

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

PHẠM THỊ QUỲNH TRANG

NGHIÊN CỨU MỘT SỐ GIẢI PHÁP NÂNG CAO
HIỆU NĂNG TRUYỀN THÔNG VÔ TUYẾN
CHO HỆ THỐNG KẾT HỢP THIẾT BỊ BAY
KHÔNG NGƯỜI LÁI (UAV)

LUẬN ÁN TIẾN SĨ CÔNG NGHỆ ĐIỆN TỬ - VIỄN THÔNG

Hà Nội – 2026

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ

PHẠM THỊ QUỲNH TRANG

NGHIÊN CỨU MỘT SỐ GIẢI PHÁP NÂNG CAO
HIỆU NĂNG TRUYỀN THÔNG VÔ TUYẾN
CHO HỆ THỐNG KẾT HỢP THIẾT BỊ BAY
KHÔNG NGƯỜI LÁI (UAV)

Ngành: Công nghệ Điện tử - Viễn thông

Chuyên ngành: Kỹ thuật Viễn thông

Mã số: 9520208

LUẬN ÁN TIẾN SĨ
CÔNG NGHỆ ĐIỆN TỬ - VIỄN THÔNG

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

1. PGS. TS. Trịnh Anh Vũ

2. TS. Đinh Triều Dương

Hà Nội - 2026

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan rằng các kết quả khoa học được trình bày trong luận án này là thành quả nghiên cứu của bản thân tôi trong suốt thời gian làm nghiên cứu sinh và chưa từng xuất hiện trong công bố của các tác giả khác. Các kết quả đạt được là chính xác và trung thực.

Tôi xin cam đoan rằng mọi sự giúp đỡ cho việc thực hiện luận án này đã được cảm ơn và các thông tin trích dẫn trong luận án đã được chỉ rõ nguồn gốc.

Hà Nội, ngày 26 tháng 6 năm 2026

Học viên

Phạm Thị Quỳnh Trang

LỜI CẢM ƠN

Trước hết, tôi xin bày tỏ lòng biết ơn sâu sắc tới PGS.TS. Trịnh Anh Vũ và TS. Đinh Triều Dương, những người thầy đã trực tiếp hướng dẫn tôi về mặt học thuật, đồng thời luôn tận tình hỗ trợ, định hướng và tạo điều kiện thuận lợi để tôi có thể hoàn thành luận án này.

Tôi xin chân thành cảm ơn Bộ môn Thông tin vô tuyến, Khoa Điện tử - Viễn thông, Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội và Trường Điện - Điện tử, Đại học Công nghiệp Hà Nội đã tạo môi trường học tập và nghiên cứu thuận lợi, cũng như hỗ trợ tôi trong suốt quá trình thực hiện luận án.

Tôi cũng xin gửi lời cảm ơn tới PGS.TS. Tống Văn Luyện, TS. Dương Thị Hằng cùng các anh/chị, bạn bè và đồng nghiệp đã chia sẻ những kinh nghiệm quý báu, đóng góp ý kiến và hỗ trợ tôi trong quá trình nghiên cứu.

Cuối cùng, tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới gia đình, đặc biệt là con trai Vũ Trí Minh, người đã luôn là nguồn động lực tinh thần to lớn, giúp tôi vượt qua những khó khăn để hoàn thành luận án.

Xin trân trọng cảm ơn!

Hà Nội, ngày 26 tháng 6 năm 2026

Phạm Thị Quỳnh Trang

MỤC LỤC

Trang phụ bìa	i
Lời cam đoan	i
Lời cảm ơn	ii
Mục lục	1
Danh mục ký hiệu và chữ viết tắt	4
Danh mục hình vẽ	6
Danh mục bảng biểu	7
MỞ ĐẦU	8
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ TRUYỀN THÔNG VÔ TUYẾN SỬ DỤNG UAV VÀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU	15
1.1. Khái quát về thiết bị bay không người lái	15
1.1.1. Định nghĩa và đặc điểm cơ bản	15
1.1.2. Phân loại UAV	15
1.1.3. Vai trò của UAV trong mạng truyền thông	17
1.1.4. Các thuộc tính của truyền thông UAV	18
1.2. Kênh truyền trong truyền thông sử dụng UAV	19
1.2.1. Các loại đường truyền	19
1.2.2. Phân loại kênh truyền UAV	19
1.2.3. Các mô hình toán học mô tả kênh truyền UAV	20
1.3. Kỹ thuật đa truy nhập trong mạng vô tuyến thế hệ mới	25
1.3.1. Kỹ thuật đa truy nhập không trực giao NOMA	25
1.3.2. Kỹ thuật đa truy nhập phân chia theo tốc độ RSMA	26
1.3.3. So sánh RSMA và NOMA	29
1.3.4. Thuật toán khử nhiễu liên tiếp SIC	29
1.4. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước	34
1.4.1. Tình hình nghiên cứu quốc tế	34
1.4.2. Tình hình nghiên cứu trong nước	39
1.4.3. Khoảng trống nghiên cứu	40

1.5. Kết luận chương	41
CHƯƠNG 2. MÔ HÌNH HÓA VÀ ƯỚC LƯỢNG SUY HAO KÊNH	
TRUYỀN UAV DỰA TRÊN MÔ HÌNH HỌC SÂU	43
2.1. Động lực nghiên cứu	43
2.2. Mô hình hệ thống	45
2.3. Đề xuất mô hình kênh truyền dựa trên dữ liệu	46
2.4. Các thuật toán học máy được xem xét	49
2.4.1. Thuật toán K – láng giềng (KNN)	49
2.4.2. Thuật toán cây quyết định (DT)	50
2.4.3. Random Forest (RF)	50
2.4.4. Long Short-Term Memory (LSTM)	51
2.4.5. Mô hình Encoder–Decoder LSTM	51
2.5. Tối ưu siêu tham số cho các mô hình học máy	52
2.5.1. Thuật toán Gravitational Search Algorithm (GSA)	52
2.5.2. Tối ưu siêu tham số sử dụng GSA	53
2.6. Tiêu chí đánh giá	54
2.7. Phân tích kết quả	56
2.7.1. Ước lượng kênh A2A	57
2.7.2. Kết quả ước lượng kênh A2G	62
2.7.3. Phân tích độ phức tạp của thuật toán	64
2.8. Kết luận chương	66
CHƯƠNG 3. TỐI ƯU THAM SỐ VẬN HÀNH UAV NHẪM NÂNG	
CAO HIỆU QUẢ TRUYỀN THÔNG	67
3.1. UAV đóng vai trò trạm cơ sở	67
3.1.1. Động lực nghiên cứu	67
3.1.2. Mô hình hệ thống	69
3.1.3. Phân tích giải tích và các công thức dạng đóng cho mô hình truyền thông UAV-BS	72
3.1.4. Đánh giá kết quả	78
3.2. UAV đóng vai trò trạm chuyển tiếp di động (UAV-relay)	80
3.2.1. Động lực nghiên cứu	80
3.2.2. Mô hình hệ thống	81

3.2.3. Vận tốc tối ưu	84
3.2.4. Kết quả mô phỏng	86
3.3. Kết luận chương	88
CHƯƠNG 4. TRUYỀN THÔNG NHẬN THỨC ĐƯỜNG LÊN CHO	
MẠNG UAV SỬ DỤNG KỸ THUẬT RSMA	90
4.1. Động lực nghiên cứu	90
4.2. Mô hình hệ thống	92
4.2.1. Kiến trúc mạng truyền thông mặt đất và các UAV	92
4.2.2. Mô hình kênh truyền và giả thiết thông tin trạng thái kênh	93
4.2.3. Mô hình công suất phát và tạp âm	94
4.2.4. Phát biểu bài toán	95
4.3. Phân tích vùng dung lượng và điều kiện ghép cặp PU-SU	95
4.3.1. Vùng dung lượng của kênh đa truy nhập đường lên	96
4.3.2. Bài toán ghép cặp PU-SU	97
4.3.3. Điều kiện ghép cặp PU-SU	98
4.4. Phân vùng dung lượng và chiến lược giải mã dựa trên RSMA	100
4.4.1. Phân vùng dung lượng dựa trên khả năng giải mã	101
4.4.2. Mô hình truyền RSMA và kỹ thuật tách đa truy cập	103
4.4.3. Phân tích xác suất mất kết nối (Outage Probability)	106
4.5. Thuật toán tối đa hóa số lượng cặp ghép PU-SU	108
4.5.1. Thiết lập bài toán trong kịch bản đa người dùng	109
4.5.2. Mô tả thuật toán đề xuất	109
4.5.3. Phân tích độ phức tạp tính toán	109
4.6. Kết quả mô phỏng và thảo luận	111
4.7. Kết luận chương	113
KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ	115
DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN	
ĐẾN LUẬN ÁN	117
TÀI LIỆU THAM KHẢO	118

DANH MỤC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Ký hiệu	Giải thích tiếng Anh	Giải thích tiếng Việt
5G	Fifth Generation	Thế hệ thứ năm của mạng di động
A2A	Air-to-Air	Kênh truyền không đối không
A2G	Air-to-Ground	Kênh truyền không đối đất
AI	Artificial Intelligence	Trí tuệ nhân tạo
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Nhiều trắng Gaussian
BS	Base Station	Trạm gốc
CDF	Cumulative Distribution Function	Hàm phân phối tích lũy
CR	Cognitive Radio	Vô tuyến nhận thức
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh truyền
DQN	Deep Q-Network	Mạng nơ-ron Q
DRL	Deep Reinforcement Learning	Học tăng cường sâu
DT	Decision Tree	Thuật toán cây quyết định
GA	Genetic Algorithm	Thuật toán di truyền
IRS/RIS	Intelligent Reflecting Surface	Bề mặt phản xạ thông minh
KNN	K-Nearest Neighbors	Thuật toán k láng giềng gần nhất
LOS	Line-of-Sight	Đường truyền có tầm nhìn thẳng
LSTM	Long Short-Term Memory	Mạng bộ nhớ ngắn hạn dài
MAE	Mean Absolute Error	Sai số tuyệt đối trung bình
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Nhiều đầu vào và đầu ra
ML	Machine Learning	Học máy
NLOS	Non-Line-of-Sight	Đường truyền không có tầm nhìn thẳng
Tiếp theo trang sau		

Ký hiệu	Giải thích tiếng Anh	Giải thích tiếng Việt
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access	Truy cập đa người dùng phi trực giao
OMA	Orthogonal Multiple Access	Truy cập đa người dùng trực giao
PL	Path Loss	Suy hao đường truyền
PU	Primary User	Người dùng chính
QoS	Quality of Service	Chất lượng dịch vụ
RF	Random Forest	Thuật toán rừng ngẫu nhiên
RL	Reinforcement Learning	Học tăng cường
RMSE	Root Mean Square Error	Căn bậc hai của sai số bình phương trung bình
RNN	Recurrent Neural Network	Mạng nơ-ron hồi tiếp
RSMA	Rate-Splitting Multiple Access	Kỹ thuật đa truy cập phân chia theo tốc độ
SDR	Software Defined Radio	Vô tuyến định nghĩa bằng phần mềm
SIC	Successive Interference Cancellation	Kỹ thuật giải mã hủy nhiễu liên tiếp
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu trên tổng nhiễu và giao thoa
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Tỷ số tín hiệu trên nhiễu
SU	Secondary User	Người dùng thứ cấp
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Thiết bị bay không người lái
UE	User Equipment	Thiết bị người dùng

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1	Kiến trúc mạng tích hợp Vệ tinh - UAV - Mạng mặt đất [53]	18
Hình 1.2	Các loại kênh truyền UAV	20
Hình 1.3	Truyền thông UAV: ứng dụng và thách thức	35
Hình 2.1	Các loại kênh truyền UAV	45
Hình 2.2	Các bước xây dựng mô hình suy hao kênh truyền	47
Hình 2.3	Framework xây dựng mô hình học máy cho bài toán ước lượng kênh truyền UAV dựa trên dữ liệu	48
Hình 2.4	Mô hình ước lượng suy hao kênh truyền dùng thuật toán LSTM	58
Hình 2.5	Mô hình ước lượng suy hao kênh truyền dùng thuật toán LSTM hai chiều	59
Hình 2.6	Mô hình ước lượng suy hao kênh truyền dùng thuật toán encoder-decoder LSTM	59
Hình 2.7	Giá trị ước lượng kênh A2A theo mô hình không gian tự do và theo mô hình đề xuất so với giá trị đo lường	60
Hình 2.8	Đồ thị CDF của sai số ước lượng	61
Hình 2.9	Phân bố RMSE, R2 và thời gian thực thi cho mô hình RF.	65
Hình 3.1	Mô hình hệ thống truyền thông sử dụng UAV	70
Hình 3.2	Đồ thị của hàm số $y_1(\theta)$ và $y_2(\theta)$	72
Hình 3.3	Mô hình hệ thống UAV - relay	81
Hình 3.4	Quỹ đạo của UAV	83
Hình 3.5	Ảnh hưởng của vận tốc UAV đến tốc độ truyền tin	87
Hình 3.6	Ảnh hưởng của tốc độ đến độ lệch của thông lượng	87
Hình 4.1	Mô hình hệ thống CR-RSMA với UAV	93
Hình 4.2	Ràng buộc vùng dung lượng trong mặt phẳng (R_s, R_0)	97
Hình 4.3	Phân vùng dung lượng trong mặt phẳng (R_s, R_0)	101
Hình 4.4	Khả năng ghép cặp PU-SU	111
Hình 4.5	Tốc độ truyền dẫn theo SNR	112

DANH MỤC BẢNG BIỂU

Bảng 2.1	Các đặc trưng đầu vào cho mô hình dự báo suy hao kênh truyền A2A	58
Bảng 2.2	So sánh sai số dự đoán suy hao kênh truyền A2A	61
Bảng 2.3	Các đặc trưng đầu vào cho mô hình ước lượng suy hao kênh truyền A2G	63
Bảng 2.4	Sai số ước lượng suy hao kênh truyền A2G với các phương pháp tối ưu hóa siêu tham số khác nhau	64
Bảng 3.1	Góc nâng tối ưu và gần đúng của UAV ($f = 2000$ MHz) . . .	79
Bảng 3.2	Độ tăng công suất của BS-UAV ($f = 2000$ MHz)	79
Bảng 3.3	Các tham số của hệ thống dùng trong mô phỏng	86

MỞ ĐẦU

A. Động lực nghiên cứu

Sự phát triển nhanh chóng của các thiết bị di động thông minh, cùng với sự bùng nổ của các dịch vụ trực tuyến đòi hỏi băng thông lớn và độ trễ thấp, đã tạo ra những thay đổi lớn trong lĩnh vực thông tin vô tuyến. Các ứng dụng như thực tế tăng cường và thực tế ảo, truyền phát video độ phân giải siêu cao (4K/8K), dịch vụ điện toán đám mây, cũng như Internet vạn vật (IoT) đang ngày càng phổ biến, dẫn đến nhu cầu truyền tải dữ liệu ngày càng tăng cả về quy mô lẫn tính đa dạng. Trước bối cảnh đó, các hệ thống thông tin di động thế hệ thứ năm (5G) và các thế hệ tiếp theo (B5G, 6G) được phát triển với mục tiêu cung cấp khả năng kết nối, tốc độ dữ liệu vượt trội, độ trễ thấp và độ tin cậy cao, nhằm đáp ứng yêu cầu của các dịch vụ và ứng dụng mới nổi [91, 117].

Mặc dù 5G mang lại nhiều cải tiến về tốc độ và độ trễ, hạ tầng mạng mặt đất với các trạm gốc cố định vẫn gặp khó khăn trong việc đảm bảo vùng phủ và chất lượng dịch vụ ổn định tại các khu vực địa hình phức tạp, vùng xa, hải đảo hoặc trong các tình huống khẩn cấp khi hạ tầng bị gián đoạn. Những hạn chế này cho thấy nhu cầu về các giải pháp truyền thông linh hoạt, có khả năng triển khai nhanh và thích ứng với điều kiện môi trường thay đổi [70, 75].

Xuất phát từ những vấn đề trên, thiết bị bay không người lái (Unmanned Aerial Vehicle – UAV), hay còn được gọi là các nút mạng trên không, đã nổi lên như một giải pháp đột phá và là thành phần không thể thiếu trong hệ sinh thái mạng B5G. Với các ưu điểm vượt trội như khả năng triển khai linh hoạt, chi phí vận hành thấp và đặc biệt là khả năng thiết lập các liên kết truyền thông tầm nhìn thẳng (Line-of-Sight - LoS) ổn định, UAV có thể đóng vai trò như các trạm gốc trên không hoặc các nút chuyển tiếp để mở rộng vùng phủ sóng và tăng cường dung lượng mạng một cách hiệu quả [12, 72, 73, 75].

Với đặc tính cơ động cao và hạn chế năng lượng của UAV, khi tích hợp UAV vào mạng di động gây ra các thách thức về quản lý tài nguyên vô tuyến, tối ưu hóa quỹ đạo bay và đảm bảo an toàn thông tin. Để nâng cao hiệu năng

hệ thống, các kỹ thuật truyền thông phối hợp được nghiên cứu nhằm cho phép UAV phối hợp với nhau hoặc với trạm mặt đất, để cải thiện độ tin cậy liên kết và chất lượng trải nghiệm người dùng [2, 12, 38].

Xu hướng hội tụ UAV với các công nghệ mới như (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA), bề mặt phản xạ thông minh (Intelligent Reflecting Surface - IRS), điện toán biên di động (Mobile Edge Computing - MEC), đặc biệt là đa truy nhập phân chia theo tốc độ (Rate-Splitting Multiple Access - RSMA) đang mở ra nhiều tiềm năng ứng dụng trong các mạng theo định hướng 6G. Các mạng này đòi hỏi khả năng kết nối đồng thời số lượng lớn thiết bị với đặc tính và yêu cầu dịch vụ đa dạng. Trong đó, RSMA được xem là một kỹ thuật đa truy nhập linh hoạt, cho phép chia nhỏ tín hiệu và quản lý can nhiễu hiệu quả hơn so với các phương thức truyền thống, giúp nâng cao hiệu quả phổ tần và hỗ trợ tích hợp với các giải pháp như UAV và truyền thông nhận thức (Cognitive Radio - CR) để tối ưu hóa sử dụng tài nguyên vô tuyến trong các mạng phức hợp [22, 42, 63, 81].

Từ những phân tích trên, có thể thấy rằng nghiên cứu các kỹ thuật truyền thông kết hợp với UAV là một hướng nghiên cứu có ý nghĩa cả về mặt khoa học và thực tiễn. Kết quả nghiên cứu không chỉ góp phần nâng cao hiệu quả hoạt động của các hệ thống thông tin vô tuyến mà còn hỗ trợ phát triển các mạng truyền thông linh hoạt, thông minh và đáp ứng tốt hơn các yêu cầu của tương lai. Vì vậy, nghiên cứu sinh lựa chọn đề tài “Nghiên cứu một số giải pháp nâng cao hiệu năng truyền thông vô tuyến cho hệ thống kết hợp thiết bị bay không người lái (UAV)” làm luận án tiến sĩ, với mục tiêu nghiên cứu, đề xuất và đánh giá một số giải pháp nhằm nâng cao hiệu năng của các hệ thống thông tin di động hiện đại.

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

1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của luận án là đề xuất một số giải pháp kỹ thuật nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và chất lượng dịch vụ cho hệ thống thông tin hỗ trợ bởi UAV. Cụ thể, luận án tập trung thực hiện các mục tiêu sau:

1. Cải thiện độ chính xác trong dự báo suy hao kênh truyền UAV: Nghiên

cứu và xây dựng các mô hình học máy và học sâu để dự báo suy hao cho các liên kết A2A và A2G. Trong đó, đề xuất sử dụng thuật toán tối ưu hóa tìm kiếm hấp dẫn (Gravitational Search Algorithm - GSA) để tự động hóa việc thiết lập siêu tham số, giúp tối ưu hóa hiệu năng của các mô hình dự báo.

2. Nâng cao hiệu quả truyền thông bằng cách tối ưu hóa một số tham số vận hành của UAV: Thiết lập các biểu thức giải tích để xác định độ cao, góc nâng tối ưu và phân tích ảnh hưởng của chúng đến bán kính vùng phủ sóng, độ lợi công suất khi UAV hoạt động như trạm cơ sở. Đồng thời, nghiên cứu tác động của vận tốc đến sự ổn định của tốc độ truyền dẫn khi UAV làm nút chuyển tiếp di động, từ đó đề xuất biểu thức dạng đóng xác định vận tốc vận hành phù hợp nhằm duy trì tính ổn định của liên kết.

3. Đề xuất các điều kiện ghép cặp giữa người dùng ưu tiên (PU) và người dùng thứ cấp (SU), đồng thời đề xuất quy trình tách tín hiệu tại trạm cơ sở trong hệ thống truyền dẫn đường lên kết hợp vô tuyến nhận thức và RSMA. Bên cạnh đó, một thuật toán ghép cặp PU-SU được phát triển nhằm tối đa hóa số lượng người dùng được phục vụ, từ đó cải thiện hiệu quả sử dụng phổ tần và nâng cao năng lực phục vụ của hệ thống.

2. Đối tượng nghiên cứu

Nghiên cứu này tập trung vào:

Kênh truyền UAV: Các mô hình suy hao của liên kết A2A và liên kết A2G trong các môi trường truyền dẫn khác nhau.

Hệ thống thông tin UAV: Các mô hình hệ thống trong đó UAV đóng vai trò là trạm gốc để mở rộng vùng phủ sóng hoặc nút chuyển tiếp để kết nối các thiết bị tầm xa.

Kỹ thuật đa truy nhập và quản lý tài nguyên: Mô hình truyền dẫn kết hợp giữa vô tuyến nhận thức và đa truy nhập RSMA; các thuật toán ghép cặp người dùng và kỹ thuật tách tín hiệu tại trạm gốc.

3. Phạm vi nghiên cứu

Để đạt được các mục tiêu nghiên cứu đã đề ra, luận án giới hạn phạm vi nghiên cứu trong các nội dung sau:

3. Phạm vi nghiên cứu

Để đạt được các mục tiêu nghiên cứu đã đề ra, luận án giới hạn phạm vi nghiên cứu trong các nội dung sau:

- *Mô hình ứng dụng*: Tập trung vào các thiết bị bay không người lái hoạt động ở độ cao thấp trong hai kịch bản: (i) UAV làm trạm gốc trên không cung cấp vùng phủ sóng mặt đất; (ii) UAV làm nút chuyển tiếp hoặc người dùng thứ cấp trong mạng vô tuyến nhận thức đường lên. Luận án chỉ tập trung vào khía cạnh truyền thông và giả định bỏ qua thành phần tiêu hao năng lượng dành cho việc chuyển động cơ học (hoặc duy trì trạng thái bay) của UAV.

- *Mô hình kênh truyền*: Nghiên cứu các liên kết UAV-UAV và UAV-mặt đất trong môi trường ngoại ô và đô thị. Luận án sử dụng hai hướng tiếp cận: mô hình hóa dựa trên dữ liệu (học máy, học sâu) và mô hình hóa dựa trên lý thuyết xác suất, giải tích (biểu thức dạng đóng).

- *Kỹ thuật truy nhập*: Giới hạn trong kỹ thuật đa truy nhập RSMA cho truyền dẫn đường lên. Trọng tâm là bài toán phân bổ tài nguyên, điều phối người dùng và kiểm soát can nhiễu giữa hệ thống sơ cấp và thứ cấp.

- *Chỉ tiêu đánh giá*: Tập trung phân tích hiệu năng ở lớp vật lý và lớp liên kết dữ liệu với các chỉ tiêu chính: suy hao kênh truyền, bán kính vùng phủ sóng, xác suất dừng và tổng tốc độ dữ liệu. Các vấn đề về giao thức tầng mạng, quản lý di động ở lớp cao hoặc thiết kế phần cứng không nằm trong phạm vi nghiên cứu của luận án.

4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án áp dụng phương pháp nghiên cứu tổng hợp, kết hợp giữa phân tích lý thuyết, mô hình hóa dựa trên dữ liệu và kiểm chứng bằng mô phỏng số. Các phương pháp cụ thể bao gồm:

- Phân tích lý thuyết và mô hình hóa hệ thống: Sử dụng lý thuyết thông tin và truyền thông vô tuyến để xây dựng mô hình hệ thống cho các kịch bản UAV. Phương pháp này là cơ sở để thiết lập các biểu thức toán học mô tả mối quan hệ giữa các thông số vật lý (vị trí, vận tốc, công suất) và hiệu năng mạng (tốc độ dữ liệu, xác suất dừng).

- Phương pháp tối ưu hóa và xấp xỉ tuyến tính: Tìm kiếm các nghiệm dạng đóng cho bài toán tối ưu hóa cấu hình không gian (độ cao, góc ngẩng) và phân bổ tài nguyên phổ tần. Cách tiếp cận này giúp xác định các xu hướng tối ưu và cung cấp các chỉ dẫn kỹ thuật cho việc triển khai hệ thống.
- Tiếp cận dựa trên dữ liệu và học sâu: Sử dụng các mô hình học sâu để dự báo đặc tính kênh truyền trong các môi trường phức tạp. Các kết quả từ mô hình này có thể cung cấp tham số đầu vào cho các thuật toán tối ưu hóa và điều phối tài nguyên ở các bước tiếp theo.
- Mô phỏng số và đối soát hiệu năng: Luận án sử dụng các công cụ Matlab và Python để thực hiện mô phỏng Monte Carlo. Quá trình này nhằm hai mục đích: (i) Kiểm chứng độ chính xác của các mô hình toán học và thuật toán đề xuất; (ii) So sánh hiệu quả của các giải pháp mới với các công nghệ truyền thống dưới cùng một điều kiện.

C. Đóng góp của luận án

Trên cơ sở mục tiêu nâng cao chất lượng truyền thông cho các hệ thống sử dụng thiết bị bay không người lái trong mạng vô tuyến thế hệ mới, luận án tập trung giải quyết các bài toán liên quan đến môi trường truyền dẫn, tối ưu hóa các tham số vận hành của UAV và thiết kế cơ chế truy nhập vô tuyến phù hợp cho các kịch bản mạng khác nhau. Thông qua các nghiên cứu này, luận án đã đạt được những đóng góp khoa học chính, góp phần cải thiện hiệu quả sử dụng tài nguyên và nâng cao chất lượng dịch vụ của hệ thống. Các đóng góp cụ thể của luận án được trình bày như sau:

1 - Đề xuất một phương pháp lựa chọn và tối ưu siêu tham số cho các mô hình học máy và học sâu trong bài toán ước lượng suy hao kênh truyền đối với cả liên kết A2A và A2G. Bằng cách kết hợp thuật toán GSA với các mô hình như KNN, DT, RF và các kiến trúc LSTM, nghiên cứu đã cải thiện đáng kể độ chính xác ước lượng so với các mô hình thống kê truyền thống. Đóng góp này cung cấp công cụ ước lượng kênh truyền dựa trên dữ liệu, làm cơ sở tin cậy cho việc thiết kế và tối ưu các hệ thống UAV trong môi trường thực tế.

2 - Đề xuất một mô hình xấp xỉ tuyến tính trong toán học nhằm xây dựng các biểu thức dạng đóng để xác định độ cao, góc ngẩng và vận tốc vận hành tối

ưu khi UAV đóng vai trò trạm gốc hoặc nút chuyển tiếp. Phân tích ảnh hưởng của các tham số này đến hiệu quả truyền thông thể hiện ở bán kính vùng phủ sóng, độ lợi công suất, hoặc tốc độ truyền dẫn. Khác với các cách tiếp cận thuần túy bằng mô phỏng, đóng góp này tường minh hóa mối quan hệ giữa cấu hình hình học, vùng phủ sóng và công suất thu. Kết quả nghiên cứu cung cấp các chỉ dẫn kỹ thuật có ý nghĩa vật lý, giúp tối ưu hóa việc triển khai UAV trên thực tế.

3 - Xây dựng mô hình truyền dẫn đường lên dựa trên kỹ thuật RSMA trong mạng vô tuyến nhận thức, cho phép nâng cao hiệu quả khai thác phổ tần. Đóng góp chính bao gồm việc thiết lập các điều kiện giải tích để ghép cặp người dùng (PU-SU) và đề xuất thuật toán kiểm soát nhập mạng có độ phức tạp thấp. Giải pháp đề xuất giúp gia tăng số lượng người dùng được phục vụ và nâng cao tổng tốc độ dữ liệu của hệ thống so với kỹ thuật NOMA truyền thống.

D. Bố cục của luận án

Ngoài phần mở đầu, kết luận và hướng phát triển, nội dung chính của luận án được tổ chức thành bốn chương như sau:

Chương 1 – TỔNG QUAN VỀ TRUYỀN THÔNG VÔ TUYẾN SỬ DỤNG UAV VÀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU: Chương này tổng quan về truyền thông UAV, mô hình kênh truyền và kỹ thuật đa truy nhập RSMA; từ đó phân tích các nghiên cứu liên quan để chỉ ra khoảng trống khoa học và định hướng nội dung của luận án.

Chương 2 – MÔ HÌNH HÓA VÀ ƯỚC LƯỢNG SUY HAO KÊNH TRUYỀN UAV DỰA TRÊN MÔ HÌNH HỌC SÂU: Chương này nghiên cứu bài toán ước lượng suy hao kênh truyền A2A và A2G trong hệ thống UAV sử dụng các mô hình học máy và học sâu (KNN, DT, RF, LSTM). Bằng việc đề xuất thuật toán GSA để tối ưu hóa siêu tham số, nghiên cứu nâng cao độ chính xác dự đoán trong các môi trường khác nhau.

Chương 3 – TỐI ƯU THAM SỐ VẬN HÀNH UAV NHẪM NÂNG CAO HIỆU QUẢ TRUYỀN THÔNG: Chương này xây dựng các biểu thức dạng đóng nhằm tối ưu hóa các tham số vận hành UAV (độ cao, góc ngẩng, vận tốc) bằng phương pháp mô hình hóa giải tích.

Chương 4 – TRUYỀN THÔNG NHẬN THỨC ĐƯỜNG LÊN CHO MẠNG UAV SỬ DỤNG KỸ THUẬT RSMA: Chương này đề xuất giải pháp ghép cặp người dùng và thuật toán kiểm soát nhập mạng độ phức tạp thấp cho hệ thống truyền thông nhận thức đường lên hỗ trợ RSMA sử dụng UAV. Phương pháp này giúp tăng số lượng người dùng và nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần, được kiểm chứng bằng các kết quả phân tích và mô phỏng so với các phương pháp truyền thống.

Phần KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG PHÁT TRIỂN tổng hợp các kết quả chính của luận án, khẳng định các đóng góp đạt được về mặt khoa học và thực tiễn, đồng thời đề xuất một số hướng nghiên cứu tiếp theo.

CHƯƠNG 1.

TỔNG QUAN VỀ TRUYỀN THÔNG VÀ TUYẾN SỬ DỤNG UAV VÀ CÁC VẤN ĐỀ NGHIÊN CỨU

1.1. Khái quát về thiết bị bay không người lái

1.1.1. Định nghĩa và đặc điểm cơ bản

UAV là các thiết bị bay có khả năng hoạt động mà không cần phi công điều khiển trực tiếp trên khoang. Trong hệ sinh thái mạng di động thế hệ B5G và 6G, UAV nổi lên như một giải pháp hiệu quả nhờ các đặc tính kỹ thuật như:

- *Khả năng triển khai linh hoạt:* UAV có thể được thiết lập nhanh chóng theo yêu cầu thời gian thực, thích ứng tốt với sự thay đổi của môi trường và nhu cầu mạng.
- *Chi phí vận hành thấp:* So với hạ tầng mạng mặt đất cố định, việc sử dụng UAV giúp tối ưu hóa chi phí triển khai do không yêu cầu chi phí thuê địa điểm hay xây dựng tháp viễn thông.
- *Liên kết truyền thông ưu việt:* Nhờ khả năng duy trì vị trí trên không, UAV dễ dàng thiết lập các liên kết truyền thẳng (Line-of-Sight – LoS) ổn định với người dùng mặt đất, giúp giảm suy hao tín hiệu đáng kể so với các kết nối mặt đất thông thường [75, 91].

1.1.2. Phân loại UAV

Sự đa dạng về thiết kế, kích thước và mục đích sử dụng dẫn đến việc có nhiều tiêu chí khác nhau để phân loại UAV. Việc hiểu rõ các phân loại này là cơ sở quan trọng để lựa chọn kỹ thuật truyền thông phối hợp phù hợp với từng kịch bản ứng dụng cụ thể.

1.1.2.1. Phân loại theo cấu trúc vật lý

Dựa trên đặc điểm khí động học và cơ cấu tạo lực nâng, UAV thường được chia thành ba nhóm chính [85]:

- **UAV cánh cố định:** Có cấu trúc tương tự máy bay truyền thống, tạo lực nâng nhờ sự chênh lệch áp suất khi di chuyển về phía trước. Ưu điểm của loại này là tốc độ bay cao, hiệu suất năng lượng tốt và thời gian vận hành dài, phù hợp cho các nhiệm vụ giám sát diện rộng. Tuy nhiên, chúng đòi hỏi đường băng để cất/hạ cánh và không có khả năng bay đứng.
- **UAV cánh quạt:** Bao gồm các loại như trực thăng hoặc đa cánh quạt. Ưu điểm vượt trội là khả năng cất/hạ cánh thẳng đứng và bay đứng tại chỗ, cho phép duy trì liên kết truyền thông ổn định với một khu vực cố định. Tuy nhiên, loại này thường có phạm vi hoạt động và thời gian bay hạn chế do tiêu thụ năng lượng lớn.
- **UAV lai:** Kết hợp khả năng cất cánh thẳng đứng của cánh quạt và hiệu suất bay hành trình của cánh cố định, nhằm tối ưu hóa cho các nhiệm vụ phức tạp đòi hỏi cả sự linh hoạt và tầm xa.

1.1.2.2. Phân loại theo độ cao vận hành

Trong lĩnh vực viễn thông, độ cao là yếu tố quyết định đến vùng phủ sóng và đặc tính kênh truyền. UAV được phân thành hai nhóm nền tảng chính [69]:

- **Nền tảng độ cao thấp (Low Altitude Platform - LAP):** Hoạt động ở độ cao từ vài chục mét đến vài kilômét (thường dưới 10 km). LAP có ưu điểm là chi phí thấp, triển khai nhanh và dễ dàng di chuyển để tối ưu hóa liên kết LoS với người dùng mặt đất.
- **Nền tảng độ cao lớn (High Altitude Platform - HAP):** Hoạt động ở tầng bình lưu (khoảng 17–22 km). HAP có khả năng hoạt động ổn định trong thời gian dài và cung cấp vùng phủ sóng rộng lớn tương đương vệ tinh nhưng với độ trễ thấp hơn nhiều, đóng vai trò như các trạm phát sóng cố định trên không.

1.1.2.3. Phân loại theo trọng lượng và phạm vi hoạt động

Theo các tiêu chuẩn quân sự và dân dụng (như NATO hay EASA), UAV được phân cấp dựa trên kích thước và hiệu suất vận hành [69]:

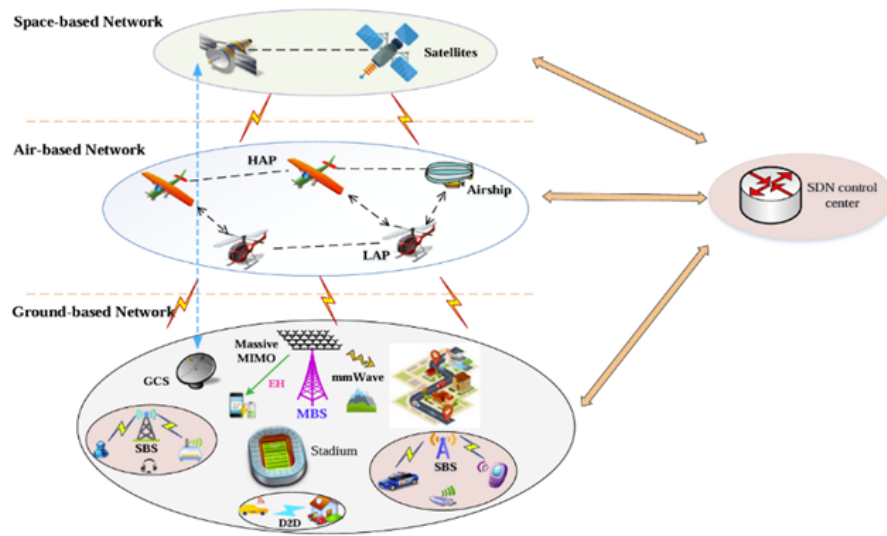
- **Nano và Micro UAV:** Trọng lượng dưới 2 kg, tầm hoạt động ngắn (dưới vài km), thường dùng cho các nhiệm vụ trinh sát tầm gần hoặc cảm biến IoT.
- **Mini UAV:** Trọng lượng từ 2–25 kg, thường được sử dụng rộng rãi trong các nghiên cứu về mạng 5G nhờ sự cân bằng giữa khả năng mang tải trọng và tính linh hoạt.
- **UAV tầm trung và tầm xa:** Nhóm UAV này có độ cao trung bình/lớn và thời gian bay dài, trọng lượng có thể lên tới hàng tấn, phục vụ các nhiệm vụ chiến lược và viễn thông quốc gia.

1.1.3. Vai trò của UAV trong mạng truyền thông

Để đáp ứng các dịch vụ IoT đa dạng với yêu cầu chất lượng dịch vụ khác nhau trong nhiều tình huống thực tế, cần tận dụng lợi thế của từng mô hình mạng. Nghiên cứu cho thấy một mạng riêng lẻ không thể xử lý hiệu quả khối lượng dữ liệu khổng lồ và đáp ứng các ứng dụng quan trọng như IoT, điện toán đám mây và dữ liệu lớn. Do đó, việc phát triển một kiến trúc mạng tích hợp gồm mạng không gian, mạng trên không và mạng mặt đất là cần thiết nhằm cung cấp dịch vụ linh hoạt và nâng cao trải nghiệm người dùng [51, 53, 112].

Hình 1.1 minh họa kiến trúc mạng tích hợp không gian – không khí – mặt đất, gồm ba lớp chức năng chính. Lớp không gian bao gồm các vệ tinh quỹ đạo địa tĩnh, tầm trung và tầm thấp, cùng các trạm mặt đất, tạo thành mạng liên kết toàn cầu phục vụ truyền dẫn dữ liệu diện rộng [58]. Lớp trên không được hình thành bởi các liên kết giữa vệ tinh, UAV và mặt đất, đóng vai trò cầu nối giữa mạng không gian và mạng di động mặt đất. Nhờ đặc tính liên kết LoS, lớp này hỗ trợ hiệu quả các dịch vụ như cứu hộ, định vị và chuyển tiếp dữ liệu, trong đó vệ tinh địa tĩnh thường được ưu tiên cho liên lạc vệ tinh–UAV do tính ổn định về vị trí [120]. UAV trong lớp này tạo ra các trạm tế bào bay (drone-cell) linh hoạt, với vùng phủ phụ thuộc vào độ cao, vị trí và công suất truyền [16]. Lớp mặt đất cung cấp kết nối cho các thiết bị người dùng cuối, kết hợp với điện toán biên di động (MEC) để tối ưu xử lý và phân phối dữ liệu. Trong kiến trúc này, UAV đóng vai trò là hạ tầng truy cập vô tuyến linh hoạt, kết nối người dùng di động và thiết bị trong mạng mặt đất, góp phần nâng cao chất lượng

dịch vụ đầu cuối [119].



Hình 1.1. Kiến trúc mạng tích hợp Vệ tinh - UAV - Mạng mặt đất [53]

Khi được triển khai và vận hành đúng cách, UAV có thể cung cấp các giải pháp liên lạc không dây đáng tin cậy và tiết kiệm chi phí cho nhiều tình huống thực tế.

1.1.4. Các thuộc tính của truyền thông UAV

Các thuộc tính của truyền thông UAV được thể hiện qua các tính chất sau [16, 53, 120]:

Khả năng triển khai động: So với cơ sở hạ tầng mạng mặt đất cố định, UAV có thể được triển khai một cách linh hoạt theo yêu cầu thời gian thực, giúp thích ứng nhanh với sự thay đổi của môi trường và nhu cầu mạng. UAV hoạt động như một trạm cơ sở trên không không yêu cầu chi phí thuê địa điểm, đồng thời loại bỏ sự phụ thuộc vào cơ sở hạ tầng vật lý như tháp viễn thông hay hệ thống cáp, giúp tối ưu hóa chi phí triển khai mạng.

Mạng bày đàn dựa trên UAV: Một nhóm UAV có thể phối hợp để tạo thành mạng đa UAV cung cấp kết nối mở rộng và liên tục cho người dùng mặt đất, ngay cả trong các khu vực hẻo lánh hoặc bị ảnh hưởng bởi thiên tai. Nhờ tính linh hoạt cao và khả năng triển khai nhanh chóng, mạng UAV bày đàn trở thành giải pháp hiệu quả để khôi phục và mở rộng hệ thống liên lạc, đảm bảo kết nối ổn định trong các tình huống khẩn cấp hoặc môi trường mạng có mật độ cao.

