

**BỘ GIÁO DỤC VÀ ĐÀO TẠO
ĐẠI HỌC DUY TÂN**

Nguyễn Quỳnh Anh

**LƯU TRỮ VÀ PHÂN PHỐI TÀI NGUYÊN TỐI ƯU
CHO DỊCH VỤ TRUYỀN VIDEO TRONG UAV-VANET**

Chuyên ngành: Khoa học máy tính
Mã số chuyên ngành: 9.84.01.01

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

Đà Nẵng, 2026

CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI
ĐẠI HỌC DUY TÂN

Người hướng dẫn khoa học:

Người hướng dẫn chính: TS. VÕ NGUYỄN SƠN

Người hướng dẫn phụ:

.....

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

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

Có thể tìm hiểu luận án tại:

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

MỞ ĐẦU

1. Lý do chọn đề tài

Sự phát triển của ITS (Intelligent Transportation Systems) làm gia tăng nhu cầu truyền video thời gian thực trong VANET (Vehicular Ad-hoc Networks), trong khi đặc tính di động và cấu trúc mạng biến đổi khiến việc bảo đảm QoS/QoE (Quality of Service/ Quality of Experience) vẫn là thách thức. Các giải pháp hiện nay chủ yếu dựa vào RSU (Roadside Unit) còn bộc lộ hạn chế, do đó cần các cơ chế lưu trữ - phân phối linh hoạt hơn. Mặc dù lưu trữ là hướng tiếp cận hiệu quả, các nghiên cứu hiện có còn thiếu một khung tối ưu thống nhất. Việc tích hợp UAV (Unmanned Aerial Vehicles) mở ra khả năng bổ sung lớp lưu trữ trên không, nhưng đồng thời đặt ra bài toán tối ưu phức tạp. Từ đó, luận án tập trung nghiên cứu tối ưu lưu trữ và phân phối video trong UAV-VANET nhằm nâng cao hiệu năng hệ thống.

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

2.1. Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu tổng quát của luận án là xây dựng và tối ưu hóa cơ chế lưu trữ và phân phối nội dung trong mạng VANET có UAV hỗ trợ nhằm giảm thiểu thời gian truyền video đến người dùng phương tiện (VU – Vehicular User), đồng thời sử dụng hiệu quả tài nguyên mạng và tài nguyên lưu trữ.

2.2. Đối tượng nghiên cứu

- Phương tiện/ người dùng trong VANET: VU, RSU, UAV;
- Nội dung video được phân phối trong mạng;
- VU với nhu cầu truy cập nội dung trong môi trường giao thông động;

Luận án tập trung vào mối quan hệ tương tác giữa các thành phần trên trong bối cảnh truyền video hướng đến thời gian thực.

2.3. Phạm vi nghiên cứu

- Xem xét dịch vụ truyền video trong mạng VANET có UAV hỗ trợ;
- Tập trung vào bài toán lưu trữ và phân phối nội dung đồng thời sử dụng hiệu quả tài nguyên nhằm giảm thời gian phục vụ;
- Xây dựng mô hình toán học cho hệ thống UAV-VANET trong môi trường ba chiều có tính di động;
- Đề xuất các giải thuật lưu trữ, phân phối và giải thuật tối ưu.

2.4. Phương pháp nghiên cứu

Luận án sử dụng bốn phương pháp nghiên cứu chính gồm: phân tích, tổng hợp tài liệu để xác định khoảng trống nghiên cứu; mô hình hóa toán học để xây dựng bài toán tối ưu; tối ưu bằng giải thuật di truyền (GA – Genetic Algorithms) nhằm tìm nghiệm tối ưu hoặc gần tối ưu; và mô phỏng đánh giá hiệu năng để kiểm chứng hiệu quả của các mô hình đề xuất thông qua các chỉ tiêu như thời gian phục vụ, hiệu suất lưu trữ và mức cải thiện QoS/QoE.

3. Nhiệm vụ nghiên cứu và kết quả đạt được

3.1. Nhiệm vụ nghiên cứu

Luận án triển khai bốn nhiệm vụ chính: (i) khảo sát các mô hình lưu trữ và phân phối video trong VANET để xác định khoảng trống nghiên cứu; (ii) xây dựng mô hình toán, tối ưu lưu trữ tại RSU và phương tiện bằng GA nhằm giảm thời gian phục vụ; (iii) mở rộng sang UAV-VANET với tối ưu đồng thời lưu trữ và vị trí UAV; và (iv) xây dựng khung tối ưu thống nhất, đánh giá hiệu năng qua mô phỏng và so sánh với các phương pháp tham chiếu.

3.2. Kết quả đạt được

Trong quá trình thực hiện luận án, NCS đã công bố 01 bài báo ISI và 02 bài báo tạp chí trong nước, với hai kết quả chính gồm:

- **Kết quả 1:** Đề xuất mô hình DPC (Deterministic and Probabilistic Caching) nhằm tối ưu lưu trữ kết hợp giữa RSU và phương tiện trong VANET. Mô hình tích hợp truyền dẫn R2V và V2V, tối thiểu hóa thời gian phục vụ thông qua tối ưu bán kính lưu trữ và xác suất lưu trữ, được giải bằng GA cho bài toán biến hỗn hợp.
- **Kết quả 2:** Đề xuất mô hình CAHO (Caching and Hovering Optimization) cho UAV-VANET, tối ưu đồng thời lưu trữ tại RSU, UAV và vị trí dừng của UAV nhằm bù đắp khoảng trống lưu trữ. Mô hình tích hợp R2V và U2V, được giải bằng GA kết hợp hàm phạt để nâng cao hiệu năng truyền video trong môi trường động.

4. Bố cục luận án

Mở đầu

Chương 1: Tổng quan về lưu trữ trong UAV-VANET

Chương 2: Kết hợp lưu trữ tại vị trí xác định và lưu trữ theo xác suất trong VANET.

Chương 3: Kết hợp lưu trữ và xác định vị trí phục vụ tối ưu trong truyền video hợp tác qua UAV-VANET.

