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 đào tạo: Kỹ thuật Viễn thông
Mã số: 9520208

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

Hà Nội - 2026

Công trình được hoàn thành tại: Trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

Người hướng dẫn khoa học: PGS. TS. Trịnh Anh Vũ (CBHD chính) và TS. Đinh Triều Dương (CBHD phụ)

Phản biện: GS.TS. Trần Xuân Nam - Học viện kỹ thuật quân sự

Phản biện: GS. TS. Trần Đức Tân - Đại học Phenikaa

Phản biện: PGS. TS. Nguyễn Hữu Phát - Đại học Bách khoa Hà Nội

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng cấp Đại học Quốc gia chấm luận án tiến sĩ họp tại Phòng 212-E3, Trường Đại học Công nghệ, vào hồi 14 giờ 00 ngày 30 tháng 9 năm 2026.

NGHIÊN CỨU SINH	**CÁN BỘ HƯỚNG DẪN**
	PGS.TS. Trịnh Anh Vũ
Phạm Thị Quỳnh Trang	
	TS. Đinh Triều Dương

XÁC NHẬN CỦA ĐƠN VỊ ĐÀO TẠO

Có thể tìm hiểu luận án tại:

- Thư viện Quốc gia Việt Nam
- Trung tâm Thông tin - Thư viện, Đại học Quốc gia Hà Nội

Mở đầu

1. Động lực nghiên cứu

Sự bùng nổ của các thiết bị di động và dịch vụ số đã thúc đẩy sự phát triển của các mạng 5G/B5G/6G, tuy nhiên hạ tầng mặt đất vẫn gặp hạn chế về vùng phủ và tính linh hoạt. UAV được xem là giải pháp hiệu quả để mở rộng vùng phủ và tăng cường dung lượng mạng, dù việc tích hợp chúng đặt ra nhiều thách thức về tối ưu hệ thống và đồng thời mở ra các hướng nghiên cứu mới khi kết hợp với các công nghệ tiên tiến như CR, RSMA, NOMA, IRS và MEC.

2. 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:

- 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.

- Nâng cao hiệu quả truyền thông bằng việc tối ưu hóa các tham số vận hành của UAV: Thiết lập các biểu thức giải tích xác định độ cao, góc ngẩng và vận tốc tối ưu, đồng thời phân tích ảnh hưởng của các tham số này đến vùng phủ sóng, độ lợi công suất và tính ổn định của liên kết truyền thông.

- Nghiên cứu giải pháp truy nhập và chia sẻ phổ tần sử dụng kỹ thuật RSMA: Xây dựng mô hình truyền dẫn đường lên kết hợp vô tuyến nhận thức và đa truy nhập tách tỉ lệ tốc độ. Luận án xác định các điều kiện ghép cặp người dùng ưu tiên (PU) – người dùng thứ cấp (SU) và quy trình tách tín hiệu tại trạm gốc. Đồng thời, đề xuất thuật toán ghép cặp PU-SU nhằm gia tăng số lượng người dùng được phục vụ, góp phần nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần của hệ thống.

3. Phạm vi nghiên cứu

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. Đóng góp khoa học của luận án

Luận án đạt được ba đóng góp khoa học chính:

1 - Luận án 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 dự báo 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 - Luận án 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 xây dựng 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.

5. Bố cục của luận án

Luận án được tổ chức thành bốn chương chính, đảm bảo tính logic và liên kết giữa các nội dung nghiên cứu:

- **Chương 1:** Tổng quan về UAV trong mạng vô tuyến thế hệ mới, các mô hình kênh truyền và các kỹ thuật đa truy nhập hiện đại, đồng thời xác định khoảng trống nghiên cứu.

- **Chương 2:** ƯỚc lượng suy hao kênh truyền UAV dựa trên kỹ thuật học sâu, tập trung vào các liên kết A2G và A2A trong các môi trường truyền dẫn khác nhau.

- **Chương 3:** 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 nhằm nâng cao hiệu quả truyền thông sử dụng UAV.

- **Chương 4:** Nghiên cứu về truyền thông nhận thức đường lên cho mạng UAV sử dụng kỹ thuật RSMA, bao gồm các điều kiện ghép cặp người dùng và thuật toán điều phối tài nguyên.

Chương 1

Tổng quan về truyền thông vô tuyến sử dụng UAV và các vấn đề nghiên cứu

1.1 Khái quát về thiết bị bay không người lái (UAV)

Thiết bị bay không người lái (UAV) là các thực thể bay không người lái có khả năng vận hành tự động hoặc điều khiển từ xa. Trong hệ sinh thái 5G/6G, UAV đóng vai trò là các nút mạng linh hoạt nhờ ba đặc tính cốt lõi: khả năng triển khai động, chi phí vận hành tối ưu và khả năng thiết lập liên kết tầm nhìn thẳng (LoS).

1.1.1 Phân loại và vai trò của UAV

Việc phân loại UAV là cơ sở để lựa chọn kỹ thuật truyền thông phối hợp phù hợp:

- **Theo cấu trúc vật lý:** Bao gồm UAV cánh cố định (tốc độ cao, tầm xa), UAV cánh quạt (VTOL, bay đứng tại chỗ) và UAV lai.
- **Theo độ cao vận hành:** Chia thành Nền tảng độ cao thấp (LAP - dưới 10 km) phục vụ kết nối đô thị và Nền tảng độ cao lớn (HAP - tầng bình lưu) phục vụ phủ sóng diện rộng.
- **Theo vai trò mạng:** UAV tham gia vào kiến trúc tích hợp Không gian – Không khí – Mặt đất, đóng vai trò như trạm gốc bay (UAV-BS) hoặc nút chuyển tiếp (Relay) để mở rộng vùng phủ và hỗ trợ cứu hộ, định vị.