1.2. Kênh truyền trong truyền thông sử dụng UAV

Kênh truyền trong truyền thông sử dụng UAV khác với kênh truyền di động mặt đất truyền thống do sự hiện diện nổi bật của thành phần truyền thẳng. Nếu như trong thông tin di động mặt đất, fading thường được mô hình hóa theo phân bố Rayleigh do môi trường giàu tán xạ và chủ yếu không nhìn thẳng [35, 99], thì trong các liên kết có UAV, xác suất xuất hiện đường truyền nhìn thẳng thường lớn hơn và phụ thuộc mạnh vào độ cao bay, góc ngẩng và đặc điểm môi trường truyền dẫn. Vì vậy, kênh truyền UAV thường được mô tả theo các mô hình xác suất LoS/NLoS thay vì chỉ sử dụng các mô hình fading mặt đất truyền thống [4, 104]. Điều này cho thấy việc lựa chọn mô hình kênh phù hợp là cần thiết để bảo đảm độ chính xác trong phân tích và đánh giá hiệu năng hệ thống.

1.2.1. Các loại đường truyền

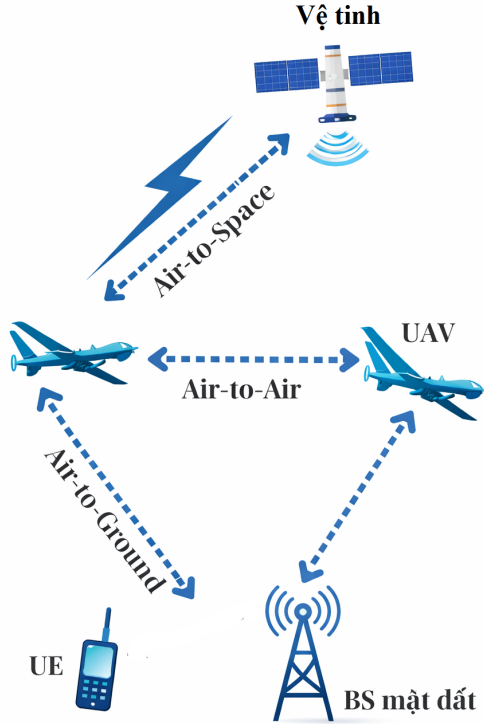
Trong truyền thông UAV, đặc tính kênh truyền giữa UAV và người dùng phụ thuộc chủ yếu vào điều kiện đường truyền, ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu năng hệ thống. Các đường truyền thường được phân thành ba loại: LOS, NLOS và OLOS [58].

Đường truyền LOS xảy ra khi không có vật cản, có suy hao thấp và fading nhẹ, thường được mô hình hóa bằng phân bố Rician [120]. Ngược lại, NLOS xuất hiện khi đường truyền bị che chắn hoàn toàn, tín hiệu đến chủ yếu qua phản xạ và tán xạ, dẫn đến suy hao lớn và fading mạnh, thường được mô hình hóa bằng phân bố Rayleigh hoặc log-normal [16]. OLOS là trường hợp trung gian, khi đường truyền trực tiếp bị cản một phần. Kênh OLOS vẫn tồn tại thành phần LOS nhưng suy giảm đáng kể, thường được mô hình hóa như kênh LOS kèm suy hao bổ sung do vật cản [119], gây suy giảm SINR và độ tin cậy hệ thống.

1.2.2. Phân loại kênh truyền UAV

Trong truyền thông UAV có ba loại kênh truyền: A2S biểu diễn kết nối giữa UAV và vệ tinh, A2A biểu diễn kênh truyền giữa UAV với UAV và A2G biểu diễn kênh liên lạc giữa UAV và UE trên mặt đất (Hình 1.2) [37, 124].

Kênh A2S có liên kết LOS chiếm ưu thế, tuy nhiên, chịu ảnh hưởng mạnh của hiệu ứng khí quyển, cấu trúc UAV và góc ngẩng lên vệ tinh [49, 58].



Hình 1.2. Các loại kênh truyền UAV

Kênh A2A mô tả liên kết giữa các UAV hoặc giữa UAV và máy bay, trong đó LOS thường chiếm ưu thế do môi trường không gian mở. Suy hao chủ yếu tuân theo mô hình không gian tự do, trong khi hiệu ứng Doppler và biến thiên kênh nhanh là các đặc trưng nổi bật do tốc độ di chuyển cao. Hiện tượng shadowing và đa đường thường không đáng kể [96, 124].

Kênh A2G đặc trưng bởi sự kết hợp giữa LOS và NLOS, phụ thuộc mạnh vào độ cao UAV và loại môi trường. Kênh này chịu ảnh hưởng rõ rệt của shadowing và fading đa đường, đặc biệt trong môi trường đô thị, trong khi hiệu ứng Doppler tồn tại nhưng yếu hơn so với kênh A2A [6, 95].

1.2.3. Các mô hình toán học mô tả kênh truyền UAV

Một cách tổng quát, kênh truyền trong miền thời gian cho một kênh giữa UAV và thiết bị thu tại thời điểm t có thể được mô tả như sau [36]:

$$h(t) = \sqrt{PL(d(t))} g(t) e^{j\theta(t)}. \quad (1.1)$$

Trong đó:

$PL(d(t))$ là hàm suy hao đường truyền tại khoảng cách $d(t)$

$g(t)$ là thành phần fading nhanh, thường được mô hình bằng phân bố Rician hoặc Rayleigh.

$\theta(t)$ là pha nhiễu ngẫu nhiên, có thể do dịch Doppler hoặc các thành phần phản xạ.

t là thời gian (s), phản ánh sự thay đổi động của kênh theo vị trí UAV.

Hàm truyền $h(t)$ thường được mô hình dưới dạng biến ngẫu nhiên phức có kỳ vọng bằng 0, đặc biệt trong các môi trường không LOS hoặc tán xạ mạnh.

1.2.3.1. Kênh truyền thông A2S

Về mặt lý thuyết và mô phỏng, trong nghiên cứu [49] của Kokkonen và nhóm cộng sự, mô hình kênh truyền A2S trong băng tần THz được mô tả bởi biểu thức sau:

$$PL(f, r) = \frac{(4\pi r_{as} f)^2 \delta_{\text{rain}}(r_r) \delta_{\text{cloud}}(r_c)}{c^2 G_{\text{Tx}}(\theta_{\text{Tx}}) G_{\text{Rx}}(\theta_{\text{Rx}})} \exp \left(\int_{r_1}^{r_2} \kappa_a(f, r_{\text{atm}}) dr_{\text{atm}} \right). \quad (1.2)$$

Trong đó:

$G_{\text{Tx}}(\theta_{\text{Tx}})$ và $G_{\text{Rx}}(\theta_{\text{Rx}})$ là độ lợi ăng-ten của máy phát (Tx) và máy thu (Rx) tại các góc θ_{Tx} và θ_{Rx} .

r_{as} là khoảng cách trực tiếp giữa UAV và vệ tinh (m).

f là tần số hoạt động (Hz).

c là tốc độ ánh sáng (m/s).

$\kappa_a(f, r_{\text{atm}})$ (m^{-1}) là hệ số hấp thụ phân tử của khí quyển, phụ thuộc vào tần số hoạt động, áp suất, nhiệt độ và thành phần khí quyển tại vị trí r_{atm} .

$\delta_{\text{rain}}(r_r)$ và $\delta_{\text{cloud}}(r_c)$ lần lượt là suy hao do mưa và mây.

Các thành phần suy hao do mưa và mây được tính theo khuyến nghị ITU-R P.838-3 như sau:

$$\delta_{\text{rain}} = k R_r^\alpha r_{\text{eff}}. \quad (1.3)$$

$$\delta_{\text{cloud}} = K_l M r_c. \quad (1.4)$$

Trong đó:

R_r là tốc độ mưa (mm/h), r_{eff} là khoảng cách hiệu dụng.

M là mật độ nước lỏng trong đám mây hoặc sương mù (g/m^3).

K_l là hệ số suy giảm riêng của đám mây-nước-lỏng ($(\text{dB}/\text{km})/(\text{g}/\text{m}^3)$).

r_c là khoảng cách truyền qua đám mây/sương mù.

k, α : các hệ số thực nghiệm phụ thuộc vào: tần số f , phân cực, và góc truyền.

Với mô hình kênh A2S được xây dựng dựa trên phép gần đúng vật lý-thống kê, ngoài thành phần LoS giữa vệ tinh và UAV, còn xét đến thành phần phản xạ từ mặt đất thông qua hệ số phản xạ. Các tham số này được biểu diễn như hàm của góc nâng và các đặc trưng thống kê (trung bình và độ lệch chuẩn) cho cả hai phân cực.

1.2.3.2. Kênh truyền A2A

Kênh này giống như không gian tự do, với thành phần LOS chiếm ưu thế và các đường dẫn đa năng công suất thấp, đều đặn từ phản xạ mặt đất, nhưng nó phụ thuộc trực tiếp vào độ cao bay và khu vực xung quanh. Thông thường, kênh A2A thể hiện các đặc điểm fading phẳng ở độ cao lớn hơn; tuy nhiên, tùy thuộc vào vận tốc tương đối của UAV và môi trường tán xạ, kênh có thể cực kỳ thay đổi theo thời gian (tức là gây ra sự lan truyền Doppler cao), dẫn đến độ lệch tần số sóng mang và nhiễu giữa các sóng mang [10].

Suy hao kênh truyền theo mô hình không gian tự do được biểu diễn bởi:

$$PL_{\text{dB}}(d) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right). \quad (1.5)$$

Trong đó:

d là khoảng cách giữa Tx và Rx (m).

f là tần số sóng mang (Hz).

c là vận tốc ánh sáng (m/s).

Theo mô hình dò tia [123], khi các thành phần trực tiếp, phản xạ và nhiễu xạ đã được xem xét, mất mát kênh truyền trong môi đô thị dày đặc được biểu

diễn bởi:

$$PL_{\zeta}(d, h_{\text{Tx}}, h_{\text{Rx}}) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) + n_{\zeta}. \quad (1.6)$$

Với:

d là khoảng cách giữa Tx và Rx (m).

h_{Tx} và h_{Rx} là độ cao của Tx và Rx (m).

n_{ζ} tuân theo phân bố chuẩn với trung bình μ_{ζ} và độ lệch chuẩn σ_{ζ} .

Trung bình μ_{ζ} được xác định bởi:

$$\mu_{\zeta} = a_{\zeta} \exp(b_{\zeta} h_{\text{Rx}}). \quad (1.7)$$

Độ lệch chuẩn tương ứng với LoS và NLoS là:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{LOS}} &= a_{\text{LOS}}\theta + b_{\text{LOS}}. \\ \sigma_{\text{NLOS}} &= a_{\text{NLOS}}(\theta - b_{\text{LOS}})^2 + c_{\text{NLOS}}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Trong đó:

a, b, c là các hằng số phụ thuộc môi trường.

θ là góc nâng giữa Tx và Rx (rad), được xác định bởi:

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{h_{\text{Tx}} - h_{\text{Rx}}}{d} \right). \quad (1.9)$$

1.2.3.3. Kênh truyền A2G

Khác với liên lạc mặt đất hay liên kết A2A vốn có tuyến tầm nhìn trực diện (LoS) chiếm ưu thế, kênh truyền A2G của UAV phức tạp hơn và dễ bị tắc nghẽn [15]. Do đó, các mô hình kênh truyền thông thường không còn phù hợp. Đặc tính của kênh A2G phụ thuộc chặt chẽ vào độ cao, góc ngẩng, loại môi trường, cũng như các yếu tố dịch chuyển hay rung động của chính UAV. [76].

Kênh A2G được mô tả bởi sự kết hợp của ba thành phần chính:

$$PL_{\text{A2G}}(d, h) = PL_{\text{LOS}}(d, h) \cdot Pr_{\text{LOS}}(h, d) + PL_{\text{NLOS}}(d, h) \cdot (1 - Pr_{\text{LOS}}(h, d)). \quad (1.10)$$

Trong đó:

d : khoảng cách mặt đất giữa UAV và thiết bị người dùng (m).

h : độ cao UAV (m).

$PL_{\text{LOS}}(d, h)$: suy hao trong trường hợp có LOS.

$PL_{\text{NLOS}}(d, h)$: suy hao trong trường hợp NLOS.

$Pr_{\text{LOS}}(h, d)$: xác suất tồn tại đường truyền LOS.

Theo 3GPP TR 36.777, xác suất tồn tại LOS được mô hình bằng một hàm của góc nâng $\theta = \tan^{-1} \left(\frac{h}{d} \right)$ như sau:

$$Pr_{\text{LOS}}(h, d) = \frac{1}{1 + a \cdot \exp(-b(\theta - a))}. \quad (1.11)$$

Trong đó a, b là các hệ số đặc trưng cho từng môi trường:

Đô thị dày đặc: $a = 9.61, b = 0.16$.

Đô thị thông thường: $a = 12.08, b = 0.11$ [1].

Các mô hình suy hao LOS và NLOS thường sử dụng biểu thức log-distance như sau:

$$\begin{aligned} PL_{\text{LOS}}(\text{dB}) &= 20 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f) + \eta_{\text{LOS}}. \\ PL_{\text{NLOS}}(\text{dB}) &= 20 \log_{10}(d_{3D}) + 20 \log_{10}(f) + \eta_{\text{NLOS}}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Trong đó:

d_{3D} : khoảng cách không gian 3D (m).

f : tần số sóng mang (Hz).

$\eta_{\text{LOS}}, \eta_{\text{NLOS}}$: hệ số suy hao phụ thuộc môi trường.

Mô hình kênh chính xác là yếu tố then chốt trong thiết kế các hệ thống truyền thông dựa trên UAV, đặc biệt cho các ứng dụng mở rộng vùng phủ, kết nối UAV-UE và IoT, trong bối cảnh mô hình dò tia có thể suy giảm độ chính xác ở dải tần thấp [110]. Đồng thời, việc mô hình hóa kênh UAV cần phản ánh được tính biến thiên theo thời gian, hiệu ứng Doppler và fading đa đường do tính di động cao của UAV.

1.3. Kỹ thuật đa truy nhập trong mạng vô tuyến thế hệ mới

1.3.1. Kỹ thuật đa truy nhập không trực giao NOMA

Kỹ thuật đa truy nhập không trực giao (Non-Orthogonal Multiple Access - NOMA) được xem là một trong những hướng tiếp cận tiềm năng cho mạng vô tuyến thế hệ mới nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần và hỗ trợ kết nối số lượng lớn người dùng [19, 20, 47, 59]. Khác với các kỹ thuật đa truy nhập trực giao truyền thống, trong đó mỗi người dùng được cấp phát một tài nguyên trực giao riêng biệt theo thời gian, tần số hoặc mã, NOMA cho phép nhiều người dùng cùng chia sẻ đồng thời một khối tài nguyên vô tuyến. Nhờ đó, hệ thống có thể cải thiện hiệu quả phổ và tăng tổng tốc độ truyền dẫn trong các kịch bản đa người dùng [20, 29].

Trong các biến thể của NOMA, NOMA miền công suất là dạng được nghiên cứu rộng rãi nhất. Nguyên lý cơ bản của kỹ thuật này là ghép nhiều tín hiệu người dùng trên cùng một tài nguyên thời gian - tần số bằng kỹ thuật chồng chập tín hiệu tại phía phát, đồng thời phân biệt các người dùng thông qua các mức công suất khác nhau [47, 59]. Thông thường, người dùng có điều kiện kênh truyền kém hơn sẽ được cấp phát công suất lớn hơn để bảo đảm yêu cầu chất lượng dịch vụ, trong khi người dùng có điều kiện kênh tốt hơn được cấp phát công suất nhỏ hơn [20, 29].

Ở đường xuống, trạm cơ sở phát tín hiệu chồng chập đến nhiều người dùng trên cùng một khối tài nguyên. Tại phía thu, kỹ thuật khử nhiễu liên tiếp SIC (Successive Interference Cancellation) được sử dụng để tách các thành phần tín hiệu. Cụ thể, người dùng có kênh tốt hơn thường giải mã tín hiệu có mức công suất lớn trước, sau đó loại bỏ thành phần này khỏi tín hiệu thu được rồi mới giải mã tín hiệu của chính mình [47, 59]. Trong khi đó, ở đường lên, nhiều người dùng truyền đồng thời đến trạm cơ sở trên cùng tài nguyên vô tuyến; trạm cơ sở sẽ thực hiện SIC để lần lượt giải mã các tín hiệu theo thứ tự công suất thu hoặc chất lượng kênh hiệu dụng [8, 97].

So với các kỹ thuật đa truy nhập trực giao, NOMA có một số ưu điểm đáng chú ý. Thứ nhất, việc cho phép nhiều người dùng dùng chung cùng tài nguyên vô tuyến giúp nâng cao hiệu quả phổ tần. Thứ hai, NOMA có khả năng hỗ trợ kết nối số lượng lớn thiết bị, phù hợp với các kịch bản mật độ người dùng cao.

Thứ ba, thông qua cơ chế phân bổ công suất thích hợp, NOMA có thể cải thiện mức độ công bằng giữa người dùng ở gần và xa trạm cơ sở [19, 20, 47]. Nhiều kết quả nghiên cứu đã chỉ ra rằng, trong các điều kiện ghép cặp người dùng và phân bổ công suất phù hợp, NOMA có thể đạt tổng tốc độ cao hơn so với OMA [29, 59].

Tuy nhiên, hiệu năng của NOMA phụ thuộc mạnh vào chiến lược ghép cặp người dùng, phân bổ công suất và chất lượng thực thi SIC. Nếu sai số SIC lớn hoặc các người dùng được ghép cặp không có sự khác biệt đủ rõ về điều kiện kênh, lợi ích của NOMA có thể suy giảm đáng kể [8, 29, 97]. Bên cạnh đó, độ phức tạp xử lý tại phía thu và nhiễu lan truyền do SIC không hoàn hảo cũng là những thách thức quan trọng trong triển khai thực tế [19, 47].

Từ góc độ của luận án này, NOMA được xem là một kỹ thuật tham chiếu có ý nghĩa trong bài toán đa truy nhập vô tuyến. Việc xem xét NOMA trong phần tổng quan không nhằm mở rộng phạm vi nghiên cứu theo hướng riêng biệt, mà chủ yếu tạo cơ sở đối sánh với kỹ thuật RSMA ở các chương sau, đặc biệt trong các kịch bản truyền thông nhận thức đường lên sử dụng UAV.

1.3.2. Kỹ thuật đa truy nhập phân chia theo tốc độ RSMA

RSMA là một kỹ thuật đa truy nhập đa người dùng tiên tiến, được đề xuất nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần và cải thiện khả năng phục vụ đồng thời nhiều người dùng trong các hệ thống truyền thông vô tuyến [65, 66]. Khác với các phương pháp đa truy nhập truyền thống như OMA hay NOMA, RSMA thực hiện chia thông điệp của mỗi người dùng thành hai phần, bao gồm phần chung và phần riêng. Phần chung được mã hóa thành luồng tín hiệu chung để nhiều người dùng có thể giải mã, trong khi phần riêng được mã hóa thành các luồng tín hiệu riêng tương ứng cho từng người dùng. Cơ chế này giúp hệ thống thực hiện quản lý nhiễu một cách linh hoạt hơn, thông qua sự kết hợp giữa giải mã một phần nhiễu và xem một phần nhiễu còn lại như tạp âm, từ đó nâng cao hiệu năng hệ thống trong nhiều điều kiện kênh truyền khác nhau [65].

Nhờ linh hoạt trong quản lý nhiễu và phân bổ tài nguyên, RSMA là giải pháp tiềm năng cho mạng vô tuyến thế hệ mới giúp tối ưu hóa thông lượng và cân bằng hiệu năng người dùng, ngay cả khi chất lượng kênh chênh lệch lớn. Đặc biệt, RSMA chứng minh hiệu quả vượt trội trong các môi trường có tính

bất định cao như mạng UAV hay vô tuyến nhận thức – nơi đặc tính kênh thay đổi mạnh và yêu cầu khai thác phổ tần linh hoạt [62].

1.3.2.1. Kỹ thuật RSMA cho kênh đường xuống

Xét một hệ thống RSMA với một trạm cơ sở có N_t anten, truyền đến K người dùng đơn anten. Tại BS, thông tin của mỗi người dùng được chia thành:

Một phần chung, ghép chung với phần của các người dùng khác để tạo thành một luồng chung

Một phần riêng, được mã hóa thành luồng riêng.

Tín hiệu tổng hợp được truyền từ BS là [64]:

$$\mathbf{x} = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{k=1}^K \mathbf{p}_k s_k. \quad (1.13)$$

Trong đó:

s_c là tín hiệu chung, s_k là tín hiệu riêng của người dùng k , cả hai đều có trung bình bằng 0 và công suất bằng đơn vị.

$\mathbf{p}_c$ là vector beamforming cho tín hiệu chung.

$\mathbf{p}_k$ là vector beamforming cho tín hiệu riêng của người dùng k .

Tín hiệu nhận được tại người dùng thứ k là:

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + n_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_c s_c + \sum_{j=1}^K \mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_j s_j + n_k. \quad (1.14)$$

Trong đó:

$\mathbf{h}_k$ là vector kênh từ BS đến người dùng k .

n_k là nhiễu AWGN tại người dùng thứ k .

Quá trình tách tín hiệu: Mỗi người dùng k tách tín hiệu chung s_c trước bằng cách coi toàn bộ tín hiệu riêng là nhiễu:

$$\text{SINR}_{c,k} = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_c|^2}{\sum_{j=1}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_j|^2 + \sigma_k^2}. \quad (1.15)$$

Nếu s_c được tách thành công, người dùng sẽ loại bỏ s_c và tách tín hiệu

riêng của mình:

$$\text{SINR}_k = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_k|^2}{\sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_j|^2 + \sigma_k^2}. \quad (1.16)$$

Bằng cách kết hợp tách tín hiệu và xử lý nhiễu linh hoạt, RSMA có thể đạt được hiệu suất cao hơn và cân bằng tốt hơn giữa các người dùng [64].

1.3.2.2. Kỹ thuật RSMA cho kênh đường lên

Xét một hệ thống RSMA đường lên gồm K người dùng đơn anten truyền dữ liệu đến một trạm cơ sở có N_r anten. Tương tự mô hình đường xuống, thông điệp của mỗi người dùng có thể được chia thành hai phần, gồm phần chung và phần riêng. Mỗi phần được mã hóa thành các luồng tín hiệu tương ứng để truyền đồng thời đến trạm cơ sở [21]. Tín hiệu phát từ người dùng thứ k được biểu diễn như sau:

$$x_k = \sqrt{p_{c,k}} s_{c,k} + \sqrt{p_{p,k}} s_{p,k}. \quad (1.17)$$

Trong đó $s_{c,k}$ và $s_{p,k}$ lần lượt là tín hiệu mang phần chung và phần riêng của người dùng thứ k , với công suất tương ứng là $p_{c,k}$ và $p_{p,k}$. Ràng buộc công suất phát của người dùng thứ k được cho bởi:

$$p_{c,k} + p_{p,k} \leq P_k, \quad \forall k. \quad (1.18)$$

Tín hiệu thu tại trạm cơ sở được viết dưới dạng:

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_k x_k + \mathbf{n}. \quad (1.19)$$

Trong đó $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ là vectơ kênh từ người dùng thứ k đến trạm cơ sở, còn $\mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$ là vectơ nhiễu cộng tính tại trạm cơ sở.

Tại phía thu, trạm cơ sở áp dụng bộ thu tuyến tính kết hợp với kỹ thuật SIC để lần lượt tách các luồng tín hiệu theo một thứ tự nhất định. Giả sử $\mathbf{w}_{c,k}$ là vectơ thu dùng để tách luồng chung của người dùng thứ k , khi đó SINR tương ứng có thể được biểu diễn như sau:

$$\text{SINR}_{c,k} = \frac{|\mathbf{w}_{c,k}^H \mathbf{h}_k|^2 p_{c,k}}{\sum_{j \neq k} |\mathbf{w}_{c,k}^H \mathbf{h}_j|^2 p_{c,j} + \sum_{j=1}^K |\mathbf{w}_{c,k}^H \mathbf{h}_j|^2 p_{p,j} + \sigma^2 \|\mathbf{w}_{c,k}\|^2}. \quad (1.20)$$

Sau khi các luồng chung được tách và loại bỏ khỏi tín hiệu thu, trạm cơ sở tiếp tục tách các luồng riêng. Nếu $\mathbf{w}_{p,k}$ là vectơ thu dùng để tách luồng riêng của người dùng thứ k , thì SINR của luồng riêng được viết như sau:

$$\text{SINR}_{p,k} = \frac{|\mathbf{w}_{p,k}^H \mathbf{h}_k|^2 p_{p,k}}{\sum_{j \neq k} |\mathbf{w}_{p,k}^H \mathbf{h}_j|^2 p_{p,j} + \sigma^2 \|\mathbf{w}_{p,k}\|^2} \quad (1.21)$$

Nhờ cơ chế tách thông điệp tại trạm cơ sở, RSMA đường lên cho phép quản lý nhiều đa người dùng theo cách linh hoạt hơn so với các kỹ thuật đa truy nhập truyền thống. Đặc điểm này đặc biệt hữu ích trong các hệ thống có điều kiện kênh không đồng nhất hoặc yêu cầu chia sẻ tài nguyên phổ tần hiệu quả [21].

1.3.3. So sánh RSMA và NOMA

RSMA và NOMA đều là các kỹ thuật đa truy nhập không trực giao được đề xuất nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần và khả năng phục vụ đồng thời nhiều người dùng trong mạng vô tuyến [19, 59]. Trong NOMA, nhiều người dùng được ghép trên cùng một tài nguyên vô tuyến và được phân biệt chủ yếu theo miền công suất, trong khi quá trình giải mã tín hiệu dựa trên kỹ thuật SIC. Vì vậy, hiệu năng của NOMA phụ thuộc nhiều vào chiến lược ghép cặp người dùng, phân bổ công suất và mức độ chênh lệch chất lượng kênh giữa các người dùng [19, 47].

Trong khi đó, RSMA thực hiện chia thông điệp của người dùng thành phần chung và phần riêng, qua đó cho phép quản lý nhiều theo hướng linh hoạt hơn thông qua việc kết hợp giải mã một phần nhiều và xem phần còn lại như tạp âm [59, 65]. Nhờ đặc điểm này, RSMA thường đạt được sự cân bằng tốt hơn giữa thông lượng tổng và mức độ công bằng giữa các người dùng, đặc biệt trong các kịch bản có điều kiện kênh không đồng nhất hoặc thông tin trạng thái kênh không hoàn hảo. Do đó, RSMA được xem là một hướng tiếp cận phù hợp cho các hệ thống truyền thông phức tạp [19, 65].

1.3.4. Thuật toán khử nhiễu liên tiếp SIC

Kỹ thuật khử nhiễu liên tiếp SIC hoạt động dựa trên nguyên lý tách từng tín hiệu trong hỗn hợp nhiều người dùng, sau đó loại bỏ tín hiệu đã tách ra khỏi

tín hiệu tổng, giúp tăng khả năng tách các tín hiệu còn lại. Quá trình này yêu cầu có thông tin kênh, công suất, và có thể bao gồm các ràng buộc về QoS. Có 3 kỹ thuật khử nhiễu liên tiếp phổ biến hiện nay, bao gồm: Kỹ thuật SIC dựa trên thông tin trạng thái kênh, Kỹ thuật SIC theo chất lượng dịch vụ, và Kỹ thuật SIC lai [24, 27, 28].

1.3.4.1. Kỹ thuật SIC dựa trên thông tin trạng thái kênh

Phương pháp khử nhiễu liên tiếp SIC dựa trên thông tin trạng thái kênh (CSI) thiết lập thứ tự tách tín hiệu dựa trên độ mạnh yếu của kênh truyền [23]. Giả sử tín hiệu của một người dùng trong tập ứng viên thứ cấp có độ lợi kênh lớn hơn so với người dùng có bản quyền, tức là $|h_0|^2$, thì tín hiệu này được tách trước. Khi đó, tốc độ dữ liệu của người dùng thứ cấp được biểu diễn bởi:

$$R_N = \log_2 \left(1 + \frac{P|h_n|^2}{1 + P|h_0|^2} \right). \quad (1.22)$$

Trong đó:

R_N : Tốc độ dữ liệu của người dùng thứ cấp (bit/s/Hz).

P : Công suất truyền của người dùng sơ cấp và thứ cấp (W).

$|h_n|^2$: Độ lợi kênh của người dùng thứ cấp.

$|h_0|^2$: Độ lợi kênh của người dùng sơ cấp.

Biểu thức (1.22) cho thấy rằng tốc độ dữ liệu của người dùng thứ cấp không chỉ phụ thuộc vào cường độ tín hiệu của chính họ mà còn chịu ảnh hưởng từ tín hiệu của người dùng sơ cấp. Khi tín hiệu của người dùng sơ cấp yếu hơn so với tín hiệu của người dùng thứ cấp, SINR của người dùng thứ cấp được cải thiện rõ rệt.

Phương pháp CSI-based SIC có thể xuất hiện lỗi sàn do đặc điểm ưu tiên tách tín hiệu của người dùng có kênh mạnh hơn. Khi chênh lệch giữa các kênh nhỏ, đặc biệt là giữa người dùng mạnh và yếu, người dùng yếu vẫn có xác suất ngắt kết nối không thể triệt tiêu, ngay cả khi SNR tăng cao. Điều này giới hạn hiệu suất hệ thống, nhất là trong môi trường có nhiều người dùng và kênh truyền gần như đồng đều [23].

SINR của người dùng sơ cấp được biểu diễn như sau:

$$\text{SINR}_N = \frac{P|h_N|^2}{P|h_1|^2 + \sigma^2} = \frac{|h_N|^2}{|h_1|^2 + \frac{\sigma^2}{P}}.$$

$$\text{SINR}_N \rightarrow \frac{|h_N|^2}{|h_1|^2}, \quad \text{khi } P \rightarrow \infty. \quad (1.23)$$

Do hiện tượng lỗi sàn, xác suất mất kết nối (outage probability) của người dùng sơ cấp không thể tiệm cận về 0 khi SNR tăng cao. Do đó, ngay cả khi tăng công suất truyền, người dùng sơ cấp vẫn có nguy cơ bị gián đoạn dịch vụ, do SINR của họ bị giới hạn bởi nhiễu từ người dùng thứ cấp.

1.3.4.2. Kỹ thuật SIC theo chất lượng dịch vụ

Phương pháp khử nhiễu liên tiếp dựa trên QoS (QoS-based SIC) ưu tiên tách tín hiệu của người dùng có yêu cầu dịch vụ cao hơn trước, chẳng hạn như những người dùng cần băng thông lớn hoặc độ trễ thấp. Mục tiêu của cách tiếp cận này là đảm bảo QoS cho các ứng dụng nhạy cảm, đồng thời tối ưu hóa việc phân bổ tài nguyên trong hệ thống.

Trong QoS-based SIC, tín hiệu của người dùng có yêu cầu dịch vụ cao sẽ được tách trước nhằm đảm bảo rằng các ràng buộc về QoS của họ — như tốc độ dữ liệu tối thiểu hoặc độ trễ giới hạn — được đáp ứng. Ngược lại, người dùng có yêu cầu dịch vụ thấp hơn sẽ được tách sau [26].

Giả sử hệ thống có hai người dùng:

- Người dùng 1: có yêu cầu QoS cao hơn (ví dụ: tốc độ cao hoặc độ trễ thấp).
- Người dùng 2: có yêu cầu QoS thấp hơn.

Quy trình tách tín hiệu trong QoS-based SIC được thực hiện như sau:

Bước 1: Tách tín hiệu của Người dùng 1 (QoS cao) trước.

Để đáp ứng QoS, tín hiệu của Người dùng 1 phải đạt tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu và can nhiễu vượt một ngưỡng xác định γ_1^{QoS} . Công thức SINR của Người dùng 1 trong khi còn chịu nhiễu từ Người dùng 2 được biểu diễn như sau:

$$\text{SINR}_1 = \frac{P|h_1|^2}{P|h_2|^2 + \sigma^2}. \quad (1.24)$$

Trong đó:

P là công suất truyền của người dùng (w) (ở đây giả sử hai người dùng có công suất truyền như nhau);

$|h_1|^2$ là độ lợi kênh của Người dùng 1;

$P|h_2|^2$ là nhiễu từ tín hiệu của Người dùng 2;

σ^2 là nhiễu nền của hệ thống (mức nhiễu có sẵn trong môi trường).

Điều kiện để SINR của Người dùng 1 đáp ứng yêu cầu QoS là:

$$\text{SINR}_1 \geq \gamma_1^{\text{QoS}}. \quad (1.25)$$

Khi đó, tốc độ dữ liệu đạt được của người dùng 1 là:

$$R_1 = \log_2(1 + \text{SINR}_1) = \log_2 \left(1 + \frac{P|h_1|^2}{P|h_2|^2 + \sigma^2} \right). \quad (1.26)$$

Sau khi tách thành công tín hiệu của Người dùng 1, tín hiệu này sẽ được loại bỏ khỏi tín hiệu tổng. Với hệ thống chỉ có 2 người dùng, sau khi loại bỏ tín hiệu của người dùng 1 thì chỉ còn tín hiệu của Người dùng 2 trong kênh truyền với SINR được xác định như sau:

$$\text{SINR}_2 = \frac{P|h_2|^2}{\sigma^2}. \quad (1.27)$$

Trong đó:

P : Công suất truyền của người dùng (w).

$|h_2|^2$: Độ lợi kênh của Người dùng 2.

σ^2 : Nhiễu nền.

Tốc độ dữ liệu đạt được của Người dùng 2 sau khi loại bỏ nhiễu là:

$$R_2 = \log_2(1 + \text{SINR}_2) = \log_2 \left(1 + \frac{P|h_2|^2}{\sigma^2} \right). \quad (1.28)$$

Công thức (1.28) cho thấy tốc độ dữ liệu của Người dùng 2 phụ thuộc vào cường độ tín hiệu của họ và nhiễu nền. Tổng tốc độ dữ liệu của hệ thống khi có

hai người dùng với SIC theo QoS là:

$$R_{\text{tổng}} = R_1 + R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{P|h_1|^2}{P|h_2|^2 + \sigma^2} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{P|h_2|^2}{\sigma^2} \right). \quad (1.29)$$

Đây là tổng tốc độ dữ liệu của cả hai người dùng trong hệ thống, thỏa mãn điều kiện người dùng có QoS cao được ưu tiên và giảm nhiều cho người dùng có QoS thấp hơn.

SIC dựa trên QoS cho phép ưu tiên tách tín hiệu của người dùng có yêu cầu dịch vụ cao, qua đó đảm bảo QoS và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên kênh. Cơ chế khử nhiễu tuần tự giúp giảm nhiễu cho các người dùng còn lại thông qua việc loại bỏ tín hiệu đã tách. Tuy nhiên, khi kênh của người dùng ưu tiên suy yếu hoặc số lượng người dùng lớn, phương pháp này có thể xuất hiện hiện tượng lỗi sàn, làm tăng xác suất ngắt kết nối và hạn chế hiệu quả phổ của hệ thống.

1.3.4.3. Kỹ thuật SIC lai (SIC Hybrid)

Kỹ thuật SIC lai được đề xuất trong [24] nhằm kết hợp ưu điểm của SIC dựa trên QoS và SIC dựa trên CSI, cho phép xác định thứ tự tách tín hiệu một cách linh hoạt theo cả mức chênh lệch kênh và yêu cầu dịch vụ. Cụ thể, hệ thống ưu tiên tách tín hiệu theo CSI khi độ chênh lệch tín hiệu lớn, và theo QoS khi người dùng có yêu cầu dịch vụ cao. Cách tiếp cận này giúp cân bằng giữa hiệu suất và QoS, đồng thời giảm hiện tượng lỗi sàn so với các phương pháp SIC truyền thống.

Xét hệ thống NOMA có hai người dùng:

- Người dùng 1: Có độ mạnh tín hiệu cao hơn hoặc yêu cầu QoS cao hơn.
- Người dùng 2: Có độ mạnh tín hiệu thấp hơn hoặc yêu cầu QoS thấp hơn.

Bước 1: Đánh giá các yếu tố CSI và QoS

Hệ thống sẽ xác định độ lợi kênh $|h_1|^2$ và $|h_2|^2$ của từng người dùng, cùng với các yêu cầu QoS của họ, chẳng hạn như tốc độ dữ liệu yêu cầu R_1^{QoS} và R_2^{QoS} .

Bước 2: Quyết định thứ tự tách tín hiệu dựa trên CSI hoặc QoS

Nếu $|h_1|^2$ lớn hơn đáng kể so với $|h_2|^2$, hệ thống sẽ ưu tiên tách Người dùng

1 trước dựa trên CSI.

Ngược lại, nếu Người dùng 2 có yêu cầu QoS cao hơn (chẳng hạn R_2^{QoS} lớn hơn), hệ thống sẽ ưu tiên tách Người dùng 2 trước dựa trên QoS.

Bước 3: Tính toán tốc độ dữ liệu đạt được

Nếu Người dùng 1 được tách trước, tốc độ dữ liệu của họ sẽ được tính bằng:

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{P|h_1|^2}{P|h_2|^2 + \sigma^2} \right). \quad (1.30)$$

Trong đó:

P là công suất truyền của hệ thống (w);

$|h_1|^2$ là độ lợi kênh của Người dùng 1;

$P|h_2|^2$ là nhiễu gây ra bởi tín hiệu của Người dùng 2;

σ^2 là nhiễu nền.

Sau khi tách tín hiệu của Người dùng 1 và loại bỏ khỏi tín hiệu tổng, Người dùng 2 sẽ được tách với tốc độ dữ liệu:

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{P|h_2|^2}{\sigma^2} \right). \quad (1.31)$$

Bước 4: Tổng tốc độ dữ liệu của hệ thống

Tổng tốc độ dữ liệu đạt được trong hệ thống với SIC Hybrid là:

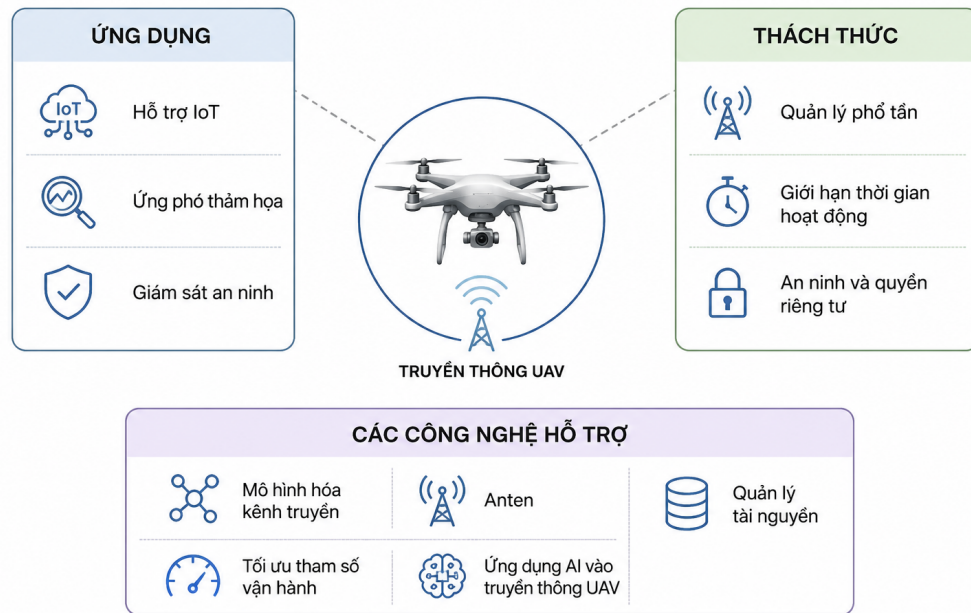
$$R_{\text{Hybrid}} = R_1 + R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{P|h_1|^2}{P|h_2|^2 + \sigma^2} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{P|h_2|^2}{\sigma^2} \right). \quad (1.32)$$

1.4. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước

1.4.1. Tình hình nghiên cứu quốc tế

Truyền thông sử dụng UAV đang trở thành một trong những hướng nghiên cứu quan trọng của mạng không dây thế hệ mới nhờ khả năng triển khai linh hoạt, mở rộng vùng phủ và hỗ trợ kết nối trong những môi trường mà hạ tầng mặt đất khó đáp ứng. UAV được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực như hỗ trợ IoT, giám sát an ninh và ứng phó thiên tai [61, 101]. Hình 1.3 trình bày tổng quan các ứng dụng, thách thức và các công nghệ hỗ trợ đang được nghiên cứu trong

lĩnh vực truyền thông UAV.



Hình 1.3. Truyền thông UAV: ứng dụng và thách thức

Mặc dù truyền thông UAV mang lại nhiều lợi ích về tính linh hoạt, khả năng triển khai nhanh và mở rộng vùng phủ sóng, việc khai thác hiệu quả các hệ thống này vẫn phải đối mặt với nhiều thách thức kỹ thuật. Trước hết, sự thay đổi liên tục về vị trí, độ cao và vận tốc của UAV làm cho đặc tính kênh truyền biến thiên mạnh theo thời gian, gây khó khăn cho việc mô hình hóa và dự đoán chất lượng liên kết. Bên cạnh đó, tài nguyên phổ tần ngày càng khan hiếm trong khi nhu cầu truyền tải dữ liệu ngày càng tăng, đòi hỏi các cơ chế quản lý và chia sẻ phổ hiệu quả nhằm hạn chế nhiễu và nâng cao hiệu suất sử dụng phổ. Ngoài ra, giới hạn về năng lượng, yêu cầu đảm bảo chất lượng dịch vụ cũng như các vấn đề về bảo mật và quyền riêng tư tiếp tục là những thách thức quan trọng trong quá trình triển khai thực tế các mạng UAV [61, 101].