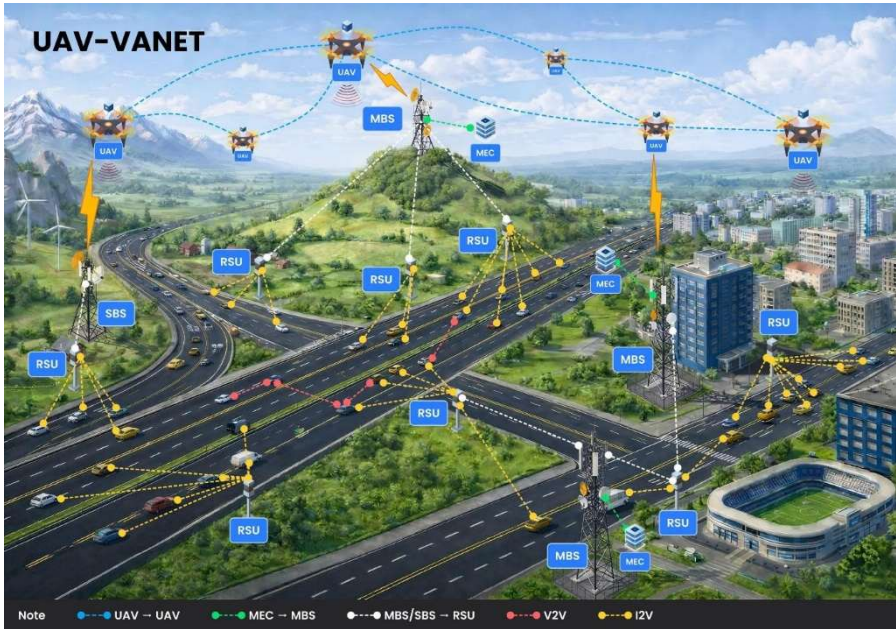
Kết luận

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN VỀ LƯU TRỮ TRONG UAV-VANET

1.1. GIỚI THIỆU MẠNG UAV-VANET

1.1.1. Giới thiệu UAV-VANET

UAV-VANET (hình 1.1) là mô hình mở rộng của VANET nhằm cải thiện vùng phủ và khả năng kết nối, đặc biệt trong môi trường đô thị phức tạp. Trong đó, UAV đóng vai trò lớp mạng trên không, hỗ trợ kết nối giữa phương tiện, hạ tầng mặt đất và mạng lõi, qua đó nâng cao hiệu quả truyền thông nhờ tính cơ động và khả năng triển khai linh hoạt. UAV-VANET có ưu điểm nổi bật là thiết lập các liên kết LoS thuận lợi, giúp giảm ảnh hưởng

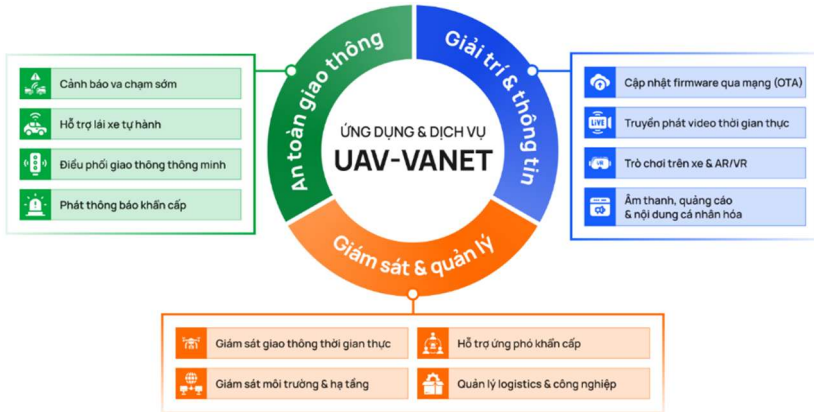


Hình 1.1. Mô hình mạng UAV-VANET

của che khuất và nâng cao chất lượng truyền thông, đồng thời mở rộng vùng phủ và duy trì kết nối trong các kịch bản động hoặc khẩn cấp. Xu hướng phát triển hiện nay hướng tới tích hợp tính toán biên và lưu trữ trên UAV nhằm giảm độ trễ và tải cho mạng lõi. Tuy nhiên, việc khai thác hiệu quả mô hình này đòi hỏi giải quyết các bài toán như tối ưu quỹ đạo bay, quản lý năng lượng và điều phối UAV.

1.1.2. Các ứng dụng của UAV-VANET

UAV-VANET có tiềm năng ứng dụng rộng trong nhiều lĩnh vực như an toàn giao thông, dịch vụ thông tin giải trí trên xe và quản lý đô thị thông minh (hình 1.2). Mô hình này hỗ trợ giám sát giao thông theo thời gian thực, cảnh báo khẩn cấp, chia sẻ thông tin cho phương tiện, đồng thời tạo điều kiện triển khai các dịch vụ đa phương tiện chất lượng cao nhờ khả năng kết nối linh hoạt và vùng phủ mở rộng. Ngoài ra, UAV-VANET còn có giá trị trong công tác giám sát, điều phối và hỗ trợ liên lạc trong các tình huống khẩn cấp. Nhờ đó, sự kết hợp giữa UAV và VANET không chỉ nâng cao hiệu quả truyền thông mà còn mở rộng đáng kể phạm vi ứng dụng của mạng giao thông thông minh trong tương lai.



Hình 1.1: Ứng dụng và dịch vụ của mạng UAV-VANET

1.2. CÁC NGHIÊN CỨU LIÊN QUAN ĐẾN LƯU TRỮ TRONG UAV-VANET

Sự phát triển của dịch vụ đa phương tiện trong ITS đã thúc đẩy nghiên cứu về truyền video và QoS/QoE trong VANET. Các kỹ thuật lưu trữ hiện nay gồm lưu trữ tại biên, lưu trữ hợp tác, lưu trữ xác suất và lưu trữ có UAV hỗ trợ. Tuy nhiên, phần lớn các nghiên cứu còn xem xét rời rạc từng thành phần và chưa khai thác đầy đủ không gian 3D của UAV. Do đó, cần xây dựng một khung tối ưu tích hợp cho UAV-VANET nhằm khai thác hiệu quả tài nguyên lưu trữ và truyền thông đa tầng, đồng thời đáp ứng yêu cầu về độ trễ và chất lượng dịch vụ của truyền video thời gian thực.

1.3. GIỚI THIỆU VỀ CÁC KỸ THUẬT TỐI ƯU

1.3.1. Các kỹ thuật tối ưu

Trong bối cảnh dịch vụ truyền video, bài toán tối ưu trở nên đặc biệt thách thức do đặc tính nhạy cảm với độ trễ và sự biến thiên mạnh theo không gian và thời gian của cả nhu cầu nội dung lẫn trạng thái mạng. Các quyết định tối ưu, chẳng hạn như vị trí lưu trữ nội dung, cơ chế phân phối hay vị trí triển khai các nút hỗ trợ, đều có mối quan hệ chặt chẽ và ảnh hưởng lẫn nhau. Vì vậy, việc tối ưu từng thành phần một cách độc lập thường không mang lại hiệu quả toàn cục, mà đòi hỏi một khung tối ưu hóa tổng thể, trong đó các quyết định được xem xét đồng thời và phối hợp một cách nhất quán. Hơn nữa, bài toán tối ưu trong UAV-VANET thường mang tính phi tuyến, không lồi và có không gian tìm kiếm lớn. Các phương pháp tối ưu trong UAV-VANET có thể kể đến gồm: tối ưu lồi, tối ưu dựa trên các kỹ thuật heuristic, tối ưu hóa dựa trên học máy và trí tuệ nhân tạo.