1.2 Kênh truyền trong truyền thông UAV

Kênh truyền UAV có đặc tính 3D biến đổi động, chịu ảnh hưởng mạnh bởi độ cao và môi trường thực tế.

1.2.1 Phân loại các liên kết truyền dẫn

- **A2S (Air-to-Satellite):** Chịu ảnh hưởng bởi hiệu ứng khí quyển và góc ngẩng vệ tinh.

- **A2A (Air-to-Air):** Liên kết giữa các UAV, thường có LoS chiếm ưu thế, suy hao theo mô hình không gian tự do nhưng chịu hiệu ứng Doppler lớn do tốc độ di chuyển cao.
- **A2G (Air-to-Ground):** Kênh truyền phức tạp nhất, là sự kết hợp giữa các thành phần LoS và NLoS (Non-Line-of-Sight), phụ thuộc vào góc ngẩng và cấu trúc vật cản mặt đất.

1.2.2 Mô hình toán học tổng quát

- **Hàm truyền** kênh truyền $h(t)$ giữa UAV và thiết bị thu được mô tả bởi:

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

Trong đó $PL(d(t))$ là suy hao đường truyền, $g(t)$ là thành phần fading (Rician/Rayleigh) và $\theta(t)$ là pha nhiễu Doppler.

- **Mô hình kênh truyền A2S trong băng tần THz:**

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

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).

$K_a(f, r_{\text{atm}})$ là hệ số hấp thụ phân tử đối với các điều kiện khí quyển không đồng nhất, phụ thuộc vào áp suất, nhiệt độ và thành phần phân tử của môi trường truyền.

$\delta_{\text{rain}}(r_r)$ 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.

- **Suy hao kênh truyền theo mô hình không gian tự do:**

$$PL_{\text{dB}}(d) = 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \tag{1.3}$$

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).

- **Mô hình kênh Kênh A2G:**

$$PL_{\text{A2G}}(d, h) = PL_{\text{LOS}}(d, h) \cdot P_{\text{LOS}}(h, d) + PL_{\text{NLOS}}(d, h) \cdot (1 - P_{\text{LOS}}(h, d)) \tag{1.4}$$

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 tầm nhìn (LOS).

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

$P_{\text{LOS}}(h, d)$: 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:

$$P_{\text{LOS}}(h, d) = \frac{1}{1 + a \cdot \exp\left(-b(\theta - a)\right)} \tag{1.5}$$

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: $a = 12.08$, $b = 0.11$.

1.3 Kỹ thuật đa truy cập phân chia theo tỷ lệ (RSMA)

RSMA (*Rate-Splitting Multiple Access*) là kỹ thuật đa truy cập tiên tiến, chia thông tin người dùng thành phần chung (common) và phần riêng (private).

- **Nguyên lý RSMA Downlink:**

  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:

$$X = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{k=1}^{K} \mathbf{p}_k s_k \tag{1.6}$$

  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 k là:

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{x} + n_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_c s_c + \sum_{j=1}^{K} \mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_j s_j + n_k \tag{1.7}$$

Trong đó:

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

n_k là nhiễu AWGN tại người dùng k.

Quá trình giải mã tại người dùng: Mỗi người dùng k trước tiên giải mã tín hiệu chung sk bằng cách coi toàn bộ tín hiệu riêng là nhiễu.

- **Nguyên lý RSMA Uplink:**

  Trong RSMA đường lên, mỗi người dùng k chia thông tin thành hai phần:

  - Phần riêng, chỉ dành cho người dùng đó.

  - Phần chung, được kết hợp với phần chung từ các người dùng khác để tạo thành một luồng chung được giải mã bởi BS và phân phối tới các người dùng tương ứng. Tín hiệu truyền từ người dùng k là:

$$x_k = \sqrt{p_{c,k}}\, s_{c,k} + \sqrt{p_{p,k}}\, s_{p,k} \tag{1.8}$$

  Trong đó:

  $s_{c,k}$ là phần dữ liệu chung của người dùng k,

  $s_{p,k}$ là phần dữ liệu riêng của người dùng k,

  $p_{c,k}$ và $p_{p,k}$ là công suất phân bổ cho phần chung và riêng.

  Tín hiệu tổng hợp nhận tại BS là:

$$y = \sum_{k=1}^{K} h_k x_k + n \tag{1.9}$$

  Trong đó:

  h_k là vector kênh từ người dùng k đến BS,

  n là nhiễu AWGN tại BS.

  Trạm gốc thực hiện giải mã luồng chung trước, sau đó loại bỏ phần chung khỏi tín hiệu nhận và giải mã phần riêng.

1.4 Kỹ thuật giải mã khử nhiễu liên tiếp (SIC)

SKỹ thuật SIC thực hiện giải mã tuần tự và loại bỏ các tín hiệu đã giải mã trong hệ thống đa người dùng, yêu cầu thông tin kênh và QoS, với ba biến thể chính gồm SIC dựa trên trạng thái kênh, SIC theo QoS và SIC lai.

Phương pháp khử nhiễu liên tiếp (SIC) dựa trên thông tin trạng thái kênh (CSI) xác định thứ tự giải mã theo độ mạnh của kênh truyền, trong đó tín hiệu của người dùng có độ lợi kênh lớn hơn sẽ được giải mã trước.

