 1994.
- [146] L. Agrawal and A. Mondal, “Energy-Efficient Bandwidth Orchestration for Industrial IoT in Softwarized 6G Networks,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 19, pp. 40440–40448, 2025, doi: 10.1109/IIOT.2025.3591029.
- [147] S. Zargari, A. Hakimi, C. Tellambura, and S. Herath, “User Scheduling and Trajectory Optimization for Energy-Efficient IRS-UAV Networks With SWIPT,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 2, pp. 1815–1830, Feb. 2023, doi: 10.1109/TVT.2022.3207700.
- [148] T. Cheng *et al.*, “Aerial IRS-Assisted Secure SWIPT System with UAV Jitter,” *IEEE Trans. Green Commun. Netw.*, vol. 8, no. 4, pp. 1530–1544, 2024, doi: 10.1109/TGCN.2024.3366539.