1.3.2. So sánh các giải pháp với GA

Các phương pháp tối ưu trong UAV-VANET gồm tối ưu lồi, heuristic và học máy. Do bài toán có tính không lồi và không gian nghiệm lớn, luận án lựa chọn GA như một phương pháp heuristic phù hợp. GA cho phép xử lý đồng thời nhiều loại biến và tích hợp linh hoạt các ràng buộc, qua đó bảo đảm tính khả thi và hiệu quả trong việc tối thiểu hóa thời gian phục vụ video. Đây cũng là cơ sở phương pháp luận xuyên suốt cho các mô hình trong luận án. Như vậy, lựa chọn GA trong luận án không chỉ xuất phát từ yêu cầu giải quyết bài toán không lồi mà còn từ tính linh hoạt, khả năng mở rộng và mức độ phù hợp với mô hình UAV-VANET đã xây dựng. Đây là cơ sở phương pháp luận quan trọng để phát triển các thuật toán tối ưu cụ thể trong các chương tiếp theo, đồng thời bảo đảm sự nhất quán giữa mô hình toán học, phương pháp giải và mục tiêu nghiên cứu của luận án.

1.4. LỘ TRÌNH NGHIÊN CỨU

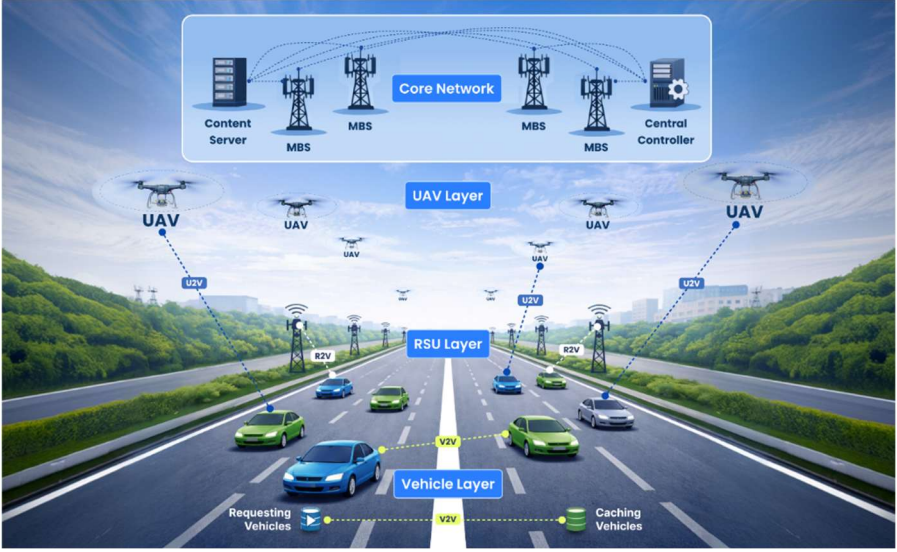
1.4.1. Bài toán của luận án

Mặc dù đã có nhiều nghiên cứu về lưu trữ nội dung trong VANET và UAV-VANET, các công trình này vẫn còn hạn chế do chủ yếu xem xét riêng lẻ từng tầng lưu trữ và chưa phản ánh trực tiếp chất lượng phục vụ video. Từ đó, luận án xây dựng lộ trình nghiên cứu từ lưu trữ tại RSU, mở rộng sang DPC (RSU và phương tiện), và tiếp tục đến CAHO (RSU và UAV), qua đó hình thành một khung tối ưu thống nhất nhằm giảm thời gian phục vụ.

Mô hình hệ thống (hình 1.3) được xây dựng theo kiến trúc phân tầng gồm MBS, UAV, RSU và phương tiện, cho phép khai thác đồng thời hạ tầng cố định, nút di động và lớp trên không để nâng cao hiệu quả phân phối video. Trong đó, DPC phù hợp với môi trường mật độ phương tiện cao, còn CAHO thích hợp với các kịch bản hạ tầng hạn chế; hai mô hình này bổ sung cho nhau trong cùng một khung lưu trữ hợp tác.

1.4.2. Các khái niệm và mô hình nền tảng

- **Thời gian phục vụ:** Luận án lựa chọn thời gian phục vụ làm tiêu chí tối ưu chính vì đại lượng này phản ánh trực tiếp chất lượng cung cấp dịch vụ video từ góc độ cả hệ thống lẫn người dùng. Khác với tỉ lệ truy suất nội dung hay thông lượng, thời gian phục vụ thể hiện rõ mức độ đáp ứng thực tế của mỗi yêu cầu dịch vụ. Trên cơ sở đó, các mô hình đều hướng tới giảm thời gian phục vụ, qua đó cải thiện trực tiếp QoS/QoE của hệ thống.



Hình 1.3: Mô hình nghiên cứu

- **Độ nổi tiếng của video:** Độ phổ biến của video i được mô hình hóa bằng phân bố Zipf [46], cho bởi:

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

với $\alpha \geq 0$ là tham số đặc trưng cho mức độ lệch của phân bố độ phổ biến.

- **Mô hình đường đi:** NCS áp dụng mô hình truyền R2V phạm vi phủ sóng d của một RSU được chia thành K vùng. Các tham số của vùng k , với $k = 1, 2, \dots, K$ và $K = 7$, được liệt kê trong bảng 1.1.

Bảng 1.1: Vùng phủ của một RSU

Vùng	1	2	3	4	5	6	7
d_k (m)	25	30	40	60	40	30	25
R_k (Mbps)	1	2	5.5	22	5.5	2	1

Việc lựa chọn chiều dài tuyến khảo sát đủ lớn cùng dải tốc độ phù hợp với môi trường đô thị cho thấy các kịch bản mô phỏng được xây dựng theo hướng gần với điều kiện vận hành thực tế. Điều này góp phần khẳng định tính khả thi và tiềm năng ứng dụng của mô hình trong các hệ thống giao thông thông minh và UAV-VANET đô thị.

- **Lưu trữ tại các RSU:** Lưu trữ video phổ biến tại RSU có vai trò nền tảng trong việc giảm thời gian phục vụ trong mạng VANET. Đây cũng là cơ sở để các mô hình như DPC và CAHO tiếp tục mở rộng theo hướng lưu trữ đa tầng nhằm nâng cao hiệu năng cung cấp dịch vụ. Đối với lưu trữ tại RSU, bán kính lưu trữ h_i của video i được xác định rằng video này sẽ được lưu trữ sau mỗi h_i RSUs. Khi đó, các RSUs lưu trữ video i được xác định bởi:

$$n_{i,j} = h_i(j - 1) + 1, j = 1, 2, \dots, J_i,$$

trong đó J_i là số RSU lưu trữ video i , được tính bởi:

$$J_i = \left\lfloor \frac{N - 1}{h_i} \right\rfloor + 1, \quad (1.2)$$

trong đó toán tử $\lfloor \cdot \rfloor$ được sử dụng để lấy phần nguyên lớn nhất không vượt quá một số thực cho trước, và h_i là bán kính lưu trữ video i tính bằng số hop.