Phương pháp CSI-based SIC có thể gây ra hiện tượng lỗi sàn (error floor) do ưu tiên giải mã người dùng có kênh mạnh hơn, khiến người dùng yếu vẫn có xác suất outage không thể triệt tiêu khi SNR tăng cao, đặc biệt trong các môi trường có nhiều người dùng với chất lượng kênh gần như đồng đều.

Phương pháp khử nhiễu liên tiếp dựa trên QoS (QoS-based SIC) thiết lập thứ tự giải mã bằng cách ưu tiên người dùng có yêu cầu dịch vụ cao hơn, nhằm đảm bảo các ràng buộc về chất lượng dịch vụ như tốc độ dữ liệu tối thiểu hoặc độ trễ, đồng thời tối ưu hóa việc phân bổ tài nguyên hệ thống.

SIC dựa trên QoS ưu tiên giải mã các người dùng có yêu cầu dịch vụ cao nhằm đảm bảo chất lượng dịch vụ và nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên kênh; 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 ngừng và hạn chế hiệu quả phổ của hệ thống.

Kỹ thuật SIC lai kết hợp ưu điểm của SIC dựa trên CSI và QoS bằng cách linh hoạt xác định thứ tự giải mã theo chênh lệch kênh hoặc yêu cầu dịch vụ, qua đó cân bằng giữa hiệu suất hệ thống và đảm bảo QoS, đồng thời giảm hiện tượng lỗi sàn so với các phương pháp SIC truyền thống.

Chương 2

Mô hình hóa và ước lượng suy hao kênh truyền với UAV dựa trên kỹ mô hình học sâu

Chương 2 xây dựng khung mô hình hóa suy hao kênh truyền dựa trên dữ liệu cho hệ thống UAV nhằm vượt qua các hạn chế của mô hình giải tích truyền thống trong ước lượng suy hao đường truyền. Các đặc trưng hình học và tần số được khai thác thông qua các kiến trúc học sâu như LSTM, Bi-LSTM và Encoder–Decoder LSTM để nắm bắt tính phụ thuộc không–thời gian của kênh truyền.

2.1 Mô hình hóa suy hao kênh truyền dựa trên dữ liệu

Mục này xây dựng một khung mô hình hóa kênh truyền dựa trên học sâu nhằm ước lượng suy hao đường truyền trong hệ thống UAV thông qua ánh xạ phi tuyến $\hat{L} = f_{\omega}(\mathbf{x})$, với các đặc trưng đầu vào như khoảng cách, độ cao UAV, tần số và tham số môi trường. Mô hình được huấn luyện ngoại tuyến trên dữ liệu mô phỏng hoặc đo đạc và được thiết kế để cân bằng giữa độ chính xác và khả năng khái quát.

Khung hệ thống bao gồm các khối chính: dữ liệu đầu vào và tiền xử lý, phân tích và lựa chọn đặc trưng, xây dựng mô hình học sâu, và đánh giá hiệu năng bằng các chỉ tiêu RMSE, MAE và R^2.

2.2 Các thuật toán học máy được xem xét

2.2.1 Thuật toán K – láng giềng

Thuật toán K-Nearest Neighbor (KNN) là phương pháp học có giám sát được sử dụng để dự đoán suy hao kênh A2G bằng cách ánh xạ phi tuyến từ không gian đặc trưng hình học–môi trường sang giá trị suy hao. KNN không xây dựng mô hình tường minh mà dựa trên các điểm lân cận gần nhất để suy luận, tuy nhiên phương pháp này nhạy cảm với nhiễu và phụ thuộc mạnh vào cấu trúc dữ liệu cục bộ.

2.2.2 Thuật toán cây quyết định

Cây quyết định mô hình hóa quan hệ giữa các đặc trưng và suy hao kênh thông qua việc phân hoạch đệ quy không gian đặc trưng thành các miền con rời rạc. Mặc dù dễ diễn giải và có khả năng mô hình hóa quan hệ phi tuyến, phương pháp này dễ bị quá khớp nếu không được kiểm soát độ sâu hoặc áp dụng kỹ thuật cắt tỉa.

2.2.3 Random Forest (RF)

Random Forest là phương pháp học tổ hợp kết hợp nhiều cây quyết định được huấn luyện trên các tập dữ liệu và tập đặc trưng ngẫu nhiên nhằm tăng tính đa dạng và giảm phương sai. Nhờ cơ chế tổng hợp kết quả dự đoán, RF cải thiện độ chính xác và hạn chế quá khớp so với cây đơn lẻ, nhưng có chi phí tính toán cao và khả năng diễn giải thấp hơn.

2.2.4 Long Short-Term Memory (LSTM)

LSTM là mạng nơ-ron hồi tiếp có khả năng học các phụ thuộc dài hạn trong dữ liệu chuỗi nhờ cơ chế các cổng nhớ, phù hợp cho việc dự đoán suy hao kênh A2A và A2G khi UAV di chuyển trên các quỹ đạo động. Tuy nhiên, mô hình này đòi hỏi chi phí huấn luyện cao và phụ thuộc nhiều vào cấu trúc mạng cũng như lựa chọn siêu tham số.

2.2.5 Mô hình Encoder–Decoder LSTM

Kiến trúc Encoder–Decoder LSTM mở rộng LSTM truyền thống bằng cách ánh xạ chuỗi đầu vào thành một biểu diễn ẩn thông qua encoder và sử dụng decoder để ước lượng chuỗi đầu ra. Cách tiếp cận này cho phép mô hình hóa linh hoạt các quan hệ nhiều–nhiều hoặc nhiều–một, từ đó nâng cao độ chính xác trong dự đoán suy hao kênh truyền so với LSTM một chiều.