Để giải quyết các vấn đề trên, nhiều công nghệ hỗ trợ đã được nghiên cứu và phát triển trong những năm gần đây. Các mô hình kênh truyền tiên tiến được đề xuất nhằm mô tả chính xác hơn đặc tính lan truyền tín hiệu giữa UAV và các nút liên lạc mặt đất. Các kỹ thuật anten thông minh, quản lý tài nguyên vô tuyến và tối ưu hóa tham số hoạt động giúp nâng cao hiệu quả sử dụng năng

lượng và phổ tần. Đặc biệt, sự phát triển mạnh mẽ của trí tuệ nhân tạo và học máy đã mở ra các hướng tiếp cận mới trong dự đoán trạng thái kênh, quản lý phổ, tối ưu quỹ đạo bay và phân bổ tài nguyên, góp phần nâng cao hiệu năng và độ tin cậy của hệ thống truyền thông UAV [61, 101].

Trong số các hướng nghiên cứu nêu trên, mô hình hóa kênh truyền, quản lý phổ vô tuyến và tối ưu hóa hoạt động của UAV là những vấn đề có ý nghĩa đặc biệt quan trọng đối với việc nâng cao hiệu năng của hệ thống truyền thông UAV. Mô hình kênh chính xác là cơ sở để dự đoán chất lượng liên kết và thiết kế hệ thống truyền thông hiệu quả. Trong khi đó, các kỹ thuật truy nhập phổ động đóng vai trò quan trọng trong việc khai thác hiệu quả tài nguyên vô tuyến đang ngày càng khan hiếm. Bên cạnh đó, việc tối ưu các tham số vận hành như quỹ đạo bay, công suất phát và cơ chế truyền dẫn có ảnh hưởng trực tiếp đến vùng phủ sóng, chất lượng dịch vụ và hiệu quả sử dụng năng lượng của UAV. Vì vậy, các nội dung này được lựa chọn làm trọng tâm nghiên cứu của luận án và sẽ được phân tích chi tiết trong các phần tiếp theo.

Trước hết, mô hình hóa kênh truyền là một trong những nội dung được nghiên cứu sớm và rộng rãi nhất trong truyền thông UAV. Các mô hình giải tích truyền thống tuy có ưu điểm về tính đơn giản và khả năng phân tích, nhưng thường gặp khó khăn khi phản ánh đầy đủ tính phức tạp của môi trường truyền dẫn, đặc biệt trong các kịch bản đô thị mật độ cao hoặc môi trường có tính biến thiên mạnh. Vì vậy, trong những năm gần đây, xu hướng ứng dụng các thuật toán học máy (ML) và học sâu (DL) để mô hình hóa kênh truyền UAV (bao gồm cả liên kết A2A và A2G) đã thu hút sự quan tâm lớn từ cộng đồng nghiên cứu quốc tế, mở ra giải pháp thay thế hiệu quả cho các mô hình giải tích truyền thống vốn bị hạn chế về độ chính xác trong môi trường thực tế.

Khi xem xét các thuật toán học máy kinh điển, trong nghiên cứu kênh A2A tại dải tần 2.4 GHz ở môi trường đô thị, Zhang và các cộng sự [118] chỉ ra rằng RF đạt độ chính xác cao đáng kể so với KNN, với sai số RMSE chỉ ở mức 3.06 dB so với 8.90 dB của KNN. Sự ưu việt này của RF tiếp tục được kiểm chứng bởi Yang và nhóm nghiên cứu [105] trong kịch bản kênh truyền đa băng tần phức tạp (từ dải tần hẹp 2.4/5.8 GHz đến băng tần milimét 28/37 GHz), nơi RF duy trì RMSE ổn định ở mức 3.52 dB, trong khi sai số của KNN tăng

mạnh lên tới 9.58 dB.

Ngược lại, hiệu quả của các thuật toán phi tuyến khác như ANN, DT hay SVR lại thể hiện sự phụ thuộc lớn vào cấu hình hệ thống và dải tần hoạt động. Cụ thể, Tahat và cộng sự [98] khi khảo sát kênh A2G trên nhiều tần số (433 MHz, 900 MHz và 5.8 GHz) đã nhận thấy KNN lại có ưu thế hơn ANN ở các dải tần thấp nhờ cấu trúc dữ liệu ít phức tạp, nhưng nhanh chóng bị suy giảm hiệu năng ở các tần số cao do mật độ nhiễu và tán xạ tăng lên. Ở một góc nhìn khác, đối với kênh truyền liên kết A2G ở các độ cao thay đổi, Duangsuwan và cộng sự [118] đã chứng minh ANN có khả năng xấp xỉ các hàm phi tuyến phức tạp tốt hơn SVR.

Tổng quan lại, các công trình nghiên cứu quốc tế đã khẳng định tính khả thi của tiếp cận dựa trên dữ liệu trong việc mô tả đặc tính kênh truyền UAV. Tuy nhiên, hiệu năng của mỗi mô hình phụ thuộc chặt chẽ vào cấu hình độ cao, tần số hoạt động và đặc thù môi trường. Việc thiếu vắng các nghiên cứu kết hợp giữa mô hình hóa dựa trên dữ liệu và các kỹ thuật tối ưu hóa nhằm tinh chỉnh siêu tham số một cách tự động chính là khoảng trống khoa học cần được tiếp tục làm rõ.

Bên cạnh bài toán mô hình hóa kênh truyền, việc tối ưu hóa các tham số vận hành để nâng cao hiệu năng hệ thống cũng là một hướng nghiên cứu quan trọng được tập trung giải quyết thông qua hai nhóm tham số chính: động học (vận tốc, quỹ đạo) và hình học (vị trí 3D, độ cao).

Đối với hướng tiếp cận tối ưu hóa động học và quỹ đạo bay, các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào việc điều chỉnh vận tốc nhằm cân bằng giữa thông lượng mạng và hiệu quả năng lượng. Sử dụng các kỹ thuật tối ưu hóa toán học truyền thống như phân chia tọa độ khối (BCD) và xấp xỉ lỗi liên tiếp (SCA), Wu và Zhang [103] đã phối hợp thành công bài toán tối ưu vận tốc UAV với phân bổ tài nguyên trong mạng OFDMA. Hướng đi này được Mozaffari và cộng sự [71] mở rộng cho mạng IoT, chứng minh rằng việc điều chỉnh vận tốc theo mật độ phân bổ người dùng giúp cải thiện rõ rệt hiệu suất năng lượng. Nhằm nâng cao tính linh hoạt trong môi trường không đồng nhất và có tính động cao, Liu và nhóm nghiên cứu [54] đã thay thế các phương pháp giải tích bằng thuật toán học tăng cường sâu (DRL), cho phép UAV tự động điều khiển vận tốc một cách

thông minh và đảm bảo tính công bằng giữa các người dùng.

Đối với hướng tiếp cận tối ưu hóa không gian hình học 3D, xác định độ cao bay và tọa độ vị trí tối ưu là chìa khóa để mở rộng vùng phủ sóng và duy trì kết nối ổn định. Ở góc độ phân tích giải tích, Azari [11] và Shahbazi [90] đã xây dựng các biểu thức xác suất nhằm xác định độ cao bay tối ưu của UAV trong các môi trường fading Rician và các miền hoạt động khác nhau. Trong khi đó, Zhang và các cộng sự [116] đã giải quyết bài toán quy hoạch tổng thể khi tối ưu hóa đồng thời cả độ cao và số lượng UAV cần thiết để giảm thiểu công suất tiêu thụ của toàn hệ thống. Để giải quyết các kịch bản thực tế phức tạp của hệ thống đa UAV, các thuật toán tiến hóa và mô hình dựa trên dữ liệu lớn bắt đầu được áp dụng rộng rãi. Điển hình như Shah và cộng sự [92] đã đề xuất thuật toán lai nsgaUAV và greedyUAV để tối ưu hóa vị trí 3D, giúp đạt thông lượng mạng lên tới 240 Mbps. Gần đây nhất, Wang và nhóm nghiên cứu [102] đã khai thác mô hình ngôn ngữ lớn để tối ưu hóa vị trí hệ thống đa UAV, chứng minh tính hiệu quả vượt trội trong việc duy trì liên kết truyền dẫn ổn định tại các môi trường động.

Mặc dù các công trình nêu trên đã đạt được nhiều kết quả khả quan, nhược điểm lớn của các phương pháp tối ưu hóa số hay thuật toán thông minh là đòi hỏi cấu hình phần cứng mạnh và tiêu tốn nhiều tài nguyên tính toán để thực thi liên tục. Điều này gây khó khăn lớn khi triển khai thời gian thực trên các thiết bị UAV vốn bị giới hạn nghiêm ngặt về năng lượng và năng lực xử lý phần cứng. Trong bối cảnh đó, việc xây dựng các biểu thức dạng đóng là vô cùng cần thiết, nhằm mang lại lợi thế tính toán vượt trội, xử lý nhanh và không yêu cầu tài nguyên cấu hình cao, làm cơ sở khoa học vững chắc cho việc quy hoạch mạng UAV.

Một hướng nghiên cứu quan trọng khác là khai thác phổ tần hiệu quả cho các hệ thống UAV trong bối cảnh tài nguyên vô tuyến ngày càng hạn chế. Trong thực tế, UAV thường hoạt động trong các băng tần có mức độ chia sẻ cao, dẫn đến nguy cơ gia tăng nhiễu và suy giảm hiệu năng hệ thống. Do đó, việc tích hợp UAV với vô tuyến nhận thức (CR) đã được nhiều nhóm nghiên cứu quan tâm như một giải pháp nhằm cải thiện hiệu quả sử dụng phổ. Các công trình gần đây chủ yếu tập trung vào các bài toán tối ưu phân bổ tài nguyên, kiểm

soát nhiều và bảo đảm chất lượng dịch vụ trong môi trường chia sẻ phổ giữa người dùng sơ cấp và người dùng thứ cấp [45, 52, 80, 109].

Thêm vào đó, việc tích hợp CR với NOMA là một hướng tiếp cận hiệu quả, kết hợp khả năng truy cập phổ tần động của CR với hiệu quả sử dụng phổ cao của NOMA để cải thiện hiệu suất khai thác tài nguyên phổ [121]. Trên nền tảng đó, các nghiên cứu gần đây đã chuyển dịch từ mô hình CR-NOMA sang hệ thống dựa trên RSMA (CR-RSMA) nhằm khai thác ưu điểm của cơ chế phân chia thông điệp, giúp quản lý nhiễu linh hoạt hơn, mở rộng vùng dung lượng so với CR-NOMA và nâng cao hiệu quả sử dụng phổ [55, 57, 108]. Tuy nhiên, các nghiên cứu hiện có về CR-RSMA chủ yếu tập trung vào việc so sánh hiệu suất với CR-NOMA hoặc đánh giá xác suất mất kết nối của hệ thống RSMA, mà không cung cấp các điều kiện ghép nối PU-SU hoặc chưa đưa ra các phân tích toán học tường minh nhằm đảm bảo ngưỡng bảo vệ nhiễu cho PU. Hơn nữa, việc phân chia tốc độ tối ưu, yếu tố quan trọng quyết định cả độ tin cậy của PU và thông lượng của SU, vẫn chưa được khám phá một cách đầy đủ dưới dạng phân tích tính khả thi. Khoảng trống này cản trở việc thiết kế hệ thống CR-RSMA trong các triển khai định hướng 6G không đồng nhất thực tế [107].

1.4.2. Tình hình nghiên cứu trong nước

Tại Việt Nam, các nghiên cứu về hệ thống truyền thông hỗ trợ bởi UAV đã thu hút sự quan tâm lớn trong những năm gần đây, tập trung chủ yếu vào các bài toán tối ưu hóa tài nguyên và phân tích hiệu năng lớp vật lý. Một trong những hướng nghiên cứu sớm là tối ưu hiệu quả năng lượng thông qua việc kết hợp thu thập năng lượng và điều khiển công suất. Điển hình là các công bố hợp tác giữa Đại học Queen's Belfast và Đại học Duy Tân, đề xuất thuật toán phân bổ tài nguyên thời gian thực cho hệ thống D2D hỗ trợ bởi UAV nhằm nâng cao hiệu suất sử dụng năng lượng [31].

Nhóm nghiên cứu tại Học viện Kỹ thuật Quân sự (chủ trì bởi GS. TS Trần Xuân Nam) đã công bố nhiều kết quả thực nghiệm và lý thuyết liên quan đến việc tích hợp UAV với các kỹ thuật đa truy nhập tiên tiến như NOMA và RSMA. Các nghiên cứu trong [44, 77] đã phân tích hiệu năng truyền thông trong các kịch bản A2G và G2A sử dụng kỹ thuật NOMA. Đặc biệt, công trình [78] đã giải quyết bài toán tối đa hóa tốc độ tối thiểu trung bình của người dùng trong

hệ thống UAV chuyển tiếp hai chiều sử dụng RSMA. Bằng cách áp dụng phương pháp tối ưu hóa tọa độ khối (BCD) để tối ưu đồng thời tốc độ chung và công suất phát, nghiên cứu chứng minh được ưu thế của RSMA so với OMA truyền thông. Ngoài ra, các biến thể hệ thống phức hợp bao gồm truyền thông song công toàn phần (FD), bề mặt phản xạ thông minh (RIS), và truyền thông sóng milimet (mmWave) cũng được khảo sát trong [30, 46]. Các tác giả đã thiết lập được các biểu thức dạng đóng cho xác suất dừng, thông lượng và xác suất lỗi khối (BLER), cung cấp cơ sở lý thuyết cho việc thiết kế hệ thống trong điều kiện kênh fading Nakagami- m và SIC không hoàn hảo.

Cùng tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, hướng nghiên cứu của PGS. TS Phạm Thanh Hiệp và cộng sự tập trung sâu vào tối ưu hóa quỹ đạo và phân tích truyền thông tin cậy trong môi trường di động phức tạp. Trong [18], nhóm tác giả đã đề xuất phương pháp tối ưu hóa bầy đàn (PSO) để giải bài toán tối đa hóa thông lượng tối thiểu thông qua việc tối ưu đồng thời vị trí 3D của UAV và công suất phát của người dùng. Vấn đề truyền thông siêu tin cậy và độ trễ thấp (URLLC) cũng được làm rõ trong [79] thông qua việc phân tích xác suất lỗi khối của hệ thống V2V MIMO-NOMA hai chặng. Bên cạnh đó, các ảnh hưởng của nhiễu tự giao thoa trong chế độ song công toàn phần của UAV chuyển tiếp cũng được định lượng hóa trong [14], chỉ ra rằng nhiễu dư là yếu tố giới hạn hiệu năng chủ yếu ở vùng công suất cao. Ngoài các nghiên cứu lý thuyết, UAV cũng bắt đầu được ứng dụng thực tế tại Việt Nam trong giám sát hạ tầng kỹ thuật [17]. Điều này tạo ra nhu cầu cấp thiết về các mô hình kênh truyền chính xác và giải pháp tối ưu hệ thống có độ phức tạp thấp, phù hợp với năng lượng hạn chế của UAV.

Nhìn chung, các nghiên cứu trong nước đã đạt được những kết quả khả quan cho lĩnh vực truyền thông UAV tại Việt Nam. Tuy nhiên, để đáp ứng yêu cầu triển khai thực tế, cần có thêm các nghiên cứu chuyên sâu tập trung vào việc xử lý các bài toán tối ưu phi lồi trong môi trường vận hành động và đa dạng kịch bản hơn.

1.4.3. Khoảng trống nghiên cứu

Từ kết quả tổng quan tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước có thể nhận thấy, mặc dù đã có nhiều công trình nghiên cứu về truyền thông hỗ trợ

bởi UAV, vẫn còn tồn tại các khoảng trống khoa học cần tiếp tục nghiên cứu.

Thứ nhất, các mô hình học máy và học sâu đã chứng minh khả năng dự đoán suy hao kênh A2A và A2G với độ chính xác cao. Tuy nhiên, việc tối ưu siêu tham số cho các mô hình này vẫn chưa được nghiên cứu một cách hệ thống, đặc biệt đối với các mô hình học sâu trong môi trường truyền thông UAV có tính biến động cao.

Thứ hai, Phần lớn các nghiên cứu về tối ưu tham số vận hành của UAV hiện nay (xác định độ cao bay, góc ngẩng, vận tốc...) thông qua các thuật toán tối ưu số. Mặc dù các phương pháp này có thể đạt hiệu năng cao, chúng thường đòi hỏi quá trình tính toán lặp với độ phức tạp lớn, gây khó khăn cho việc triển khai trong các ứng dụng UAV yêu cầu xử lý thời gian thực và tiết kiệm năng lượng. Trong khi đó, các mô hình giải tích hoặc biểu thức dạng đóng cho phép xác định nhanh các tham số vận hành với chi phí tính toán thấp, nhưng hiện vẫn còn rất ít được nghiên cứu trong bối cảnh truyền thông UAV.

Thứ ba, mặc dù RSMA được đánh giá là kỹ thuật đa truy nhập đầy tiềm năng cho mạng vô tuyến thế hệ mới, việc tích hợp RSMA vào mạng vô tuyến nhận thức sử dụng UAV vẫn còn ở giai đoạn ban đầu. Các vấn đề về quản lý can nhiễu, ghép cặp người dùng, điều khiển truy nhập và tối ưu tài nguyên phổ chưa được nghiên cứu đầy đủ, đặc biệt trong kịch bản UAV hoạt động như người dùng thứ cấp.

Những khoảng trống trên là cơ sở để luận án đề xuất ba hướng nghiên cứu tương ứng: (i) tối ưu siêu tham số cho các mô hình ML/DL trong mô hình hóa kênh truyền UAV; (ii) xây dựng mô hình giải tích và tối ưu các tham số vận hành của UAV; và (iii) phát triển giải pháp quản lý tài nguyên cho mạng UAV-CR-RSMA nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng phổ và chất lượng dịch vụ.

1.5. Kết luận chương

Chương 1 đã trình bày tổng quan các vấn đề nghiên cứu liên quan đến truyền thông vô tuyến sử dụng UAV trong bối cảnh mạng vô tuyến thế hệ mới, làm rõ vai trò của UAV, đặc điểm kênh truyền, các kỹ thuật đa truy nhập tiên tiến và ứng dụng của vô tuyến nhận thức.

Trên cơ sở khảo sát và phân tích các công trình nghiên cứu trong và ngoài

nước theo ba phương diện chính, gồm: (i) ước lượng và mô hình hóa chính xác kênh truyền UAV; (ii) phân tích và tối ưu các tham số vận hành nhằm nâng cao hiệu quả truyền thông của UAV trong các vai trò khác nhau; và (iii) thiết kế các cơ chế truy nhập vô tuyến hiệu quả cho kịch bản truyền thông nhận thức, tiêu biểu là kỹ thuật RSMA. Kết quả khảo sát cho thấy rằng, mặc dù nhiều kết quả quan trọng đã được công bố, vẫn còn tồn tại những vấn đề cần tiếp tục được nghiên cứu và hoàn thiện.

Từ đó, luận án xác định định hướng nghiên cứu xuyên suốt là nâng cao chất lượng truyền thông trong các mạng sử dụng UAV thông qua việc giải quyết ba nhóm bài toán nêu trên. Các nội dung này tạo thành cơ sở khoa học và định hướng nghiên cứu cho các chương tiếp theo của luận án.

CHƯƠNG 2.

MÔ HÌNH HÓA VÀ ƯỚC LƯỢNG SUY HAO KÊNH TRUYỀN UAV DỰA TRÊN MÔ HÌNH HỌC SÂU

Nhằm nâng cao hiệu quả thiết kế và vận hành các hệ thống truyền thông UAV, việc xác định chính xác đặc tính lan truyền tín hiệu là yêu cầu tiên quyết. Chương 2 tập trung giải quyết bài toán nâng cao độ chính xác trong ước lượng suy hao kênh truyền thông qua hướng tiếp cận dựa trên dữ liệu. Cụ thể, chương này nghiên cứu việc ước lượng suy hao đường truyền cho các liên kết A2A và A2G bằng cách ứng dụng các kỹ thuật học máy và học sâu tiên tiến.

Trong chương này, các thuật toán học máy như KNN, DT, RF cùng các cấu trúc học sâu như LSTM, Bi-LSTM và Encoder–Decoder LSTM được triển khai để xây dựng mô hình ước lượng. Đặc biệt, luận án đề xuất việc tích hợp thuật toán tối ưu GSA để tự động hóa quá trình tìm kiếm và tối ưu hóa các siêu tham số của mô hình. Việc kết hợp này giúp khắc phục hạn chế của phương pháp thử sai truyền thống, từ đó cải thiện khả năng học và độ chính xác của hệ thống.

Các mô hình này khai thác các tham số đặc trưng của hệ thống truyền thông UAV, bao gồm khoảng cách liên kết, độ cao UAV, vị trí tương đối giữa các nút, góc ngẩng và tần số sóng mang. Thông qua việc học mối quan hệ giữa các đặc trưng đầu vào và suy hao kênh truyền, các phương pháp này cho phép ước lượng PL một cách hiệu quả, góp phần phản ánh chính xác hơn đặc tính của các liên kết A2A và A2G trong các môi trường truyền dẫn khác nhau.

Nội dung của chương 2 được phát triển dựa trên các công trình công bố [CT1], [CT4] và [CT6] của NCS.

2.1. Động lực nghiên cứu

Trong các hệ thống thông tin vô tuyến hiện đại như MIMO, 5G và hướng tới 6G, việc thu thập thông tin trạng thái kênh truyền chính xác là điều kiện tiên quyết để thực hiện giải điều chế, tách tín hiệu và tối ưu hóa tài nguyên

mạng. Kỹ thuật ước lượng kênh dựa trên tín hiệu pilot là phương pháp phổ biến nhất, trong đó bên phát gửi các ký hiệu đã biết trước xen kẽ với dữ liệu [36].

Dựa trên các vị trí pilot, bộ thu ước lượng ma trận đáp ứng kênh truyền và sử dụng nội suy để xác định thông tin kênh tại các vị trí dữ liệu. Hai phương pháp phổ biến là LS (Least Squares) và LMMSE (Linear Minimum Mean Square Error): LS có độ phức tạp thấp nhưng nhạy cảm với nhiễu, trong khi LMMSE đạt độ chính xác cao hơn nhờ khai thác thống kê kênh song, nhưng yêu cầu tính toán lớn. Mặc dù được sử dụng rộng rãi, kỹ thuật này vẫn đối mặt với các hạn chế như tổn hao tài nguyên do mật độ pilot cao, hiện tượng ô nhiễm pilot trong hệ thống đa ô và độ phức tạp tính toán lớn, đặc biệt trong các kịch bản kênh thưa ở dải tần mmWave hoặc Terahertz [36, 60].

Trong mạng truyền thông sử dụng UAV, đặc tính kênh truyền biến thiên phức tạp theo không gian ba chiều, chịu ảnh hưởng đồng thời của các yếu tố hình học không gian, động học bay và đặc trưng môi trường triển khai [48]. Hơn nữa, tài nguyên của UAV hạn chế do kích thước, năng lượng vì vậy, việc áp dụng các kỹ thuật ước lượng kênh dung pilot càng trở nên khó khăn, phức tạp.

Như đã phân tích tại chương 1, các mô hình kênh truyền giải tích và thống kê truyền thống tuy cung cấp khả năng diễn giải vật lý tốt nhưng thường dựa trên các giả thiết trung bình và tập tham số cố định. Điều này dẫn đến những hạn chế đáng kể trong việc mô tả tính biến thiên tức thời của kênh truyền UAV, đặc biệt trong các kịch bản đô thị mật độ cao hoặc khi UAV di chuyển trên các quỹ đạo động. Sự thiếu chính xác ở cấp độ kênh truyền sẽ trực tiếp lan truyền sai lệch sang các bài toán tối ưu hóa ở cấp độ hệ thống như quy hoạch quỹ đạo, phân bổ công suất và quản lý đa truy nhập.

Trong bối cảnh đó, học sâu nổi lên như một công cụ mạnh mẽ nhờ khả năng khai thác dữ liệu để nhận diện các quy luật phi tuyến tiềm ẩn giữa trạng thái UAV và đặc tính kênh truyền. Xuất phát từ thực trạng này, với mục tiêu nâng cao chất lượng truyền thông UAV, chương 2 thực hiện việc giải quyết bài toán cải thiện độ chính xác trong ước lượng suy hao kênh truyền thông qua việc ứng dụng các kỹ thuật học máy và học sâu hiện đại. Các kết quả thu được cung cấp cơ sở dữ liệu đáng tin cậy cho các bài toán tối ưu hóa hệ thống UAV. Các đóng góp chính của chương 2 bao gồm:

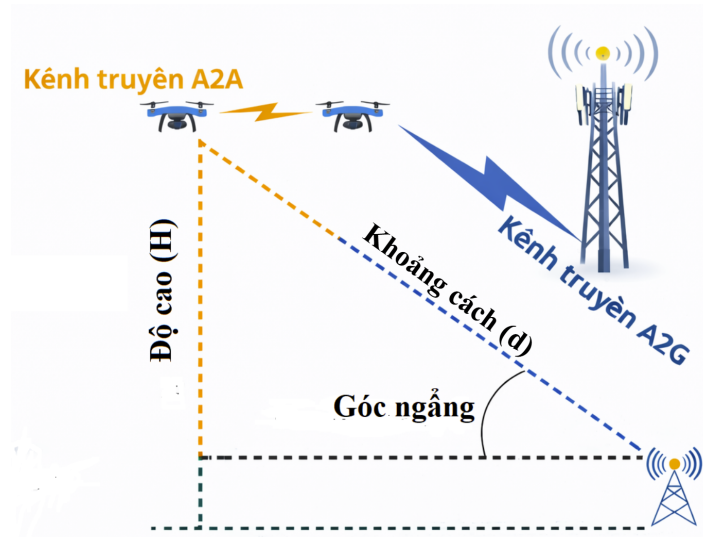
- Xây dựng quy trình mô hình hóa dựa trên dữ liệu: Thiết lập mối liên hệ trực tiếp giữa các tham số vị trí, góc ngẩng, độ cao, tần số sóng mang và đặc trưng môi trường với chất lượng liên kết truyền thông.

- Khai thác các kiến trúc học sâu tiên tiến: Ứng dụng các thuật toán học máy, các mô hình nơ-ron hồi tiếp (LSTM, Bi-LSTM, Encoder-Decoder-LSTM) để học các đặc trưng động theo không gian của kênh truyền UAV, cải thiện đáng kể độ chính xác so với các mô hình học máy tĩnh.

- Đề xuất giải pháp tối ưu hóa siêu tham số dựa trên thuật toán GSA để tự động hóa việc tìm kiếm cấu trúc và bộ siêu tham số cho các mô hình học sâu. Đóng góp này giúp loại bỏ tính chủ quan của phương pháp thử sai, giúp các mô hình dự báo đạt được hiệu năng tiệm cận mức tối ưu toàn cục trong các kịch bản môi trường khác nhau.

2.2. Mô hình hệ thống

Trong chương này, một kịch bản mạng vô tuyến điển hình có hỗ trợ UAV được xem xét, trong đó UAV hoạt động như một trạm gốc trên không hoặc nút chuyển tiếp nhằm phục vụ các thiết bị người dùng dưới mặt đất, như minh họa trong Hình 2.1.



Hình 2.1. Các loại kênh truyền UAV

Mô hình hệ thống tập trung phân tích hai loại liên kết truyền dẫn chính như sau:

Liên kết A2G: Đây là loại liên kết chịu ảnh hưởng đáng kể từ môi trường truyền, đặc biệt là cấu trúc đô thị và địa hình. Đặc tính kênh truyền A2G phụ thuộc mạnh vào xác suất tồn tại LoS và NLoS. Các xác suất này thường được mô hình hóa như một hàm của góc ngẩng θ_i giữa UAV và người dùng mặt đất [6, 95].

Liên kết A2A: Liên kết giữa các UAV thường được giả định có điều kiện truyền dẫn thuận lợi với khả năng tồn tại LoS cao. Tuy nhiên, kênh truyền vẫn chịu ảnh hưởng của hiệu ứng Doppler do sự chuyển động tương đối giữa các UAV theo nhiều hướng khác nhau [96, 124].

2.3. Đề xuất mô hình kênh truyền dựa trên dữ liệu

Trong mục này, một mô hình học sâu được xây dựng nhằm học ánh xạ phi tuyến giữa các tham số hình học – môi trường và đặc tính suy hao kênh truyền trong các kịch bản truyền thông UAV. Cụ thể, bài toán được biểu diễn dưới dạng một hàm ánh xạ:

$$\hat{L} = f_{\omega}(\mathbf{x}). \quad (2.1)$$

Trong đó:

$\mathbf{x}$ là vector đặc trưng đầu vào bao gồm khoảng cách liên kết, độ cao UAV, tần số hoạt động và các tham số môi trường,

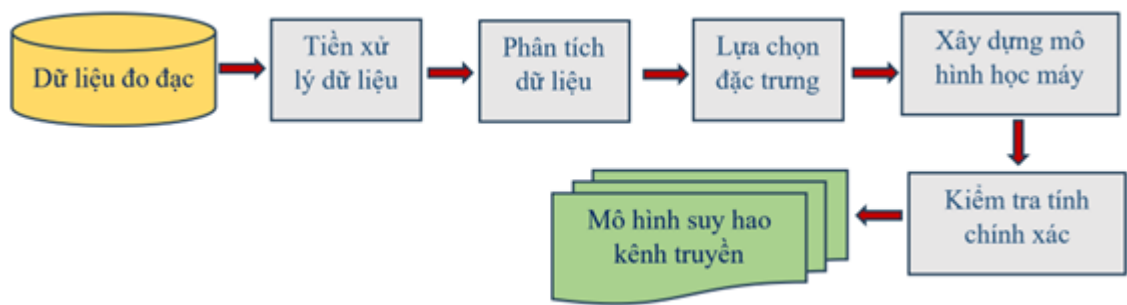
$\hat{L}$ là giá trị suy hao đường truyền được ước lượng,

$f_{\omega}(\cdot)$ là mô hình học sâu với tập tham số ω cần được huấn luyện.

Kiến trúc mạng nơ-ron được thiết kế theo hướng cân bằng giữa độ chính xác và độ phức tạp tính toán, nhằm đảm bảo khả năng hội tụ ổn định trong quá trình huấn luyện và khả năng khái quát hóa tốt trên các kịch bản chưa quan sát. Quá trình huấn luyện được thực hiện theo chế độ ngoại tuyến (offline) dựa trên tập dữ liệu thu thập từ mô phỏng hoặc đo đạc thực tế, trong khi mô hình sau huấn luyện được sử dụng để hỗ trợ ước lượng kênh trong giai đoạn triển khai.

Để xây dựng mô hình suy hao kênh truyền, một sơ đồ khối tổng quát được đề xuất như minh họa trong Hình 2.2.

Các thành phần chính của sơ đồ bao gồm:



Hình 2.2. Các bước xây dựng mô hình suy hao kênh truyền

Khối dữ liệu đầu vào: Khối này tiếp nhận tập dữ liệu mô tả đặc tính kênh truyền trong các kịch bản UAV khác nhau. Dữ liệu có thể được thu thập từ mô phỏng, đo đạc thực nghiệm hoặc các bộ dữ liệu công khai. Trước khi đưa vào huấn luyện, dữ liệu được tiền xử lý thông qua các bước như loại bỏ nhiễu, xử lý giá trị ngoại lai và chuẩn hóa nhằm đảm bảo tính ổn định của quá trình học.

Khối phân tích dữ liệu: Khối này thực hiện phân tích thống kê và đánh giá mức độ tương quan giữa các đặc trưng đầu vào và suy hao kênh truyền. Kết quả phân tích được sử dụng để xác định mức độ đóng góp của từng tham số và hỗ trợ quá trình lựa chọn đặc trưng.

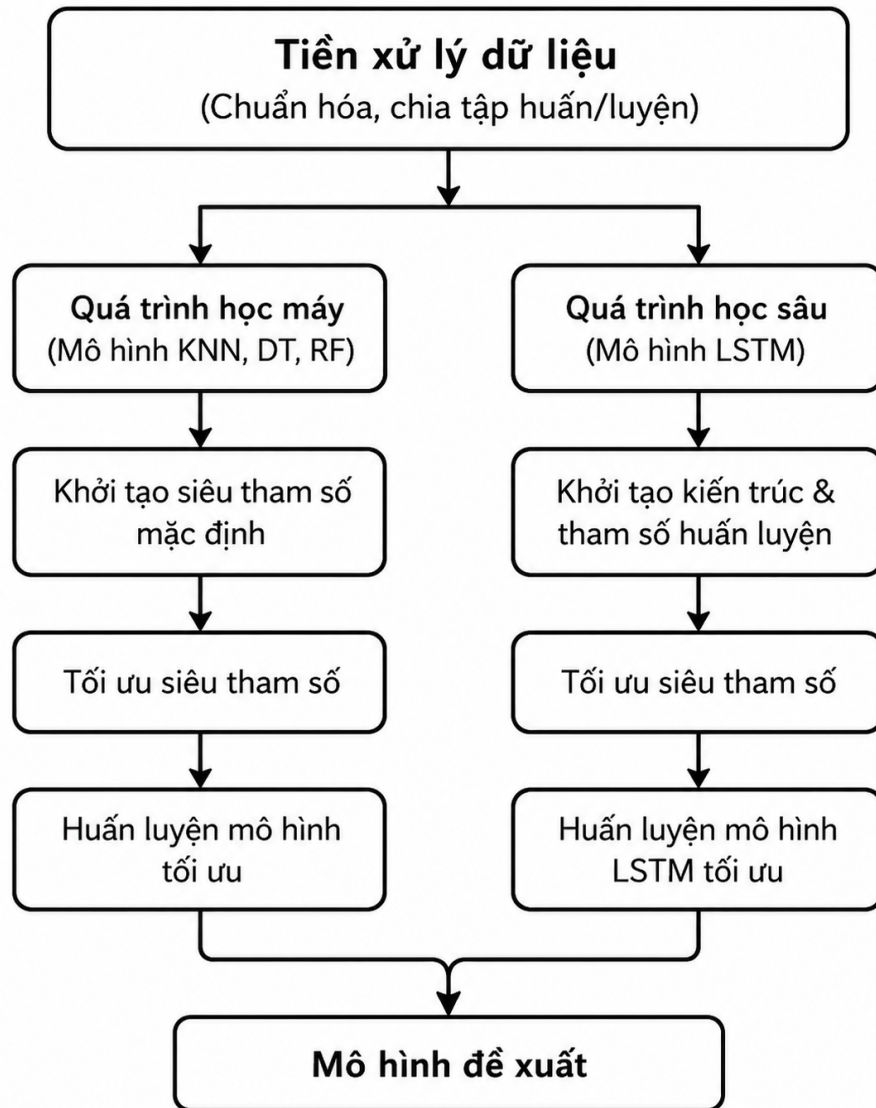
Khối lựa chọn đặc trưng: Dựa trên kết quả phân tích, các đặc trưng quan trọng được lựa chọn nhằm giảm chiều dữ liệu và hạn chế hiện tượng quá khớp (overfitting), đồng thời cải thiện khả năng khái quát của mô hình.

Khối xây dựng mô hình: Khối này thực hiện thiết kế và huấn luyện mô hình học sâu. Cấu trúc mạng (số lớp, loại lớp) được xác định dựa trên đặc tính của bài toán, trong khi các siêu tham số (learning rate, số nơ-ron, batch size, số epoch) được tối ưu thông qua các thuật toán tối ưu hóa thích hợp.

Khối đánh giá mô hình: Khối này đánh giá hiệu năng của mô hình thông qua các chỉ tiêu định lượng như RMSE, MAE hoặc R^2 . Nhiều cấu hình mô hình có thể được xem xét để lựa chọn mô hình tối ưu, đảm bảo độ chính xác và tính ổn định trong quá trình ước lượng kênh truyền.

Hình 2.3 minh họa các bước triển khai mô hình học máy phục vụ bài toán ước lượng đặc tính kênh truyền trong hệ thống truyền thông UAV. Quy trình

được thiết kế theo hướng tiếp cận dựa trên dữ liệu (data-driven), nhằm đảm bảo tính linh hoạt và khả năng thích ứng với các kịch bản truyền dẫn phức tạp, bao gồm cả liên kết A2G và A2A.



Hình 2.3. Framework xây dựng mô hình học máy cho bài toán ước lượng kênh truyền UAV dựa trên dữ liệu

Quy trình bắt đầu bằng giai đoạn tiền xử lý dữ liệu, bao gồm các bước chuẩn hóa và phân chia dữ liệu thành các tập huấn luyện (training) và kiểm thử (testing) riêng biệt, giúp giảm thiểu sai lệch thống kê và đảm bảo tính hội tụ trong quá trình huấn luyện. Cấu trúc đề xuất triển khai song song hai hướng tiếp cận: các thuật toán học máy truyền thống (KNN, DT, RF) và các kiến trúc

học sâu chuyên sâu (LSTM cùng các biến thể).

Điểm nhấn quan trọng trong quy trình này là cơ chế tối ưu hóa bộ siêu tham số. Thay vì thiết lập thủ công, các thông số cấu hình quan trọng (như tốc độ học, số lượng nút ẩn, hoặc hàm kích hoạt) được tinh chỉnh tự động thông qua thuật toán GSA. Việc tích hợp này giúp tăng cường khả năng tổng quát hóa của mô hình, đồng thời giảm thiểu sự phụ thuộc vào kinh nghiệm chủ quan của người thiết kế. Kết quả sau cùng là các mô hình đã được tối ưu, sẵn sàng thực hiện dự báo đặc tính kênh truyền với độ chính xác cao, tạo cơ sở tin cậy cho các phân tích hiệu năng hệ thống ở các giai đoạn tiếp theo.

2.4. Các thuật toán học máy được xem xét

2.4.1. Thuật toán K – láng giềng (KNN)

KNN là một thuật toán học có giám sát được áp dụng trong bài toán dự đoán suy hao kênh truyền A2G. Bài toán được mô hình hóa dưới dạng một ánh xạ phi tuyến từ không gian đặc trưng sang miền đầu ra:

$$\widehat{PL} = f(\mathbf{x}).$$

Trong đó $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d$ là vector đặc trưng hình học – môi trường (ví dụ: khoảng cách UAV–UE, độ cao UAV, góc ngẩng, v.v.), và $\widehat{PL}$ là giá trị suy hao kênh ước lượng.

Khác với các phương pháp học tham số, KNN không xây dựng mô hình tường minh trong giai đoạn huấn luyện mà lưu trữ toàn bộ tập dữ liệu. Với một mẫu đầu vào mới $\mathbf{x}$, thuật toán xác định tập $\mathcal{N}_K(\mathbf{x})$ gồm K điểm lân cận gần nhất trong không gian đặc trưng theo một độ đo khoảng cách (thường là khoảng cách Euclid) [9]. Khi đó, giá trị dự đoán được xác định như sau:

$$\widehat{PL}(\mathbf{x}) = \begin{cases} PL_i, & \text{nếu } K = 1. \\ \frac{\sum_{i \in \mathcal{N}_K(\mathbf{x})} w_i PL_i}{\sum_{i \in \mathcal{N}_K(\mathbf{x})} w_i}, & \text{nếu } K > 1. \end{cases} \quad (2.2)$$

Trong đó PL_i là giá trị suy hao kênh của điểm lân cận thứ i , và w_i là trọng số, thường được lựa chọn tỷ lệ nghịch với khoảng cách giữa $\mathbf{x}$ và $\mathbf{x}_i$.

Mặc dù có ưu điểm về tính đơn giản và khả năng xấp xỉ các quan hệ phi tuyến trong mô hình hóa kênh A2G, KNN phụ thuộc mạnh vào cấu trúc dữ liệu cục bộ, do đó có thể nhạy cảm với nhiễu và các điểm ngoại lai trong tập dữ liệu huấn luyện [9].

2.4.2. Thuật toán cây quyết định (DT)

Khác với KNN, mô hình Cây quyết định xây dựng một cấu trúc phân hoạch không gian đặc trưng dưới dạng cây phân cấp. Cụ thể, không gian đầu vào được chia thành các miền con rời rạc thông qua một chuỗi các phép tách dựa trên giá trị của các đặc trưng. Mỗi nút trong của cây tương ứng với một điều kiện phân tách trên một đặc trưng, trong khi mỗi nút lá biểu diễn một giá trị dự đoán $\widehat{PL}$, thường được tính bằng trung bình của các mẫu huấn luyện thuộc miền tương ứng [68].

Quá trình huấn luyện cây được thực hiện theo cơ chế phân hoạch đệ quy, bắt đầu từ toàn bộ tập dữ liệu tại nút gốc. Tại mỗi bước, thuật toán lựa chọn đặc trưng và ngưỡng phân tách tối ưu nhằm cực tiểu hóa hàm mất mát (ví dụ: sai số bình phương trong bài toán hồi quy). Quá trình này tiếp tục cho đến khi đạt các tiêu chí dừng, chẳng hạn như số lượng mẫu tối thiểu tại nút hoặc khi việc phân tách không còn cải thiện hiệu suất. Mặc dù có khả năng mô hình hóa các quan hệ phi tuyến và dễ diễn giải, cây quyết định có xu hướng quá khớp nếu không được kiểm soát độ sâu hoặc không áp dụng các kỹ thuật cắt tỉa [68].