CHƯƠNG 2. KẾT HỢP LƯU TRỮ TẠI VỊ TRÍ XÁC ĐỊNH VÀ LƯU TRỮ THEO XÁC SUẤT TRONG VANET

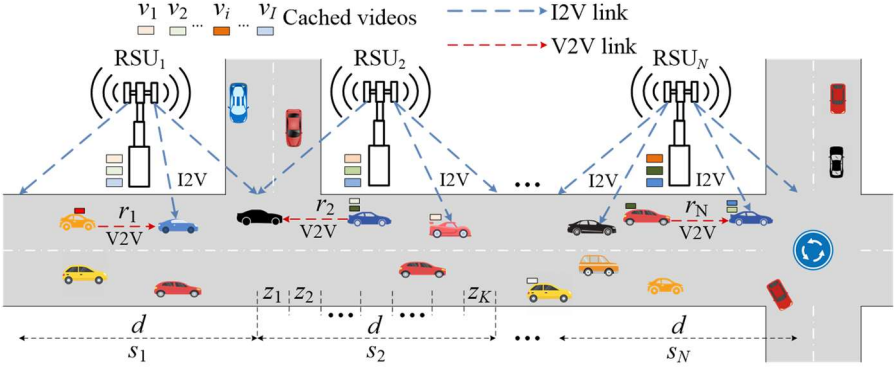
2.1. GIỚI THIỆU

Chương 2 nghiên cứu mô hình lưu trữ kết hợp DPC cho dịch vụ truyền video trong VANET nhằm giảm thời gian phục vụ thông qua khai thác đồng thời lưu trữ tại RSU và phương tiện. Trên cơ sở mô hình hệ thống và ràng buộc lưu trữ, bài toán tối ưu được giải bằng GA kết hợp hàm phạt. Kết quả mô phỏng cho thấy DPC giảm thiểu thời gian phục vụ và sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ.

2.2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Mô hình hệ thống gồm N RSU và I video, trong đó các phương tiện người dùng được phân bố theo quá trình Poisson một chiều với mật độ λ và di chuyển qua các đoạn đường với vận tốc trung bình s_n . Mỗi RSU bao phủ một đoạn đường dài d , được chia thành K vùng, và video có thể được lưu trữ tại cả RSU lẫn phương tiện (hình 2.1). Hệ thống có hai loại phương tiện gồm xe lưu trữ CV (Caching Vehicle) và xe yêu cầu RV (Requesting Vehicle). Do tài nguyên lưu trữ tại RSU và phương tiện đều hữu hạn, mô hình đặt ra các ràng buộc lưu trữ nhằm bảo đảm việc sử dụng tài nguyên hiệu quả.

Trong mô hình này, bài toán tối ưu DPC được xây dựng nhằm xác định lưu trữ video tối ưu tại RSU theo phương pháp xác định (DC) và tại các CV theo phương pháp xác suất (PC). Mục tiêu là tối thiểu hóa thời gian phục vụ đồng thời sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ của hệ thống. Các thông số hệ thống được mô tả trong bảng 2.2. Thời gian phục vụ được định nghĩa là khoảng thời gian trung bình để các RV nhận được các video đã yêu cầu từ các RSU và các CV trong khi đang di chuyển.



Hình 2.1: Mô hình DPC cho truyền video trong VANETs

Bảng 2.1: Bảng thông số hệ thống mô hình DPC

Ký hiệu	Thông số kỹ thuật
N	Số lượng RSU
K	Số lượng vùng được phủ bởi RSU
I	Số lượng videos
d	Vùng phủ của một RSU
d_k	Độ dài của vùng k trong một đoạn đường, $k = 1, 2, \dots, K$
R_k	Tốc độ truyền trong zone k
S_i	Kích thước video i đo bằng bits, $i = 1, 2, \dots, I$
p_i	Tốc độ truy cập (độ phổ biến) của video i
ρ_i	Xác suất lưu trữ video i
λ_n	Tốc độ xe đến trung bình ở RSU n , $n = 1, 2, \dots, N$
μ_n	Tốc độ phục vụ bởi RSU n
s_n	Tốc độ trung bình của xe trong vùng phủ của RSU n

2.2.1. Quá trình Poissons đồng nhất cho các VU

Nghiên cứu áp dụng quá trình Poisson đồng nhất một chiều độc lập (T1D-PPP) để mô hình hóa phân bố không gian của các CV phục vụ truyền dữ liệu và các RV thực hiện truy xuất trên các tuyến đường một chiều. τ và ρ_i lần lượt là tỷ lệ các xe đóng vai trò là CV và xác suất lưu trữ video i , khi đó phân bố của các CV và RV cũng tuân theo các T1D-PPPs Φ_i^{CV} và Φ_i^{RV} với các mật độ λ_i^{CV} và λ_i^{RV} , được biểu diễn như sau:

$$\lambda_i^{CV} = \tau \rho_i \lambda, \quad (2.1)$$

$$\lambda_i^{RV} = (1 - \tau \rho_i) \lambda. \quad (2.2)$$

2.2.2. DC và PC

Trong DC, dọc theo tuyến đường gồm N trạm phát, vị trí lưu trữ của video i được xác định thông qua bán kính lưu trữ h_i , được đo theo số chặng (hop) và tỉ lệ nghịch với mật độ lưu trữ. Trong khi đó, đối với PC, xác suất ρ_i để xác định khả năng lưu trữ video i tại các CV. Trong quá trình di chuyển, các RV được phục vụ bởi cả các RSU và các CV thông qua phương pháp lưu trữ kết hợp DPC, trong đó xét đến mô hình phổ biến của video i , tuân theo phân bố kiểu Zipf được biểu diễn như công thức (1.1).

2.2.3. Kênh truyền V2V

1) Dung lượng V2V

Nếu video i được một RV bất kỳ yêu cầu, trong trường hợp xấu nhất, RV đó cần một khoảng thời gian di chuyển để đi qua $h_i - 1$ chặng để đến được RSU lưu trữ video i . Trong khoảng thời gian di chuyển này, RV được phục vụ bởi các CV. Xác suất để một CV lưu trữ và một RV điền hình yêu cầu video i trong phạm vi r_n tại đoạn đường n lần lượt được cho bởi:

$$p_{i,n}^{CV} = 1 - e^{-2r_n \lambda_i^{CV}}, \quad (2.3)$$

$$p_{i,n}^{RV} = 1 - e^{-2r_n \lambda_i^{RV}}. \quad (2.4)$$

Kênh truyền V2V giữa các CV và RV được mô hình suy hao ngẫu nhiên quy mô nhỏ có thành phần LoS dựa trên phân bố Rician. Dung lượng kênh giữa một CV a (với $a \in \Phi_i^{CV}$) và một RV b (với $b \in \Phi_i^{RV}$) được tính bởi:

$$C_{a,b} = W \log_2 \left(1 + \frac{P|h|^2 d_{a,b}^{-\eta}}{N_0} \right), \quad (2.5)$$

trong đó, W là băng thông hệ thống, η là hệ số suy hao đường truyền, $d_{a,b}$ là khoảng cách từ CV a đến RV b , và h là hệ số kênh được tính như sau:

$$h = \sqrt{\frac{\kappa}{1+\kappa}} e^{j\theta} + \sqrt{\frac{1}{1+\kappa}} \omega, \quad (2.6)$$

trong đó κ là hệ số Rician, θ là biến ngẫu nhiên phân bố đều trong $[0, 2\pi]$, và ω là biến ngẫu nhiên Gauss phức theo $\mathcal{CN}(0,1)$.