2.3 Phân tích kết quả

Hiệu quả của mô hình ước lượng suy hao kênh truyền đề xuất được đánh giá thông qua hai bộ dữ liệu độc lập, bao gồm dữ liệu đo đạc thực nghiệm cho kênh A2A ở dải tần mmWave (60 GHz) và dữ liệu mô phỏng cho kênh A2G trong môi trường đô thị ba chiều. Việc sử dụng đồng thời hai nguồn dữ liệu giúp kiểm chứng khả năng khái quát hóa của mô hình học sâu và cung cấp cơ sở so sánh khách quan với các mô hình kênh truyền thống. Các mô hình học máy được xây dựng và tối ưu hóa theo khung phương pháp luận đã đề xuất, với kết quả nghiên cứu được thẩm định và công bố trong các công trình khoa học liên quan.

Kết quả ước lượng kênh A2A

Đối với kênh truyền A2A, bộ dữ liệu gồm 6.889 mẫu được tiền xử lý thông qua các bước làm sạch, xử lý giá trị ngoại lai, chuẩn hóa và phân tách thành tập huấn luyện (80%) và kiểm thử (20%). Các đặc trưng đầu vào quan trọng bao gồm khoảng cách, độ cao, hướng búp sóng, độ lợi anten và nhiệt độ thiết bị, phản ánh đầy đủ các yếu tố hình học và trạng thái hệ thống ảnh hưởng đến suy hao kênh. Ba kiến trúc mạng nơ-ron hồi tiếp gồm LSTM, Bi-LSTM và

Encoder–Decoder LSTM được thiết kế và tối ưu hóa siêu tham số nhằm nắm bắt tính phụ thuộc không–thời gian của kênh truyền.

Bảng 2.1 tổng hợp các chỉ số sai số MAE và RMSE của các mô hình được xem xét. Kết

Bảng 2.1: So sánh sai số dự đoán suy hao kênh truyền A2A

STT	Mô hình	MAE (dB)	RMSE (dB)
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 (En-LSTM)**	**0,939**	**1,229**

quả thực nghiệm cho thấy các mô hình học sâu vượt trội so với các phương pháp truyền thống như mô hình không gian tự do (FSPL), mô hình phụ thuộc độ cao và KNN. Những kết quả này khẳng định hiệu quả của việc khai thác các kiến trúc học sâu dựa trên chuỗi thời gian trong việc nâng cao độ chính xác nhận thức môi trường cho các hệ thống truyền thông UAV.

Kết quả ước lượng kênh A2G

Khác với liên kết A2A, kênh truyền A2G trong môi trường đô thị có độ phức tạp cao do ảnh hưởng của vật cản và hiệu ứng đa đường, khiến các mô hình học máy với siêu tham số mặc định khó đạt được độ chính xác tối ưu. Vì vậy, các thuật toán tối ưu hóa siêu tham số, đặc biệt là thuật toán tối ưu hóa trọng trường (GSA), đã được áp dụng nhằm tinh chỉnh cấu trúc và tham số của các mô hình dự báo, từ đó nâng cao khả năng khái quát hóa trong các kịch bản che khuất phức tạp. Kết quả thực nghiệm cho thấy các mô hình học máy vượt trội so với mô hình FSPL truyền thống, với sai số MAE giảm đáng kể từ 9,29 dB xuống dưới 4,5 dB. Đặc biệt, phương pháp GSA mang lại hiệu năng tốt nhất, giúp các mô hình KNN và Decision Tree đạt độ chính xác cao và tiệm cận với Random Forest, đồng thời đảm bảo tính ổn định của hệ thống nhận thức kênh truyền A2G. Các kết quả so sánh định lượng được trình bày trong Bảng 2.2.

Bảng 2.2: Hiệu năng dự báo 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**

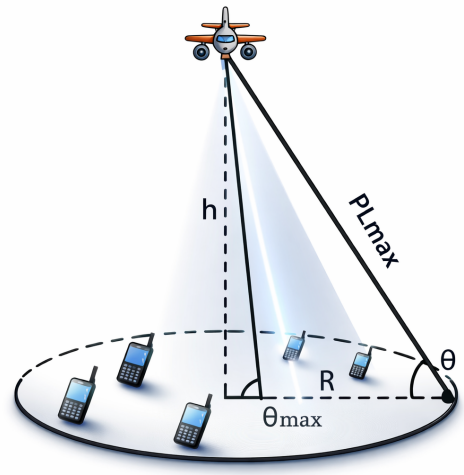
Chương 3

Tối ưu tham số vận hành UAV nhằm nâng cao hiệu quả truyền thông

3.1 UAV đóng vai trò trạm cơ sở

Mục này trình bày việc phân tích và tối ưu hóa các tham số hình học và động học của UAV-BS thông qua các biểu thức giải tích dạng đóng nhằm xác định cấu hình triển khai tối ưu. Các kết quả được xác nhận bằng mô phỏng số, chứng minh hiệu quả và tính ứng dụng của phương pháp đề xuất.

3.1.1 Mô hình hệ thống



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

UAV được mô hình hóa như một trạm cơ sở di động ở độ cao h, cung cấp vùng phủ bán kính R, trong đó người dùng tại rìa ô chịu suy hao truyền dẫn lớn nhất do góc nhìn nhỏ nhất.