2.4.3. Random Forest (RF)

Random Forest là một phương pháp học có giám sát được áp dụng trong bài toán dự đoán suy hao kênh truyền A2G. Mô hình này thuộc nhóm học tổ hợp, trong đó nhiều cây quyết định được xây dựng và kết hợp để đưa ra dự đoán cuối cùng. Cụ thể, mỗi cây quyết định trong RF được huấn luyện trên một tập dữ liệu con khác nhau, được tạo ra bằng phương pháp lấy mẫu ngẫu nhiên có hoàn lại. Đồng thời, tại mỗi bước phân tách, chỉ một tập con các đặc trưng được lựa chọn ngẫu nhiên để tìm điều kiện tách tối ưu. Cơ chế này giúp tăng tính đa dạng giữa các cây và giảm sự phụ thuộc vào một tập đặc trưng cố định [43].

Trong giai đoạn suy luận, giá trị dự đoán được xác định thông qua việc tổng hợp kết quả từ tất cả các cây quyết định, thường bằng cách lấy trung bình

trong bài toán hồi quy. Nhờ đó, RF có khả năng giảm phương sai và hạn chế hiện tượng quá khớp so với một cây đơn lẻ, đồng thời vẫn giữ được khả năng mô hình hóa các quan hệ phi tuyến phức tạp. Tuy nhiên, mô hình RF có chi phí tính toán cao hơn và kém khả năng diễn giải hơn so với Cây quyết định đơn lẻ [43].

2.4.4. Long Short-Term Memory (LSTM)

Mạng nơ-ron hồi tiếp với bộ nhớ dài ngắn hạn (LSTM) là một phương pháp học sâu có giám sát, trong nghiên cứu này nó được sử dụng trong bài toán dự đoán suy hao kênh truyền A2A, A2G. Mô hình này đặc biệt phù hợp với dữ liệu dạng chuỗi, trong đó các quan sát có sự phụ thuộc theo thời gian hoặc theo trạng thái hệ thống. Nhờ cơ chế các cổng nhớ, LSTM có khả năng học và duy trì các phụ thuộc dài hạn trong dữ liệu, khắc phục hạn chế suy giảm gradient của các mạng nơ-ron hồi tiếp truyền thống. Trong bối cảnh truyền thông UAV, điều này cho phép mô hình nắm bắt sự biến thiên của kênh truyền theo quỹ đạo di chuyển, độ cao, hoặc các trạng thái động khác của hệ thống [94].

Mặc dù có khả năng khai thác hiệu quả thông tin theo chuỗi, LSTM yêu cầu chi phí huấn luyện cao và phụ thuộc đáng kể vào cấu trúc mạng cũng như lựa chọn siêu tham số [94].

2.4.5. Mô hình Encoder–Decoder LSTM

Để nâng cao khả năng khai thác cấu trúc chuỗi của dữ liệu và mô hình hóa mối quan hệ giữa các trạng thái hệ thống theo thời gian, kiến trúc Encoder–Decoder LSTM được xem xét như một mở rộng của LSTM truyền thống. Trong kiến trúc này, khối encoder có nhiệm vụ ánh xạ chuỗi dữ liệu đầu vào, đại diện cho trạng thái hệ thống UAV trong một khoảng thời gian, thành một biểu diễn ẩn có kích thước cố định. Biểu diễn này sau đó được khối decoder sử dụng để ước lượng chuỗi đầu ra tương ứng với đặc tính kênh truyền. Cách tiếp cận này cho phép mô hình hóa linh hoạt các quan hệ nhiều–nhiều hoặc nhiều–một, đặc biệt phù hợp với các kịch bản kênh truyền có tính biến thiên phức tạp theo thời gian. Ở đây, mô hình Encoder–Decoder LSTM được sử dụng nhằm nâng cao độ chính xác của việc ước lượng kênh truyền so với LSTM một chiều, từ đó cải thiện độ tin cậy của các tham số triển khai hệ thống UAV được xác định từ

các biểu thức giải tích [82].

2.5. Tối ưu siêu tham số cho các mô hình học máy

2.5.1. Thuật toán Gravitational Search Algorithm (GSA)

Thuật toán GSA là một phương pháp tối ưu hóa siêu heuristic dựa trên quần thể, được phát triển dựa trên định luật hấp dẫn Newton và tương tác giữa các khối lượng [39]. Trong GSA, mỗi tác nhân (agent) đại diện cho một nghiệm ứng viên trong không gian tìm kiếm và được gán một giá trị khối lượng phản ánh chất lượng của nghiệm tương ứng. Các nghiệm tốt hơn sẽ có khối lượng lớn hơn, từ đó tạo ra lực hấp dẫn mạnh hơn và thu hút các tác nhân khác di chuyển về các vùng tìm kiếm tiềm năng. Cơ chế này cho phép thuật toán đồng thời thực hiện khai thác toàn cục và khai thác cục bộ, giúp nâng cao khả năng tìm kiếm nghiệm tối ưu trong không gian phi tuyến phức tạp.

Lực hấp dẫn $F_{ij}(t)$ tác động từ tác nhân j lên tác nhân i tại thời điểm t được xác định như sau:

$$F_{ij}(t) = G(t) \frac{M_i(t)M_j(t)}{R_{ij}(t) + \epsilon} (X_j(t) - X_i(t)). \quad (2.3)$$

Trong đó $G(t)$ là hằng số hấp dẫn theo thời gian, $M_i(t)$ và $M_j(t)$ là khối lượng của các tác nhân, $R_{ij}(t)$ là khoảng cách Euclid giữa hai tác nhân, và ϵ là một hằng số nhỏ nhằm tránh hiện tượng chia cho không.

Tổng lực tác động lên tác nhân i được tính bằng tổng có trọng số ngẫu nhiên từ các tác nhân tốt hơn trong tập Kbest:

$$F_i(t) = \sum_{\substack{j \in \text{Kbest} \\ j \neq i}} \text{rand}_j F_{ij}(t). \quad (2.4)$$

Trong đó rand_j là một số ngẫu nhiên phân bố đều trong khoảng $[0, 1]$.

Gia tốc và vận tốc của tác nhân được cập nhật dựa trên tổng lực tác động và khối lượng quán tính:

$$a_i(t) = \frac{F_i(t)}{M_i(t)}, \quad v_i(t+1) = \text{rand}_i v_i(t) + a_i(t). \quad (2.5)$$

Trong đó rand_i là một số ngẫu nhiên trong khoảng $[0, 1]$.

Cuối cùng, vị trí của tác nhân, tương ứng với nghiệm ứng viên trong không gian tìm kiếm, được cập nhật theo:

$$X_i(t+1) = X_i(t) + v_i(t+1). \quad (2.6)$$

GSA đã được áp dụng rộng rãi trong nhiều bài toán tối ưu hóa, bao gồm tối ưu siêu tham số cho các mô hình học máy [7, 33]. Trong nghiên cứu này, GSA được lựa chọn nhờ cấu trúc đơn giản và khả năng tìm kiếm toàn cục hiệu quả, phù hợp với các bài toán tối ưu phi lồi. Đối với bài toán ước lượng suy hao kênh truyền A2A và A2G, mỗi tác nhân biểu diễn một vector siêu tham số ứng viên, và giá trị mục tiêu (fitness) của tác nhân được xác định dựa trên sai số dự báo của mô hình (MAE). Thông qua quá trình lặp, GSA khai thác hiệu quả không gian tìm kiếm để xác định các cấu hình siêu tham số gần tối ưu, từ đó cải thiện độ chính xác và khả năng tổng quát hóa của mô hình.

2.5.2. Tối ưu siêu tham số sử dụng GSA

Mặc dù các thuật toán học máy và học sâu cung cấp nhiều siêu tham số khác nhau, không phải tất cả đều có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng dự báo. Do đó, nghiên cứu này tập trung tối ưu các siêu tham số cốt lõi có tác động trực tiếp đến độ chính xác của mô hình, nhằm giảm không gian tìm kiếm và tăng hiệu quả của quá trình tối ưu hóa, đồng thời vẫn đảm bảo hiệu năng dự báo.

Đối với các mô hình học máy được xem xét, không gian các siêu tham số cần tối ưu hóa đối với từng mô hình ngẫu nhiên được định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}_{\text{RF}} &= \{N_{\text{est}}, D_{\text{max}}, F_{\text{max}}, S_{\text{spl}}, S_{\text{leaf}}\}, \\ \mathcal{H}_{\text{KNN}} &= \{K_{\text{nn}}, p, w\}, \\ \mathcal{H}_{\text{DT}} &= \{D_{\text{max}}, F_{\text{max}}, S_{\text{spl}}, S_{\text{leaf}}\}. \end{aligned}$$

Trong đó:

- Đối với thuật toán RF: N_{est} là số lượng cây quyết định; D_{max} là độ sâu tối đa của cây; F_{max} là số lượng đặc trưng tối đa được xem xét khi phân tách; S_{spl} là số lượng mẫu tối thiểu cần thiết để phân tách một nút nội bộ; và S_{leaf} là số lượng mẫu tối thiểu quy định tại một nút lá.

- Đối với thuật toán KNN: K_{nn} là số lượng láng giềng; p là tham số khoảng cách (bậc Minkowski); và w là hàm trọng số của các điểm láng giềng.

- Đối với thuật toán DT: các tham số $D_{\max}, F_{\max}, S_{\text{spl}}, S_{\text{leaf}}$ có ý nghĩa tương tự như trong mô hình RF.

Đối với các mô hình học sâu, đặc biệt là mạng LSTM, việc lựa chọn siêu tham số phù hợp đóng vai trò quan trọng trong việc nâng cao khả năng học các đặc trưng phi tuyến và đảm bảo sự hội tụ của quá trình huấn luyện. Trong nghiên cứu này, các siêu tham số chính của mô hình LSTM được xem xét bao gồm số lượng nút trong lớp LSTM, số lượng nút trong lớp Dense và tốc độ học của thuật toán huấn luyện. Tập siêu tham số của LSTM được biểu diễn như sau:

$$\mathcal{H}_{LSTM} = \{n_{LSTM}, n_{Dense}, \eta\},$$

Trong đó n_{LSTM} là số lượng nút của lớp LSTM, n_{Dense} là số lượng nút của lớp Dense, và η là tốc độ học (learning rate).

Đối với các kiến trúc mở rộng như Bidirectional LSTM và Encoder-Decoder LSTM, các siêu tham số tương tự cũng được xem xét, với sự điều chỉnh phù hợp theo cấu trúc mạng tương ứng. Tất cả các tập siêu tham số này được tối ưu hóa bằng thuật toán GSA nhằm tìm kiếm cấu hình tối ưu, góp phần nâng cao độ chính xác dự báo suy hao kênh truyền trong các kịch bản A2A và A2G.

Quy trình tối ưu hóa siêu tham số sử dụng thuật toán GSA được tóm tắt trong thuật toán 2.1. Trong đó, mỗi tác nhân biểu diễn một vector siêu tham số ứng viên trong không gian tìm kiếm. Tại mỗi vòng lặp, mô hình học máy/học sâu được huấn luyện trên tập dữ liệu huấn luyện và đánh giá trên tập kiểm tra. Dựa trên cơ chế tương tác hấp dẫn giữa các tác nhân, vị trí của chúng được cập nhật dần theo thời gian nhằm tìm kiếm cấu hình siêu tham số tối ưu, từ đó nâng cao độ chính xác dự báo suy hao kênh truyền.

2.6. Tiêu chí đánh giá

Để đánh giá và so sánh hiệu năng của các mô hình ước lượng suy hao kênh truyền, nghiên cứu sử dụng các tiêu chí định lượng phổ biến trong các bài toán hồi quy, cụ thể như sau:

Sai số tuyệt đối trung bình (MAE – Mean Absolute Error): MAE

Thuật toán 2.1 Tối ưu siêu tham số bằng thuật toán GSA

Đầu vào: k (số lượng siêu tham số), N (số lượng tác nhân), N_{iter} (số vòng lặp), $\mathcal{D}_{\text{train}}$ (tập dữ liệu huấn luyện), $\mathcal{D}_{\text{test}}$ (tập dữ liệu kiểm tra)

Đầu ra: $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_k]$ – bộ siêu tham số tối ưu

```
1: Khởi tạo ngẫu nhiên các tác nhân  $\mathbf{X}$  trong không gian siêu tham số  $\mathcal{H}$ 
2: for  $t = 1$  đến  $N_{\text{iter}}$  do
3:   Huấn luyện mô hình  $\mathcal{M}$  trên tập  $\mathcal{D}_{\text{train}}$  với các siêu tham số  $\mathbf{X}$ 
4:   Dự báo suy hao kênh:  $PL_{\text{pre}} = \mathcal{M}(\mathcal{D}_{\text{test}})$ 
5:   Đánh giá hàm thích nghi của toàn bộ các tác nhân
6:   for mỗi tác nhân  $j = 1$  đến  $N$  do
7:     for mỗi siêu tham số  $i = 1$  đến  $k$  do
8:       Tính toán  $m_j^i, M_j^i, a_j^i$  (theo các Công thức (2.3)–(2.5))
9:       Cập nhật vị trí  $x_j^i$  (theo Công thức (2.6))
10:    end for
11:  end for
12:  Xác định tác nhân tốt nhất  $\mathbf{X}$ 
13: end for
```

đo lường giá trị trung bình của độ lệch tuyệt đối giữa giá trị suy hao dự đoán và giá trị thực tế [40]. Chỉ số này phản ánh trực tiếp mức độ sai khác trung bình của mô hình và có ý nghĩa rõ ràng về mặt vật lý trong bối cảnh ước lượng suy hao kênh truyền.

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| PL_i - \hat{P}L_i \right|. \quad (2.7)$$

Sai số căn bình phương trung bình (RMSE – Root Mean Square Error): RMSE nhấn mạnh các sai số lớn bằng cách bình phương độ lệch trước khi lấy trung bình. Do đó, chỉ số này đặc biệt phù hợp để đánh giá độ ổn định của mô hình trong các kịch bản kênh truyền biến thiên mạnh hoặc có nhiễu cao [40].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(PL_i - \hat{P}L_i \right)^2}. \quad (2.8)$$

Hệ số xác định (R^2 – Coefficient of Determination): R^2 là một chỉ số thống kê dùng để đánh giá mức độ mà mô hình hồi quy giải thích được phương sai của biến phụ thuộc. Cụ thể, R^2 biểu thị tỷ lệ phần trăm biến thiên của dữ

liệu thực tế được mô hình học máy tái hiện thông qua các giá trị dự đoán. Giá trị của R^2 nằm trong khoảng $(-\infty, 1]$, trong đó $R^2 = 1$ cho thấy mô hình dự đoán hoàn hảo, còn $R^2 = 0$ nghĩa là mô hình không tốt hơn việc sử dụng giá trị trung bình của dữ liệu. Trong một số trường hợp, R^2 có thể âm, phản ánh mô hình hoạt động kém hơn cả mô hình tham chiếu đơn giản.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (PL_i - \hat{PL}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (PL_i - \overline{PL})^2}. \quad (2.9)$$

Trong bài toán ước lượng suy hao kênh truyền, hệ số R^2 phản ánh khả năng của mô hình trong việc nắm bắt các quy luật lan truyền tín hiệu trong môi trường vô tuyến. Tuy nhiên, chỉ số này không phản ánh trực tiếp sai số tuyệt đối, do đó cần được sử dụng kết hợp với các thước đo như MAE và RMSE để đánh giá toàn diện hiệu năng mô hình [40].

Nguyên tắc so sánh mô hình: Tất cả các mô hình được so sánh trong nghiên cứu đều tuân thủ cùng một quy trình tiền xử lý, huấn luyện và đánh giá. Điều này đảm bảo rằng sự khác biệt về kết quả thu được phản ánh đúng năng lực mô hình, thay vì xuất phát từ sự khác biệt trong quy trình thực nghiệm. Việc sử dụng đồng thời MAE và RMSE cho phép đánh giá toàn diện hiệu năng mô hình, vừa phản ánh sai số trung bình, vừa làm rõ mức độ nhạy cảm của mô hình đối với các sai số lớn.

2.7. Phân tích kết quả

Trong tiểu mục này, hiệu năng của mô hình kênh truyền đề xuất được đánh giá và kiểm chứng thông qua hai bộ dữ liệu độc lập, đại diện cho các kịch bản truyền thông không dây sử dụng UAV trong môi trường thực tế và mô phỏng. Bộ dữ liệu thứ nhất phản ánh đặc tính suy hao kênh truyền A2A thu thập từ chiến dịch đo đạc thực nghiệm ở dải tần sóng milimet, trong khi bộ dữ liệu thứ hai mô phỏng kênh truyền A2G trong môi trường đô thị phức tạp với cấu trúc không gian ba chiều chi tiết.

Việc sử dụng đồng thời dữ liệu đo đạc thực và dữ liệu mô phỏng cho phép đánh giá khả năng khái quát hóa của mô hình học sâu trong các điều kiện truyền dẫn khác nhau, đồng thời cung cấp cơ sở so sánh khách quan giữa mô hình đề

xuất và các mô hình kênh truyền thống. Thông qua các chỉ số đánh giá định lượng, các kết quả phân tích nhằm làm rõ mức độ cải thiện về độ chính xác khi áp dụng phương pháp học sâu trong bài toán ước lượng suy hao kênh truyền cho các hệ thống truyền thông sử dụng UAV. Các kết quả nghiên cứu thực nghiệm và phân tích định lượng này đã được xác thực thông qua các công bố khoa học của nghiên cứu sinh tại [CT1], [CT3] và [CT6].

2.7.1. Ước lượng kênh A2A

Nhằm kiểm chứng tính hiệu quả của phương pháp luận đã đề xuất, kết quả ước lượng suy hao kênh truyền A2A được tổng hợp và phân tích trong tiểu mục này thông qua các chỉ số định lượng.

2.7.1.1. Tiền xử lý dữ liệu

Bộ dữ liệu phục vụ bài toán dự báo suy hao kênh truyền A2A được trích xuất từ kho lưu trữ dữ liệu thực nghiệm công khai của nhóm nghiên cứu WINES-Lab [84]. Dữ liệu này là kết quả của chiến dịch đo đạc kênh truyền thực tế kéo dài ba ngày tại dải tần sóng milimet (60 GHz), sử dụng hệ thống channel sounder Facebook Terragraph triển khai trên các thực thể UAV trong điều kiện LoS. Độ tin cậy của bộ dữ liệu đã được kiểm chứng thông qua việc đối soát với các mô hình kênh tiêu chuẩn của 3GPP [83].

Tập dữ liệu thô bao gồm 6.889 mẫu quan trắc được lưu trữ dưới định dạng tệp tin .CSV. Để đảm bảo chất lượng đầu vào cho các mô hình học máy, quy trình tiền xử lý được thực hiện nghiêm ngặt qua các bước:

Lọc và làm sạch dữ liệu: Các bản ghi không hoàn thiện hoặc chứa giá trị ngoại lai được loại bỏ. Đối với các trường dữ liệu thiếu cục bộ, phương pháp nội suy dựa trên giá trị trung bình của đặc trưng tương ứng được áp dụng để duy trì tính liên tục của dữ liệu.

Phân tách và Chuẩn hóa: Bộ dữ liệu được phân chia ngẫu nhiên thành hai tập con độc lập: 80% dành cho giai đoạn huấn luyện và 20% dành cho giai đoạn kiểm thử. Sau đó, kỹ thuật chuẩn hóa dữ liệu được áp dụng nhằm đưa các đặc trưng về cùng một thang đo, giúp tối ưu hóa quá trình hội tụ của mạng nơ-ron và hạn chế sai lệch hệ thống trong quá trình học.

2.7.1.2. Lựa chọn đặc trưng

Dựa trên việc phân tích đặc tính vật lý của kênh truyền sóng milimet trong kịch bản A2A, một tập hợp các đặc trưng đầu vào có tác động trực tiếp đến suy hao đường truyền đã được lựa chọn. Việc xác định các đặc trưng này không chỉ dựa trên tính sẵn có của dữ liệu thực nghiệm mà còn nhằm mục đích nắm bắt đầy đủ các yếu tố hình học và trạng thái hệ thống ảnh hưởng đến chất lượng liên kết truyền dẫn.

Cụ thể, các tham số như khoảng cách (d) và độ cao (h) đóng vai trò then chốt trong việc mô hình hóa suy hao không gian tự do và các hiệu ứng phản xạ từ mặt đất. Bên cạnh đó, các thông số về búp sóng (beam) và độ lợi (gain) của anten được đưa vào nhằm mô tả đặc tính định hướng và tổn hao do lệch búp sóng – một hiện tượng đặc biệt nghiêm trọng ở dải tần 60 GHz khi các thực thể UAV di chuyển động. Ngoài ra, yếu tố nhiệt độ tại các nút phát và thu cũng được xem xét để đánh giá các ảnh hưởng nhiệt học đến hiệu suất của thiết bị vô tuyến. Chi tiết về tập đặc trưng được tổng hợp trong Bảng 2.1.

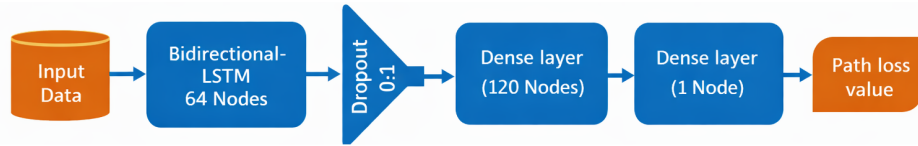
Bảng 2.1. Các đặc trưng đầu vào cho mô hình dự báo suy hao kênh truyền A2A

STT	Tên	Kiểu	Mô tả chi tiết (Đơn vị)
1	Distance	Số thực	Khoảng cách Euclid giữa UAV phát và UAV thu (m)
2	Altitude	Số thực	Độ cao vận hành của các thiết bị UAV (m)
3	Tx_beam	Số thực	Chỉ số hướng búp sóng của anten phát (Index)
4	Rx_beam	Số thực	Chỉ số hướng búp sóng của anten thu (Index)
5	Tx_gain	Số thực	Độ lợi của anten tại phía phát (dBi)
6	Rx_gain	Số thực	Độ lợi của anten tại phía thu (dBi)
7	Tx_temp	Số thực	Nhiệt độ thiết bị tại vị trí phát (°C)
8	Rx_temp	Số thực	Nhiệt độ thiết bị tại vị trí thu (°C)

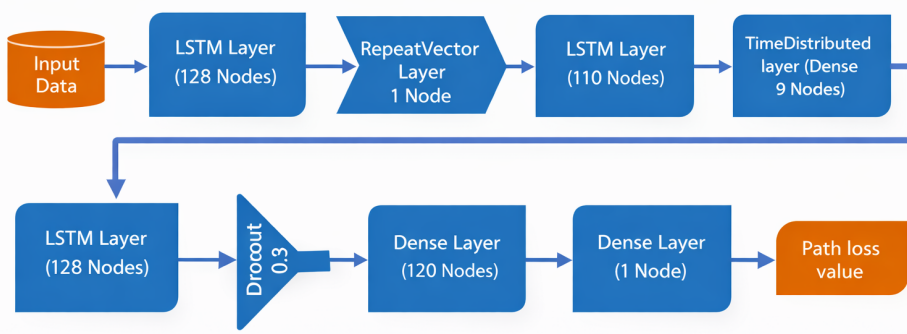
2.7.1.3. Thiết lập cấu trúc mô hình và Tối ưu hóa siêu tham số



Hình 2.4. Mô hình ước lượng suy hao kênh truyền dùng thuật toán LSTM



Hình 2.5. Mô hình ước lượng suy hao kênh truyền dùng thuật toán LSTM hai chiều



Hình 2.6. Mô hình ước lượng suy hao kênh truyền dùng thuật toán encoder-decoder LSTM

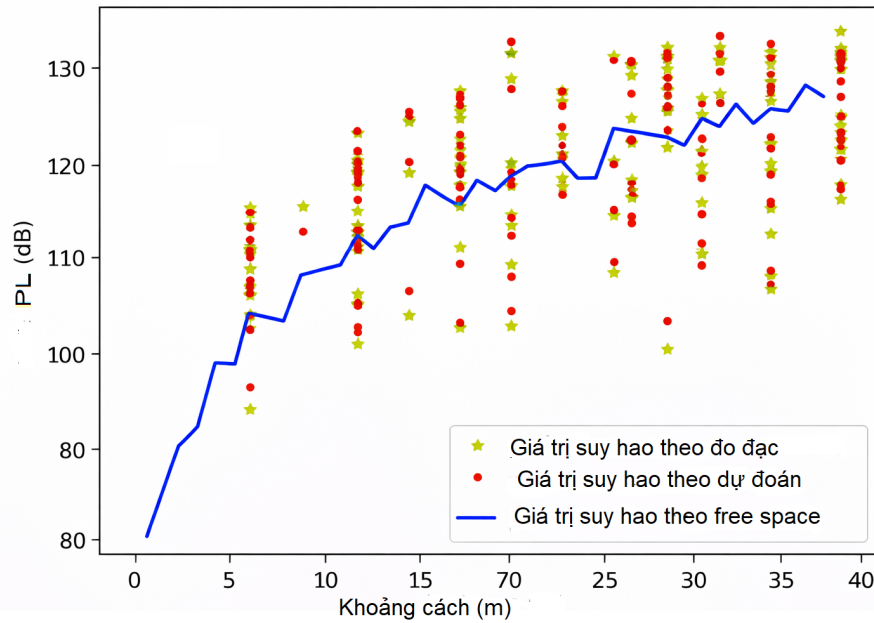
Dựa trên tập đặc trưng đã lựa chọn tại Bảng 2.1, tiểu mục này trình bày chi tiết cấu trúc của các mạng nơ-ron hồi tiếp được đề xuất nhằm ước lượng suy hao kênh truyền A2A. Cấu trúc chi tiết của các mô hình được thiết lập như sau:

- **Mô hình LSTM (Hình 2.4):** Được thiết kế với cấu trúc phân lớp bao gồm một lớp đầu vào (input layer) với 100 nơ-ron, một lớp ẩn chứa 80 nơ-ron để trích xuất đặc trưng chuỗi, và cuối cùng là một lớp đầu ra thực hiện dự báo giá trị suy hao đường truyền.
- **Mô hình LSTM hai chiều (Hình 2.5):** Tận dụng khả năng học hai chiều để nắm bắt toàn diện tính phụ thuộc của các đặc tính của kênh truyền đến suy hao. Bên cạnh các lớp LSTM hai chiều, một lớp Dropout được tích hợp nhằm ngăn chặn hiện tượng quá khớp (overfitting) và tăng cường khả năng khái quát hóa của mô hình.
- **Mô hình Encoder-Decoder LSTM (Hình 2.6):** Đây là kiến trúc có độ phức tạp cao nhất, bao gồm các khối mã hóa (encoder) để nén thông tin trạng thái UAV và khối giải mã (decoder) để tái tạo đặc tính kênh truyền.

Mặc dù các kiến trúc LSTM hai chiều và Encoder-Decoder LSTM yêu cầu

chi phí tính toán cao hơn do có thêm các lớp hồi quy và cơ chế mã hóa-giải mã phức tạp, chúng cho thấy khả năng xấp xỉ các biến thiên phi tuyến của kênh truyền A2A với độ chính xác vượt trội so với các mô hình truyền thống.

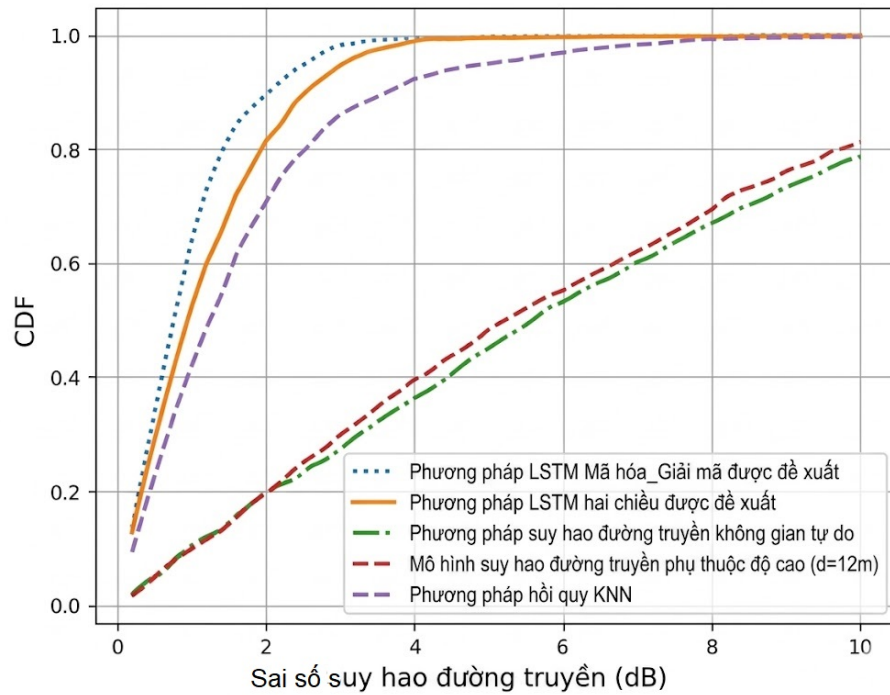
2.7.1.4. Kết quả thực nghiệm và Thảo luận cho kênh truyền A2A



Hình 2.7. Giá trị ước lượng kênh A2A theo mô hình không gian tự do và theo mô hình đề xuất so với giá trị đo lường

Hình 2.7 minh họa kết quả dự báo suy hao đường truyền của mô hình đề xuất so với dữ liệu đo đạc thực tế và mô hình truyền sóng không gian tự do (FSPL). Về mặt xu hướng, giá trị dự báo từ mô hình LSTM bám sát các biến thiên của dữ liệu đo đạc thực tế và phù hợp với quy luật suy giảm theo định luật Friis (vốn chỉ phụ thuộc vào tần số và khoảng cách). Sự tương đồng này khẳng định mô hình học sâu không chỉ học được dữ liệu mà còn tuân thủ các nguyên lý vật lý cơ bản của truyền sóng vô tuyến. Sự vượt trội về độ chính xác giữa các kiến trúc học sâu so với các phương pháp truyền thống (như Log-distance, mô hình phụ thuộc độ cao và KNN) được thể hiện rõ nét qua hàm phân phối tích lũy (CDF) của sai số tại Hình 2.8. Kết quả cho thấy:

- Đối với các mô hình học sâu, 100% sai số dự báo nằm trong khoảng dưới 4 dB.



Hình 2.8. Đồ thị CDF của sai số ước lượng

- Trong khi mô hình Log-distance chỉ đạt xác suất tích lũy 20% cho mức sai số dưới 2 dB, con số này tăng mạnh lên 80% đối với Bi-LSTM và đạt mức ấn tượng trên 90% khi sử dụng kiến trúc Encoder-Decoder LSTM.

Để có cái nhìn định lượng chi tiết, Bảng 2.2 tổng hợp các chỉ số sai số MAE và RMSE của các mô hình được xem xét.

Bảng 2.2. So sánh sai số dự đoán suy hao kênh truyền A2A

STT	Mô hình	MAE	RMSE
1	Mô hình không gian tự do (FSPL)	6,521	7,985
2	Mô hình phụ thuộc độ cao	6,944	8,583
3	K-Nearest Neighbor (KNN)	1,662	2,303
4	LSTM	1,480	1,980
5	Bi-LSTM	1,183	1,535
6	Encoder-Decoder-LSTM (Mô hình đề xuất)	0,939	1,229

Kết quả từ Bảng 2.2 khẳng định kiến trúc Encoder-Decoder LSTM cho hiệu năng tốt nhất với MAE thấp nhất (0,939 dB). Sai số RMSE của các mô hình học sâu cũng thấp hơn đáng kể so với các phương pháp truyền thống, cho thấy độ ổn định cao và khả năng xử lý tốt các biến động mạnh của kênh truyền UAV tại dải tần mmWave. Những kết quả thực nghiệm này minh chứng rằng

việc tích hợp cơ chế học chuỗi thời gian là hướng đi hiệu quả để nâng cao độ chính xác nhận thức môi trường cho mạng UAV thế hệ mới.

2.7.2. Kết quả ước lượng kênh A2G

Tiếp nối các đánh giá thực nghiệm trên dữ liệu đo đạc thực tế A2A, tiểu mục này tập trung phân tích hiệu năng của các mô hình đề xuất trong kịch bản liên kết A2G. Khác với môi trường A2A vốn có điều kiện truyền dẫn thuận lợi, kênh truyền A2G trong môi trường đô thị chịu ảnh hưởng sâu sắc bởi cấu trúc không gian ba chiều, gây ra các hiện tượng che khuất và đa đường phức tạp.

2.7.2.1. Dữ liệu mô phỏng và đặc trưng môi trường A2G

Bộ dữ liệu phục vụ bài toán ước lượng suy hao kênh truyền A2G được trích xuất từ kho lưu trữ dữ liệu khoa học Mendeley Data [87]. Đây là tập dữ liệu mô phỏng được thiết lập trong môi trường đô thị thực tế, dựa trên bản đồ số 3D của khu vực khảo sát được xây dựng thông qua công cụ CADMAPPER.

Đặc điểm chi tiết của môi trường mô phỏng bao gồm [89]:

- **Phạm vi khảo sát:** Khu vực có diện tích $0,748 \text{ km}^2$ với cấu trúc hạ tầng phức tạp, bao gồm tổng cộng 1.419 thực thể tòa nhà.
- **Đặc trưng hình học:** Khoảng 98% các công trình trong khu vực được phân loại là nhà cao tầng, tạo ra các kịch bản che khuất (NLoS) và phản xạ đa đường mạnh, thách thức các mô hình dự báo truyền thống.
- **Các tham số đầu vào:** Tập dữ liệu cung cấp các đặc trưng cốt lõi bao gồm: vị trí tương đối của máy thu, khoảng cách liên kết (d), góc ngẩng (θ), độ cao vận hành của UAV (h) và tần số sóng mang (f).

Việc sử dụng một bộ dữ liệu có cấu trúc đô thị mật độ cao như trên cho phép đánh giá chính xác khả năng thích ứng của các thuật toán học máy trong việc nhận diện các biến thiên phi tuyến của suy hao kênh truyền A2G.

Để xây dựng mô hình dự báo suy hao đường truyền trong kịch bản liên kết A2G, một tập hợp các đặc trưng hình học và hệ thống đã được trích xuất từ bộ dữ liệu mô phỏng. Việc lựa chọn các tham số này nhằm mục đích mô tả chính xác sự thay đổi của môi trường truyền dẫn đô thị, nơi mà suy hao kênh

phụ thuộc mạnh mẽ vào vị trí tương đối và các điều kiện che khuất giữa UAV và người dùng mặt đất. Chi tiết về các đặc trưng đầu vào được tổng hợp trong Bảng 2.3.

Bảng 2.3. Các đặc trưng đầu vào cho mô hình ước lượng suy hao kênh truyền A2G

STT	Tên	Kiểu	Mô tả chi tiết (Đơn vị)
1	X, Y, Z	Số thực	Tọa độ không gian 3D của thiết bị (m)
2	Frequency (f)	Số thực	Tần số sóng mang hoạt động (GHz)
3	Distance (d)	Số thực	Khoảng cách Euclid giữa UAV và máy thu (m)
4	Elevation Angle (θ)	Số thực	Góc ngẩng giữa UAV và vị trí máy thu mặt đất ($^{\circ}$)

Các tham số này sau đó được đưa vào quy trình tiền xử lý và huấn luyện theo các kiến trúc học sâu đã đề xuất, nhằm tìm ra quy luật biến thiên phi tuyến của kênh truyền A2G trong môi trường đô thị mật độ cao.

2.7.2.2. Kết quả ước lượng kênh A2G

Khác với liên kết A2A vốn có đặc tính truyền dẫn tương đối ổn định, kênh truyền A2G trong môi trường đô thị sở hữu độ phức tạp cao hơn đáng kể do sự hiện diện của các vật cản và hiệu ứng đa đường không đồng nhất. Chính sự biến thiên phi tuyến mạnh mẽ này khiến các mô hình học máy với bộ siêu tham số mặc định khó có thể đạt được độ chính xác hội tụ tối ưu.

Do đó, trong mục này, NCS chứng minh hiệu quả của thuật toán tối ưu hóa siêu tham số trong tinh chỉnh cấu trúc và tham số vận hành cho các mô hình dự báo kênh A2G. Việc ứng dụng thuật toán tối ưu GSA cùng các phương pháp đối chứng khác hướng tới việc tìm kiếm điểm cực trị của hàm mất mát, từ đó nâng cao khả năng khái quát hóa của mô hình trước các kịch bản che khuất phức tạp. Kết quả thực nghiệm và so sánh định lượng giữa các phương pháp được trình bày chi tiết trong Bảng 2.4. Bảng kết quả này so sánh hiệu quả của việc tối ưu siêu tham số dùng GSA với các thuật toán tìm kiếm ngẫu nhiên (Random search), thuật toán tìm kiếm Bayes, và trường hợp không tối ưu (Mặc định).

Kết quả thực nghiệm khẳng định ưu thế vượt trội của các mô hình học máy so với mô hình FSPL truyền thống, với sai số MAE giảm đáng kể từ 9.29

Bảng 2.4. Sai số ước lượng suy hao kênh truyền A2G với các phương pháp tối ưu hóa siêu tham số khác nhau

Phương pháp tối ưu	Mô hình học máy	MAE	RMSE
Mô hình lý thuyết	Free Space (FSPL)	9,29	12,63
Mặc định (Default)	Decision Tree (DT)	4,79	7,25
	KNN	5,82	7,95
	Random Forest (RF)	3,80	5,41
Random Search	Decision Tree	5,76	7,89
	KNN	4,13	5,81
	Random Forest	5,62	7,69
Bayes Search	Decision Tree	5,83	7,98
	KNN	4,09	5,93
	Random Forest	4,34	5,90
GSA (Đề xuất)	Decision Tree	4,49	6,43
	KNN	3,98	5,59
	Random Forest	3,85	5,46
	LSTM	4,22	5,46

dB xuống dưới mức 4.5 dB trong mọi kịch bản thử nghiệm. Đặc biệt, việc ứng dụng thuật toán tối ưu hóa GSA đã giúp tinh chỉnh hiệu quả bộ siêu tham số cho các mô hình KNN và DT, từ đó đạt được độ chính xác dự báo tiệm cận với mô hình RF và đảm bảo tính ổn định cao cho hệ thống nhận thức kênh truyền A2G.

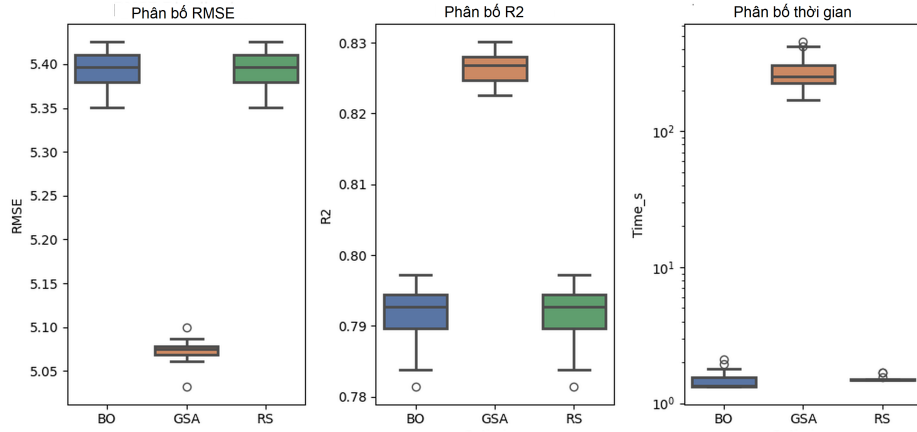
2.7.3. Phân tích độ phức tạp của thuật toán

Trong thuật toán 2.1, với mỗi chu kỳ lặp thuật toán tiến hành đánh giá giá trị thích nghi cho toàn bộ N tác nhân quần thể. Đối với mỗi tác nhân, quy trình này bao gồm ba giai đoạn chính: huấn luyện mô hình học máy với cấu hình siêu tham số tương ứng, dự báo trên tập dữ liệu kiểm tra và xác định sai số dự báo. Gọi C_{fit} là chi phí tính toán để thực hiện trọn vẹn quy trình đánh giá hàm thích nghi của một tác nhân, chi phí tính toán cho mỗi vòng lặp tương ứng với hàm độ phức tạp $\mathcal{O}(N \cdot C_{\text{fit}})$. Sau giai đoạn đánh giá, thuật toán thực hiện cập nhật các đại lượng vật lý (khối lượng, gia tốc, vận tốc) và vị trí của các tác nhân trong không gian k chiều với độ phức tạp là $\mathcal{O}(N \cdot k)$. Trong thực tế triển khai, chi phí huấn luyện mô hình học máy đóng vai trò chủ đạo và lớn hơn rất nhiều so với chi phí cập nhật trạng thái của thuật toán tối ưu ($C_{\text{fit}} \gg k$). Do đó, độ phức tạp tính toán tổng thể của Thuật toán 2.1 sau N_{iter} vòng lặp được xấp xỉ

toán học như sau:

$$T_{\text{total}} = \mathcal{O}(N_{\text{iter}} \cdot N \cdot C_{\text{fit}}) \quad (2.10)$$

Để đánh giá chi tiết hơn đặc tính của các chiến lược tối ưu, 100 lần chạy độc lập đã được thực hiện cho mỗi phương pháp (RS, BO và GSA) trên mô hình RF. Mô hình RF được lựa chọn làm đại diện cho nhóm mô hình cây tổng hợp do tính phổ biến trong thực tiễn và mức độ nhạy đối với cấu hình siêu tham số.