Trong phạm vi r_n đã cho, chỉ có một CV lưu trữ video i chịu trách nhiệm phục vụ RV tương ứng thông qua các kết nối từ thiết bị đến thiết bị. Dựa trên công thức (2.5) và trong trường hợp xấu nhất, dung lượng truyền video i đến một RV bất kỳ trong phạm vi truyền cực đại $d_{a,b} = r_n$ được xác định bởi:

$$C_{i,n} = p_{i,n}^{CV} p_{i,n}^{RV} W \log_2 \left(1 + \frac{P|h|^2 r_n^{-\eta}}{N_0} \right). \quad (2.7)$$

2) Thời gian truyền V2V

Số lượng các RSU lưu trữ video i được xác định theo công thức (1.2). Như vậy, video i được lưu trữ tại RSU $n_{i,j} = h_i(j-1) + 1$, với $j =$

1, 2, ..., J_i . Khi các RV di chuyển ra khỏi vùng phủ của RSU $n_{i,j}$, thời gian để nhận video i từ các CV trong đoạn đường $m_{i,j}$, với $m_{i,j} = n_{i,j} + 1, n_{i,j} + 2, \dots, n_{i,j} + h_i - 1$, được xác định bởi:

$$t_{i,m_{i,j}} = \frac{d}{s_{m_{i,j}}}. \quad (2.8)$$

NCS định rằng không tồn tại khoảng trống truyền dẫn giữa hai RSU liên kề. Tuy nhiên, nếu bán kính lưu trữ $h_i > 1$, sẽ tồn tại một khoảng trống lưu trữ giữa hai RSU liên kề cùng lưu trữ video i .

2.2.4. Kênh truyền R2V

1) Dung lượng R2V

Để xác định dung lượng R2V, NCS áp dụng mô hình truyền R2V được trình bày trong 1.4.2. Dung lượng R2V cho một RV yêu cầu video i tại vùng k và được phục vụ bởi RSU n , được xác định như sau:

$$R_{i,n}^{(k)} = \begin{cases} 0, & \text{nếu } n \neq n_{i,j}, \\ \frac{(1 - p_{i,n}^{CV}) p_{i,n}^{RV} R_k}{V_{i,k}}, & \text{nếu } n = n_{i,j}. \end{cases} \quad (2.9)$$

trong đó $p_{i,k}^{RV}$ và $V_{i,k}$ lần lượt là xác suất để một RV tại vùng k yêu cầu video i từ RSU n , và số lượng RV yêu cầu video i trong vùng k , được tính bởi:

$$p_{i,k}^{RV} = 1 - e^{-d_k \lambda_i^{RV}}, \quad (2.10)$$

$$V_{i,k} = d_k \lambda_i^{RV}. \quad (2.11)$$

2) Thời gian truyền R2V

Thời gian truyền của RSU n để phục vụ các RV tại vùng k , tức là thời gian trung bình để di chuyển xuyên suốt vùng k được bao phủ bởi RSU n , được tính như sau:

$$t_{n,k} = \frac{d_k}{s_n}. \quad (2.12)$$

2.2.5. Thời gian phục vụ trung bình

Thời gian phục vụ trung bình tổng thể đối với I video, đây cũng chính là hàm mục tiêu được cực tiểu bằng cách tìm h_i và ρ_i , được xác định:

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^I p_i t_i. \quad (2.13)$$

trong đó, t_i là thời gian trung bình để nhận video i một cách hợp tác từ các CV và các RSU như được trình bày trong thuật toán 2.1.

Thuật toán 2.1: Phân phối video DPC

Input: S_i

$t_i = 0$

Output: t_i

```

1: for  $j = 1: J_i$  do
2:    $n_{i,j} = h_i(j - 1) + 1$ 
3:   for  $k = 1: K$  do
4:     if  $S_i > 0$  then
5:        $S_i = S_i - t_{k,n_{i,j}}(C_{i,n_{i,j}} + R_{i,n_{i,j}}^{(k)})$ 
6:        $t_i = t_i + t_{n_{i,j},k}$ 
7:     else
8:       break
9:     end if
10:  end for
11:  for  $m_{i,j} = n_{i,j} + 1 : n_{i,j} + h_i - 1$  do
12:    if  $S_i > 0$  and  $m_{i,j} \leq N$  then
13:       $S_i = S_i - t_{i,m_{i,j}}C_{i,m_{i,j}}$ 
14:       $t_i = t_i + t_{i,m_{i,j}}$ 
15:    else
16:      break
17:    end if
18:  end for
19: end for

```

2.3. THIẾT KẾ TỐI ƯU DPC

2.3.1. Bài toán tối ưu

Dựa trên hàm mục tiêu (2.13) và đồng thời xét thêm ràng buộc về tài nguyên lưu trữ của RSU và CV, bài toán tối ưu DPC được xây dựng như sau:

$$\min \bar{T} \quad (2.14a)$$

$$h_i, \rho_i \quad (2.14b)$$

$$1 \leq h_i \leq N - 1, \forall i \quad (2.14c)$$

$$S^{CR} + S^{CV} \leq \delta N \sum_{i=1}^I S_i \quad (2.14c)$$

trong đó, (2.14c) được sử dụng nhằm giới hạn tổng mức tiêu thụ tài nguyên cho việc lưu trữ tại cả RSU và CV, với $0 < \delta < 1$.

Ở đây, S^{CR} và S^{CV} lần lượt là lượng tài nguyên lưu trữ được tiêu thụ bởi các RSU và CV, được tính lần lượt như sau:

$$S^{CR} = \sum_{i=1}^I J_i S_i, \quad (2.15)$$

$$S^{CV} = \tau \lambda d(N-1) \sum_{i=1}^I \rho_i S_i. \quad (2.16)$$

2.3.2. Giải bài toán với GA

GA chỉ hỗ trợ các ràng buộc đơn giản dưới dạng cận trên và cận dưới như (2.14b), mà không thể trực tiếp xử lý các ràng buộc phức tạp hơn như (2.14c). Bài toán tối ưu có ràng buộc (2.14) được chuyển đổi thành bài toán tối ưu không ràng buộc bằng cách biến đổi ràng buộc (2.14c) thành:

$$\Delta S = \delta N \sum_{i=1}^I S_i - (S^{CR} + S^{CV}) \geq 0. \quad (2.17)$$

Tiếp theo, hàm phạt được xây dựng như sau:

$$F = \rho(\min\{0, \Delta S\})^2, \quad (2.18)$$

trong đó, ρ là hệ số mức độ vi phạm ràng buộc, được sử dụng để điều chỉnh mức độ phạt đối với các cá thể trong GA khi chúng vi phạm các ràng buộc.