Góc ngẩng tối ưu là nghiệm của phương trình:

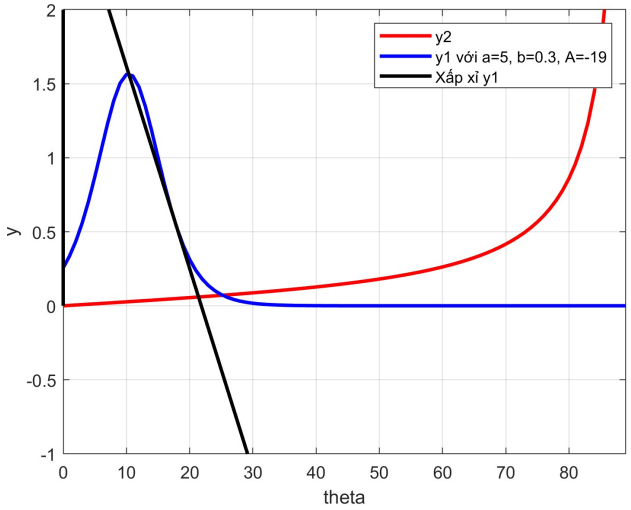
$$0 = \frac{\pi}{9 \ln 10} \tan\left(\frac{\pi\theta}{180}\right) + \frac{abA \exp\left(-b(\theta - a)\right)}{\left(1 + a \exp\left(-b(\theta - a)\right)\right)^2} \tag{3.1}$$

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

Phương trình (3.1) được chuyển thành hệ hai phương trình như sau:

$$\begin{cases} y_1(\theta) = \dfrac{-abA\exp\left(-b(\theta-a)\right)}{\left(1+a\exp\left(-b(\theta-a)\right)\right)^2} \\ y_2(\theta) = \dfrac{\pi}{9\ln 10}\tan\left(\dfrac{\pi\theta}{180}\right) \end{cases} \tag{3.2}$$

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



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

Nghiệm của hệ phương trình (3.2) là giao điểm của hai đường cong sau:

$$y_2(\theta) = \frac{\pi}{9\ln 10}\tan\left(\frac{\pi\theta}{180}\right) \tag{3.3}$$

và

$$y_1(\theta) = \frac{abA\exp\left(-b(\theta-a)\right)}{\left(1+a\exp\left(-b(\theta-a)\right)\right)^2} \tag{3.4}$$

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

$$\begin{cases} y_1'(\theta) = -\dfrac{bA}{4} + 0.0726\,b^2A\left[\theta - \left(a + \dfrac{1}{b}\ln a\right) + 1.58\,Ab^2\right] \\ y_2(\theta) = \dfrac{\pi^2}{9\ln 10\cdot 180}\,\theta \end{cases} \tag{3.5}$$

3.1.3 Tính toán các tham số của hệ thống

Khi $y_1'(\theta) = y_2(\theta)$, **góc ngẩng tối ưu xấp xỉ** được xác định bởi:

$$\theta_{\text{app}} = \frac{-\frac{bA}{4} - \left(a + \frac{1}{b}\ln a - 1.58\,Ab^2\right)\,0.0726\,b^2A}{-0.0726\,b^2A + 0.0027} \tag{3.6}$$

Đặt:

$$\overline{PL} = PL_{\text{max}} - \left(\frac{A}{1 + a\exp\left(-b(\theta_{\text{app}} - a)\right)} + B\right) \tag{3.7}$$

Bán kính của cell được xác định bởi:

$$R = 10^{\frac{\overline{PL}}{20}}\cos\left(\frac{\pi\theta_{\text{app}}}{180}\right) \tag{3.8}$$

Độ cao tối ưu của UAV:

$$h = R\tan(\theta_{\text{op}}) \tag{3.9}$$

Độ lợi công suất:

$$G_{PL} = N\Bigg\{|A|\left(1 - \frac{1}{1 + a\exp(ba)}\right) + \frac{20}{\ln 10}\left[\frac{1}{2}\cos\left(\frac{\pi\theta_{\text{app}}}{180}\right) - \frac{\tan^2\left(\frac{\pi\theta_{\text{app}}}{180}\right)}{2}\ln\left(\frac{1 + \frac{1}{\cos\left(\frac{\pi\theta_{\text{app}}}{180}\right)}}{\tan\left(\frac{\pi\theta_{\text{app}}}{180}\right)}\right) - 1\right]\Bigg\} \tag{3.10}$$

3.1.4 Đánh giá kết quả

Các kết quả so sánh được trình bày trong Bảng 3.1.

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%

Kết quả định lượng cho thấy biểu thức 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 các tài liệu đã công bố trước đó.

Kết quả trình bày trong Bảng 3.2 cho thấy mức tăng công suất khi thay thế trạm gốc 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.

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	$N \times 14.7230$

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

Trong kịch bản này, UAV được mô hình hóa như một nút chuyển tiếp di động hỗ trợ liên lạc giữa nguồn S và đích D cách nhau khoảng L, trong khi liên kết trực tiếp là không đáng kể. UAV bay ở độ cao cố định H với quỹ đạo đã biết trước, và các kênh truyền S–R và R–D được giả định là liên kết tầm nhìn thẳng (LoS).

Bằng phân tích giải tích, vận tốc tối ưu nhằm đạt được thông lượng đồng đều của hệ thống được xác định bởi:

$$v^* = \frac{2\left(\frac{LK}{2} - I\right)}{K - \frac{K_1}{2}} \tag{3.11}$$

Trong đó:

$$K_1 = \log_2\left(1 + \frac{P}{H^2}\right) \tag{3.12}$$

$$\begin{aligned} I = {} & \frac{L}{2}\log_2\left(1 + \frac{P}{H^2 + \left(\frac{L}{2}\right)^2}\right) \\ & + P\log_2 e\left[\frac{2}{\sqrt{P+H^2}}\arctan\left(\frac{L/2}{\sqrt{P+H^2}}\right) - \frac{2}{H}\arctan\left(\frac{L/2}{H}\right)\right] \end{aligned} \tag{3.13}$$

Mô phỏng xác nhận hiệu quả của thiết kế UAV chuyển tiếp, với vận tốc tối ưu khoảng $1{,}56$ m/s và biểu thức giải tích đề xuất cho kết quả gần đúng $1{,}4986$ m/s với độ phức tạp tính toán thấp.