Hình 2.9. Phân bố RMSE, R2 và thời gian thực thi cho mô hình RF.

Hình 2.9 trình bày các biểu đồ boxplot của RMSE, hệ số xác định R^2 và thời gian thực thi. Kết quả phân bố độ chính xác cho thấy phương pháp dựa trên GSA đạt giá trị trung vị RMSE thấp nhất và giá trị trung vị R^2 cao nhất trong số các phương pháp so sánh. Đồng thời, khoảng tứ phân vị của GSA hẹp hơn, cho thấy mức độ biến thiên thấp hơn và hành vi hội tụ ổn định hơn qua các lần chạy độc lập. Ngược lại, RS và BO có độ phân tán lớn hơn, phản ánh mức độ nhạy cao hơn đối với khởi tạo ngẫu nhiên và quá trình lấy mẫu.

Về thời gian thực thi, GSA yêu cầu chi phí tính toán cao hơn so với RS và BO, điều này là phù hợp với đặc trưng của các thuật toán metaheuristic dựa trên quần thể. Tuy nhiên, chi phí này chỉ phát sinh trong giai đoạn tối ưu hóa ngoại tuyến và không ảnh hưởng đến quá trình suy luận thời gian thực sau khi đã xác định được bộ siêu tham số tối ưu.

Nhìn chung, các kết quả thực nghiệm cho thấy sự đánh đổi giữa chi phí tính toán và độ ổn định tối ưu hóa, trong đó phương pháp đề xuất mang lại độ

ổn định và độ chính xác tốt hơn với chi phí tìm kiếm cao hơn.

2.8. Kết luận chương

Chương 2 đã nghiên cứu bài toán ước lượng suy hao kênh truyền cho các hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng UAV dựa trên dữ liệu. Các bước thực hiện đã được trình bày, bao gồm quy trình tiền xử lý dữ liệu và phát triển các mô hình học máy và học sâu nhằm dự báo suy hao đường truyền cho các liên kết A2A và A2G. Cụ thể, các thuật toán học máy như KNN, DT và RF, cùng với các kiến trúc học sâu như LSTM, Bi-LSTM và Encoder–Decoder LSTM, đã được triển khai và đánh giá. Bên cạnh đó, các siêu tham số của các mô hình được xác định tự động thông qua thuật toán tối ưu GSA nhằm cải thiện độ chính xác và tính ổn định của kết quả dự báo.

Kết quả thực nghiệm cho thấy các mô hình học sâu có khả năng mô tả hiệu quả mối quan hệ phi tuyến giữa các tham số đặc trưng của hệ thống UAV—bao gồm khoảng cách liên kết, độ cao, vị trí tương đối, góc ngẩng và tần số sóng mang—với suy hao đường truyền. Trong các kịch bản khảo sát, mô hình Encoder–Decoder LSTM đạt độ chính xác cao, với sai số trung bình tuyệt đối dưới 1 dB trong kịch bản A2A. Đồng thời, việc tối ưu hóa siêu tham số bằng GSA đã góp phần nâng cao hiệu năng của các mô hình học máy truyền thống, đặc biệt trong môi trường đô thị mật độ cao.

Mặc dù phương pháp ước lượng kênh dựa trên dữ liệu cho độ chính xác cao và phản ánh tốt các điều kiện truyền dẫn trong những tình huống giao tiếp cụ thể, cách tiếp cận này chưa cung cấp được các biểu thức giải tích thể hiện quy luật biến đổi của kênh trong môi trường động ba chiều của UAV. Do đó, kết quả thu được khó được sử dụng trực tiếp để giải quyết các bài toán ở cấp độ hệ thống như thiết kế, quy hoạch mạng hay cơ chế đa truy cập. Nhằm tiếp tục hướng tới mục tiêu chung là nâng cao chất lượng của hệ thống truyền thông UAV, các chương tiếp theo của luận án sử dụng các mô hình kênh giải tích để giải một số bài toán này nhằm xác định các tham số triển khai tối ưu. Sau khi có các lời giải cụ thể, kết quả ước lượng kênh dựa trên dữ liệu từ chương 2 có thể được sử dụng để hiệu chỉnh và nâng cao độ chính xác của các mô hình giải tích, qua đó đảm bảo tính phù hợp với các điều kiện triển khai thực tế.

CHƯƠNG 3.

TỐI ƯU THAM SỐ VẬN HÀNH UAV NHẪM NÂNG CAO HIỆU QUẢ TRUYỀN THÔNG

Chương 3 tập trung phân tích xác định ảnh hưởng của các tham số vận hành UAV đến hiệu quả truyền thông. Nội dung trọng tâm của chương được trình bày theo hai định hướng chính:

Thứ nhất, nghiên cứu thiết lập mô hình hệ thống cho nút truyền thông UAV-BS dựa trên các giả thiết về phân bố người dùng và đặc điểm lan truyền sóng trong các môi trường vận hành đặc thù. Bằng cách áp dụng mô hình kênh truyền xác suất LoS, chương này làm rõ ảnh hưởng của các thông số hình học của vị trí UAV (như độ cao và góc ngẩng) đến chất lượng liên kết. Từ đó, các biểu thức toán học dạng đóng được xây dựng để xác định cụ thể hiệu năng hệ thống. Dựa trên ngưỡng suy hao cho phép, nghiên cứu xác định các tham số tối ưu về góc ngẩng, độ cao triển khai và phạm vi phủ sóng hiệu quả. Ngoài ra, việc so sánh đối soát với trạm cơ sở cố định giúp khẳng định lợi thế về công suất của mô hình UAV-BS, tạo cơ sở kỹ thuật cho việc quy hoạch mạng thực tế.

Thứ hai, chương này cũng đi sâu phân tích ảnh hưởng của vận tốc di chuyển khi UAV đóng vai trò là trạm chuyển tiếp di động. Trong kịch bản này, vận tốc được xem xét như một tham số tác động trực tiếp đến thời gian duy trì liên kết và tính ổn định của thông lượng hệ thống. Kết quả phân tích giúp xác định ngưỡng vận tốc tối ưu nhằm đạt được sự cân bằng giữa tính linh động của thiết bị và chất lượng truyền dẫn tín hiệu.

Nội dung của Chương 3 được phát triển và tổng hợp từ các kết quả nghiên cứu của tác giả đã công bố trong các công trình [CT2] và [CT3].

3.1. UAV đóng vai trò trạm cơ sở

3.1.1. Động lực nghiên cứu

Sự tiến hóa của các mạng truyền thông không dây thế hệ mới hướng tới mục tiêu thông lượng cực cao, độ trễ thấp và khả năng đáp ứng vùng phủ linh

hoạt đã thúc đẩy mạnh mẽ việc tích hợp các thiết bị bay không người lái vào hạ tầng viễn thông. Trong số các kịch bản ứng dụng, việc triển khai nút truyền thông UAV hoạt động như UAV-BS được xem là giải pháp đột phá. Nhờ ưu thế về tính di động và khả năng triển khai theo yêu cầu, nút UAV-BS có thể nhanh chóng thiết lập vùng phủ, tăng cường dung lượng và thích nghi tối ưu với sự thay đổi của nhu cầu lưu lượng theo cả không gian và thời gian [11, 90].

Tuy nhiên, hiệu năng của hệ thống nút truyền thông UAV-BS chịu sự chi phối chặt chẽ và phức tạp từ các tham số triển khai hình học cũng như đặc tính động học. Các yếu tố như độ cao bay, góc ngẩng và khoảng cách phục vụ có mối quan hệ phi tuyến phức tạp với xác suất thiết lập liên kết LoS, suy hao đường truyền và độ lợi công suất. Đây là những nhân tố quyết định trực tiếp đến chất lượng liên kết và khả năng phục vụ người dùng mặt đất [70, 111]. Do đó, việc xác định và tối ưu hóa các tham số triển khai này trở thành bài toán quan trọng, đóng vai trò quyết định trong công tác quy hoạch và thiết kế mạng truyền thông sử dụng UAV.

Như đã khảo sát trong chương 1, phần lớn các công trình nghiên cứu thường tiếp cận bài toán tối ưu hóa thông qua mô phỏng số hoặc các thuật toán lặp [3, 32, 106, 113]. Mặc dù các phương pháp này mang lại kết quả khả quan trong các kịch bản cố định, chúng thường đòi hỏi chi phí tính toán lớn và thiếu đi tính tổng quát trong việc mô tả bản chất hệ thống. Sự thiếu vắng các biểu thức giải tích dạng đóng gây khó khăn cho việc đánh giá nhanh hiệu năng, đồng thời hạn chế khả năng ra quyết định trong các kịch bản yêu cầu phản ứng gần thời gian thực hoặc quy hoạch mạng quy mô lớn.

Nghiên cứu của Al-Hourani đã đề xuất phương pháp xác định góc ngẩng tối ưu giữa UAV và thiết bị mặt đất trong một môi trường xác định khi ràng buộc trước công suất suy hao [5]. Tuy nhiên, để xác định góc tối ưu này vẫn cần dùng mô phỏng để giải một phương trình ẩn. Như vậy sẽ khó khăn cho việc tính toán các tham số hiệu quả tiếp theo của hệ thống.

Xuất phát từ những thực trạng đó, nội dung nghiên cứu trong mục này tập trung vào việc phân tích, xác định độ cao, vùng phủ tối ưu cũng như hiệu năng của hệ thống khi sử dụng UAV như trạm cơ sở trên các vùng địa hình khác nhau. Cụ thể, các đóng góp chính bao gồm:

- Xem xét một hệ thống truyền thông không dây trong đó UAV-BS có thể phục vụ đồng thời N người dùng mặt đất trong cùng một vùng phủ. Mô hình hệ thống được xây dựng nhằm phản ánh các đặc trưng cơ bản của truyền thông UAV, bao gồm mối quan hệ hình học giữa UAV và người dùng, cũng như ảnh hưởng của môi trường truyền dẫn đến chất lượng liên kết.

- Trên cơ sở mô hình kênh truyền A2G dựa trên xác suất LoS và ngưỡng suy hao đường truyền cho phép, ảnh hưởng của góc ngẩng đến chất lượng liên kết giữa UAV và người dùng mặt đất được tập trung phân tích. Từ các biểu thức xác suất LoS và suy hao truyền dẫn, bài toán xác định góc ngẩng tối ưu được hình thành với mục tiêu đảm bảo điều kiện truyền thông tin cậy cho các người dùng trong vùng phục vụ.

- Để giải bài toán này, một mô hình xấp xỉ tuyến tính được thiết lập, qua đó thu được nghiệm giải tích cho góc ngẩng tối ưu. Dựa trên góc ngẩng tối ưu, độ cao bay tối ưu của UAV và bán kính vùng phủ sóng tương ứng được xác định dưới dạng các công thức giải tích. Các kết quả này cho phép đánh giá trực tiếp mối quan hệ giữa các tham số triển khai UAV và hiệu năng phủ sóng, đồng thời hỗ trợ bài toán quy hoạch mạng trong các kịch bản thực tế.

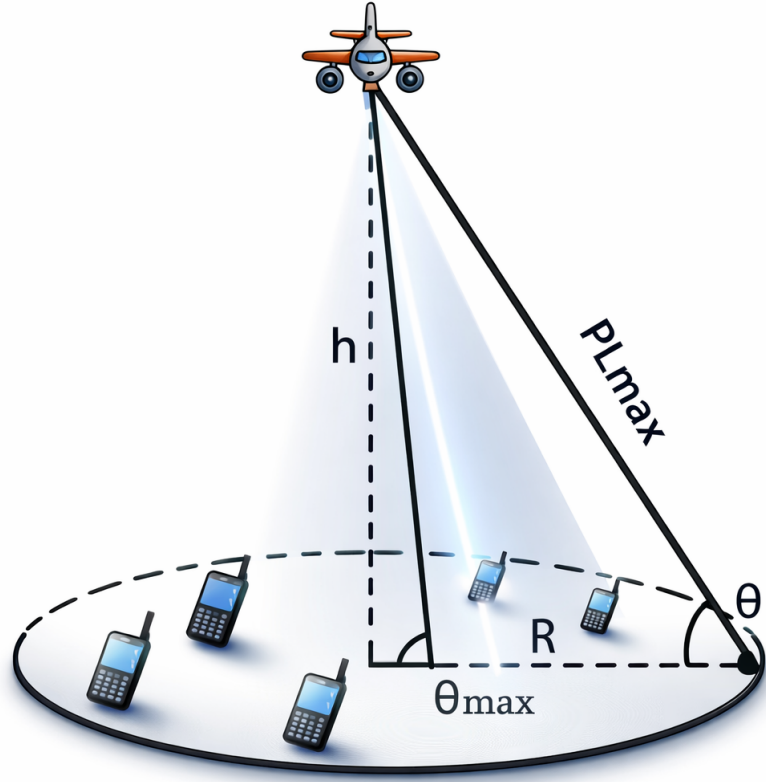
3.1.2. Mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống truyền thông được minh họa trong Hình 3.1, trong đó một UAV đóng vai trò như một trạm cơ sở di động, hoạt động ở độ cao h so với mặt đất. UAV này cung cấp vùng phủ sóng cho một ô (cell) có bán kính R . Các thiết bị người dùng (UE) được phân bố ngẫu nhiên và đồng đều trong phạm vi của ô. Khi một UE nằm tại rìa của ô, góc nhìn của nó đối với UAV là nhỏ nhất, dẫn đến tổn thất truyền dẫn công suất lớn nhất [CT3]. Xác suất đường truyền thẳng giữa UAV và UE trên mặt đất [115] được biểu diễn bởi:

$$P(LoS, \theta) = \frac{1}{1 + a \exp(-b[\theta - a])}. \quad (3.1)$$

Trong đó, a và b là các tham số phụ thuộc vào môi trường. Góc θ biểu thị góc ngẩng giữa UE và UAV.

Theo định luật Friis, tổn thất đường dẫn trong các trường hợp LoS và NLoS được xác định như sau:



Hình 3.1. Mô hình hệ thống truyền thông sử dụng UAV

$$PL_{\text{LoS}} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) + \eta_{\text{LoS}}. \quad (3.2)$$

$$PL_{\text{NLoS}} = \underbrace{20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)}_{\text{FSPL}} + \underbrace{\eta_{\text{NLoS}}}_{\text{shadowing/fading}}. \quad (3.3)$$

Trong đó, c là tốc độ ánh sáng, f là tần số sóng mang, và d là khoảng cách giữa UAV và UE trên mặt đất. Các thành phần η_{LoS} và η_{NLoS} biểu diễn suy hao bổ sung do fading/shadowing, thường được mô hình hóa theo phân bố Gauss với giá trị trung bình bằng 0 và độ lệch chuẩn σ , trong đó σ phụ thuộc vào môi trường truyền dẫn.

Ngoài ra, ta có:

$$P(\text{NLoS}, \theta) = 1 - P(\text{LoS}, \theta). \quad (3.4)$$

Giá trị suy hao cực đại PL_{max} đạt được khi UE nằm tại rìa cell, được xác

định như sau:

$$PL_{\max} = \frac{A}{1 + a \exp(-b [\arctan(\frac{h}{R}) - a])} + 10 \log_{10}(h^2 + R^2) + B. \quad (3.5)$$

Trong đó:

$$A = \eta_{\text{LoS}} - \eta_{\text{NLoS}}. \quad (3.6)$$

$$B = 20 \log_{10}(f) + 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) + \eta_{\text{NLoS}}. \quad (3.7)$$

Mặt khác, ta có:

$$h^2 + R^2 = d^2 = \left(\frac{R}{\cos \theta}\right)^2, \quad \theta = \arctan\left(\frac{h}{R}\right). \quad (3.8)$$

Do đó, biểu thức (3.5) có thể được viết lại như sau:

$$PL_{\max} = \frac{A}{1 + a \exp(-b(\theta - a))} + 20 \log_{10}\left(\frac{R}{\cos\left(\frac{\pi\theta}{180}\right)}\right) + B. \quad (3.9)$$

Với giá trị suy hao đường truyền cực đại $PL_{\max}$ đã được thiết lập trước, góc ngẩng tối ưu θ có thể được xác định thông qua việc giải điều kiện cực trị:

$$\frac{\partial R}{\partial \theta} = 0. \quad (3.10)$$

Theo [5] nghiệm của phương trình này thu được như sau:

$$0 = \frac{\pi}{9 \ln 10} \tan\left(\frac{\pi\theta}{180}\right) + \frac{abA \exp(-b(\theta - a))}{(1 + a \exp(-b(\theta - a)))^2}. \quad (3.11)$$

Phương trình (3.11) có thể được giải bằng các phương pháp số, chẳng hạn như thuật toán chia đôi, với sự hỗ trợ của máy tính. Tuy nhiên, dạng biểu thức này chưa thể hiện tường minh mối quan hệ hàm giữa góc ngẩng tối ưu và các tham số đặc trưng của môi trường truyền dẫn.

Ngược lại, việc xây dựng các biểu thức dạng đóng cho góc ngẩng tối ưu mang lại lợi thế đáng kể về mặt tính toán, cho phép xác định nhanh các tham số triển khai. Điều này đặc biệt hữu ích trong các bài toán quy hoạch và thiết kế mạng truyền thông không dây sử dụng UAV, nơi yêu cầu khả năng ra quyết

định theo thời gian thực với độ phức tạp tính toán thấp.

3.1.3. Phân tích giải tích và các công thức dạng đóng cho mô hình truyền thông UAV-BS

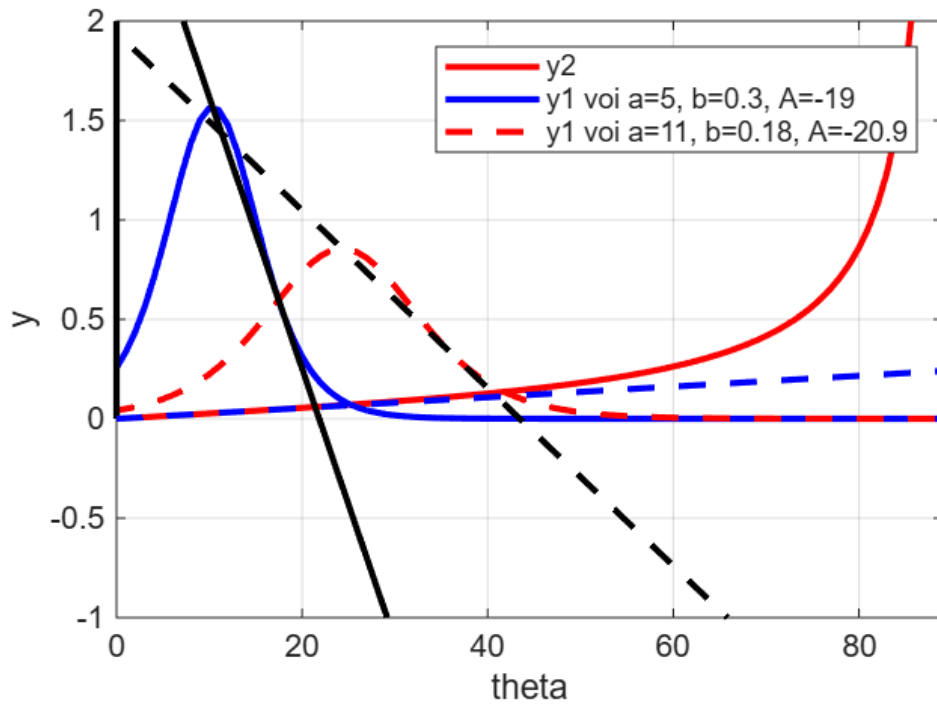
3.1.3.1. Mô hình xấp xỉ tuyến tính cho bài toán xác định góc ngẩng tối ưu

Để tránh việc sử dụng phương pháp khai triển chuỗi Taylor truyền thống, vốn dẫn đến các phương trình bậc cao phức tạp, luận án đề xuất một mô hình xấp xỉ tuyến tính nhằm giải phương trình (3.11) một cách đơn giản hơn.

Trước hết, phương trình (3.11) được chuyển thành hệ hai phương trình như sau:

$$\begin{cases} y_1(\theta) = \frac{-abA \exp(-b(\theta - a))}{(1 + a \exp(-b(\theta - a)))^2} \\ y_2(\theta) = \frac{\pi}{9 \ln 10} \tan\left(\frac{\pi\theta}{180}\right). \end{cases} \quad (3.12)$$

Đồ thị của hai hàm số $y_1(\theta)$ và $y_2(\theta)$ được biểu diễn trong Hình 3.2. Từ đồ thị



Hình 3.2. Đồ thị của hàm số $y_1(\theta)$ và $y_2(\theta)$

này, có thể rút ra một số nhận xét quan trọng như sau:

- Hàm $y_2(\theta)$ có thể được xấp xỉ tuyến tính trong miền góc nhỏ, cụ thể khi $\theta < 55^\circ$. Điều kiện này phù hợp với hầu hết các kịch bản thực tế, trong đó góc ngẩng tối ưu θ_{op} thường nhỏ hơn 55° .

- Hàm $y_1(\theta)$ có dạng gần giống hàm chuông. Phần sườn bên phải của đồ thị có thể được xấp xỉ tuyến tính bằng một đường thẳng $y'_1(\theta)$, nối giữa đỉnh của hàm (tại đó đạo hàm bậc nhất bằng 0) và điểm uốn ở phía bên phải (tại đó đạo hàm bậc hai bằng 0).

- Nghiệm thu được từ mô hình xấp xỉ tuyến tính (y'_1, y_2) có thể sai lệch đáng kể so với nghiệm chính xác (y_1, y_2) , đặc biệt trong trường hợp độ dốc của sườn hàm $y_1(\theta)$ lớn. Do đó, trong quá trình xấp xỉ, cần bổ sung một hệ số hiệu chỉnh tỷ lệ phụ thuộc vào độ dốc này nhằm cải thiện độ chính xác của nghiệm gần đúng.

Như vậy, nghiệm của hệ phương trình (3.12) là giao điểm của hai đường cong sau:

$$y_2(\theta) = \frac{\pi}{9 \ln 10} \tan \left(\frac{\pi \theta}{180} \right). \quad (3.13)$$

và

$$y_1(\theta) = \frac{abA \exp(-b(\theta - a))}{(1 + a \exp(-b(\theta - a)))^2}. \quad (3.14)$$

Trong khoảng $\theta < 55^\circ$, giá trị $\frac{\pi \theta}{180}$ là nhỏ, do đó có thể sử dụng xấp xỉ:

$$\tan \left(\frac{\pi \theta}{180} \right) \approx \frac{\pi \theta}{180}. \quad (3.15)$$

suy ra:

$$y_2(\theta) \approx \frac{\pi^2}{9 \ln 10 \cdot 180} \theta. \quad (3.16)$$

Hàm $y_2(\theta)$ do đó có đặc tính gần như tuyến tính trong miền giá trị đang xét. Trong khi đó, hàm $y_1(\theta)$ có dạng hình chuông, với độ dốc trong khoảng từ điểm cực đại đến điểm uốn có thể được xấp xỉ bằng một hàm tuyến tính. Đỉnh và điểm uốn của $y_1(\theta)$ tương ứng với các điểm mà tại đó đạo hàm bậc nhất và đạo hàm bậc hai của hàm lần lượt bằng không. Đặt:

$$X = \sqrt{a \exp(-b(\theta - a))}, \quad 0 < X < \infty. \quad (3.17)$$

suy ra:

$$\theta = a - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{X^2}{a} \right). \quad (3.18)$$

Khi đó, hàm $y_1(\theta)$ có thể được viết lại dưới dạng hàm của X :

$$y_1(\theta) = \frac{abA \exp(-b(\theta - a))}{(1 + a \exp(-b(\theta - a)))^2} = f(X) = \frac{-bA}{(X + X^{-1})^2}. \quad (3.19)$$

Tại đỉnh của đồ thị, ta có:

$$\frac{\partial f(X)}{\partial X} = \frac{-2bA(1 - X^{-2})}{(X + X^{-1})^3} = 0. \quad (3.20)$$

suy ra:

$$X = 1, \quad f(1) = \frac{-bA}{4}. \quad (3.21)$$

Tọa độ của đỉnh là: $(a + \frac{1}{b} \ln a, -\frac{bA}{4})$. Tại điểm uốn, ta có:

$$\frac{\partial^2 f(X)}{\partial X^2} = \frac{-4bAX^{-3}}{(X + X^{-1})^3} + \frac{6bA(1 - X^{-2})^2}{(X + X^{-1})^4} = 0. \quad (3.22)$$

Biến đổi tương đương:

$$X^{-4} - 8X^{-2} + 3 = 0. \quad (3.23)$$

suy ra:

$$X_{1,2}^{-2} = 4 \pm \sqrt{13}. \quad (3.24)$$

Kết hợp với (3.16), tọa độ điểm uốn được xác định là: $(a - \frac{1}{b} \ln \left(\frac{0.3626^2}{a} \right), 0.1027 bA)$.

Dựa trên tọa độ của đỉnh và điểm uốn của hàm $y_1(\theta)$, có thể xây dựng một đường thẳng đi qua hai điểm này nhằm xấp xỉ độ dốc của hàm trong khoảng quan tâm. Lưu ý rằng độ dốc của y_1 có mối quan hệ phụ thuộc vào đại lượng b^2A . Do đó, trong quá trình xây dựng mô hình, hàm y_1 được hiệu chỉnh bằng cách dịch chuyển độ dốc theo một hệ số tỉ lệ phù hợp. Dựa trên kinh nghiệm thực nghiệm, hệ số hiệu chỉnh này được lựa chọn là $1.58 Ab^2$.

Từ đó, giá trị gần đúng của góc ngẩng tối ưu θ là nghiệm của hệ phương trình:

$$\begin{cases} y_1'(\theta) = -\frac{bA}{4} + 0.0726 b^2 A \left[\theta - \left(a + \frac{1}{b} \ln a \right) + 1.58 Ab^2 \right] \\ y_2(\theta) = \frac{\pi^2}{9 \ln 10 \cdot 180} \theta \end{cases} \quad (3.25)$$

Khi $y'_1(\theta) = y_2(\theta)$, góc ngảng tối ưu xấp xỉ được xác định bởi:

$$\theta_{\text{app}} = \frac{-\frac{bA}{4} - \left(a + \frac{1}{b} \ln a - 1.58 Ab^2\right) 0.0726 b^2 A}{-0.0726 b^2 A + 0.0027}. \quad (3.26)$$

3.1.3.2. Tính toán bán kính của cell

Đặt:

$$\overline{PL} = PL_{\text{max}} - \left(\frac{A}{1 + a \exp(-b(\theta_{\text{app}} - a))} + B \right). \quad (3.27)$$

Thay vào biểu thức (3.9), bán kính của cell được xác định bởi:

$$R = 10^{\frac{\overline{PL}}{20}} \cos\left(\frac{\pi\theta_{\text{app}}}{180}\right). \quad (3.28)$$

Trong biểu thức này, bán kính phủ sóng tối ưu R được xác định dựa trên ngưỡng suy hao đường truyền cực đại cho phép PL_{max} tương ứng với công suất phát. Tuy nhiên, trong thực tế quy hoạch mạng, bán kính tế bào R thường được xác định trước dựa trên mật độ lưu lượng người dùng. Cụ thể, tại các khu vực có mật độ lưu lượng cao, R được lựa chọn nhỏ nhằm tăng khả năng phục vụ, trong khi ở các khu vực có mật độ thấp, R có thể lớn hơn do ít bị ràng buộc bởi giới hạn tài nguyên băng tần trên mỗi tế bào.

Ngược lại, biểu thức (3.28) cho phép xác định bán kính phủ sóng R bằng cách suy ra R từ mức chi phí công suất phát tối ưu cần thiết để đảm bảo yêu cầu chất lượng dịch vụ.

3.1.3.3. Tính toán độ cao UAV

Trong quá trình lập kế hoạch vùng phủ sóng, nếu bán kính phủ sóng R được xác định dựa trên giá trị suy hao tín hiệu cực đại PL_{max} . Khi đó, độ cao tối ưu của UAV có thể được tính trực tiếp thông qua công thức:

$$h = R \tan(\theta_{\text{app}}). \quad (3.29)$$

Điều này cho thấy rằng độ cao h của UAV không chỉ phụ thuộc vào bán kính R mà còn phụ thuộc gián tiếp vào các tham số môi trường như a , b và A thông qua giá trị của góc ngảng tối ưu θ_{op} . Có thể sử dụng góc ngảng gần tối

ưu theo biểu thức (3.26) để xác định độ cao tối ưu của UAV.

3.1.3.4. Tính toán độ lợi công suất

Xét một UE được đặt tại khoảng cách r từ tâm của cell và quan sát UAV dưới góc ngẩng θ . Khi đó, theo phương trình (3.9), công suất suy hao giữa UAV và UE được xác định như sau:

$$PL_{\text{UAV}} = \frac{A}{1 + a \exp(-b(\theta - a))} + 20 \log_{10}(r) - 20 \log_{10} \left(\cos \left(\frac{\pi \theta}{180} \right) \right) + B. \quad (3.30)$$

Giả thiết suy hao giữa BS cố định và UE là suy hao LoS, khi đó:

$$PL_{\text{BS}} = \frac{A}{1 + a \exp(ba)} + 20 \log_{10}(r) + B. \quad (3.31)$$

Đối với BS cố định $\theta = 0$, do đó độ lợi công suất đạt được khi sử dụng UAV-BS thay thế BS cố định là:

$$G_{PL} = PL_{\text{BS}} - PL_{\text{UAV}} = \frac{A}{1 + a \exp(ba)} - \frac{A}{1 + a \exp(-b(\theta - a))} + 20 \log_{10} \left(\cos \left(\frac{\pi \theta}{180} \right) \right). \quad (3.32)$$

Khi UE nằm trong vùng phủ sóng bán kính R , ta có:

$$90^\circ > \theta > \theta_{\text{op}} \quad (3.33)$$

Mặt khác, do:

$$A = \eta_{\text{LoS}} - \eta_{\text{NLoS}} < 0. \quad (3.34)$$

nên:

$$P_{\text{LoS}}(90^\circ) > P_{\text{LoS}}(\theta) > P_{\text{LoS}}(\theta_{\text{op}}) = \frac{1}{1 + a \exp(-b(\theta_{\text{op}} - a))} \approx 1. \quad (3.35)$$

Suy ra:

$$PL_{\text{BS}} - PL_{\text{UAV}} = |A| \left(1 - \frac{1}{1 + a \exp(ba)} \right) + 20 \log_{10} \left(\cos \left(\frac{\pi \theta}{180} \right) \right). \quad (3.36)$$

Ta có:

$$0 < \cos \left(\frac{\pi \theta}{180} \right) < 1. \quad (3.37)$$

Sử dụng phép xấp xỉ bậc nhất trong khai triển Taylor của hàm $\ln(\cos(\cdot))$:

$$\frac{20}{\ln 10} \ln \left[\cos \left(\frac{\pi\theta}{180} \right) \right] \approx \frac{20}{\ln 10} \left(\cos \left(\frac{\pi\theta}{180} \right) - 1 \right). \quad (3.38)$$

Nếu mật độ người dùng trên đơn vị diện tích là ρ_{ue} , độ lợi công suất của toàn cell đạt được là:

$$G_{PL} = \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho_{ue} (PL_{BS} - PL_{UAV}) r dr d\phi = \rho_{ue} \pi R^2 |A| \left(1 - \frac{1}{1 + a \exp(ba)} \right) + I \quad (3.39)$$

Trong đó:

$$I = \frac{20}{\ln 10} \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho_{ue} \left(\cos \left(\frac{\pi\theta}{180} \right) - 1 \right) r dr d\phi \quad (3.40)$$

Với:

$$\cos \left(\frac{\pi\theta}{180} \right) = \frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} \quad (3.41)$$

Suy ra:

$$I = \frac{40\pi}{\ln 10} \int_0^R \rho_{ue} \left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) r dr - \frac{20}{\ln 10} \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho_{ue} r dr d\phi \quad (3.42)$$

Sử dụng công thức tích phân từng phần, ta có:

$$\left(\frac{r}{\sqrt{r^2 + h^2}} \right) r dr = \frac{1}{2} r d \left(\sqrt{r^2 + h^2} \right) = \frac{1}{2} \left[d \left(r \sqrt{r^2 + h^2} \right) - \sqrt{r^2 + h^2} dr \right] \quad (3.43)$$

Từ đó, suy ra:

$$\begin{aligned} I &= \frac{20\rho_{ue}\pi}{\ln 10} \left[r \sqrt{r^2 + h^2} \right]_0^R \\ &\quad - \frac{20\rho_{ue}\pi}{\ln 10} \left[\frac{r}{2} \sqrt{r^2 + h^2} + \frac{h^2}{2} \ln \left(r + \sqrt{r^2 + h^2} \right) \right]_0^R - \frac{20\rho_{ue}\pi R^2}{\ln 10} \end{aligned} \quad (3.44)$$

Rút gọn, ta được:

$$I = \frac{20\rho_{ue}\pi}{\ln 10} \left[\frac{R}{2} \sqrt{R^2 + h^2} - \frac{h^2}{2} \ln \left(\frac{R + \sqrt{R^2 + h^2}}{h} \right) - R^2 \right] \quad (3.45)$$

Kết hợp với biểu thức (3.29), suy ra:

$$I = \frac{20\rho_{ue}\pi R^2}{\ln 10} \left[\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi\theta_{op}}{180}\right) - \frac{\tan^2\left(\frac{\pi\theta_{op}}{180}\right)}{2} \ln \left(\frac{1 + \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi\theta_{op}}{180}\right)}}{\tan\left(\frac{\pi\theta_{op}}{180}\right)} \right) - 1 \right] \quad (3.46)$$

Sử dụng kết quả $\theta_{app} \approx \theta_{op}$ được tính theo các tham số môi trường a, b, A , với bán kính R xác định trước (theo mật độ lưu lượng người dùng) và giả thiết các UE phân bố đều, có các kết nối trực giao với UAV, ta tính được độ lợi công suất tổng cộng của toàn bộ cell khi sử dụng UAV thay thế trạm cơ sở mặt đất như sau:

$$G_{PL} = \rho_{ue}\pi R^2 |A| \left(1 - \frac{1}{1 + a \exp(ba)} \right) + I \quad (3.47)$$

Đặt:

$$N = \rho_{ue}\pi R^2 \quad (3.48)$$

là số lượng UE trong cell. Giá trị N được thiết kế phụ thuộc vào tài nguyên thời gian và tần số trực giao của UAV, và không phụ thuộc trực tiếp vào bán kính cell. Khi đó, biểu thức (3.47) có thể viết lại thành:

$$G_{PL} = N \left\{ |A| \left(1 - \frac{1}{1 + a \exp(ba)} \right) + \frac{20}{\ln 10} \left[\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi\theta_{app}}{180}\right) - \frac{\tan^2\left(\frac{\pi\theta_{app}}{180}\right)}{2} \ln \left(\frac{1 + \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi\theta_{app}}{180}\right)}}{\tan\left(\frac{\pi\theta_{app}}{180}\right)} \right) - 1 \right] \right\} \quad (3.49)$$

Biểu thức (3.49) cho thấy độ lợi công suất G_{PL} trên toàn bộ cell khi thay thế trạm cơ sở mặt đất bằng UAV là một hàm của các tham số môi trường a, b, A , đồng thời tỷ lệ tuyến tính với số lượng người dùng N trong cell.

3.1.4. Đánh giá kết quả

Phần này so sánh kết quả thu được từ mô hình gần đúng được đề xuất với kết quả mô phỏng máy tính được báo cáo trong các nghiên cứu [5, 88] tại tần số $f = 2000$ MHz. Các tham số môi trường được sử dụng bao gồm: Đô thị dày đặc ($a = 0.5$, $b = 300$, $A = 20$), Đô thị ($a = 0.3$, $b = 500$, $A = 15$), Đô thị cao tầng ($a = 0.5$, $b = 300$, $A = 50$), và Ngoại ô ($a = 0.1$, $b = 750$, $A = 8$). Các kết quả

so sánh được trình bày trong Bảng 3.1. Kết quả định lượng cho thấy biểu thức

Bảng 3.1. Góc nâng tối ưu và gần đúng của UAV ($f = 2000$ MHz)

Môi trường	a	b	η_{LoS}	η_{NLoS}	θ_{OP}	θ_{app}	Error	%
Đô thị dày đặc	15	0.16	1.6	23	49.3672	50.8706	-1.5034	3%
Đô thị	11	0.18	1	20	41.7188	41.9057	-0.1869	0.4%
Đô thị cao tầng	5	0.3	2.3	34	26.4219	26.0682	0.3537	1.3%
Ngoại ô	5	0.3	0.1	21	25.0313	24.3710	0.6603	2.8%

dạng đóng cho góc nâng tối ưu sử dụng mô hình gần đúng đề xuất cho sai số nhỏ hơn 3% so với kết quả mô phỏng trong [5, 88]. Dựa trên biểu thức này, hai biểu thức dạng đóng bổ sung, dùng để tính bán kính phủ sóng của UAV và mức tăng công suất của cell khi triển khai UAV-BS cũng được đưa ra. Tính đúng đắn của các biểu thức này đã được kiểm chứng thông qua so sánh với kết quả mô phỏng tương ứng trong bảng 3.1.

Bảng 3.2. Độ tăng công suất của BS-UAV ($f = 2000$ MHz)

Môi trường	a	b	η_{LoS}	η_{NLoS}	θ_{app}	Độ lợi công suất (dB)
Đô thị dày đặc	15	0.16	1.6	23	50.8706	$N \times 14.5904$
Đô thị	11	0.18	1	20	41.9057	$N \times 12.5564$
Đô thị cao tầng	5	0.3	2.3	34	26.0682	$N \times 24.9739$
Ngoại ô	5	0.3	0.1	21	24.3710	$N \times 14.7230$

Kết quả trình bày trong Bảng 3.2 cho thấy mức tăng công suất khi thay thế trạm cơ sở cố định bằng UAV-BS phụ thuộc chặt chẽ vào các đặc điểm môi trường, với sự khác biệt rõ rệt giữa khu vực thành thị và ngoại ô. Cụ thể, mức tăng công suất có xu hướng cao hơn trong các môi trường có giá trị tham số A lớn. Điều này phản ánh đặc trưng của các môi trường đô thị cao tầng, nơi tồn tại sự chênh lệch đáng kể giữa hệ số suy hao của đường truyền thẳng η_{LoS} và không truyền thẳng η_{NLoS} . Khác với các nghiên cứu trước chủ yếu sử dụng nghiệm số hoặc khai triển Taylor, luận án này đề xuất một mô hình xấp xỉ tuyến tính dựa trên hình học của hàm mục tiêu, cho phép thu được nghiệm dạng đóng với sai số nhỏ hơn 3% trong nhiều môi trường thực tế.

Từ mô hình xấp xỉ tuyến tính được xây dựng trong mục này, bài toán xác định góc ngẩng tối ưu của UAV trong hệ thống truyền thông không dây đã được chuyển đổi từ một bài toán phi tuyến phức tạp sang dạng có thể phân tích giải

tích. Nghiệm thu được cho phép làm rõ vai trò của các tham số môi trường truyền dẫn và ngưỡng suy hao cho phép trong việc quyết định cấu hình hình học của hệ thống truyền thông sử dụng UAV. Trên cơ sở góc ngưỡng tối ưu, các biểu thức giải tích cho độ cao bay tối ưu và bán kính vùng phủ sóng có thể được suy ra một cách trực tiếp, tạo nền tảng cho bài toán quy hoạch và triển khai UAV trong vai trò trạm cơ sở di động.

3.2. UAV đóng vai trò trạm chuyển tiếp di động (UAV-relay)

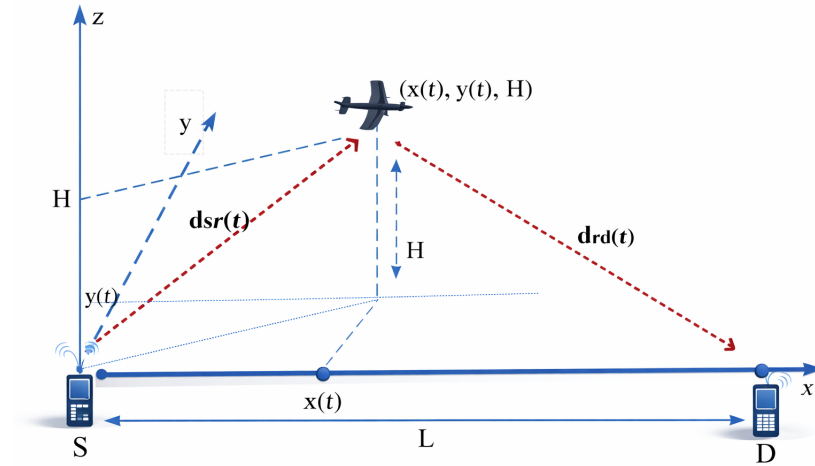
3.2.1. Động lực nghiên cứu

Trong kịch bản UAV đóng vai trò là trạm chuyển tiếp di động, tính linh hoạt cao về vị trí cho phép hệ thống thích nghi tốt với điều kiện môi trường và cấu trúc mạng. Tuy nhiên, đặc tính di động này cũng đặt ra thách thức trong việc duy trì chất lượng dịch vụ (QoS) ổn định theo thời gian. Theo nghiên cứu của Zeng và các cộng sự, thông lượng của hệ thống chuyển tiếp sử dụng UAV có thể vượt trội so với trạm chuyển tiếp cố định. Đồng thời, với một ràng buộc độ trễ truyền dẫn cho trước, việc tăng tốc độ bay của UAV có thể giúp cải thiện thông lượng chuyển tiếp. Mặc dù vậy, hệ thống UAV relay tồn tại nhược điểm là thông lượng không liên tục theo thời gian do sự thay đổi vị trí của UAV, dẫn đến hiện tượng truyền dẫn gián đoạn. Để giảm thiểu ảnh hưởng này, một giải pháp thường được áp dụng là sử dụng bộ đệm tại phía thu nhằm tích trữ dữ liệu trong các khoảng thời gian kênh truyền thuận lợi. Tuy nhiên, việc tích lũy dữ liệu lớn có thể gây quá tải bộ đệm và làm tăng độ trễ. Để khắc phục hạn chế này, có thể triển khai nhiều UAV hoạt động theo mô hình nối tiếp (multi-UAV relaying), qua đó duy trì tính liên tục của liên kết truyền thông và cải thiện hiệu năng tổng thể của hệ thống [74, 114].