Cuối cùng, GA có khả năng giải bài toán tối ưu DPC không ràng buộc sau đây:

$$\min_{h_i, \rho_i} T_F = \bar{T} + F. \quad (2.19)$$

Giải thuật di truyền chi tiết được sử dụng để giải bài toán (2.19) được trình bày trong thuật toán 2.2. Trong thuật toán 2.2, hai biến tối ưu dạng số nguyên và số thực không thể được biểu diễn bằng cùng một nhiễm sắc thể (chuỗi) trong một cá thể, cũng như không thể được xử lý bằng cùng một cơ chế lai ghép và đột biến. Do đó, chúng được xử lý riêng biệt thông qua hai chuỗi con $X_1^{(z)}$ và $X_2^{(z)}$ của cá thể z . Cụ thể, đối với $X_1^{(z)}$, một phép toán cơ số $(N-1)$ được sử dụng để sinh ra các giá trị số nguyên trong khoảng từ 0 đến $(N-2)$, sau đó cộng thêm 1 để thỏa mãn ràng buộc (2.15b). Ngoài ra, đối với $X_2^{(z)}$, chuỗi này được chuyển đổi thành các biến tối ưu dạng thực $X_{2,R}^{(z)}$ thông qua phép toán b2r (binary-to-real).

Thuật toán 2.2: GA cho DPC

Đầu vào: Thông số trong bảng 2.4, $Gen = 1$

Đầu ra: $T_F^*(h_i^*, \rho_i^*)$

1. Khởi tạo ngẫu nhiên

- N_p chuỗi con $\{X_1^{(z)}\}$, $z = 1, 2, \dots, N_p$, mỗi chuỗi gồm I biến tối ưu nguyên $\{h_i\}$

- N_p chuỗi con $\{X_2^{(z)}\}$, mỗi chuỗi gồm $(I \times P_R)$ bit để biểu diễn biến tối ưu thực $\{\rho_i\}$, trong đó P_R là số bit dùng để biểu diễn độ chính xác của một biến tối ưu thực, với giá trị được lượng tử hóa thành 2^{P_R} mức.
- 2. Tính giá trị hàm thích nghi (fitness) theo công thức (2.20) để có $\{T_F^{(z)}\}$, tức là: $T_F^{(z)} = T_F(X_1^{(z)}, X_{2,R}^{(z)})$
- 3. Khi điều kiện dừng TC chưa thỏa mãn, thực hiện:
- 4. Đặt $\{X^{(z)}\} = [\{X_1^{(z)}\} \{X_{2,R}^{(z)}\}]$ cùng giá trị hàm phạt $T_F^{(z)}$ vào tập xếp hạng để lai tạo.
- 5. Lựa chọn $N_{PG} = N_p \times N_G$ cá thể tốt nhất có giá trị fitness nhỏ nhất bằng toán tử lấy mẫu phổ quá ngẫu nhiên [18] để lai ghép, được tập: $\{X^{(t)}\} = [\{X_1^{(t)}\} \{X_{2,R}^{(t)}\}]$, $t = 1, 2, \dots, N_{PG}$
- 6. Chọn một cặp cá thể bố mẹ để tạo cá thể con bằng lai ghép một điểm với các xác suất P_{ci} và P_{cr} , lần lượt áp dụng cho $X_1^{(t)}$ và $X_{2,R}^{(t)}$.
- 7. Thực hiện đột biến các cá thể con $\{X_1^{(t)}\}$ và $\{X_{2,R}^{(t)}\}$ tương ứng với các xác suất P_{mi} và P_{mr} bằng phép đảo bit, nhằm khôi phục các đặc trưng di truyền tích cực có thể đã bị mất trong các bước trước để thu được $\{X^{(t),*}\} = [\{X_1^{(t),*}\} \{X_{2,R}^{(t),*}\}]$
- 8. Lặp lại bước 2 để có $T_F^{(t),*}(X_1^{(t),*}, X_{2,R}^{(t),*})$.
- 9. Chèn $\{X^{(t),*}\}$ và $T_F^{(t),*}$ vào quần thể hiện tại để có quần thể mới $\{X^{(z)}\}$ và $T_F^{(z)}$.
- 10. Cập nhật $Gen = Gen + 1$
- 11. Kết thúc vòng lặp
- 12. Tìm giá trị hàm phạt tốt nhất $T_F^*(h_i^*, \rho_i^*) \in \{T_F^{(z)}(X_1^{(z)}, X_{2,R}^{(z)})\}$

2.4. ĐÁNH GIÁ HIỆU SUẤT

2.4.1. Thiết lập thông số hệ thống

Thông số hệ thống và GA được liệt kê trong Bảng 2.3. Để đánh giá hiệu năng, DPC được so sánh với các phương pháp OCV, OCR, DAV và DWO. Trong đó, OCV và OCR lần lượt triển khai riêng lẻ lưu trữ xác suất tại VU và lưu trữ xác định tại RSU, kết hợp với truyền thông hợp tác; còn DAV và DWO sử dụng GA nhưng đánh giá nghiệm dựa trên giá trị trung bình và kém nhất thay vì cá thể tốt nhất. Để bảo đảm tính công bằng, tất cả các phương pháp đều được thiết lập với cùng mức tài nguyên lưu trữ như DPC.

Bảng 2.3: Thiết lập thông số cho DPC

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
λ	0.025	phương tiện/m
N	25	RSU
I	10	video
K	7	vùng/RSU
s_n	Ngẫu nhiên trong khoảng 30 đến 60	km/h
r	Ngẫu nhiên trong khoảng 50 đến 200	m
S_i	Ngẫu nhiên trong khoảng 10 đến 200	Mbits
d_k	[25,30,40,60,40,30,25]	m
d	250	m
R_k	[1,2,5.5,11,5.5,2,1]	Mbps
α	1	
η	4	
τ	0.2	
δ	0.5	
κ	4	
P	0.1	W
ρ	10^{-2}	
N_0	10^{-12}	W
W	10	W
N_P	3000	cá thể
N_G	100	thể hệ
P_G	0.9	
P_R	5 (sử dụng 2^5 bits để lượng tử hóa biến thực ρ_i trong khoảng $[0,1]$)	bits
P_{ci}, P_{cr}	0.6, 0.8	
P_{mi}, P_{mr}	$10^{-12}, 10^{-10}$	

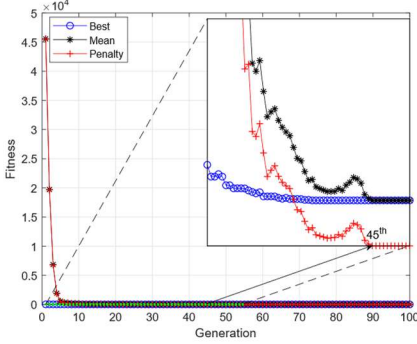
2.4.2. Đánh giá sự hội tụ của GA

Hình 2.2 cho thấy GA hội tụ từ khoảng thế hệ thứ 45, khi giá trị Mean trùng với Best và Penalty giảm về 0, chứng tỏ nghiệm thu được vừa tối ưu vừa thỏa mãn các ràng buộc. Hình 2.3 tiếp tục xác nhận tính ổn định và độ chính xác của GA qua 100 lần thực hiện với các kích thước quần thể khác nhau. Khi N_P tăng, GA cho kết quả ổn định hơn và các giá trị trung bình, cực

đại được cải thiện rõ rệt. Trên cơ sở đó, luận án chọn $N_p = 3000$ tại điểm “khuyết” để cân bằng giữa độ chính xác, tính ổn định và chi phí tính toán.