Chương 4

Truyền thông nhận thức đường lên cho mạng UAV sử dụng kỹ thuật RSMA

Chương 4 đề xuất mô hình vô tuyến nhận thức kết hợp rate-splitting multiple access (CR-RSMA) cho đường lên nhằm nâng cao hiệu quả chia sẻ phổ giữa người dùng sơ cấp (PU) và người dùng thứ cấp là UAV (SU). Nghiên cứu thiết lập điều kiện dạng đóng cho việc ghép cặp PU–SU, đồng thời phát triển chiến lược giải mã RSMA tại trạm cơ sở để mở rộng vùng dung năng vượt ngoài khả năng của NOMA truyền thống. Bên cạnh đó, một thuật toán ghép cặp dựa trên sắp xếp chất lượng kênh được đề xuất nhằm tối đa hóa số lượng cặp người dùng khả thi trong khi vẫn đảm bảo QoS cho PU. Kết quả mô phỏng cho thấy phương pháp CR-RSMA có thể tăng tới 50% số lượng cặp PU-SU so với CR-NOMA và duy trì hiệu năng ổn định dưới các mức ưu tiên dịch vụ khác nhau.

4.1 Mô hình hệ thống

Hệ thống được xét bao gồm một trạm cơ sở trung tâm, PU là các thiết bị mặt đất có quyền ưu tiên sử dụng phổ, và các UAV đóng vai trò là SU truy nhập phổ theo cơ chế cơ hội. Các PU và UAV có thể đồng thời truyền tín hiệu lên trạm cơ sở trên cùng một khối tài nguyên vô tuyến, trong đó kỹ thuật RSMA được sử dụng để tách tín hiệu và quản lý nhiễu đa người dùng. Mọi hoạt động truy nhập của UAV phải đảm bảo các yêu cầu QoS tối thiểu của PU, phản ánh đúng nguyên lý hoạt động của hệ thống vô tuyến nhận thức.

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. 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. Trạm cơ sở được giả thiết có CSI hoàn hảo của cả PU và SU.

4.2 Phát biểu bài toán

Chương này thực hiện trả lời 3 câu hỏi nghiên cứu sau:

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?

4.3 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:**

$$R_0 \leq \log_2\left(1 + P_0|h_0|^2\right) \tag{4.1}$$

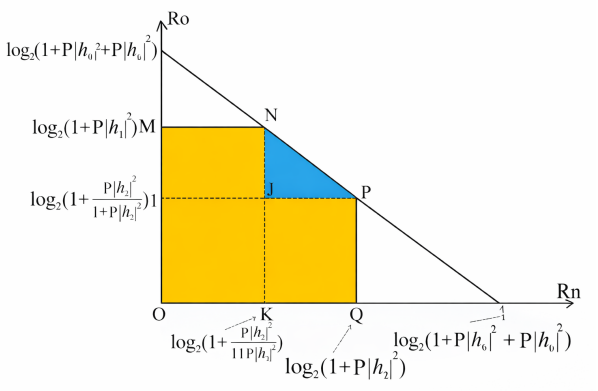
- **Ràng buộc tốc độ cá nhân của SU:**

$$R_s \leq \log_2\left(1 + P_n|h_n|^2\right) \tag{4.2}$$

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

$$R_0 + R_s \leq \log_2\left(1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2\right) \tag{4.3}$$

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 4.1.



Hình 4.1: Ràng buộc vùng dung lượng trong mặt phẳng (R_s, R_0)

4.4 Bài toán ghép cặp PU–SU

Việc chấp nhận SU trong mạng vô tuyến nhận thức đòi hỏi sự tồn tại của tập tốc độ khả thi thỏa mãn QoS của cả PU và SU, được biểu diễn bởi điểm vận hành mục tiêu $T(R_s, R_0)$ trong mặt phẳng dung lượng.

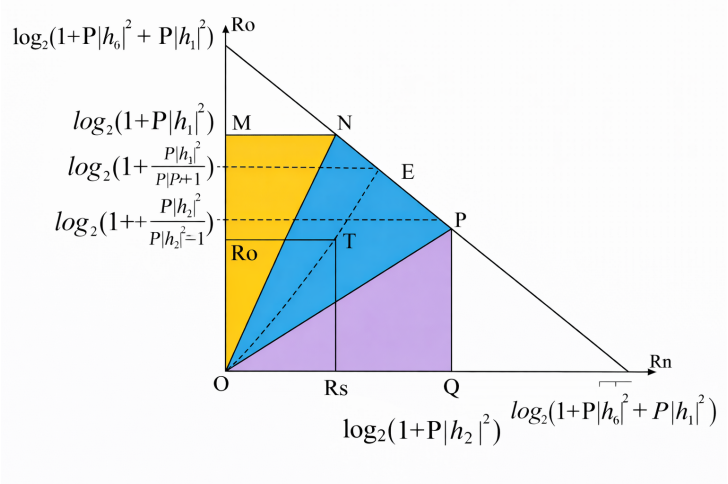
Điểm vận hành mục tiêu $T(R_S, R_0)$ nằm trong vùng dung lượng ngũ giác OMNPQ, được xác định thông qua các bất phương trình giới hạn biên. Như vậy, với bộ tham số hệ thống $\Psi = \{P_0, P_n, h_0, h_n, R_0, R_s\}$, xác định điều kiện cần và đủ để hệ bất phương trình sau có nghiệm:

$$\begin{cases} R_0 \leq \log_2\left(1 + P_0|h_0|^2\right), \\ R_s \leq \log_2\left(1 + P_n|h_n|^2\right), \\ R_0 + R_s \leq \log_2\left(1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2\right). \end{cases} \tag{4.4}$$