Mặt khác, tổng quan nghiên cứu tại chương 1 cho thấy các công trình hiện nay chủ yếu sử dụng phương pháp mô phỏng hoặc tìm kiếm heuristic để tìm kiếm vận tốc nhằm tối đa hóa tốc độ dữ liệu. Kết quả tối ưu chỉ nhận được qua mô phỏng mà không có các công thức giải tích trong các kịch bản khác nhau để hỗ trợ thiết kế. Nhằm giải quyết vấn đề này, luận án này đề xuất việc điều chỉnh tốc độ thông qua các biểu thức giải tích dạng đóng để xác định ngưỡng vận tốc phù hợp. Việc sử dụng các biểu thức tường minh này không chỉ giúp giảm thiểu độ phức tạp tính toán so với các thuật toán lặp, mà còn cho phép hệ

thống phản ứng linh hoạt với sự thay đổi của môi trường. Mục tiêu trọng tâm của nghiên cứu là đạt được sự ổn định của thông lượng theo thời gian, đảm bảo chất lượng truyền dẫn không bị gián đoạn hoặc sụt giảm đột ngột trong suốt hành trình bay của UAV.

3.2.2. Mô hình hệ thống



Hình 3.3. Mô hình hệ thống UAV - relay

Trong kịch bản được xét ở mục này, UAV thực hiện chức năng chuyển tiếp với mô hình truyền thông được biểu diễn trên hình 3.3. Việc đưa yếu tố chuyển động vào mô hình nhằm phản ánh sát hơn điều kiện vận hành thực tế của các hệ thống truyền thông sử dụng UAV, nơi UAV thường phải thay đổi vị trí để duy trì sự thích nghi với sự phân bố người dùng hoặc đáp ứng các yêu cầu dịch vụ theo thời gian.

Trong Hình 3.3, nguồn phát (S) và nguồn thu (D) được đặt tại các vị trí cố định trên mặt đất và cách nhau một khoảng L (mét). Với giả định rằng không có liên kết trực tiếp giữa S và D, hoặc liên kết này là không đáng kể, cần sử dụng một bộ chuyển tiếp để hỗ trợ liên lạc giữa S và D. Trong nghiên cứu này, giả thiết rằng các UAV-Relay, nguồn và đích đều được trang bị một ăng-ten duy nhất.

Tất cả UAV bay ở độ cao cố định H (mét) trong một khoảng thời gian hữu hạn T (giây). Mỗi UAV có thể bị trễ một khoảng thời gian nhất định so với các UAV khác. Không mất tính tổng quát, trong hệ tọa độ Descartes, giả sử S có

tọa độ $(0, 0, 0)$ và D nằm tại vị trí $(L, 0, 0)$. Tọa độ của nút chuyển tiếp R thay đổi theo thời gian và được biểu diễn dưới dạng $(x(t), y(t), H)$, với $0 \leq t \leq T$.

Để đơn giản, quỹ đạo của UAV-Relay được xem là đã biết trước và các kênh truyền thông từ S đến R và từ R đến D được chi phối bởi các liên kết LoS [67]. Trong mô hình suy hao không gian tự do, hệ số kênh từ S đến R tại thời điểm t được biểu diễn như sau:

$$h_{SR}(t) = \frac{\beta_0}{H^2 + x^2(t) + y^2(t)}. \quad (3.50)$$

Trong đó, β_0 là hệ số công suất kênh tại khoảng cách tham chiếu $d_0 = 1$ m. Giả sử $p_s(t)$ là công suất truyền của nguồn S tại thời điểm t , tốc độ truyền tối đa từ S đến R (đơn vị: bit/s/Hz) được xác định như sau:

$$R_s(t) = \log_2 \left(1 + \frac{p_s(t) h_{SR}(t)}{\sigma^2} \right) = \log_2 \left(1 + \frac{p_s(t) \gamma_0}{H^2 + x^2(t) + y^2(t)} \right). \quad (3.51)$$

trong đó σ^2 là công suất nhiễu và $\gamma_0 = \frac{\beta_0}{\sigma^2}$.

Tương tự, tốc độ truyền tối đa từ R đến D được biểu diễn như sau:

$$R_r(t) = \log_2 \left(1 + \frac{p_r(t) \gamma_0}{H^2 + (L - x(t))^2 + y^2(t)} \right). \quad (3.52)$$

Trong đó $p_r(t)$ là công suất truyền từ R đến D tại thời điểm t . Do dữ liệu trong bộ đệm của relay tuân theo tính nhân quả, hệ thống phải thỏa mãn ràng buộc thông tin nhân quả:

$$\int_0^T R_r(t) dt \leq \int_0^T R_s(t) dt. \quad (3.53)$$

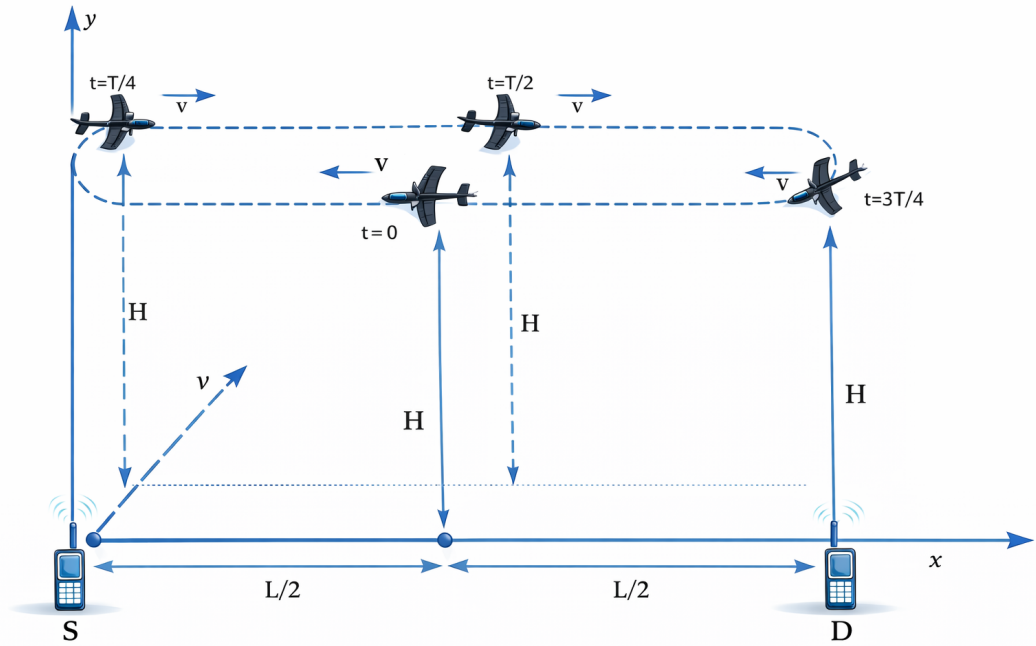
Theo bản chất của tính nhân quả và từ các biểu thức (3.51) và (3.52), relay R sẽ hoạt động như một bộ thu dữ liệu khi khoảng cách từ S đến R nhỏ hơn khoảng cách từ R đến D. Ngược lại, R sẽ đóng vai trò là bộ truyền dữ liệu khi R gần D hơn.

Thông lượng của relay được xác định như sau:

$$\Omega = \int_0^T R_r(t) dt. \quad (3.54)$$

Ổn định và cải thiện thông lượng là các yếu tố quan trọng trong truyền thông không dây, đặc biệt đối với các hệ thống truyền thông chuyển tiếp [50]. Do đó, để cải thiện thông lượng của hệ thống UAV-relay, nghiên cứu sinh đề xuất sử dụng N relay UAV di động với $N > 1$. Cụ thể, UAV thứ i được định vị tại vị trí $(\frac{iL}{N}, 0, H)$, với $i = 0, 1, \dots, N - 1$, và bắt đầu xuất phát tại thời điểm $(t - \frac{iT}{N})$. Điều này có nghĩa là mỗi UAV sẽ khởi hành trễ hơn UAV trước đó một khoảng thời gian $\frac{T}{N}$.

Về mặt lý thuyết, khi N tăng thì thông lượng hệ thống cũng tăng; tuy nhiên, khi N lớn, độ phức tạp điều khiển UAV và chi phí triển khai hệ thống cũng tăng đáng kể. Do đó, không mất tính tổng quát, ta chọn $N = 4$ cho hệ thống đề xuất. Khi đó, vị trí của các UAV lần lượt là $(\frac{iL}{4}, 0, H)$, với $i = 0, 1, 2, 3$.



Hình 3.4. Quỹ đạo của UAV

Giả sử quỹ đạo của relay UAV là đường thẳng từ S đến D và quay trở lại từ D đến S, do đó $0 \leq x(t) \leq L$ như minh họa trong Hình 3.4. Khi đó, biểu thức thông lượng có thể được viết lại như sau:

$$\Omega(V(t)) = \int_0^T \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (V(t)t)^2} \right) dt \quad (3.55)$$

Trong đó $V(t)$ là vận tốc của relay UAV tại thời điểm t .

Như vậy, trong một chu kỳ thời gian T , bốn relay UAV đều lần lượt hoạt động như bộ thu dữ liệu và sau đó là bộ truyền dữ liệu. Tuy nhiên, trong số đó, chỉ có hai relay UAV tại các vị trí $(0, 0, H)$ và $(0, \frac{L}{4}, H)$ hoạt động như bộ thu dữ liệu, do khoảng cách từ hai relay này đến nguồn S gần hơn so với các relay còn lại.

Do đó, thông lượng của hệ thống được xác định dựa trên hai relay UAV này như sau:

$$\Omega_{\text{sum}} = \sum_{i=1}^2 \Omega_i(V_i(t)) \quad (3.56)$$

Gọi $\delta(t)$ là phương sai của thông lượng đầu cuối. Điều kiện để đạt được thông lượng ổn định của hệ thống được biểu diễn như sau:

$$\min_{V(t)} \sigma(V(t)) = \min_{V(t)} \left(\Omega_{\text{sum}}(V(t)) - \overline{\Omega_{\text{sum}}(V(t))} \right) \quad (3.57)$$

Vận tốc tối ưu thỏa mãn điều kiện ổn định thông lượng được xác định bởi:

$$V_{\text{opt}}(t) = \arg \min_{V(t)} \sigma(V(t)) \quad (3.58)$$

3.2.3. Vận tốc tối ưu

Dựa trên các thông số kỹ thuật từ mô hình hệ thống và đặc tính vật lý của kênh truyền đã được thiết lập ở các phần trước, nghiên cứu này tiến hành xây dựng bài toán tối ưu hóa vận tốc của UAV. Mục tiêu cốt lõi của bài toán là tìm kiếm một điểm cân bằng tối ưu cho thông lượng dữ liệu thu thập được trong suốt một chu kỳ hoạt động, tránh tình trạng thông lượng bị biến động quá lớn do tác động của hiệu ứng di động.

Bài toán được xét trong kịch bản UAV chuyển động thẳng đều với vận tốc không đổi trên từng phân đoạn hành trình. Việc giả định UAV duy trì vận tốc không đổi trên mỗi phân đoạn hành trình giúp đơn giản hóa bài toán và chuyển đổi các biến số thời biến về dạng tường minh. Đây là tiền đề để thiết lập các biểu thức giải tích và tìm ra nghiệm tối ưu từ phương trình (3.58) một cách trực tiếp. Thay vì phụ thuộc vào các phương pháp mô phỏng lặp đi lặp lại vốn tiêu

tổn tài nguyên tính toán, cách tiếp cận dựa trên biểu thức tường minh này cung cấp một cơ sở định lượng để xác định ngưỡng vận tốc tối hạn. Kết quả thu được không chỉ có ý nghĩa về mặt lý thuyết mà còn là công cụ hỗ trợ cho quá trình thiết kế, lập kế hoạch quỹ đạo và triển khai các hệ thống UAV trong thực tế.

Để giải phương trình (3.58), ta xét khoảng thời gian từ 0 đến $\frac{T}{2}$. Trong khoảng này, các UAV chuyển động đều với vận tốc không đổi $V(t) = v$. Hai UAV thực hiện thu dữ liệu từ nguồn S với tốc độ tại thời điểm t được biểu diễn như sau:

$$R_{SD}(t) = \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (vt)^2} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (v(t - \frac{T}{4}))^2} \right). \quad (3.59)$$

Giả sử tại thời điểm $t = 0$, UAV thứ nhất bắt đầu truyền dữ liệu, thì đến thời điểm $t = \frac{T}{4}$, UAV thứ hai sẽ bắt đầu truyền dữ liệu. Trong mô hình này, tổng thông lượng của hai UAV liên tiếp có thể được ước tính như sau:

$$\begin{aligned} 2 \int_0^{\frac{T}{2}} \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2} \right) dt &\geq \int_0^{\frac{T}{2}} \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (vt)^2} \right) dt \\ &\quad + \int_0^{\frac{T}{2}} \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (v(t - \frac{T}{4}))^2} \right) dt. \end{aligned} \quad (3.60)$$

Trong đó $T = \frac{L}{v}$.

Để đạt được thông lượng đồng đều, vận tốc tối ưu của UAV thỏa mãn:

$$\begin{aligned} \min &\left(\int_0^{\frac{T}{2}} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (vt)^2} \right) - K \right] dt \right. \\ &\quad \left. + \int_0^{\frac{T}{2}} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (v(t - \frac{T}{4}))^2} \right) - K \right] dt \right) \end{aligned} \quad (3.61)$$

Với:

$$K = \mathbb{E} \left[\log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (vt)^2} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + (v(t - \frac{T}{4}))^2} \right) \right]. \quad (3.62)$$

Để đơn giản, K có thể được xấp xỉ như sau:

$$K \approx \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right). \quad (3.63)$$

Khi đó, (3.61) tương đương với:

$$2 \left(\int_0^{\frac{L}{2v}} \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + \left(\frac{L}{2} - vt\right)^2} \right) dt + \left(\frac{L}{2} - \frac{L}{2v} \right) \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2} \right) \right) \approx \frac{L}{2} K. \quad (3.64)$$

Giải phương trình (3.64), ta thu được vận tốc tối ưu:

$$v^* = \frac{2 \left(\frac{LK}{2} - I \right)}{K - \frac{K_1}{2}}. \quad (3.65)$$

Trong đó:

$$K_1 = \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2} \right) \quad (3.66)$$

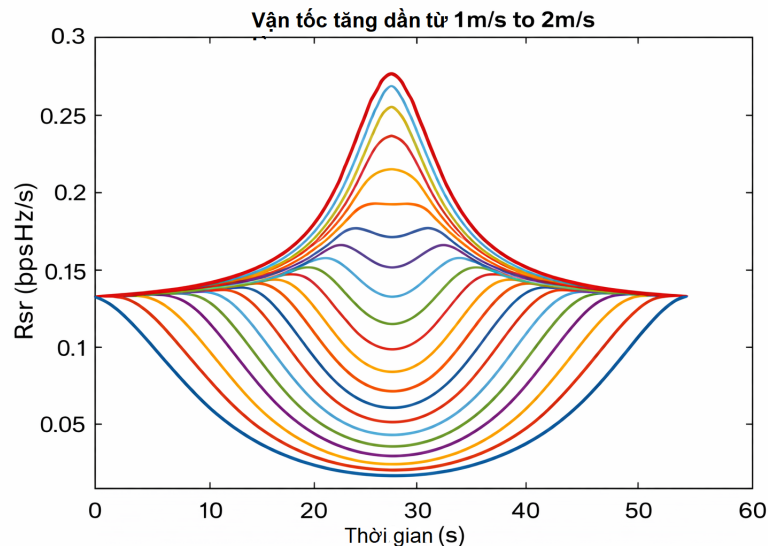
$$I = \frac{L}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P}{H^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2} \right) + P \log_2 e \left[\frac{2}{\sqrt{P + H^2}} \arctan \left(\frac{L/2}{\sqrt{P + H^2}} \right) - \frac{2}{H} \arctan \left(\frac{L/2}{H} \right) \right] \quad (3.67)$$

3.2.4. Kết quả mô phỏng

Để xác thực thiết kế chuyển tiếp di động đề xuất, phần này thực hiện mô phỏng kịch bản đã trình bày trong Mục 3.2.2 và 3.2.3, với các tham số hệ thống được liệt kê trong Bảng 3.3; quá trình mô phỏng được triển khai trên phần mềm Matlab R2021a.

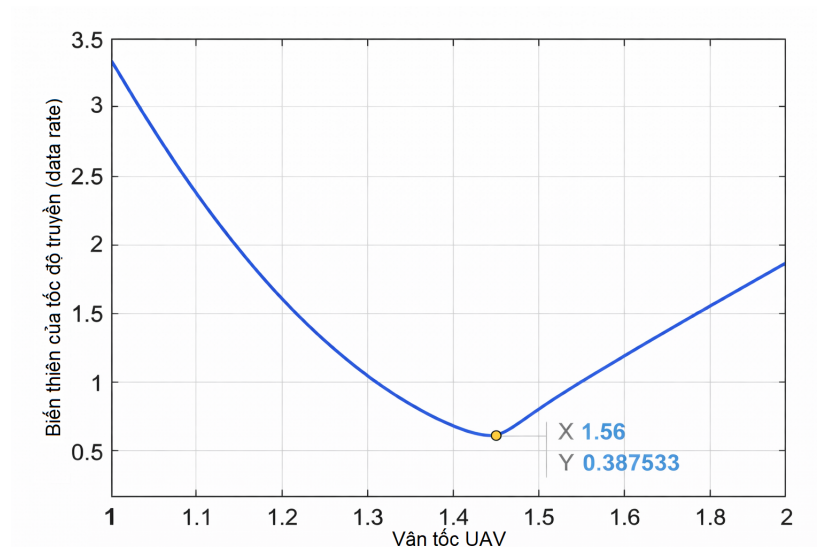
Bảng 3.3. Các tham số của hệ thống dùng trong mô phỏng

Các tham số	Giá trị
Khoảng cách L giữa máy phát (S) và máy thu (D)	1000 m
Tỷ số SNR tại khoảng cách tham chiếu $d_0 = 1$ m (γ_0)	80 dB
Độ cao UAV (H)	100 m
Công suất phát tối đa tại S (P_s)	10 dBm
Công suất phát tối đa tại UAV-Relay (P_r)	10 dBm
Băng thông (B)	20 MHz



Hình 3.5. Ảnh hưởng của vận tốc UAV đến tốc độ truyền tin

Hình 3.5 minh họa mối quan hệ động giữa tốc độ truyền từ nguồn đến relay khi vận tốc của UAV-Relay tăng từ 1 m/s đến 2 m/s. Có thể thấy rằng, khi vận tốc lớn thì tốc độ truyền lớn đồng thời mức độ biến thiên cũng cao, để đạt sự ổn định của tốc độ truyền dẫn, cần lựa chọn vận tốc chuyển động của UAV một cách phù hợp.



Hình 3.6. Ảnh hưởng của tốc độ đến độ lệch của thông lượng

Hình 3.6 minh họa sự biến thiên thông lượng theo tốc độ di chuyển của UAV. Để đảm bảo thông lượng đồng đều trong suốt quá trình bay, độ lệch thông lượng cần được duy trì ở mức tối thiểu. Kết quả mô phỏng dựa trên phương

trình 3.61 cho thấy tốc độ UAV tối ưu đạt 1,56 m/s. Trong khi đó, phương pháp gần đúng sử dụng biểu thức đề xuất (phương trình 3.65) cho kết quả xấp xỉ 1,4986 m/s, với sai số tương đối nhỏ, khoảng 0,061.

Đáng chú ý, trong khi phương pháp dựa trên phương trình 3.61 đòi hỏi chi phí tính toán cao do cần nhiều vòng lặp để hội tụ đến nghiệm tối ưu, thì biểu thức đề xuất trong phương trình 3.65 cung cấp một giải pháp thay thế hiệu quả với độ phức tạp tính toán thấp hơn đáng kể.

3.3. Kết luận chương

Chương 3 đã nghiên cứu hiệu quả truyền thông của UAV trong hai vai trò chính là trạm cơ sở và trạm chuyển tiếp di động.

Đối với mô hình UAV-BS, luận án đã xây dựng mô hình hệ thống dựa trên kênh truyền A2G với xác suất đường truyền LoS phụ thuộc vào góc ngẩng. Trên cơ sở đó, ảnh hưởng của các tham số hình học như góc ngẩng, độ cao bay và bán kính vùng phủ đến chất lượng liên kết đã được phân tích. Một biểu thức gần đúng dạng đóng cho góc ngẩng tối ưu đã được thiết lập, từ đó cho phép xác định trực tiếp độ cao triển khai và phạm vi phủ sóng của UAV. Kết quả đánh giá cho thấy mô hình gần đúng có sai số nhỏ và có thể sử dụng hiệu quả trong bài toán quy hoạch vùng phủ. Ngoài ra, việc sử dụng UAV làm trạm cơ sở cũng cho thấy khả năng cải thiện đáng kể hiệu quả công suất so với trạm cơ sở mặt đất trong nhiều môi trường truyền dẫn khác nhau.

Đối với mô hình UAV-Relay, chương đã xem xét ảnh hưởng của vận tốc di chuyển đến thông lượng hệ thống. Trong điều kiện kênh truyền thay đổi theo vị trí, vận tốc của UAV có tác động trực tiếp đến độ ổn định của kênh và hiệu quả truyền dữ liệu. Trên cơ sở phân tích này, luận án đã đề xuất các biểu thức giải tích để xác định ngưỡng vận tốc phù hợp, nhằm duy trì chất lượng dịch vụ ổn định và tránh sự sụt giảm thông lượng đột ngột trong suốt hành trình bay.

Nhìn chung, các kết quả trình bày trong chương 3 đã làm rõ vai trò của các tham số triển khai và tham số động học đối với hiệu quả truyền thông của UAV. Đây là cơ sở để tiếp tục nghiên cứu các bài toán tối ưu quỹ đạo, phân bổ công suất và quản lý tài nguyên trong các hệ thống truyền thông sử dụng UAV.

Tuy nhiên, mọi phân tích về vùng phủ và chất lượng liên kết trong chương

này đều dựa trên giả thiết nút UAV được cấp phát tài nguyên phổ tần đầy đủ và ổn định. Trong thực tế, với sự bùng nổ của các thiết bị không dây, phổ tần đã trở thành một tài nguyên khan hiếm và đắt đỏ. Các hệ thống UAV thường phải hoạt động trong môi trường phổ tần dùng chung hoặc phải chia sẻ tài nguyên với các mạng mặt đất hiện có. Khi đó, hiệu năng thực tế của hệ thống không chỉ bị giới hạn bởi các tham số hình học và động học, mà còn phụ thuộc chặt chẽ vào chiến lược quản lý và chia sẻ phổ tần.

Vì vậy, để mở rộng các kết quả đã đạt được sang các kịch bản mạng thực tế hơn, việc nghiên cứu các cơ chế chia sẻ phổ hiệu quả là cần thiết. Đây cũng chính là nội dung trọng tâm được trình bày trong Chương 4 của luận án.

CHƯƠNG 4.

TRUYỀN THÔNG NHẬN THỨC ĐƯỜNG LÊN CHO MẠNG UAV SỬ DỤNG KỸ THUẬT RSMA

Với định hướng tối ưu hóa truy cập và chia sẻ phổ tần trong mạng UAV, nội dung chương này trình bày kết quả nghiên cứu về truyền thông nhận thức đường lên cho UAV trong bối cảnh kết hợp vô tuyến nhận thức và kỹ thuật RSMA. Nội dung được tổng hợp từ các kết quả nghiên cứu của tác giả đã công bố trong công trình [CT5].

4.1. Động lực nghiên cứu

Sự phát triển nhanh chóng của các hệ thống thông tin không dây thế hệ mới đang đặt ra những yêu cầu ngày càng khắt khe về hiệu năng phổ tần, khả năng kết nối linh hoạt và đảm bảo chất lượng dịch vụ (QoS) cho các người dùng ưu tiên [86]. Trong bối cảnh đó, UAV ngày càng được tích hợp sâu vào các hệ thống thông tin vô tuyến, không chỉ với vai trò nền tảng chuyển tiếp mà còn như các thực thể truyền thông chủ động, trực tiếp tham gia vào quá trình truy nhập và chia sẻ tài nguyên vô tuyến. Tuy nhiên, việc tích hợp UAV vào mạng di động hiện hữu cũng đồng thời làm gia tăng đáng kể áp lực lên tài nguyên phổ tần vốn đã hạn chế, từ đó đặt ra những thách thức mới trong thiết kế các cơ chế truy nhập phổ hiệu quả và an toàn [75, 114].

Một đặc điểm quan trọng của các hệ thống UAV hiện nay là chưa tồn tại một dải phổ tần được cấp phép riêng, cố định và thống nhất cho truyền thông UAV trên quy mô rộng. Trong thực tế, UAV thường phải khai thác các băng tần đã được cấp phép cho các hệ thống mặt đất, hoặc sử dụng các băng tần không cấp phép vốn có mức nhiễu cao và khó đảm bảo QoS. Điều này dẫn đến nguy cơ gây nhiễu nghiêm trọng cho các người dùng được cấp phép, đặc biệt trong các kịch bản mật độ UAV cao hoặc khi UAV hoạt động gần các trạm gốc mặt đất [75].

Vì lý do đó, mạng CR-UAV xuất hiện như một giải pháp tất yếu cho truyền

thông UAV. Bằng cách cho phép các UAV đóng vai trò người dùng thứ cấp, CR cung cấp một cơ chế truy nhập phổ linh hoạt, trong đó UAV có thể khai thác phổ tần một cách cơ hội dựa trên trạng thái hoạt động của PU, đồng thời vẫn đảm bảo các ràng buộc QoS nghiêm ngặt đối với hệ thống ưu tiên. Cách tiếp cận này không chỉ giúp tận dụng hiệu quả các khoảng phổ nhàn rỗi mà còn tạo điều kiện cho việc triển khai UAV ở quy mô lớn mà không cần tái quy hoạch phổ tần phức tạp [41, 93].

Tuy nhiên, khi số lượng UAV tăng lên, các cơ chế CR truyền thống dựa trên truy nhập OMA thường không còn đủ linh hoạt, dẫn đến hiệu năng phổ tần thấp và khả năng phục vụ SU bị hạn chế. Do đó, việc kết hợp CR với các kỹ thuật truy nhập đa người dùng phi trực giao tiên tiến trở thành một hướng nghiên cứu có ý nghĩa quan trọng.

NOMA đã được đề xuất như một kỹ thuật truy nhập hiệu quả nhằm nâng cao hiệu suất phổ bằng cách cho phép nhiều người dùng cùng chia sẻ một khối tài nguyên thông qua phân bổ công suất và kỹ thuật SIC. Trong các hệ thống CR, NOMA còn mang lại lợi thế trong việc cho phép SU truyền đồng thời với PU, miễn là mức nhiễu gây ra cho PU được kiểm soát phù hợp. Nhờ đó, CR-NOMA đã thu hút được sự quan tâm đáng kể trong những năm gần đây như một giải pháp tiềm năng cho truyền thông UAV [25].

Tuy nhiên, các nghiên cứu gần đây chỉ ra rằng NOMA không khai thác hết toàn bộ vùng dung lượng đạt được của kênh đa truy nhập, đặc biệt trong các kịch bản yêu cầu QoS không đối xứng giữa PU và SU hoặc khi điều kiện kênh truyền của các thực thể biến động mạnh do sự di động của UAV. Cụ thể, với một thứ tự SIC cố định, NOMA chỉ có thể đạt được một phần biên của vùng dung lượng, trong khi các điểm vận hành nằm bên trong hoặc gần biên còn lại không thể được hỗ trợ một cách hiệu quả. Về mặt hình học, điều này tạo ra các khoảng trống dù khả thi mà NOMA truyền thống vẫn buộc phải từ chối yêu cầu truy nhập của người dùng thứ cấp để đảm bảo an toàn cho người dùng ưu tiên. Điều này dẫn đến việc nhiều cặp PU-SU mặc dù về mặt lý thuyết là khả thi nhưng vẫn bị loại bỏ khi áp dụng CR-NOMA truyền thống, làm giảm đáng kể số lượng UAV có thể được chấp nhận truy nhập phổ [27, 122].

RSMA được xem là một kỹ thuật tổng quát hơn, trong đó thông điệp của

người dùng được chia thành các thành phần chung và riêng, cho phép điều khiển linh hoạt mức độ nhiễu được giải mã và mức độ nhiễu được xem như tạp âm. Nhờ đó, RSMA có khả năng khai thác đầy đủ vùng dung lượng của kênh đa truy nhập, bao gồm cả những miền mà NOMA không thể hỗ trợ [34]. Trong kịch bản CR, việc tích hợp RSMA không chỉ giúp mở rộng miền ghép cặp PU–SU khả thi mà còn cho phép thiết kế các chiến lược giải mã linh hoạt hơn, qua đó đảm bảo QoS cho PU đồng thời cải thiện đáng kể hiệu năng của SU [56].

Xuất phát từ hai vấn đề chính nêu trên, chương này tập trung đề xuất và phân tích một giải pháp CR-RSMA cho đường lên, nhằm cung cấp một lời giải cho bài toán chia sẻ phổ tần hiệu quả và an toàn trong các hệ thống truyền thông tích hợp UAV.

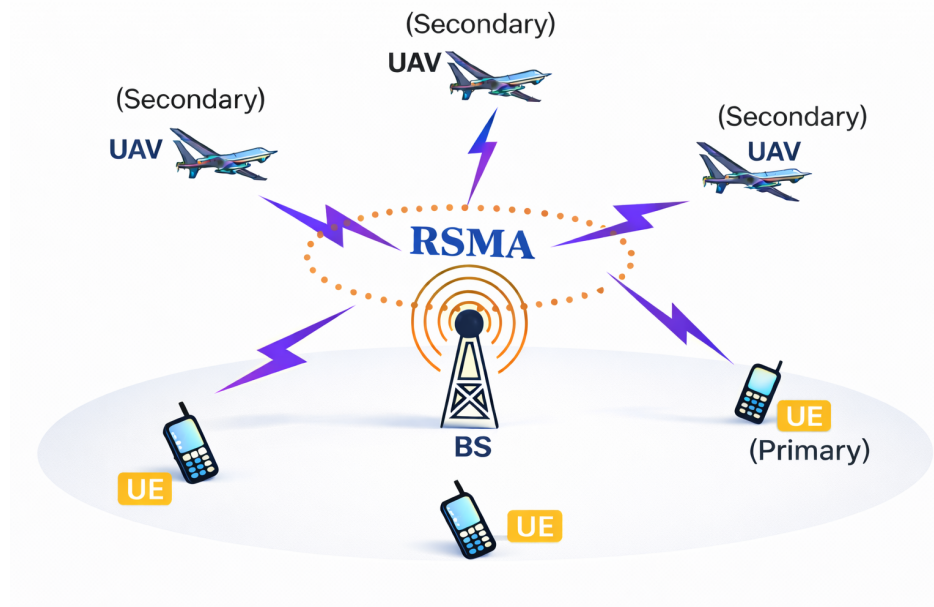
4.2. Mô hình hệ thống

4.2.1. Kiến trúc mạng truyền thông mặt đất và các UAV

Hệ thống được xét bao gồm một trạm cơ sở trung tâm, một tập các người dùng sơ cấp là các thiết bị di động mặt đất được cấp phép sử dụng phổ tần, và một tập các người dùng thứ cấp là các UAV hoạt động trên không. Các UAV đóng vai trò người dùng thứ cấp, truy nhập phổ tần theo cơ chế cơ hội, trong khi các PU duy trì quyền ưu tiên tuyệt đối đối với tài nguyên vô tuyến. Hình 4.1 minh họa kiến trúc logic của hệ thống được xét. Các phân tích trong chương này tập trung vào hành vi chia sẻ phổ và vùng dung lượng đạt được, do đó không xét đến các tham số hình học cụ thể như vị trí hay quỹ đạo UAV.

Trong kiến trúc này, các PU và UAV có thể đồng thời truyền tín hiệu lên BS trên cùng một khối tài nguyên vô tuyến, bao gồm cùng băng tần và khe thời gian, dưới sự điều phối của cơ chế vô tuyến nhận thức. Trạm cơ sở đóng vai trò trung tâm trong việc thu nhận, xử lý và tách tín hiệu chồng chập từ nhiều người dùng thông qua kỹ thuật RSMA, cho phép quản lý linh hoạt nhiễu đa người dùng trong môi trường chia sẻ phổ.

PU được ưu tiên tuyệt đối về chất lượng dịch vụ, do đó mọi hoạt động truy nhập phổ của các UAV đều phải đảm bảo không vi phạm các yêu cầu QoS tối thiểu của hệ thống ưu tiên. Với vai trò là người dùng thứ cấp, UAV chỉ được phép truyền khi các điều kiện bảo vệ PU được thỏa mãn. Cách tiếp cận này



Hình 4.1. Mô hình hệ thống CR-RSMA với UAV

phản ánh đúng bản chất của các hệ thống vô tuyến nhận thức trong thực tế, trong đó các người dùng thứ cấp phải thích nghi linh hoạt với trạng thái hoạt động của hệ thống ưu tiên, đồng thời tận dụng hiệu quả các cơ hội phổ tần sẵn có.

4.2.2. Mô hình kênh truyền và giả thiết thông tin trạng thái kênh

Các kênh truyền từ PU và SU đến BS được mô hình hóa dưới dạng kênh fading phẳng, ký hiệu lần lượt là h_0 và h_n . Các hệ số kênh này bao gồm cả suy hao đường truyền và hiệu ứng fading nhỏ, và được giả thiết là không đổi trong suốt một khối truyền. Trong trường hợp SU là UAV, mô hình kênh phản ánh đặc tính liên kết tầm nhìn thẳng LoS chiếm ưu thế, đặc biệt khi UAV hoạt động ở độ cao vừa phải và trong môi trường ít vật cản.

Trong phạm vi nghiên cứu này, trạm cơ sở được giả thiết có CSI hoàn hảo của cả PU và SU. Giả thiết này là hợp lý trong các hệ thống hiện đại, nơi CSI có thể được ước lượng thông qua các tín hiệu pilot và được sử dụng để thiết kế các chiến lược giải mã tối ưu. Việc giả thiết CSI hoàn hảo cho phép tập trung phân tích vào các giới hạn lý thuyết của hệ thống CR-RSMA, đồng thời làm rõ các đóng góp cốt lõi của mô hình đề xuất. Các kịch bản CSI không hoàn hảo có

thể được xem xét như một hướng nghiên cứu mở trong tương lai.

4.2.3. Mô hình công suất phát và tạp âm

Giả sử PU và SU truyền tín hiệu đồng thời trên cùng một băng tần. Ký hiệu x_0 và x_n lần lượt là các ký hiệu tin nhắn của PU và SU, với giả thiết

$$\mathbb{E}[|x_0|^2] = \mathbb{E}[|x_n|^2] = 1. \quad (4.1)$$

Công suất phát của PU và SU được ký hiệu tương ứng là P_0 và P_n . Tín hiệu thu được tại BS trong một khe thời gian bất kỳ được biểu diễn dưới dạng tổng chồng chập như sau:

$$y = \sqrt{P_0} h_0 x_0 + \sqrt{P_n} h_n x_n + w \quad (4.2)$$

Trong đó, w đại diện cho nhiễu Gauss trắng cộng (AWGN) tại bộ thu của BS. Để đơn giản hóa quá trình phân tích và tập trung vào ảnh hưởng của tỉ số SNR, công suất tạp âm được chuẩn hóa về đơn vị, tức là $N_0 = 1$. Khi đó, các đại lượng $P_0|h_0|^2$ và $P_n|h_n|^2$ tương ứng với SNR thu được của PU và SU tại BS khi không xét đến nhiễu liên thiết bị.

Trong kịch bản truyền thông này, sự tồn tại của nhiễu đồng kênh giữa PU và SU là không thể tránh khỏi. Cụ thể:

- Đối với PU, tín hiệu từ UAV với công suất thu $P_n|h_n|^2$ đóng vai trò là nhiễu gây hại, có khả năng làm suy giảm tốc độ truyền dẫn xuống dưới ngưỡng yêu cầu R_0 .

- Đối với SU, tín hiệu từ PU mặt đất với công suất thu $P_0|h_0|^2$ cũng tạo ra nhiễu đáng kể trong quá trình khôi phục thông điệp của UAV.

PU được giả thiết có yêu cầu tốc độ tối thiểu R_0 , phản ánh các dịch vụ ưu tiên cần được đảm bảo độ tin cậy cao. Trong khi đó, SU có yêu cầu tốc độ tối thiểu R_s , đại diện cho mức QoS chấp nhận được đối với các ứng dụng UAV như truyền dữ liệu cảm biến, hình ảnh hoặc video.

Một cặp PU-SU được xem là khả thi nếu tồn tại một chiến lược giải mã tại trạm gốc sao cho tốc độ đạt được của PU không nhỏ hơn R_0 , đồng thời tốc độ đạt được của SU không nhỏ hơn R_s . Do đó, việc thiết kế chiến lược giải mã

tại BS đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo QoS cho PU, đồng thời khai thác hiệu quả khả năng truyền của SU.

Đây là tiêu chí cơ bản để đánh giá khả năng chia sẻ phổ tần trong hệ thống vô tuyến nhận thức, và cũng là nền tảng cho việc thiết lập điều kiện ghép cặp PU-SU ở các mục tiếp theo.

4.2.4. Phát biểu bài toán

Dựa trên mô hình hệ thống đã trình bày, các câu hỏi nghiên cứu cốt lõi được đặt ra trong chương này bao gồm:

1. Với các tham số hệ thống cho trước $(P_0, P_n, h_0, h_n, R_0, R_s)$, dưới điều kiện nào một UAV có thể được chấp nhận làm SU để cùng chia sẻ tài nguyên vô tuyến với PU mà không vi phạm yêu cầu QoS của hệ thống ưu tiên?
2. Khi điều kiện ghép cặp PU-SU được thỏa mãn, trạm cơ sở cần áp dụng chiến lược giải mã và tách tín hiệu như thế nào để đảm bảo khả năng giải mã thành công cho cả PU và SU?
3. Trong các kịch bản mở rộng với nhiều PU và nhiều UAV, làm thế nào để thiết kế một cơ chế kiểm soát chấp nhận hiệu quả nhằm tối đa hóa số lượng SU được phục vụ dưới các ràng buộc QoS?

Các câu hỏi trên sẽ lần lượt được giải quyết trong các mục tiếp theo của chương, thông qua việc phân tích vùng dung lượng, thiết kế chiến lược RSMA và phát triển các thuật toán kiểm soát chấp nhận phù hợp cho hệ thống UAV-CR.

4.3. Phân tích vùng dung lượng và điều kiện ghép cặp PU-SU

Trong các hệ thống vô tuyến nhận thức, một trong những vấn đề cốt lõi là xác định khi nào một người dùng thứ cấp có thể được phép truy nhập phổ tần mà không làm ảnh hưởng đến chất lượng dịch vụ của hệ thống ưu tiên [27]. Đối với bối cảnh nghiên cứu của luận án này, vấn đề đó tương đương với việc xác định điều kiện ghép cặp khả thi giữa một PU mặt đất và một UAV - SU, khi cả hai cùng truyền đồng thời lên trạm cơ sở trên cùng một khối tài nguyên vô tuyến. Để giải quyết bài toán này một cách hệ thống, mục này tiến hành phân tích vùng dung lượng đạt được của kênh đa truy nhập đường lên và từ đó dẫn xuất điều kiện ghép cặp PU-SU dưới dạng đóng.