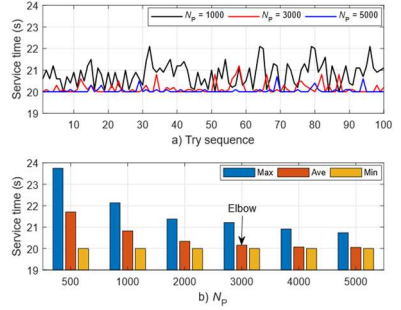
2.4.3. Đánh giá hiệu suất của DPC

1) Thời gian phục vụ

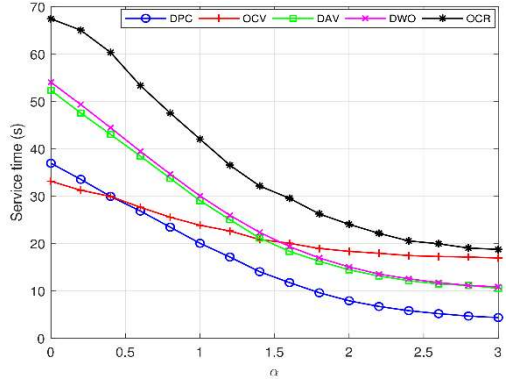


Hình 2.1: Sự hội tụ của GA - DPC

Hình 2.4 cho thấy hiệu năng của DPC phụ thuộc rõ vào hệ số sai lệch mức độ phổ biến α . Khi α tăng, một số ít video trở nên phổ biến hơn, nhờ đó hệ thống có thể tập trung tài nguyên lưu trữ vào các nội dung này để rút ngắn thời gian phục vụ.



Hình 2.3: Độ ổn định và chính xác của GA - DPC

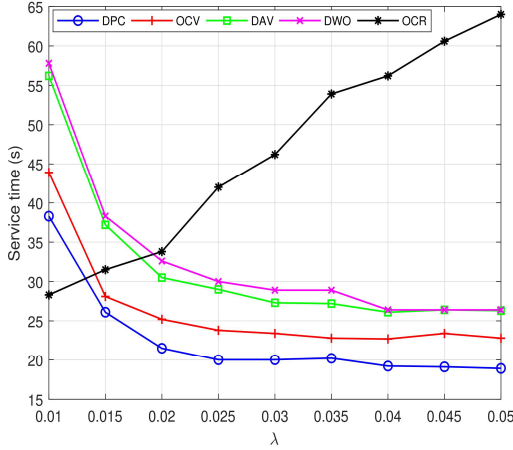


Hình 2.4: Thời gian phục vụ theo α

Khi α lớn, DPC phát huy hiệu quả nhờ phối hợp lưu trữ giữa RSU và phương tiện. Ngược lại, khi α nhỏ, vai trò của lưu trữ tại phương tiện trở nên chủ đạo và lợi thế của cơ chế kết hợp giảm đi. Nhìn chung, ưu điểm của DPC nằm ở khả năng phân bổ linh hoạt tài nguyên lưu trữ theo đặc tính truy cập nội dung.

Hình 2.5 cho thấy hiệu năng của DPC thay đổi rõ theo mật độ phương tiện λ . Khi λ tăng, thời gian phục vụ của các phương pháp có khai thác lưu trữ xác suất như DPC, OCV, DAV và DWO giảm dần do xác suất xuất hiện các xe lưu trữ tăng lên, giúp nội dung được truy xuất nhanh hơn từ các nút gần phương tiện yêu cầu.

Ngược lại, với OCR, thời gian phục vụ lại tăng theo λ do băng thông phải chia sẻ cho nhiều phương tiện hơn. Đáng chú ý, DPC phát huy hiệu quả rõ nhất trong các kịch bản có mật độ phương tiện trung bình và cao,



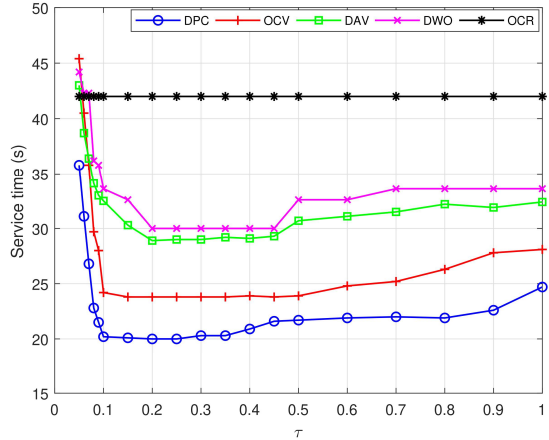
Hình 2.5: Thời gian phục vụ theo λ

khi lớp lưu trữ tại phương tiện có thể phối hợp hiệu quả với lưu trữ tại RSU.

Kết quả này cho thấy ưu điểm của DPC nằm ở khả năng tận dụng đồng thời hạ tầng cố định và tài nguyên lưu trữ phân tán trong mạng để giảm thời gian phục vụ.

Hình 2.6 cho thấy thời gian phục vụ phụ thuộc đáng kể vào tỷ lệ phương

tiện tham gia lưu trữ τ . Trong khi OCR gần như không thay đổi theo τ , các phương pháp dựa trên lưu trữ xác suất như DPC, OCV, DAV và DWO đều tồn tại một khoảng giá trị τ tối ưu để đạt thời gian phục vụ nhỏ nhất. Đặc biệt, khi τ đủ lớn, DPC cho hiệu năng tốt nhất nhờ khai thác hiệu quả đồng thời lưu trữ tại RSU và phương tiện.

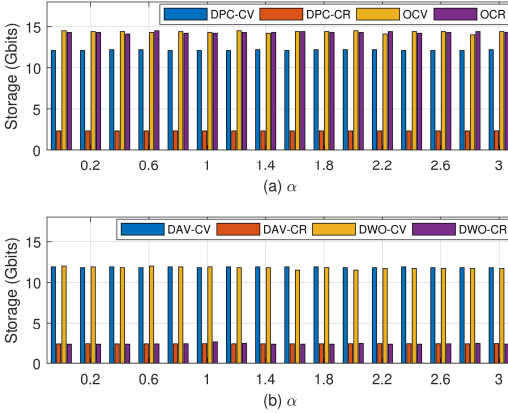


Hình 2.6: Thời gian phục vụ theo τ

Ưu điểm của DPC nằm ở khả năng thích nghi với mức độ tham gia lưu trữ của các phương tiện, từ đó phân bổ hiệu quả tài nguyên lưu trữ phân tán và cải thiện rõ rệt hiệu năng phân phối video trong mạng VANET.