Bằng cách kết hợp đồng thời các điều kiện có thể xác định 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:

$$P_n|h_n|^2 \geq \max\left(2^{R_s} - 1,\ 2^{R_s+R_0} - P_0|h_0|^2 - 1\right) \tag{4.5}$$

4.5 Chiến lược giải mã dựa trên RSMA



Hình 4.2: Phân vùng dung lượng trong mặt phẳng (R_s, R_0)

Hình 4.2 minh họa chi tiết vùng dung lượng của kênh uplink trong mặt phẳng (R_s, R_0). 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.

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 $\lambda = \dfrac{R_0}{R_s}$, 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.

Nếu điểm T nằm trong tam giác ONP, giao điểm $E(x, y)$ của tia OT với cạnh NP được sử dụng để xác định tỷ lệ tách tốc độ cho SU.

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:

$$\begin{cases} y = \dfrac{R_0}{R_s} x, \\ y = -x + \log_2\left(1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2\right) \end{cases} \tag{4.6}$$

Giải hệ phương trình 4.6, thu được tung độ của điểm E dưới dạng khép kín:

$$y = \frac{\log_2\left(1 + P_0|h_0|^2 + P_n|h_n|^2\right)}{1 + \dfrac{R_s}{R_0}} \tag{4.7}$$

Thành phần tín hiệu thu từ SU tại trạm cơ sở có thể được phân tách thành hai phần "ảo" như sau:

$$P|h_n|^2 = \left(P|h_n|^2 - P\theta\right) + P\theta \tag{4.8}$$

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:

$$\left(P|h_n|^2 - P\theta\right) \;\rightarrow\; P|h_0|^2 \;\rightarrow\; P\theta \tag{4.9}$$

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

$$\begin{aligned} R_1 &= \log_2\left(1 + \frac{P|h_n|^2 - P\theta}{P\theta + P|h_0|^2 + 1}\right), \\ R_2 &= \log_2\left(1 + \frac{P|h_0|^2}{P\theta + 1}\right), \\ R_3 &= \log_2(1 + P\theta). \end{aligned} \tag{4.10}$$

Kết quả phân tích cho thấy khung CR-RSMA mở rộng đáng kể vùng dung lượng khả thi so với CR-NOMA truyền thống. Đồng thời, hệ thống đạt xác suất dừng tiệm cận bằng không trong

miền công suất cao, trong khi vẫn đảm bảo nghiêm ngặt các yêu cầu chất lượng dịch vụ (QoS) của người dùng sơ cấp.

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

Algorithm 1 Thuật toán tối đa hóa số lượng cặp ghép PU–SU

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

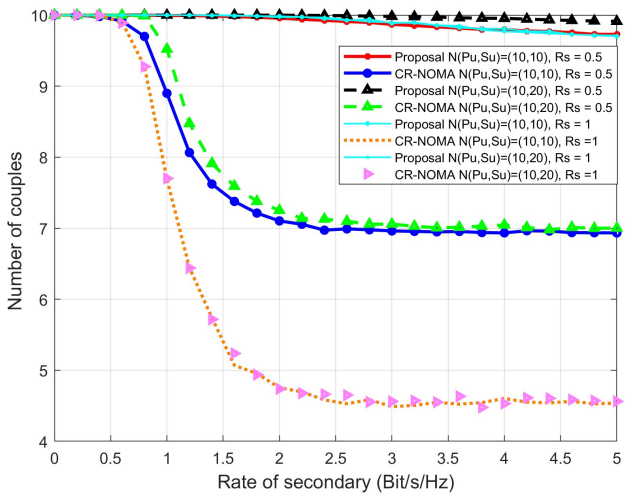
```
for r = 1 to length(R_s) do
    A ← 2^(R_0 + R_s[r]) − 1
    for i = 1 to N do
        P_0[i] ← (2^R_0 − 1) + (A − (2^R_0 − 1)) · rand(0, 1)
        P_m[i] ← (2^R_s[r] − 1) + (A − (2^R_s[r] − 1)) · rand(0, 1)
    end for
    Sort P_0 in ascending order
    Sort P_m in descending order
    u ← 0
    for i = 1 to N do
        for k = 1 to N do
            if P_m[k] > max(2^R_s[r] − 1, A − P_0[i]) then
                u ← u + 1
                P_m[k] ← 0
                break
            end if
        end for
    end for
    C[r] ← u
end for
return C =0
```

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 4.5. Chi tiết thuật toán được biểu diễn bằng mã giả trong Thuật toán 4.1.