4.3.1. Vùng dung lượng của kênh đa truy nhập đường lên

Xét kênh đa truy nhập đường lên với hai người dùng, bao gồm một PU và một SU, cùng truyền tín hiệu đến BS. Với giả thiết CSI hoàn hảo tại BS và nhiễu AWGN có công suất được chuẩn hóa bằng 1, vùng dung lượng đạt được của hệ thống được đặc trưng bởi tập các cặp tốc độ (R_0, R_s) thỏa mãn các ràng buộc cơ bản của lý thuyết thông tin Shannon:

- Ràng buộc tốc độ cá nhân của PU:

$$R_0 \leq \log_2 (1 + P_0|h_0|^2) \quad (4.3)$$

- Ràng buộc tốc độ cá nhân của SU:

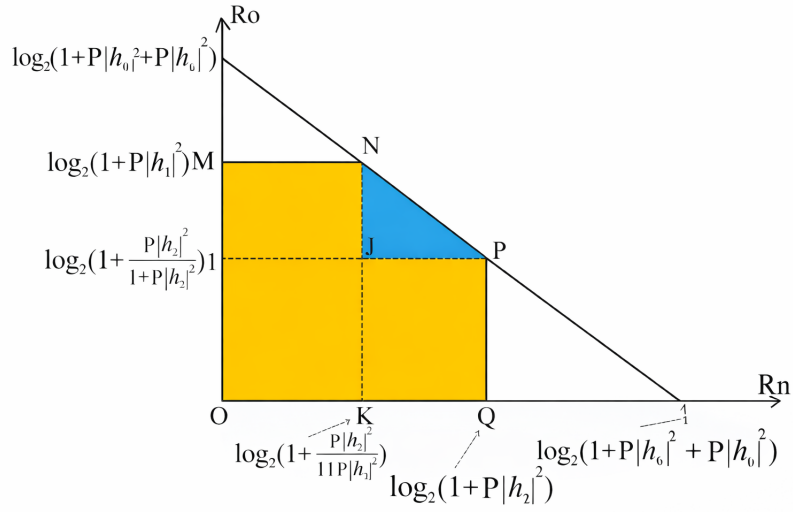
$$R_s \leq \log_2 (1 + P_n|h_n|^2) \quad (4.4)$$

- Ràng buộc tổng tốc độ (sum-rate constraint):

$$R_0 + R_s \leq \log_2 (1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2) \quad (4.5)$$

Về mặt hình học, ba ràng buộc trên xác định một vùng dung lượng lồi trong mặt phẳng (R_s, R_0) , có thể được biểu diễn dưới dạng một đa giác $OMNPQ$ như minh họa trong Hình 4.2. Mỗi đỉnh của đa giác này tương ứng với một kịch bản truyền dẫn và giải mã cụ thể tại BS. Trong đó, các đỉnh O và M lần lượt biểu diễn các trường hợp chỉ có một người dùng hoạt động, trong khi các đỉnh N và P tương ứng với hai thứ tự giải mã triệt nhiễu liên tiếp (SIC) khác nhau. Đoạn thẳng nối giữa hai đỉnh N và P biểu diễn biên tổng tốc độ tối ưu, tại đó tổng tốc độ $R_s + R_0$ đạt giá trị cực đại. Các điểm nằm trên đoạn NP phản ánh các chế độ vận hành mà hệ thống có thể phân bổ linh hoạt tài nguyên giữa PU và SU, trong khi vẫn duy trì hiệu suất phổ tối đa [100].

Tuy nhiên, trong hệ thống NOMA truyền thống, trạm cơ sở chỉ có khả năng đạt được hai điểm cực trị N (giải mã thông điệp của SU trước, sau đó đến PU) và P (giải mã thông điệp của PU trước, sau đó đến SU) thông qua cơ chế SIC thuần. Các điểm nằm trên đoạn NP nhưng không trùng với hai đỉnh



Hình 4.2. Ràng buộc vùng dung lượng trong mặt phẳng (R_s, R_0)

này không thể đạt được trực tiếp bằng NOMA, trừ khi áp dụng cơ chế chia sẻ thời gian hoặc các kỹ thuật đa truy nhập tiên tiến hơn. Hạn chế này cho thấy NOMA chưa khai thác hết tiềm năng của vùng dung lượng, đặc biệt trong các kịch bản yêu cầu QoS nghiêm ngặt cho cả PU và SU [13, 55, 57].

4.3.2. Bài toán ghép cặp PU–SU

Trong kiến trúc mạng vô tuyến nhận thức, việc chấp nhận một người dùng thứ cấp không đơn thuần là kiểm soát mức nhiễu gây ra cho hệ thống ưu tiên, mà thực chất là bài toán đảm bảo sự tồn tại của một tập hợp tốc độ khả thi thỏa mãn đồng thời yêu cầu chất lượng dịch vụ của cả PU và SU. Để mô hình hóa yêu cầu này một cách trực quan, gọi $T(R_s, R_0)$ là điểm vận hành mục tiêu đại diện cho cặp yêu cầu tốc độ tối thiểu của SU và PU trong mặt phẳng dung lượng [13, 57, 100].

Về mặt lý thuyết, một UAV chỉ có thể được chấp nhận làm người dùng thứ cấp nếu và chỉ nếu tồn tại ít nhất một chiến lược truyền và giải mã tại trạm cơ sở sao cho điểm $T(R_s, R_0)$ nằm bên trong hoặc trên biên của vùng dung lượng [27]. Khi đó, bài toán ghép cặp PU–SU có thể được phát biểu dưới dạng điều kiện tồn tại như sau:

Với bộ tham số hệ thống $\Psi = \{P_0, P_n, h_0, h_n, R_0, R_s\}$, xác định điều kiện cần

và đủ để hệ bất phương trình sau có nghiệm:

$$\begin{cases} R_0 \leq \log_2 (1 + P_0|h_0|^2) , \\ R_s \leq \log_2 (1 + P_n|h_n|^2) , \\ R_0 + R_s \leq \log_2 (1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2) . \end{cases} \quad (4.6)$$

Việc phát biểu bài toán ghép cặp theo cách này mang lại ba ý nghĩa quan trọng được phân tích trong luận án như sau:

1- Về mặt trực quan, quy trình truy nhập phổ phức tạp được chuyển hóa thành một bài toán hình học trong không gian Euclid hai chiều. Nếu điểm T nằm ngoài đa giác OMNPQ, hệ thống rơi vào trạng thái không thỏa mãn QoS, ngay cả khi chưa xét đến kỹ thuật giải mã cụ thể tại trạm cơ sở.

2- Cách tiếp cận này cho phép xác định rõ giới hạn của NOMA truyền thống. Cụ thể, với cơ chế SIC thuần, trạm cơ sở chỉ có thể đạt được trực tiếp các điểm vận hành tương ứng với hai đỉnh N và P của vùng dung lượng. Các điểm còn lại trên biên tổng tốc độ đòi hỏi các kỹ thuật đa truy nhập tổng quát hơn, mở đường cho việc tích hợp RSMA nhằm khai thác đầy đủ vùng khả thi.

3- Điều kiện hình học nêu trên đóng vai trò là nền tảng cho việc thiết kế thuật toán kiểm soát chấp nhận trong các kịch bản đa người dùng. Các cặp PU-SU không thỏa mãn điều kiện tồn tại này có thể được loại bỏ ngay từ đầu, giúp giảm đáng kể độ phức tạp cho các bước tối ưu hóa tiếp theo.

Như vậy, để một UAV có thể được phép truy nhập phổ tần của hệ thống ưu tiên, không chỉ chất lượng kênh truyền của UAV đến trạm cơ sở phải đủ tốt, mà phần dung lượng còn lại của hệ thống sau khi đáp ứng yêu cầu R_0 của PU cũng phải đủ lớn để hỗ trợ thông điệp của SU.

4.3.3. Điều kiện ghép cặp PU-SU

Để xác định khả năng một UAV có thể được chấp nhận làm SU trong hệ thống vô tuyến nhận thức, chúng ta cần tìm miền giá trị của các tham số hệ thống sao cho điểm yêu cầu chất lượng dịch vụ $T(R_s, R_0)$ nằm trọn trong vùng dung lượng ngũ giác OMNPQ (Hình 4.2). Quá trình này được thực hiện thông qua việc kết hợp các bất phương trình giới hạn biên.

Cụ thể, từ ràng buộc tổng tốc độ quy định khả năng chịu tải tối đa của kênh truyền chung [100], ta có:

$$R_s + R_0 \leq \log_2 (1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2) \quad (4.7)$$

Thực hiện biến đổi hàm mũ cơ số 2 cho cả hai vế, ta thu được điều kiện về công suất thu tối thiểu từ phía SU để duy trì tổng tốc độ:

$$2^{R_s+R_0} \leq 1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2 \Rightarrow P_n|h_n|^2 \geq 2^{R_s+R_0} - P_0|h_0|^2 - 1 \quad (4.8)$$

Mặt khác, ngay cả khi tổng tốc độ được thỏa mãn, SU vẫn phải đảm bảo tốc độ cá nhân tối thiểu R_s trong kịch bản lý tưởng nhất (khi không bị PU gây nhiễu). Điều này dẫn đến ràng buộc:

$$R_s \leq \log_2 (1 + P_n|h_n|^2) \Rightarrow P_n|h_n|^2 \geq 2^{R_s} - 1 \quad (4.9)$$

Bằng cách kết hợp đồng thời hai điều kiện 4.8 và 4.9, chúng ta dẫn xuất được điều kiện cần và đủ để một UAV có thể ghép cặp thành công với PU dưới dạng một công thức đóng duy nhất:

$$P_n|h_n|^2 \geq \max \left(2^{R_s} - 1, 2^{R_s+R_0} - P_0|h_0|^2 - 1 \right) \quad (4.10)$$

Điều kiện này cung cấp một tiêu chí ghép cặp PU-SU rõ ràng và có thể tính toán trực tiếp dựa trên các tham số kênh và yêu cầu QoS, mà không cần đến các thuật toán tối ưu phức tạp.

Phân tích về các thành phần của điều kiện ghép cặp:

Điều kiện ghép cặp PU-SU thu được trong 4.10 được biểu diễn dưới dạng một hàm max, phản ánh sự tồn tại của hai kịch bản giới hạn vật lý khác nhau trong hệ thống. Việc sử dụng cấu trúc này không chỉ mang ý nghĩa toán học, mà còn cung cấp những hiểu biết quan trọng về cơ chế chia sẻ tài nguyên trong mạng vô tuyến nhận thức.

Trường hợp 1: Giới hạn bởi năng lực cá nhân của SU ($2^{R_s} - 1$).
Trường hợp này xảy ra khi kênh truyền của PU ($P_0|h_0|^2$) rất mạnh, vượt xa yêu

cầu tối thiểu R_0 . Khi đó, PU hoạt động xa ngưỡng QoS của mình và không bị ảnh hưởng đáng kể bởi sự hiện diện của SU. Khả năng ghép cặp lúc này chủ yếu phụ thuộc vào việc liên kết BS-UAV có đủ tốt để duy trì tốc độ R_s hay không.

Trường hợp 2: Giới hạn bởi tài nguyên hệ thống ($2^{R_s+R_0} - P_0|h_0|^2 - 1$). Đây là kịch bản phổ biến trong mạng CR, khi PU hoạt động gần ngưỡng giới hạn của mình. Để SU có thể tham gia, nó không chỉ cần đảm bảo tốc độ của chính mình mà còn phải “cạnh tranh” trực tiếp phần tài nguyên tổng với PU. Công thức này cho thấy nếu R_0 hoặc R_s tăng lên, yêu cầu về chất lượng kênh của UAV ($|h_n|^2$) sẽ tăng theo hàm mũ.

Phân tích trên cho thấy điều kiện ghép cặp PU-SU được chi phối đồng thời bởi cả đặc tính kênh truyền cục bộ của SU và mức độ bão hòa tài nguyên của hệ thống ưu tiên. Đây chính là nguyên nhân khiến các sơ đồ CR-NOMA truyền thống gặp hạn chế trong các kịch bản QoS nghiêm ngặt, đồng thời là động lực để tích hợp RSMA nhằm mở rộng miền vận hành khả thi của hệ thống.

Tóm lại, điều kiện ghép cặp 4.10 cho phép:

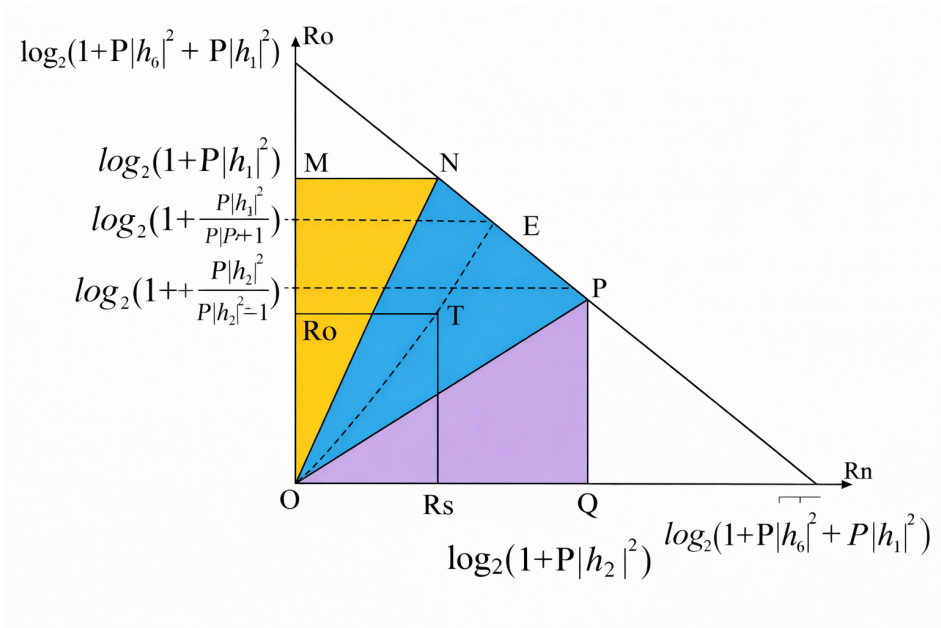
- Xác định nhanh chóng tập các UAV có khả năng truy nhập phổ trong mỗi khối truyền;
- Phân loại các cặp PU-SU theo vị trí của điểm vận hành trong vùng dung lượng, từ đó lựa chọn chiến lược giải mã phù hợp;
- Làm cơ sở cho việc thiết kế tỷ lệ tách tốc độ và thứ tự SIC trong khung RSMA;
- Mở rộng tự nhiên sang bài toán kiểm soát chấp nhận trong các kịch bản đa người dùng.

4.4. Phân vùng dung lượng và chiến lược giải mã dựa trên RSMA

Phân tích vùng dung lượng và điều kiện ghép cặp PU-SU ở Mục 4.3 cho thấy rằng không phải mọi điểm vận hành khả thi đều có thể đạt được trực tiếp bằng các sơ đồ đa truy nhập truyền thống. Đặc biệt, trong bối cảnh vô tuyến nhận thức với yêu cầu QoS nghiêm ngặt cho PU, các hạn chế của NOMA trở nên rõ rệt khi điểm vận hành mục tiêu không trùng với các đỉnh tương ứng với hai thứ tự SIC cố định. Điều này đặt ra yêu cầu cần có một cơ chế giải mã linh hoạt hơn tại trạm cơ sở, có khả năng khai thác đầy đủ vùng dung lượng khả

thi [13, 55, 57]. Trong mục này, luận án đề xuất tích hợp kỹ thuật RSMA vào khung CR uplink nhằm đạt được mục tiêu đó.

4.4.1. Phân vùng dung lượng dựa trên khả năng giải mã



Hình 4.3. Phân vùng dung lượng trong mặt phẳng (R_s, R_o)

Hình 4.3 minh họa chi tiết vùng dung lượng của kênh uplink trong mặt phẳng (R_s, R_o) . Vùng này không chỉ đơn thuần là một đa giác giới hạn tốc độ, mà còn là một bản đồ chiến lược giúp BS xác định phương thức xử lý tín hiệu tối ưu. Sự phân chia này dựa trên mối tương quan giữa yêu cầu QoS của người dùng và khả năng khử nhiễu liên tiếp của bộ thu.

a) Miền NOMA khả thi với SIC giải mã SU trước ($D1$ – Miền màu vàng):

Miền $D1$ nằm ở phía trên của ngũ giác, tiếp giáp với trục R_o . Đặc điểm của miền này là yêu cầu tốc độ của PU chiếm tỉ trọng lớn so với SU.

Chiến lược giải mã: BS thực hiện giải mã SU trước trong khi coi PU là nhiễu. Sau khi thu được $\hat{x}_n$, tín hiệu này được khử khỏi hỗn hợp thu để giải mã PU với SNR tối đa.

Điều kiện hình học: Miền này được giới hạn bởi góc dốc của tia ON .

Một điểm $T \in D_1$ khi và chỉ khi:

$$\frac{R_0}{R_s} \geq \frac{\log_2(1 + P_0|h_0|^2)}{\log_2\left(1 + \frac{P_n|h_n|^2}{1 + P_0|h_0|^2}\right)} \quad (3.10)$$

Khi điểm vận hành T nằm trong miền này, chiến lược NOMA với thứ tự SIC “SU trước – PU sau” là đủ để đảm bảo giải mã thành công cho cả hai người dùng.

b) Miền NOMA khả thi với SIC giải mã PU trước (D3 – Miền màu tím):

Ngược lại với D1, miền D3 nằm sát trục hoành R_s . Đây là vùng vận hành nơi SU có yêu cầu tốc độ rất cao hoặc có chất lượng kênh truyền vượt trội. Trong miền này, trạm cơ sở ưu tiên giải mã thông điệp của PU trước nhằm bảo vệ QoS của hệ thống ưu tiên, sau đó khử nhiễu và giải mã thông điệp của SU. Đây là cấu hình thường gặp trong các hệ thống CR-NOMA truyền thống. Miền này được đặc trưng bởi các điểm vận hành nằm dưới đường thẳng nối từ gốc O đến điểm P, và bị giới hạn bởi ràng buộc tốc độ cá nhân của SU tại điểm Q. Khi điểm T thuộc miền này, việc áp dụng SIC với thứ tự “PU trước – SU sau” là đủ để thỏa mãn các yêu cầu tốc độ đã đặt ra.

c) Miền NOMA không khả thi và sự cần thiết của RSMA (D2- Miền màu xanh biển):

Miền thứ ba, được biểu diễn bằng vùng tô màu xanh trong Hình 4.3, nằm giữa hai miền NOMA khả thi nêu trên và kéo dài dọc theo biên tổng tốc độ NP. Mặc dù các điểm trong miền này vẫn nằm trong vùng dung lượng lý thuyết của kênh uplink, không tồn tại thứ tự SIC thuần nào cho phép giải mã thành công cả hai thông điệp với các yêu cầu QoS tương ứng.

Về mặt hình học, miền này được xác định bởi các điểm nằm giữa hai đường thẳng ON và OP, đồng thời nằm dưới biên tổng tốc độ NP. Điểm E trên biên NP minh họa một điểm vận hành mà tổng tốc độ đạt cực đại, nhưng không thể đạt được trực tiếp bằng NOMA nếu không áp dụng cơ chế chia sẻ thời gian.

Khi điểm vận hành mục tiêu T rơi vào miền này, việc áp dụng NOMA truyền thống dẫn đến trạng thái không thỏa mãn QoS cho ít nhất một trong hai người dùng. Đây chính là miền vận hành mà kỹ thuật RSMA được kích hoạt,

bằng cách chia thông điệp của SU thành các thành phần chung và riêng, cho phép trạm cơ sở đạt được các điểm nằm trên hoặc bên trong miền này mà không cần đến chia sẻ thời gian.

d) Quy trình ra quyết định chiến lược:

Việc phân vùng này cho phép thiết lập một bộ quy tắc logic tại BS như sau:

- **Bước 1:** Xác định vị trí của $T(R_s, R_0)$ thông qua tỉ số $\lambda = \frac{R_0}{R_s}$, đại diện cho độ dốc của tia nối từ gốc tọa độ O đến điểm T .
- **Bước 2:** So sánh λ với độ dốc của các tia ON và OP .
- **Bước 3:** Kích hoạt bộ giải mã tương ứng:
 - Nếu $\lambda \geq \lambda_{ON} \Rightarrow$ NOMA (SU trước).
 - Nếu $\lambda \leq \lambda_{OP} \Rightarrow$ NOMA (PU trước).
 - Nếu $\lambda_{OP} < \lambda < \lambda_{ON} \Rightarrow$ kích hoạt RSMA.

Quy trình ra quyết định này cho phép trạm cơ sở lựa chọn chiến lược giải mã một cách trực tiếp và hiệu quả, mà không cần giải các bài toán tối ưu phức tạp trong mỗi khe thời gian. Đồng thời, nó thể hiện rõ vai trò của RSMA như một cơ chế tổng quát, cho phép lấp đầy khoảng trống dung lượng mà các sơ đồ NOMA truyền thống không thể khai thác.

4.4.2. Mô hình truyền RSMA và kỹ thuật tách đa truy cập

Khi điểm vận hành mục tiêu $T(R_s, R_0)$ nằm trong miền xanh (miền D2), các kỹ thuật NOMA truyền thống với thứ tự giải mã đơn nhất sẽ không thể thỏa mãn đồng thời yêu cầu tốc độ của cả hai người dùng. Để giải quyết vấn đề này, một sơ đồ RSMA mới cho đường lên được đề xuất, trong đó thông điệp của người dùng thứ cấp được chia tách một cách linh hoạt.

a) Nguyên lý hình học của cơ chế rate-splitting

Xét trường hợp điểm T nằm trong tam giác ONP . Kéo dài tia OT sẽ cắt cạnh NP tại điểm $E(x, y)$, như minh họa trong Hình 4.3. Điểm E đóng vai trò

then chốt trong việc xác định tỷ lệ tách tốc độ (rate-splitting ratio) cho SU. Theo quan hệ hình học, hệ số góc của tia OT được xác định bởi

$$\tan \angle EOQ = \frac{R_0}{R_s} = \frac{y}{x} \quad (4.11)$$

Do E nằm trên đoạn thẳng NP , tọa độ của $E(x, y)$ đồng thời thỏa mãn phương trình của đường thẳng NP , do đó hệ phương trình xác định E được viết như sau:

$$\begin{cases} y = \frac{R_0}{R_s}x, \\ y = -x + \log_2 (1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2) \end{cases} \quad (4.12)$$

Giải hệ phương trình 4.12, ta thu được tung độ của điểm E dưới dạng khép kín:

$$y = \frac{\log_2 (1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2)}{1 + \frac{R_s}{R_0}} \quad (4.13)$$

Điểm $E(x, y)$ không chỉ là một giao điểm hình học đơn thuần; nó đại diện cho một “điểm vận hành ảo” trên biên dung lượng tối ưu của hệ thống. Trong các hệ thống đa truy nhập truyền thống (OMA hoặc NOMA), việc đạt được các điểm nằm giữa hai đỉnh N và P là không thể nếu không có sự can thiệp của kỹ thuật chia sẻ thời gian. Tuy nhiên, RSMA cho phép hệ thống “mềm hóa” các biên cứng nhắc này. Việc kéo dài tia OT cắt NP tại E đảm bảo rằng dù hệ thống hoạt động ở mức công suất nào, tỷ lệ đóng góp về mặt tốc độ của PU và SU luôn được duy trì ở mức tối ưu nhất so với yêu cầu QoS ban đầu. Điều này giúp tối đa hóa hiệu suất sử dụng phổ mà không làm thay đổi cấu trúc ưu tiên của mạng vô tuyến nhận thức.

Để thuận tiện cho phân tích, tung độ y của điểm E được biểu diễn lại dưới dạng:

$$y = \log_2 \left(1 + \frac{P|h_0|^2}{P\theta + 1} \right) \quad (4.14)$$

Trong đó θ là tham số rate-splitting, đại diện cho phần công suất của SU được ánh xạ vào thông điệp chung trong mô hình CR-RSMA đề xuất. Từ 4.14,

suy ra biểu thức khép kín của tham số rate-splitting:

$$\theta = \frac{P|h_0|^2}{2^y - 1} - 1 \quad (4.15)$$

Biểu thức 4.15 cho thấy tham số rate-splitting không được lựa chọn tùy ý, mà được xác định trực tiếp bởi vị trí hình học của điểm vận hành T trong vùng dung lượng. Điều này đảm bảo rằng cơ chế RSMA được kích hoạt chỉ khi cần thiết và với tỷ lệ tách tối ưu.

Tham số θ đóng vai trò là “biến điều tiết nhiều”. Trong mô hình này, θ xác định chính xác lượng công suất mà SU cần trích ra để tạo thành một thông điệp chung có thể được giải mã ngay cả khi có sự hiện diện của nhiễu mạnh từ PU:

- Nếu $\theta \rightarrow 0$, hệ thống tiệm cận về sơ đồ NOMA giải mã PU trước.
- Nếu θ tăng lên, hệ thống dịch chuyển về phía sơ đồ giải mã SU trước.

Như vậy, công thức 4.15 chính là lời giải cho bài toán cân bằng động: nó cho phép trạm cơ sở tự động điều chỉnh mức độ chấp nhận nhiễu tùy thuộc vào vị trí tương đối của UAV và yêu cầu tốc độ của PU mặt đất.

b) Thứ tự giải mã SIC:

Do điểm E nằm trên đoạn NP, tung độ của nó bị chặn bởi các tung độ của hai điểm N và P, từ đó suy ra điều kiện:

$$P|h_n|^2 > P\theta \quad (4.16)$$

Theo đó, thành phần tín hiệu thu từ SU tại trạm cơ sở có thể được phân tách thành hai phần “ảo” như sau:

$$P|h_n|^2 = (P|h_n|^2 - P\theta) + P\theta \quad (4.17)$$

Như vậy, trạm cơ sở quan sát ba thành phần tín hiệu hiệu dụng:

$(P|h_n|^2 - P\theta)$: phần riêng của SU,

$P|h_0|^2$: tín hiệu của PU,

$P\theta$: phần chung của SU.

Để giải mã các tín hiệu này, kỹ thuật SIC được áp dụng theo thứ tự sau:

$$(P|h_n|^2 - P\theta) \rightarrow P|h_0|^2 \rightarrow P\theta \quad (4.18)$$

Với thứ tự SIC trên, các tốc độ đạt được tương ứng được xác định như sau:

$$\begin{aligned} R_1 &= \log_2 \left(1 + \frac{P|h_n|^2 - P\theta}{P\theta + P|h_0|^2 + 1} \right), \\ R_2 &= \log_2 \left(1 + \frac{P|h_0|^2}{P\theta + 1} \right), \\ R_3 &= \log_2(1 + P\theta). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Một ưu điểm đáng chú ý của việc xác định tham số θ dựa trên lập luận hình học là khả năng đảm bảo tính khả thi một cách nhất quán. Trong các phương pháp tối ưu hóa số, quá trình tìm nghiệm có thể phụ thuộc vào điều kiện khởi tạo hoặc tiêu chí hội tụ, từ đó dẫn đến việc không xác định được giá trị θ phù hợp trong một số kịch bản. Ngược lại, với cách tiếp cận dựa trên vị trí của điểm vận hành T trong vùng dung lượng, tham số θ được xác định trực tiếp và duy nhất theo các tham số hệ thống. Cách tiếp cận này giúp đơn giản hóa quá trình thiết kế bộ giải mã và đặc biệt phù hợp với các hệ thống UAV, nơi yêu cầu về tính ổn định của liên kết và khả năng xử lý theo thời gian thực đóng vai trò quan trọng.

Để đảm bảo giải mã SIC thành công, cần thỏa mãn hai điều kiện:

$$R_0 \leq R_2, \quad R_s \leq R_1 + R_3 \quad (4.20)$$

Từ các biểu thức 4.14–4.19, có thể chứng minh rằng hai điều kiện trên luôn được thỏa mãn với tham số rate-splitting được xác định theo 4.15. Do đó, điểm vận hành $T(R_s, R_0)$ nằm trong tam giác ONP luôn có thể đạt được trong khuôn khổ CR-RSMA đề xuất.

4.4.3. Phân tích xác suất mất kết nối (Outage Probability)

Trong hệ thống NOMA truyền thống, sần lỗi xác suất mất kết nối thường xuất hiện và trở thành yếu tố giới hạn hiệu năng. Nhằm khắc phục hiện tượng này, Ding và các cộng sự đã đề xuất phương pháp NOMA lai (hybrid SIC-

NOMA) [24]. Tuy nhiên, phương pháp này chưa đưa ra các điều kiện kênh chặt cho bài toán ghép cặp giữa PU và SU, đồng thời cũng chưa đưa ra phương pháp tổng quát cho việc tách các tín hiệu đa truy cập tại phía thu. Phương pháp đề xuất trong luận án không chỉ đưa ra điều kiện kênh cho ghép cặp PU–SU và cơ chế tách các bản tin đa truy cập được mà còn có khả năng loại bỏ sà n lỗi xác suất Outage. Cụ thể như sau:

Dựa trên phân tích hình học ở mục 3.4.1, chúng ta chia xác suất mất kết nối tổng thể thành các thành phần tương ứng với ba tiểu vùng của ngũ giác dung lượng: vùng NOMA giải mã SU trước (D_1 – tam giác OMN), vùng RSMA (D_2 – tam giác NOP), và vùng NOMA giải mã PU trước (D_3 – tam giác POQ).

xác suất mất kết nối tổng thể của người dùng U_n được biểu diễn dưới dạng tổng xác suất có điều kiện:

$$\mathbb{P}_{\text{outage}} = \mathbb{P}_1 + \mathbb{P}_2 + \mathbb{P}_3 \quad (4.21)$$

Trong đó $\mathbb{P}_1, \mathbb{P}_2, \mathbb{P}_3$ lần lượt là xác suất mất kết nối khi điểm vận hành T rơi vào các tiểu vùng tương ứng. Khi đó, xác suất mất kết nối tổng thể của SU có thể được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}_{\text{outage}} = & \mathbb{P}_1 \left(\log_2 \left(1 + \frac{P_n |h_n|^2}{P_0 |h_0|^2 + 1} \right) < R_s \right) \\ & + \mathbb{P}_2 \left(\log_2(1 + P_n |h_n|^2) < R_s \right) \\ & + \mathbb{P}_3 \left(\log_2 \left(1 + \frac{P_0 |h_0|^2 - P_n \theta}{P_n \theta + P_0 |h_0|^2 + 1} \right) + \log_2(1 + P_n \theta) < R_s \right) \end{aligned} \quad (4.22)$$

Xét miền công suất phát lớn, khi $P_0, P_n \rightarrow \infty$ có thể nhận thấy rằng:

$$\mathbb{P}_2 = \mathbb{P}_3 = 0. \quad (4.23)$$

Điều này là do trong hai miền tương ứng, tốc độ đạt được của SU tăng không bị chặn theo công suất phát và do đó luôn vượt quá yêu cầu R_s .

Tiếp theo, ta tập trung phân tích xác suất $\mathbb{P}_1$, tương ứng với trường hợp điểm vận hành T nằm trong tam giác ONP . Trong trường hợp này, từ quan hệ

hình học của vùng dung lượng, ta có:

$$\frac{R_0}{R_s} > \frac{\log_2(1 + P_0|h_0|^2)}{\log_2\left(1 + \frac{P_n|h_n|^2}{P_0|h_0|^2+1}\right)}. \quad (4.24)$$

Xét xác suất:

$$\mathbb{P}_1 = \mathbb{P}\left(\log_2\left(1 + \frac{P_n|h_n|^2}{P_0|h_0|^2+1}\right) < R_s\right) \quad (4.25)$$

Từ biểu thức 4.24, có thể viết 4.25 như sau:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}_1 &= \mathbb{P}\left(\log_2\left(1 + \frac{P_n|h_n|^2}{P_0|h_0|^2+1}\right) < R_s\right) \\ &\leq \mathbb{P}(\log_2(1 + P_0|h_0|^2) < R_0) \\ &= \mathbb{P}\left(|h_0|^2 < \frac{2^{R_0} - 1}{P_0}\right). \end{aligned} \quad (4.26)$$

Biểu thức 4.26 cho thấy rằng xác suất mất kết nối trong miền này chỉ phụ thuộc vào kênh truyền của người dùng sơ cấp. Khi công suất phát của PU tăng, ngưỡng $\frac{2^{R_0} - 1}{P_0}$ tiến dần về 0, do đó:

$$\lim_{P_0 \rightarrow \infty} \mathbb{P}_1 = 0. \quad (4.27)$$

Kết hợp các kết quả trên, xác suất mất kết nối tổng thể của SU trong khung CR-RSMA đề xuất thỏa mãn:

$$\lim_{P_0, P_n \rightarrow \infty} \mathbb{P}_{\text{outage}} = 0. \quad (4.28)$$

Kết quả này xác nhận rằng khung CR-RSMA không chỉ mở rộng vùng khả thi so với CR-NOMA truyền thống mà còn đảm bảo hiệu năng dùng tiệm cận bằng không trong miền công suất cao, đồng thời vẫn duy trì yêu cầu QoS nghiêm ngặt cho người dùng sơ cấp.

4.5. Thuật toán tối đa hóa số lượng cặp ghép PU–SU

Trong các kịch bản mạng vô tuyến nhận thức thực tế, nhiều PU và SU thường được phân bố ngẫu nhiên trong vùng phục vụ của trạm gốc. Do tài nguyên phổ tần là hữu hạn và PU được ưu tiên tuyệt đối về chất lượng dịch vụ, không phải mọi SU đều có thể được chấp nhận truy nhập phổ tại cùng một thời

điểm. Vì vậy, việc thiết kế một chiến lược ghép cặp hiệu quả nhằm tối đa hóa số lượng cặp PU–SU khả thi là một bài toán quan trọng.

Trong mục này, một thuật toán kiểm soát chấp nhận và ghép cặp được đề xuất dựa trên các điều kiện khả thi đã dẫn xuất ở Mục 4.3 và cơ chế giải mã thích ứng RSMA trình bày ở Mục 4.4. Mục tiêu của thuật toán là tối đa hóa số lượng cặp PU–SU có thể cùng chia sẻ một khối tài nguyên vô tuyến, đồng thời vẫn đảm bảo các yêu cầu QoS nghiêm ngặt của hệ thống ưu tiên.

4.5.1. Thiết lập bài toán trong kịch bản đa người dùng

Xét một hệ thống vô tuyến nhận thức uplink bao gồm N thiết bị di động mặt đất đóng vai trò là các PU và M UAV đóng vai trò là các SU. Các kênh truyền từ người dùng đến trạm gốc được giả định là các biến ngẫu nhiên độc lập, phản ánh các điều kiện lan truyền khác nhau trong môi trường thực tế. Để đảm bảo khả năng đáp ứng các yêu cầu QoS cơ bản, các hệ số kênh được giả định nằm trong các miền khả thi. Mục tiêu của bài toán là xác định một tập hợp các cặp ghép (PU, SU) có kích thước lớn nhất sao cho mỗi cặp đều thỏa mãn điều kiện ghép cặp tổng quát đã được thiết lập ở mục 4.3.

4.5.2. Mô tả thuật toán đề xuất

Để giải quyết bài toán ghép cặp với độ phức tạp tính toán thấp, một thuật toán dựa trên cơ chế sắp xếp (sorting-based algorithm) được đề xuất. Ý tưởng chính của thuật toán là ưu tiên ghép các SU có chất lượng kênh kém hơn với các PU có điều kiện kênh tốt hơn, nhằm gia tăng khả năng thỏa mãn điều kiện biên trong 4.10. Chi tiết thuật toán được biểu diễn bằng mã giả trong Thuật toán 4.1.

4.5.3. Phân tích độ phức tạp tính toán

Để đánh giá tính hiệu quả và khả năng triển khai thực tế của Thuật toán 4.1, chúng ta tiến hành phân tích độ phức tạp tính toán dựa trên các thao tác cơ bản trong mã giả. Giả sử hệ thống có N người dùng là PU và M người dùng là SU, trong kịch bản mô phỏng, chúng ta xét $M = N$. Độ phức tạp của thuật toán được xác định qua các giai đoạn chính sau:

Giai đoạn khởi tạo và tạo lập kênh truyền: Giai đoạn này yêu cầu số phép toán tỷ lệ tuyến tính với số lượng người dùng, do đó có độ phức tạp: $\mathcal{O}(N)$

Thuật toán 4.1 Thuật toán tối đa hóa số lượng cặp ghép PU–SU

Require: $N; R_0; \{R_s\}$ **Ensure:** C

```
1: for  $r = 1$  to  $\text{length}(R_s)$  do
2:    $A \leftarrow 2^{(R_0 + R_s[r])} - 1$ 
3:   for  $i = 1$  to  $N$  do
4:      $P_0[i] \leftarrow (2^{R_0} - 1) + (A - (2^{R_0} - 1)) \cdot \text{rand}(0, 1)$ 
5:      $P_m[i] \leftarrow (2^{R_s[r]} - 1) + (A - (2^{R_s[r]} - 1)) \cdot \text{rand}(0, 1)$ 
6:   end for
7:   Sort  $P_0$  in ascending order
8:   Sort  $P_m$  in descending order
9:    $u \leftarrow 0$ 
10:  for  $i = 1$  to  $N$  do
11:    for  $k = 1$  to  $N$  do
12:      if  $P_m[k] > \max(2^{R_s[r]} - 1, A - P_0[i])$  then
13:         $u \leftarrow u + 1$ 
14:         $P_m[k] \leftarrow 0$ 
15:      break
16:    end if
17:  end for
18: end for
19:   $C[r] \leftarrow u$ 
20: end for
21: return  $C$ 
```

Giai đoạn sắp xếp: Các hệ số kênh của PU và SU được sắp xếp nhằm hỗ trợ chiến lược ghép cặp hiệu quả. Việc sắp xếp hai danh sách có kích thước lần lượt là N và M dẫn đến độ phức tạp: $\mathcal{O}(N \log N + M \log M)$ Trong trường hợp $M = N$, độ phức tạp của giai đoạn này là: $\mathcal{O}(N \log N)$

Giai đoạn ghép cặp: Đây là giai đoạn chiếm ưu thế về mặt độ phức tạp. Trong trường hợp xấu nhất, thuật toán phải kiểm tra toàn bộ các cặp PU–SU khả dĩ, dẫn đến số phép so sánh tỷ lệ với $N \times M$. Do đó, độ phức tạp trong trường hợp xấu nhất là: $\mathcal{O}(N^2)$

Tuy nhiên, trong trường hợp trung bình, nhờ chiến lược sắp xếp kênh truyền (PU có kênh tốt được xét trước, SU có kênh kém được ưu tiên ghép trước), các cặp thỏa mãn điều kiện ghép cặp thường được phát hiện sớm. Điều này cho phép kết thúc vòng lặp lồng nhau trước khi duyệt toàn bộ danh sách, từ đó làm giảm đáng kể số phép toán thực tế.

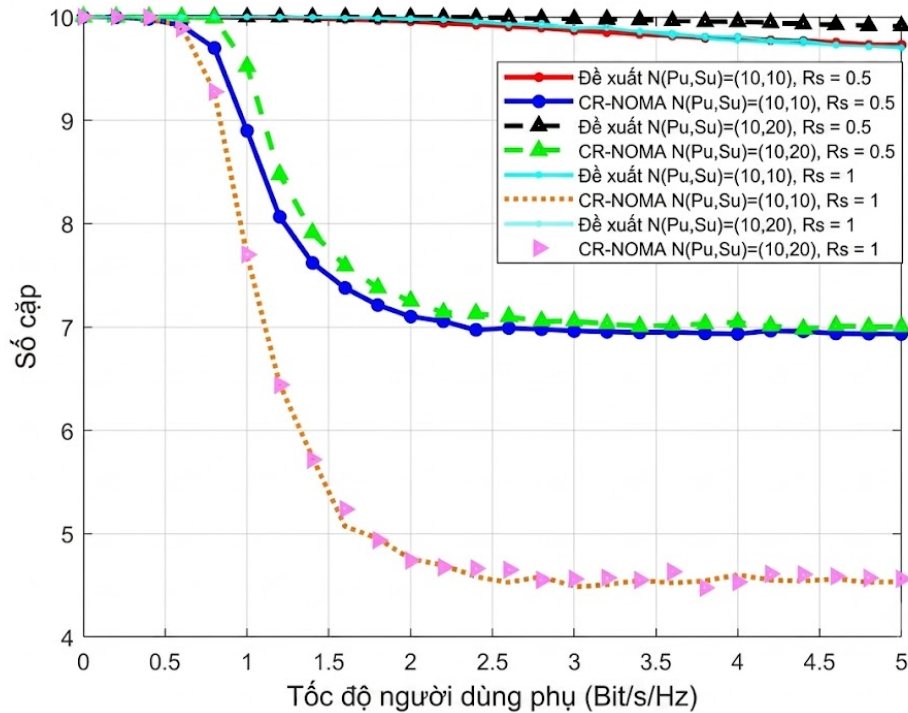
Tổng độ phức tạp của thuật toán: Kết hợp các giai đoạn trên, độ phức

tập tính toán của Thuật toán 4.1 được chi phối bởi giai đoạn ghép cặp và có bậc: $\mathcal{O}(N^2)$

Nhận xét về tính khả thi: Mặc dù độ phức tạp tỷ lệ với bình phương số lượng người dùng $\mathcal{O}(N^2)$, nhưng trong các hệ thống mạng vô tuyến nhận thức thực tế, số lượng người dùng N trong một khối tài nguyên vô tuyến thường không quá lớn. Với năng lực tính toán của các bộ vi xử lý hiện đại tại trạm gốc, thuật toán có thể thực thi trong thời gian thực, đáp ứng được yêu cầu về độ trễ và tính linh động của các thiết bị UAV. So với các kỹ thuật tối ưu hóa lồi hoặc tìm kiếm toàn cục có độ phức tạp hàm mũ, Thuật toán 4.1 thể hiện sự cân bằng hiệu quả giữa hiệu năng hệ thống và chi phí tính toán.

4.6. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Nhằm đánh giá hiệu năng của khung truyền RSMA đề xuất kết hợp với thuật toán ghép cặp trong mạng vô tuyến nhận thức, mục này trình bày và phân tích các kết quả mô phỏng số. Các chỉ tiêu đánh giá tập trung vào khả năng chấp nhận và ghép cặp người dùng PU-SU, cũng như hiệu năng tốc độ đạt được của hệ thống dưới các điều kiện kênh truyền và yêu cầu QoS khác nhau.