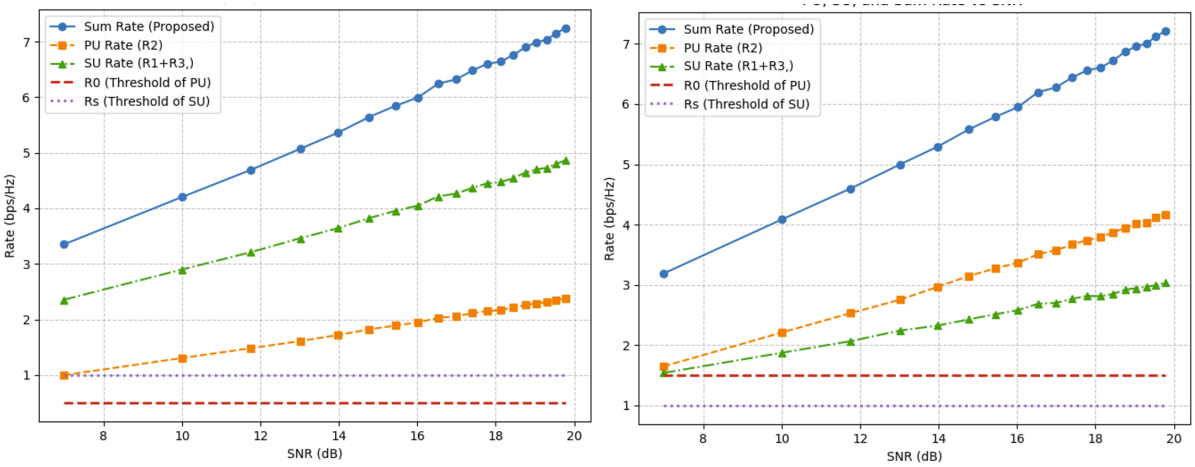
4.7 Kết quả mô phỏng và thảo luận

Nhằm đánh giá hiệu năng của khung truyền RSMA kết hợp thuật toán ghép cặp trong mạng vô tuyến nhận thức, các kết quả mô phỏng được phân tích dựa trên khả năng ghép cặp PU–SU và tốc độ đạt được của hệ thống dưới các điều kiện QoS và kênh truyền khác nhau.

Hình 4.3 cho thấy phương pháp RSMA duy trì số lượng cặp ghép gần mức tối đa ngay cả khi tốc độ yêu cầu của SU (R_s) tăng cao, trong khi CR-NOMA suy giảm nhanh do vùng dung lượng bị thu hẹp. Việc tăng số lượng SU chỉ cải thiện nhẹ khả năng ghép cặp, nhưng ưu thế ổn định của RSMA vẫn được bảo toàn.



Hình 4.3: Khả năng ghép cặp PU–SU



a) Ro < Rs

b) Ro > Rs

Hình 4.4: Tốc độ truyền dẫn theo SNR

Hình 4.4 minh họa tốc độ đạt được của PU, SU và toàn hệ thống theo SNR trong hai kịch bản $R_0 < R_s$ và $R_0 > R_s$. Kết quả cho thấy các tốc độ đều vượt ngưỡng QoS yêu cầu và tổng tốc độ hệ thống tăng gần tuyến tính theo SNR. Khung RSMA cho phép phân bổ tài nguyên linh hoạt, ưu tiên SU hoặc PU tùy theo yêu cầu dịch vụ.

Kết luận

1. Kết luận của luận án

Luận án nghiên cứu các giải pháp nâng cao hiệu quả sử dụng tài nguyên và chất lượng dịch vụ cho hệ thống truyền thông UAV trong mạng vô tuyến thế hệ mới, thông qua tối ưu hiệu năng truyền dẫn dưới các ràng buộc về tính cơ động, phổ tần và QoS.

Các đóng góp chính gồm:

Thứ nhất, đề xuất phương pháp ước lượng suy hao kênh UAV dựa trên kết hợp mô hình học máy (KNN, DT, RF), học sâu (LSTM, Bi-LSTM) và tối ưu siêu tham số bằng GSA. Phương pháp giúp nâng cao độ chính xác dự báo kênh A2G, A2A và phản ánh tốt tính phi tuyến của môi trường truyền.

Thứ hai, đề xuất các biểu thức giải tích dạng đóng xác định góc ngẩng và vận tốc tối ưu trong các mô hình UAV-BS và UAV-Relay, từ đó làm rõ các tham số như độ cao, vùng phủ và dung năng hệ thống.

Thứ ba, đề xuất điều kiện ghép cặp UAV–PU, đề xuất cơ chế RSMA và phân tích hiệu năng trong kịch bản đa PU trong truyền thông nhận thức đường lên cho UAV.

Tổng thể, luận án góp phần vào mô hình hóa kênh, tối ưu vận hành và thiết kế cơ chế truy nhập, cung cấp cơ sở cho phân tích và triển khai hệ thống UAV trong mạng vô tuyến thế hệ mới.

2.Thảo luận và hướng nghiên cứu tiếp theo

Mặc dù đã đạt được các kết quả nghiên cứu đề ra, luận án vẫn còn một số hướng cần tiếp tục phát triển nhằm nâng cao độ chính xác và khả năng ứng dụng thực tiễn. Trong thời gian tới, có thể nghiên cứu áp dụng các mô hình học sâu để nâng cao độ chính xác của mô hình kênh truyền và tối ưu hóa tham số vận hành UAV; mở rộng bài toán truy nhập phổ sang trường hợp CSI không hoàn hảo nhằm tăng tính bền vững của hệ thống; đồng thời phân tích sâu hơn ảnh hưởng của các tham số vận hành UAV đến hiệu năng cảm biến và truy nhập phổ trong môi trường động. Trên cơ sở đó, hướng nghiên cứu tiếp theo là xây dựng mô hình tối ưu hóa liên kết, tích hợp mô hình kênh truyền, tham số vận hành UAV và cơ chế truy nhập phổ trong một khuôn khổ thống nhất, hướng tới triển khai thực tế cho các mạng UAV.

DANH MỤC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC 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)**.