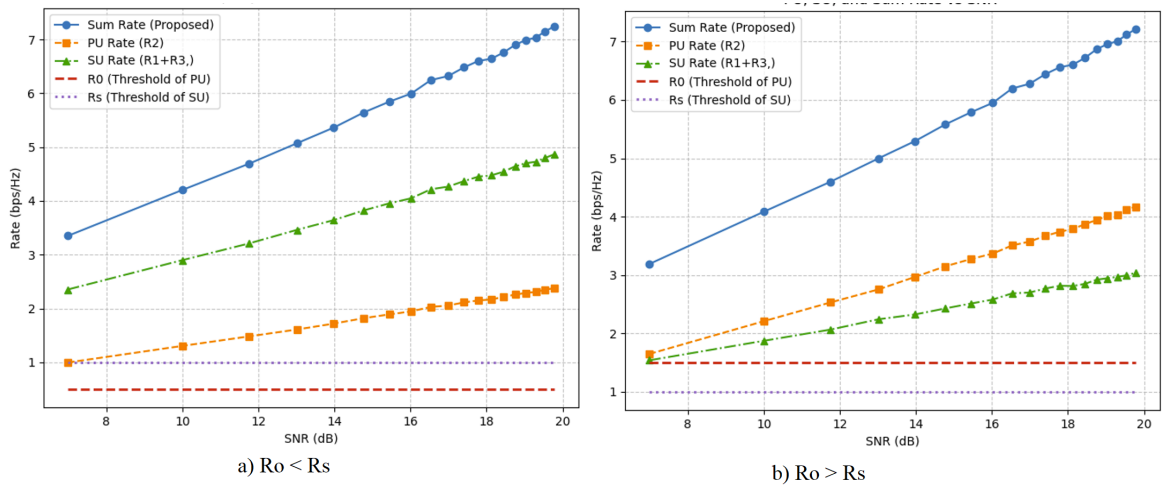
Hình 4.4. Khả năng ghép cặp PU-SU

Hình 4.4 minh họa số lượng cặp ghép thành công giữa PU và SU theo sự thay đổi của tốc độ yêu cầu phía SU là R_s , với các kịch bản số lượng người dùng khác nhau ($N_{PU} = 10, N_{SU} = 10$) và ($N_{PU} = 10, N_{SU} = 20$). Từ kết quả mô phỏng có thể rút ra các nhận xét chính sau:

- Trong tất cả các kịch bản khảo sát, phương pháp RSMA đề xuất duy trì số lượng cặp ghép gần mức tối đa, xấp xỉ số lượng PU hiện có, ngay cả khi tốc độ yêu cầu R_s tăng cao. Điều này cho thấy vùng dung lượng khả thi của hệ thống được mở rộng hiệu quả nhờ cơ chế tách tốc độ. Ngược lại, phương pháp CR-NOMA truyền thống ghi nhận sự suy giảm nhanh chóng về số lượng cặp ghép khi R_s vượt quá ngưỡng trung bình.

- Khi R_s tăng, vùng dung lượng khả thi của NOMA bị thu hẹp đáng kể, khiến nhiều cặp PU-SU không thể đồng thời thỏa mãn ràng buộc QoS. Ở mức $R_s = 5$ bps/Hz, số lượng cặp ghép trong hệ CR-NOMA giảm xuống còn khoảng 4–7 cặp, trong khi giải pháp RSMA vẫn duy trì xấp xỉ 10 cặp. Kết quả này xác nhận vai trò của RSMA trong việc “làm mềm” biên dung lượng.

- Việc tăng số lượng SU ứng viên giúp cải thiện nhẹ khả năng ghép cặp nhờ hiệu ứng đa dạng hóa người dùng. Tuy nhiên, ưu thế ổn định của RSMA vẫn được duy trì, cho thấy hiệu quả của thuật toán ghép cặp kết hợp với phân vùng dung lượng đã đề xuất.



Hình 4.5. Tốc độ truyền dẫn theo SNR

Hình 4.5 trình bày tốc độ đạt được của PU (R_2), SU ($R_1 + R_3$) và tổng tốc độ hệ thống theo SNR tại trạm gốc, với hai kịch bản: (a) $R_0 < R_s$ và (b)

$R_0 > R_s$. Nhận xét:

- Trong cả hai kịch bản, tốc độ thực tế của PU và SU đều vượt ngưỡng yêu cầu tối thiểu tương ứng. Điều này xác nhận tính đúng đắn của việc xác định tham số tách tốc độ θ dựa trên hình học vùng dung lượng, đồng thời đảm bảo khả năng giải mã SIC một cách khả thi.

- Tổng tốc độ hệ thống tăng gần tuyến tính theo SNR, phản ánh khả năng khai thác tài nguyên phổ hiệu quả của RSMA. Khi SNR tăng, khoảng cách giữa tốc độ đạt được và ngưỡng QoS ngày càng mở rộng, tạo ra biên an toàn lớn cho hệ thống.

- Ở kịch bản $R_0 < R_s$, tài nguyên được phân bổ ưu tiên hơn cho SU nhằm đáp ứng yêu cầu tốc độ cao. Ngược lại, khi $R_0 > R_s$, tốc độ của PU được đảm bảo và gia tăng đáng kể. Sự linh hoạt này thể hiện khả năng điều chỉnh thứ tự giải mã và phân bổ tốc độ của khung RSMA-SIC đề xuất.

Tóm lại, các kết quả mô phỏng đã chứng minh rằng khung truyền RSMA kết hợp thuật toán ghép cặp đề xuất không chỉ mở rộng khả năng truy cập phổ cho các thiết bị UAV mà còn đảm bảo nghiêm ngặt yêu cầu QoS cho người dùng ưu tiên. Việc duy trì được số lượng cặp ghép gần tối đa trong khi vẫn đạt hiệu suất tốc độ cao cho thấy RSMA là một giải pháp hiệu quả và linh hoạt, phù hợp cho các mạng vô tuyến nhận thức thể hệ mới hỗ trợ UAV.

4.7. Kết luận chương

Chương 4 đã trình bày các nội dung nghiên cứu về bài toán ghép cặp người dùng trong mạng vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật đa truy nhập phân chia theo tốc độ, tập trung vào kịch bản uplink hỗ trợ thiết bị bay không người lái. Các kết quả chính đạt được bao gồm:

- **Xác định điều kiện ghép cặp:** Thiết lập các điều kiện dạng đóng dựa trên phân tích vùng dung lượng uplink theo yêu cầu QoS của PU và SU. Kết quả chứng minh ưu thế của RSMA so với NOMA truyền thống trong việc mở rộng miền vận hành của hệ thống.
- **Xác định tham số phân chia tốc độ:** Đề xuất phương pháp xác định tham số θ dựa trên hình học vùng dung lượng. Giải pháp này đơn giản hóa

cơ chế RSMA–SIC tại trạm gốc, đạt tốc độ mục tiêu mà không cần thuật toán tối ưu hóa lặp phức tạp.

- **Đánh giá xác suất mất kết nối:** Phân tích xác suất mất kết nối cho từng phân vùng giải mã. Kết quả giải tích khẳng định hệ thống đạt hiệu năng ổn định ở vùng SNR cao và luôn bảo đảm quyền ưu tiên tài nguyên của mạng chính (CRN).
- **Xây dựng thuật toán điều phối:** Đề xuất thuật toán kiểm soát chấp nhận nhằm tối đa hóa số cặp người dùng được phục vụ. Với độ phức tạp $\mathcal{O}(N^2)$, thuật toán đáp ứng tốt yêu cầu xử lý thời gian thực trên các thiết bị có phần cứng hạn chế.
- **Kiểm chứng hiệu năng:** Mô phỏng số xác tổ chức khả năng duy trì số cặp ghép ổn định trước thay đổi QoS của SU. So với CR-NOMA, cấu trúc đề xuất cải thiện rõ rệt về tổng tốc độ và độ linh hoạt phân bổ tài nguyên.

Các tham số hệ thống bao gồm băng tần hoạt động, giới hạn công suất phát, và đặc tính môi trường đều được thiết lập dựa trên các kịch bản điển hình nhằm đảm bảo tính nhất quán của mô hình, đồng thời tạo cơ sở đối sánh khách quan với các công trình liên quan. Nhằm kiểm chứng toàn diện khả năng tổng quát hóa, tính thích nghi và độ bền vững của các giải pháp đề xuất, các nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng đánh giá trên nhiều cấu hình hệ thống và điều kiện vận hành đa dạng hơn trong thực tế.

Những nội dung được trình bày trong Chương 4 cung cấp cơ sở lý thuyết và thuật toán nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần trong các hệ thống thông tin hỗ trợ UAV, đồng thời tạo tiền đề cho các nghiên cứu tối ưu hóa đa mục tiêu trong các hướng nghiên cứu tiếp theo.

KẾT LUẬN

1. Kết luận của luận án

Luận án tập trung nghiên cứu các giải pháp nhằm nâng cao hiệu quả khai thác tài nguyên và chất lượng dịch vụ của hệ thống truyền thông sử dụng thiết bị bay không người lái trong các mạng vô tuyến thế hệ mới. Hướng tiếp cận được xây dựng dựa trên việc xử lý bài toán tối ưu hiệu năng truyền dẫn dưới các ràng buộc về tính cơ động của UAV, sự hạn chế tài nguyên phổ tần và các yêu cầu khắt khe về chất lượng dịch vụ.

Các đóng góp chính được tóm lược như sau:

Thứ nhất, một phương pháp nâng cao độ chính xác trong ước lượng suy hao kênh truyền UAV được phát triển dựa trên sự kết hợp giữa các mô hình học máy (KNN, DT, RF) và học sâu (LSTM, Bi-LSTM) cùng với thuật toán tối ưu GSA trong quá trình lựa chọn siêu tham số. Cách tiếp cận này giúp cải thiện đáng kể độ chính xác dự báo suy hao kênh A2G và A2A, đồng thời mô tả hiệu quả các đặc tính phi tuyến của môi trường truyền sóng. Kết quả được trình bày trong chương 2 và các công bố [CT1, CT4, CT6].

Thứ hai, các biểu thức giải tích dạng đóng đã được thiết lập nhằm xác định góc ngẩng tối ưu trong mô hình UAV đóng vai trò trạm cơ sở, cũng như vận tốc tối ưu trong kịch bản UAV làm trạm chuyển tiếp. Từ đó, cho phép xác định định lượng các tham số quan trọng như độ cao bay, độ lợi truyền thông và vùng phủ tối ưu trong bài toán quy hoạch tế bào, đồng thời đảm bảo dung năng ổn định với mức dao động thấp trong mô hình UAV-Relay. Nội dung tương ứng được trình bày trong chương 3 và các công bố [CT2, CT3].

Thứ ba, bài toán truyền thông nhận thức đường lên cho UAV được xem xét trên ba phương diện: thiết lập điều kiện kênh phục vụ ghép cặp UAV-PU trong vai trò SU; xây dựng cơ chế tách bản tin đa truy cập tổng quát dựa trên kỹ thuật RSMA; và phân tích, so sánh hiệu năng trong kịch bản mạng đa PU. Các kết quả này được trình bày trong chương 4 và công trình [CT5].

Tóm lại, luận án đã giải quyết một số vấn đề liên quan đến mô hình hóa kênh truyền, tối ưu tham số vận hành và thiết kế cơ chế truy nhập vô tuyến, qua đó góp phần nâng cao hiệu quả truyền thông của mạng UAV. Những kết quả đạt được cung cấp cơ sở khoa học và công cụ hỗ trợ cho việc phân tích, thiết kế và triển khai các hệ thống truyền thông UAV trong các mạng vô tuyến thế hệ mới.

2. Thảo luận và hướng nghiên cứu tiếp theo

Mặc dù luận án đã đạt được một số kết quả nghiên cứu nhất định, nhưng vẫn còn một số khía cạnh cần tiếp tục được phát triển nhằm nâng cao tính chính xác và khả năng ứng dụng thực tiễn của hệ thống. Cụ thể, trong bài toán tối ưu hóa các tham số vận hành của UAV hiện tại, mô hình kênh truyền chủ yếu được xây dựng dựa trên tiếp cận xác suất truyền thống. Trong các nghiên cứu tiếp theo, có thể xem xét thay thế hoặc bổ sung bằng các mô hình kênh học sâu để ước lượng trực tiếp ngưỡng suy hao cực đại (PL_{max}), từ đó cải thiện độ chính xác của quá trình tối ưu trong môi trường truyền dẫn biến đổi phức tạp.

Bên cạnh đó, các kết quả tối ưu truy nhập ở Chương 4 hiện mới dừng lại ở giả thiết CSI hoàn hảo. Để nâng cao tính thực tiễn và độ bền vững của hệ thống CR-RSMA, hướng nghiên cứu tiếp theo cần mở rộng sang kịch bản CSI không hoàn hảo bằng cách sử dụng các mô hình xác suất có xét đến sai số ước lượng, hoặc tích hợp học máy để dự đoán và bù sai lệch kênh thời gian thực.

Ngoài ra, đặc tính cơ động của UAV dẫn đến sự biến thiên liên tục của điều kiện kênh truyền theo không gian và thời gian, từ đó ảnh hưởng trực tiếp đến hiệu năng của cả quá trình cảm biến phổ và truy cập phổ. Do đó, việc nghiên cứu sâu hơn ảnh hưởng của các tham số vận hành UAV đến hiệu năng hệ thống là cần thiết, đặc biệt trong các kịch bản động với môi trường nhiễu và che khuất thay đổi nhanh.

Từ các phân tích trên, có thể thấy một hướng phát triển tự nhiên là tích hợp mô hình kênh truyền, tham số vận hành UAV và cơ chế truy nhập phổ tần trong cùng một bài toán tối ưu. Cách tiếp cận này giúp chuyển từ các mô hình tách rời sang một hệ thống tối ưu hóa liên kết, hướng tới triển khai thực tế cho các mạng UAV trong giám sát, cứu hộ và truyền thông khẩn cấp.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

[CT1] **Pham Thi Quynh Trang**, Duong Thi Hang, Ha Xuan Son, Dinh Trieu Duong, and Trinh Anh Vu, "Millimeter Wave Path Loss Modeling for UAV Communications Using Deep Learning", Ad Hoc Networks. ADHOCNETS 2023. Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol 558. Springer, Cham. March 2024 (**Scopus/Q4**).

[CT2] **P. T. Quynh Trang**, H. X. Son, D. T. Duong and T. A. Vu, "UAV Speed Control for Mobile Relay System to Ensure Transmission Quality and Throughput Stability," 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), Ha Long, Vietnam, 2024, pp. 99-103 (**Scopus**).

[CT3] **P. Thi Quynh Trang**, H. Xuan Son and T. A. Vu, "An Approach to the Calculation of Parameters in BS-UAV Networks," in IEEE Access, vol. 12, pp. 109409-109415, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3421556 (**SCI-E/Q1**).

[CT4] **Pham Thi Quynh Trang**, Tong Van Luyen, Duong Thi Hang, Dinh Trieu Duong, and Trinh Anh Vu, "An Enhanced Path Loss Prediction Approach for the A2A Channel in UAV Communications," Journal of Communications, vol. 19, no. 10, pp. 498-505, 2024 (**Scopus/Q3**).

[CT5] **P. T. Q. Trang**, H. X. Son, B. N. Son, D. T. Duong and T. A. Vu, "A Novel Rate Splitting Scheme for Uplink Cognitive Radio Networks," in IEEE Wireless Communications Letters, vol. 15, pp. 450-454, 2026, doi: 10.1109/LWC.2025.3627584 (**SCI/Q1**).

[CT6] **P. T. Q. Trang**, N. T. P. . Van, D. T. Hang, D. T. Duong, and T. A. Vu, "Air-to-Ground Path Loss Modeling in UAV Networks Via GSA-Based Hyperparameter Optimization", ACES Journal, vol. 41, no. 04, pp. 306-314, Apr. 2026. (**SCIE-Q3**).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. 3GPP (2017), Study on enhanced LTE support for aerial vehicles, Technical Report (TR) 36.777, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
2. Abubakar, A. I., Ahmad, I., Omeke, K. G., Ozturk, M., Ozturk, C., Abdel-Salam, A. M., Mollel, M. S., Abbasi, Q. H., Hussain, S. and Imran, M. A. (2023), “A survey on energy optimization techniques in uav-based cellular networks: From conventional to machine learning approaches”, *Drones* **7**(3).
3. Abubakar, A. I., Mollel, M. S., Onireti, O., Ozturk, M., Ahmad, I., Asad, S. M., Sambo, Y., Zoha, A., Hussain, S. and Imran, M. A. (2023), “Coverage and throughput analysis of an energy efficient uav base station positioning scheme”, *Comput. Netw.* **232**(C).
4. Al-Hourani, A., Kandeepan, S. and Lardner, S. (2014a), “Optimal lap altitude for maximum coverage”, *IEEE Wireless Communications Letters* **3**(6), 569–572.
5. Al-Hourani, A., Kandeepan, S. and Lardner, S. (2014b), “Optimal lap altitude for maximum coverage”, *IEEE Wireless Communications Letters* **3**(6), 569–572.
6. Al-Hourani, A., Sithamparanathan, K. and Jamalipour, A. (2014), “Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments”, *2014 IEEE Global Communications Conference* pp. 2898–2904.
7. Alenazy, W.M. Alqahtani, A. (2020), “Gravitational search algorithm based optimized deep learning model with diverse set of features for facial expression recognition”, *J Ambient Intell Human Comput* .
8. Ali, M. S., Tabassum, H. and Hossain, E. (2016), “Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (noma) systems”, *IEEE Access* **4**, 6325–6343.
9. Altman, N. S. (1992), “An introduction to kernel and nearest-neighbor nonparametric regression”, *The American Statistician* **46**(3), 175–185. hdl:1813/31637.
10. Amodu, O. A., Busari, S. A. and Othman, M. (2022), “Physical layer aspects of terahertz-enabled uav communications: Challenges and opportunities”, *Vehicular Communications* **38**, 100540.

11. Azari, M. M., Rosas, F. and Pollin, S. (2017), Coverage performance in UAV-assisted cellular networks: From the sky to the ground, *in* “2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)”, Singapore, pp. 1–7.
12. Banafaa, M., Pepeoğlu, Ö., Shayea, I., Alhammadi, A., Shamsan, Z. A., Razaz, M. A., Alsagabi, M. and Al-Sowayan, S. (2024), “A comprehensive survey on 5g-and-beyond networks with uavs: Applications, emerging technologies, regulatory aspects, research trends and challenges”, *IEEE Access* **12**, 7786–7826.
13. Bansal, A., Singh, K., Clerckx, B., Li, C.-P. and Alouini, M.-S. (2021), “Rate-splitting multiple access for intelligent reflecting surface aided multi-user communications”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **70**, 9217–9229.
14. Bao, B. Q., Hiep, P. T. and Phuong, N. T. (2026), On study of performance of full-duplex two-way relay system with uav-aided, *in* A. Swaroop, B. Virdee, S. Correia and Z. Polkowski, eds, “Proceedings of Data Analytics and Management”, Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 21–30.
15. Bor-Yaliniz, I., Szyszkowicz, S. S. and Yanikomeroglu, H. (2018), “Environment-aware drone-base-station placements in modern metropolitans”, *IEEE Wireless Communications Letters* **7**(3), 372–375.
16. Bor-Yaliniz, I. and Yanikomeroglu, H. (2016), “The new frontier in ran heterogeneity: Multi-tier drone-cells”, *IEEE Communications Magazine* **54**(11), 48–55.
17. Báo Công Thương (2023), “Mở rộng ứng dụng bay UAV vào quản lý vận hành lưới truyền tải”.
18. Cuong, N. T., Ba Nghien, N., Hiep, P. T. and Hai Nam, L. (2025), Joint power and position optimization for uplink max-min throughput in multi-uav assisted small-cell systems using pso, *in* “2025 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)”, pp. 1–6.
19. Dai, L., Wang, B., Ding, Z., Wang, Z., Chen, S. and Hanzo, L. (2018), “A survey of non-orthogonal multiple access for 5g”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **20**(3), 2294–2323.
20. Dai, L., Wang, B., Yuan, Y., Han, S., I, C.-L. and Wang, Z. (2015), “Non-orthogonal multiple access for 5g: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends”, *IEEE Communications Magazine* **53**(9), 74–81.
21. Dai, M. and Clerckx, B. (2021), Uplink rate-splitting for multi-antenna C-RAN with limited fronthaul, *in* “Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC)”, pp. 1–6.

22. Dias Santana, G. M., Cristo, R. S. d. and Lucas Jaquie Castelo Branco, K. R. (2021), “Integrating cognitive radio with unmanned aerial vehicles: An overview”, *Sensors* **21**(3).
23. Ding, Z., Adachi, F. and Poor, H. V. (2016), “The application of MIMO to non-orthogonal multiple access”, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **15**(1), 537–552.
24. Ding, Z., Fan, P., Poor, H. V. and Peng, M. (2019), “Hybrid SIC and QoS-based resource allocation for NOMA systems”, *IEEE Transactions on Communications* **67**(4), 2930–2942.
25. Ding, Z., Liu, Y., Choi, J., Sun, Q., El Kashlan, M., Chih-Lin, I. and Poor, H. V. (2017), “Application of non-orthogonal multiple access in lte and 5g networks”, *IEEE communications magazine* **55**(2), 185–191.
26. Ding, Z., Poor, H. V. and Peng, M. (2016), “Quality-of-service based resource allocation for NOMA systems”, *IEEE Transactions on Communications* **64**(2), 587–599.
27. Ding, Z., Schober, R. and Poor, H. V. (2020a), “Unveiling the importance of sic in noma systems—part 1: State of the art and recent findings”, *IEEE Communications Letters* **24**(11), 2373–2377.
28. Ding, Z., Schober, R. and Poor, H. V. (2020b), “Unveiling the importance of sic in noma systems—part ii: New results and future directions”, *IEEE Communications Letters* **24**, 2378–2382.
29. Ding, Z., Yang, Z., Fan, P. and Poor, H. V. (2014), “On the performance of non-orthogonal multiple access in 5g systems with randomly deployed users”, *IEEE Signal Processing Letters* **21**(12), 1501–1505.
30. Dinh, C. H., Pham, X. N., Tran, X. N. and Nguyen, B. C. (2026), “Performance analysis of irls-aided full-duplex mmwave uav systems using rsma and antenna selection”, *Physical Communication* **75**, 103003.
31. Duy Tan University and Queen’s Belfast University (2017), “Optimal resource allocation for UAV communication systems”, Newton Prize 2017, U.K. Government and Newton Fund. Award-winning project on sustainable development through UAV communications.
32. Erdelj, M., Natalizio, E., Chowdhury, K. R. and Akyildiz, I. F. (2017), “Help from the sky: Leveraging uavs for disaster management”, *IEEE Pervasive Computing* **16**, 24–32.

33. Ezzat D, Hassanien AE, E. H. (2021), “An optimized deep learning architecture for the diagnosis of covid-19 disease based on gravitational search optimization”, *Applied soft computing* .
34. Ghosh, S., Singh, K., Jung, H., Li, C.-P. and Duong, T. Q. (2024), “On the performance of rate splitting multiple access for isac in device-to-multi-device iot communications”, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking* **11**(1), 333–348.
35. Goldsmith, A. (2005*a*), *Wireless Communications*, Cambridge University Press.
36. Goldsmith, A. (2005*b*), *Wireless communications*, Cambridge university press.
37. *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced* (2008).
URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:9208259>
38. Han, S. I. (2022), “Survey on uav deployment and trajectory in wireless communication networks: Applications and challenges”, *Inf.* **13**, 389.
39. Hashemi, A., Dowlatshahi, M. B. and Nezamabadi-Pour, H. (2021), “Gravitational search algorithm: Theory, literature review, and applications”, *Handbook of AI-based Metaheuristics* pp. 119–150.
40. Hastie, T., Tibshirani, R. and Friedman, J. (2009), *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*, 2 edn, Springer, New York, USA.
41. Haykin, S. S. (2005), “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **23**, 201–220.
42. Ho, C. M., Lakew, D. S., Tran, A.-T., Lee, C., Hua, D. T. and Cho, S. (2023), A review on unmanned aerial vehicle-based networks and satellite-based networks with rsma: Research challenges and future trends, in “2023 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIC)”, pp. 139–142.
43. Ho, T. K. (1995), Random decision forests, in “Proceedings of the 3rd International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)”, Montreal, QC, Canada, pp. 278–282. August 14–16, 1995.
44. Hoang, T. M., Dung, L. T., Nguyen, B. C., Le, X. H., Tran, X. N. and Kim, T. (2023), “Outage probability and throughput of mobile multi-antenna UAV-assisted FD-NOMA relay system with imperfect CSI”, *IEEE Systems Journal* **17**(1), 1477–1488.

45. Hu, H. et al. (2020), "Optimization of energy management for UAV-enabled cognitive radio", *IEEE Wireless Communications Letters* **9**(9), 1505–1508.
46. Huyen, L. T. T., Hoang, T. M., Dung, L. T., Nguyen, B. C. and Tran, X. N. (2026), "Short-packet noma communication with assistance of active ris and uav: Analysis and optimization", *IEEE Transactions on Mobile Computing* **25**(4), 5364–5376.
47. Islam, S. M. R., Avazov, N., Dobre, O. A. and sup Kwak, K. (2017), "Power-domain non-orthogonal multiple access (noma) in 5g systems: Potentials and challenges", *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **19**(2), 721–742.
48. Khuwaja, A. A., Chen, Y., Zhao, N., Alouini, M.-S. and Dobbins, P. (2018), "A survey of channel modeling for uav communications", *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **20**(4), 2804–2821.
49. Kokkonen, J., Jornet, J. M., Petrov, V., Koucheryavy, Y. and Juntti, M. (2021), "Channel modeling and performance analysis of airplane-satellite terahertz band communications", *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **70**(3), 2047–2061.
50. Lee, J.-H., Park, K.-H., Ko, Y.-C. and Alouini, M.-S. (2021), "Throughput maximization of mixed fso/rf uav-aided mobile relaying with a buffer", *IEEE Transactions on Wireless Communications* **20**(1), 683–694.
51. Li, B., Fei, Z., Dai, Y. and Zhang, Y. (2018a), "Secrecy-optimized resource allocation for uav-assisted relaying networks", *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* pp. 1–6.
52. Li, B., Fei, Z., Dai, Y. and Zhang, Y. (2018b), "Secrecy-optimized resource allocation for UAV-assisted relaying networks", in "2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)", Abu Dhabi, United Arab Emirates, pp. 1–6.
53. Li, B., Fei, Z. and Zhang, Y. (2019), "Uav communications for 5g and beyond: Recent advances and future trends", *IEEE Internet of Things Journal* **6**(2), 2241–2263.
54. Liu, C., Zhang, S., Zeng, Y. and Zhang, R. (2021), "Energy-efficient UAV control with deep reinforcement learning", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **39**(11), 3241–3257.
55. Liu, H., Bai, Z., Lei, H., Pan, G., Kim, K. J. and Tsiftsis, T. A. (2022a), "A new rate splitting strategy for uplink cr-noma systems", *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **71**(7), 7947–7951.

56. Liu, H., Bai, Z., Lei, H., Pan, G., Kim, K. J. and Tsiftsis, T. A. (2022b), “A new rate splitting strategy for uplink cr-noma systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **71**(7), 7947–7951.
57. Liu, H., Tsiftsis, T. A., Clerckx, B., Jin, K., Sup, K. K., Vincent, K. H., Poor, L. F. I. and Kim, K. J. (2021), “Rate splitting multiple access for semi-grant-free transmissions”, *ArXiv* **abs/2110.02127**.
58. Liu, J., Shi, Y., Fadlullah, Z. M. and Kato, N. (2018), “Space-air-ground integrated network: A survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **20**(4), 2714–2741.
59. Liu, Y., Qin, Z., El Kashlan, M., Ding, Z., Nallanathan, A. and Hanzo, L. (2017), “Non-orthogonal multiple access for 5g and beyond”, *Proceedings of the IEEE* **105**(12), 2347–2381.
60. Lu, L., Li, G. Y., Swindlehurst, A. L., Ashikhmin, A. and Zhang, R. (2014), “An overview of massive mimo: Benefits and challenges”, *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing* **8**(5), 742–758.
61. Mahbub, M., Saym, M. M., Jahan, S., Paul, A. K., Vahid, A., Hosseinalipour, S., Barua, B., Yeh, H.-G., Shubair, R. M., Taleb, T., Kaushik, A., Alsharif, M. H., Islam, M. S., Mahmud, R. R. and Niyato, D. (2025), “Uav-assisted wireless communications in the 6g-and-beyond era: An extensive survey on characteristics, standardization and regulations, enabling technologies, challenges, and future directions”, *Vehicular Communications* **56**, 100977.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214209625001044>
62. Mao, Y., Clerckx, B. and Li, V. O. (2018a), “Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing and outperforming SDMA and NOMA”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* **2018**(1), 1–20.
63. Mao, Y., Clerckx, B. and Li, V. O. K. (2017), “Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing, and outperforming sdma and noma”, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking* **2018**.
64. Mao, Y., Clerckx, B. and Li, V. O. K. (2018b), “Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: Bridging, generalizing, and outperforming SDMA and NOMA”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* **2018**(1), 1–54.

65. Mao, Y., Clerckx, B. and Li, V. O. K. (n.d.), “Rate-splitting multiple access for downlink communication systems: bridging, generalizing, and outperforming sdma and noma”, *Eurasip Journal on Wireless Communications and Networking* **2018**.
66. Mao, Y., Dizdar, O., Clerckx, B., Schober, R., Popovski, P. and Poor, H. V. (2022), “Rate-splitting multiple access: Fundamentals, survey, and future research trends”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **24**(4), 2073–2126.
67. Mengali, U. and D’Andrea, N. A. (1997), Synchronization techniques for digital receivers, in “Applications of Communications Theory”.
68. Menzies, T. and Hu, Y. (2003), “Data mining for very busy people”, *IEEE Computer* pp. 18–25.
69. Mohsan, S. A. H., Khan, M. A., Noor, F., Ullah, I. and Alsharif, M. H. (2022), “Towards the unmanned aerial vehicles (uavs): A comprehensive review”, *Drones* **6**(6).
70. Mozaffari, M., Kargari, A. T. Z., Saad, W., Bennis, M. and Debbah, M. (2018), “Beyond 5g with uavs: Foundations of a 3d wireless cellular network”, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **18**, 357–372.
71. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M. and Debbah, M. (2017a), “Mobile UAVs for energy-efficient IoT communications”, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **16**(11), 7574–7589.
72. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M. and Debbah, M. (2017b), “Mobile unmanned aerial vehicles (uavs) for energy-efficient internet of things communications”, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **16**, 7574–7589.
73. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M. and Debbah, M. (2017c), “Wireless communication using unmanned aerial vehicles (uavs): Optimal transport theory for hover time optimization”, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **16**, 8052–8066.
74. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M. and Debbah, M. (2019), “A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **21**(3), 2334–2360.
75. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y.-H. and Debbah, M. (2018), “A tutorial on uavs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **21**, 2334–2360.

76. Mozaffari, M., Saad, W., Bennis, M., Nam, Y.-H. and Debbah, M. (2019), “A tutorial on uavs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials* **21**(3), 2334–2360.
77. Nguyen, B. C., Phuong, N. T., Tran, X. N. and Hiep, P. T. (2023), “On performance of RIS-aided ground-to-air and air-to-ground communications in multi-user NOMA systems”, *Computer Networks* **228**, 109728.
78. Nguyen, T. T., Vu, N. H., Hoang, T. M., Le, T. T. H., Nguyen, T. P. and Tran, X. N. (2026), Performance maximization in uav-based two-way relay rsma systems, *in* N. T. Nguyen, A.-C. Le, T. D. Tran, T.-P. Hong, Y. Manolopoulos, N. A. Le Khac, P. Tran Tin and V.-N. Huynh, eds, “Computational Intelligence in Engineering Science”, Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 33–42.
79. Nguyen, V. S., Do, P. N., Khanh, P. X., Le, H.-N., Phuong, N. T. and Hiep, P. T. (2026), “On the bler performance of uav-assisted dual-hop v2v mimo-noma systems in finite blocklength regime”, *Digital Signal Processing* **168**, 105625.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1051200425006475>
80. Nobar, S. K. et al. (2022), “Resource allocation in cognitive radio-enabled UAV communication”, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking* **8**(1), 296–310.
81. Park, J., Lee, B., Choi, J., Lee, H., Lee, N., Park, S.-H., Lee, K.-J., Choi, J., Chae, S. H., Jeon, S.-W., Kwak, K. S., Clerckx, B. and Shin, W. (2024), “Rate-splitting multiple access for 6g networks: Ten promising scenarios and applications”, *IEEE Network* **38**(3), 128–136.
82. Pham, T. Q. T., Tong, V. L., Duong, T. H., Dinh, T. D. and Trinh, A. V. (2024), “An enhanced path loss prediction approach for the a2a channel in uav communications”, *Journal of Communications* **19**(10), 498–505.
83. Polese, M., Bertizzolo, L., Bonati, L., Gosain, A. and Melodia, T. (2020a), An experimental mmwave channel model for uav-to-uav communications, *in* “Proceedings of the ACM Workshop on Millimeter-Wave Networks and Sensing Systems (mmNets)”, London, UK.
84. Polese, M., Bertizzolo, L., Bonati, L., Gosain, A. and Melodia, T. (2020b), “Uav-to-uav 60 ghz channel model: Dataset and code”, <https://github.com/wineslab/uav-to-uav-60-ghz-channel-model>.
Accessed: 2026-04-04.

85. Rai, S., Rawat, A. and Kumar, A. (2025), “Design and performance analysis of high-altitude UAVs: trends, challenges, and innovations”, *Discovery Applied Sciences* **7**(1), 833.
86. Saad, W., Bennis, M. and Chen, M. (2019), “A vision of 6g wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems”, *IEEE Network* **34**, 134–142.
87. Safwat, N. E.-D. (2021), “Path loss data for uav channel modeling”.
URL: <https://data.mendeley.com/datasets/z97wrnk75y/1>
88. Safwat, N. E.-D., Hafez, I. M. and Newagy, F. (2022), “UGPL: A MATLAB application for UAV-to-ground path loss calculations”, *Software Impacts* **12**, 100277.
89. Safwat, N. E.-D., Newagy, F. and Hafez, I. M. (2020), “Air-to-ground channel model for uavs in dense urban environments”, *IET Communications* .
90. Shahbazi, M. and Di Renzo, M. (2022), “On the average performance of downlink cellular networks with unmanned aerial vehicles”, *IEEE Transactions on Wireless Communications* **21**(4), 2780–2794.
91. Shahraki, A., Abbasi, M., Piran, M. J., Chen, M. and Cui, S. (2021), “A comprehensive survey on 6g networks: Applications, core services, enabling technologies, and future challenges”, *ArXiv* **abs/2101.12475**.
92. Silva, W. R. S., Santana, L. and Cardoso, D. L. (2025), “Optimization strategies for uav-bs positioning in disaster scenarios”, *IEEE Access* **13**, 189751–189761.
93. Song, Y. and Xu, D. (2025), Cognitive radio-enabled integrated sensing and communication, in “2025 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)”, IEEE, pp. 1–6.
94. Staudemeyer, R. C. and Morris, E. R. (2019), “Understanding lstm – a tutorial into long short-term memory recurrent neural networks”, *arXiv preprint arXiv:1909.09586* . version 1.
95. Sun, S., Rappaport, T. T. S., Thomas, T. A., Ghosh, A., Nguyen, H. C., Kovács, I. Z., Rodriguez, I., Koymen, O. H. and Partyka, A. (2016), “Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5g wireless communications”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **65**, 2843–2860.
96. Supramongkonset, J., Duangsuwan, S. and Promwong, S. (2022), “A study of a2a channel modeling for small uav-enabled wireless communication”,

97. Tabassum, H., Ali, M. S., Hossain, E., Hossain, M. J. and Kim, D. I. (2017), Uplink vs. downlink noma in cellular networks: Challenges and research directions, *in* “2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)”, pp. 1–7.
98. Tahat, A., Edwan, T., Al-Sawwaf, H., Al-Baw, J. and Amayreh, M. (2020), Simplistic machine learning-based air-to-ground path loss modeling in an urban environment, *in* “Proceedings of the 2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)”, pp. 158–163.
99. Tse, D. and Viswanath, P. (2005a), *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press.
100. Tse, D. and Viswanath, P. (2005b), *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
101. Wan, F., Yaseen, M. B., Riaz, M. B., Shafiq, A., Thakur, A. and Rahman, M. O. (2024), “Advancements and challenges in uav-based communication networks: A comprehensive scholarly analysis”, *Results in Engineering* **24**, 103271.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024015251>
102. Wang, Y., Farooq, J., Ghazzai, H. and Setti, G. (2025), Multi-uav placement for integrated access and backhauling using llm-driven optimization, *in* “2025 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)”, pp. 1–6.
103. Wu, Q. and Zhang, R. (2018), “Common throughput maximization in UAV-enabled OFDMA systems with delay consideration”, *IEEE Transactions on Communications* **66**(12), 6614–6627.
104. Yan, C., Fu, L., Zhang, J. and Wang, J. (2019), “A comprehensive survey on uav communication channel modeling”, *IEEE Access* **7**, 107769–107792.
105. Yang, G., Zhang, Y., He, Z., Wen, J., Ji, Z. and Li, Y. (2019), “Machine learning based prediction methods for path loss and delay spread in air-to-ground millimetre-wave channels”, *IET Microwaves, Antennas & Propagation* **13**(8), 1113–1121.
106. Yang, L., Guo, D., Liu, Y. and Feng, L. (2024), “Joint trajectory and power optimization for uav-assisted communication networks”, *2024 10th International Conference on Computer and Communications (ICCC)* pp. 2542–2547.

107. Yang, Z., Chen, M., Saad, W. and Shikh-Bahaei, M. (2021), “Optimization of rate allocation and power control for rate splitting multiple access (rsma)”, *IEEE Transactions on Communications* **69**(9), 5988–6002.
108. You, H., Bai, Z., Liu, H., Tsiftsis, T. A. and Kwak, K. S. (2023), “Rate-splitting for intelligent reflecting surface-assisted cr-noma systems”, *Journal of Communications and Networks* **25**(1), 15–24.
109. Yu, Y. et al. (2023), “Joint trajectory and resource optimization for RIS assisted UAV cognitive radio”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **72**(10), 13643–13648.
110. Yun, Z. and Iskander, M. F. (2015), “Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications”, *IEEE Access* **3**, 1089–1100.
111. Zeng, Y., Lyu, J. and Zhang, R. (2018), “Cellular-connected uav: Potential, challenges, and promising technologies”, *IEEE Wireless Communications* **26**, 120–127.
112. Zeng, Y., Lyu, J. and Zhang, R. (2019), “Cellular-connected uav: Potential, challenges, and promising technologies”, *IEEE Wireless Communications* **26**, 120–127.
113. Zeng, Y., Zhang, R. and Lim, T. J. (2016a), “Throughput maximization for uav-enabled mobile relaying systems”, *IEEE Transactions on Communications* **64**, 4983–4996.
114. Zeng, Y., Zhang, R. and Lim, T. J. (2016b), “Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges”, *IEEE Communications Magazine* **54**, 36–42.
115. Zhang, L., Zeng, Y. and Zhang, R. (2020), “Cognitive uav communication via deep reinforcement learning”, *IEEE Network* **34**(5), 110–117.
116. Zhang, S., Zhang, H., Di, B. and Song, L. (2018), “Joint trajectory and power optimization for UAV relay networks”, *IEEE Communications Letters* **22**(1), 161–164.
117. Zhang, X., Zhang, Y., Yu, R., Wang, W. and Guizani, M. (2014), “Enhancing spectral-energy efficiency forlte-advanced heterogeneous networks: a users social pattern perspective”, *IEEE Wirel. Commun.* **21**, 10–17.
118. Zhang, Y., Wen, J.-X., Yang, G.-S., He, Z.-W. and Luo, X.-R. (2018), “Air-to-air path loss prediction based on machine learning methods in urban environments”, *Wireless Communications and Mobile Computing* **2018**, 1–12.

119. Zhao, J., Gao, F., Ding, G., Zhang, T., Jia, W. and Nallanathan, A. (2018), “Integrating communications and control for uav systems: Opportunities and challenges”, *IEEE Access* **6**, 67519–67527.
120. Zhao, J., Gao, F., Wu, Q., Jin, S., Wu, Y. and Jia, W. (2018), “Beam tracking for uav mounted satcom on-the-move with massive antenna array”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **36**(2), 363–375.
121. Zhou, F., Wu, Y., Liang, Y.-C., Li, Z., Wang, Y. and Wong, K.-K. (2018a), “State of the art, taxonomy, and open issues on cognitive radio networks with noma”, *IEEE Wireless Communications* **25**(2), 100–108.
122. Zhou, F., Wu, Y., Liang, Y.-C., Li, Z., Wang, Y. and Wong, K.-K. (2018b), “State of the art, taxonomy, and open issues on cognitive radio networks with noma”, *IEEE Wireless Communications* **25**(2), 100–108.
123. Zhou, L., Yang, Z., Zhao, G., Zhou, S. and Wang, C.-X. (2018), Propagation characteristics of air-to-air channels in urban environments, in “Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)”, Abu Dhabi, United Arab Emirates, pp. 1–6.
124. Zhu, Q., Wang, C.-X., Hua, B., Mao, K., Jiang, S. and Yao, M. (n.d.), *3GPP TR 38.901 Channel Model*, John Wiley Sons, Ltd, pp. 1–35.