1) Dung lượng lưu trữ

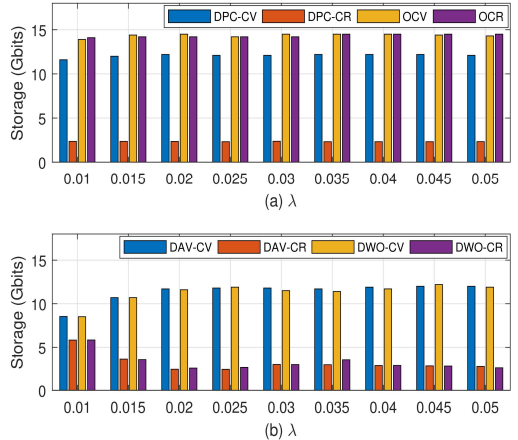
Để bảo đảm tính công bằng, các phương pháp đối chứng được thiết lập với tổng dung lượng lưu trữ tương đương DPC, bao gồm cả tại RSU và phương tiện. Do DAV và DWO kế thừa từ DPC, cơ cấu phân bổ lưu trữ của hai phương pháp này cũng được duy trì tương tự. Hình 2.7 cho thấy các phương pháp được so sánh trong điều kiện tổng dung lượng lưu trữ tương đương nhau. Vì vậy, ưu thế của DPC không nằm ở việc sử dụng nhiều tài nguyên lưu trữ hơn, mà ở khả năng phân bổ dung lượng lưu trữ hợp lý giữa RSU và phương tiện. Kết quả này khẳng định hiệu quả của DPC đến từ chiến lược lưu trữ tối ưu, qua đó cải thiện thời gian phục vụ mà vẫn bảo đảm tính công bằng về tài nguyên.



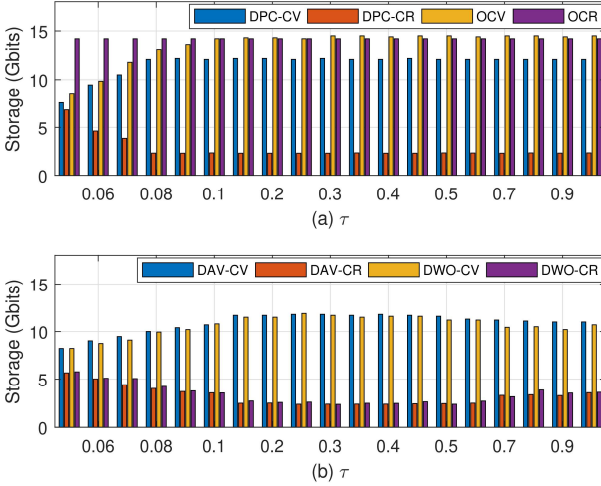
Hình 2.7: Dung lượng lưu trữ theo α

Như vậy ưu thế của DPC nằm ở khả năng chủ động xác định cấu hình lưu trữ hợp lý để duy trì thời gian phục vụ thấp nhất trong các điều kiện khác nhau.

Hình 2.9 cho thấy DPC có khả năng điều chỉnh phân bổ lưu trữ giữa RSU và phương tiện theo tỷ lệ τ của các xe tham gia lưu trữ.



Hình 2. 8: Dung lượng lưu trữ theo λ



Hình 2.9: Dung lượng lưu trữ theo τ

2.4.4. Độ phức tạp của DPC

Độ phức tạp tính toán trong DPC phụ thuộc chủ yếu vào số lượng RSU và video trong hệ thống. Nếu giải bằng vét cạn, chi phí tính toán sẽ tăng rất lớn và khó khả thi khi quy mô mạng mở rộng. Vì vậy, luận án sử dụng GA để tìm nghiệm gần tối ưu với chi phí chấp nhận được. Với cách tiếp cận này, độ phức tạp của thuật toán tăng theo kích thước quần thể, số thế hệ và chi phí tính hàm mục tiêu C_O , xấp xỉ $\mathcal{O}(N_P \times N_G \times C_O)$. GA vẫn bảo đảm khả năng mở rộng và phù hợp với các hệ thống VANET quy mô lớn.

2.5. KẾT LUẬN CHƯƠNG 2

Chương 2 đã đề xuất mô hình lưu trữ kết hợp DPC cho dịch vụ video trong VANET, trong đó RSU thực hiện lưu trữ xác định và phương tiện thực hiện lưu trữ xác suất. Mô hình này cho phép khai thác đồng thời hai lớp lưu trữ để hỗ trợ truyền video hợp tác, qua đó giảm thời gian phục vụ cho các phương tiện yêu cầu. Trên cơ sở xét đến các đặc trưng của RSU, phương tiện, nội dung video và cơ chế truyền hợp tác, chương 2 đã xây dựng bài toán tối ưu nhằm xác định bán kính lưu trữ và xác suất lưu trữ phù hợp dưới ràng buộc dung lượng chung của hệ thống. Để giải bài toán này, GA được sử dụng như công cụ tối ưu hiệu quả cho các biến hỗn hợp nguyên-thực. Kết quả mô phỏng cho thấy DPC có khả năng hội tụ tốt, sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ và cải thiện rõ rệt hiệu năng phục vụ video trong VANET.

Khi τ nhỏ, DPC dựa nhiều hơn vào RSU; khi τ tăng, hệ thống khai thác hiệu quả hơn lớp lưu trữ tại các phương tiện. Nhờ đó, DPC duy trì được sự linh hoạt trong phân bổ tài nguyên và góp phần giảm ổn định thời gian phục vụ video trong các điều kiện khác nhau.

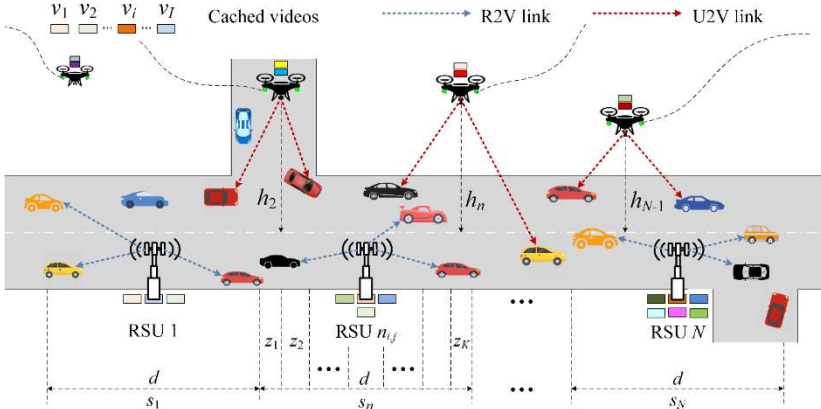
CHƯƠNG 3. KẾT HỢP LƯU TRỮ VÀ XÁC ĐỊNH VỊ TRÍ PHỤC VỤ TỐI ƯU TRONG TRUYỀN VIDEO HỢP TÁC QUA UAV-VANET

3.1. GIỚI THIỆU

Trong chương 3, hướng nghiên cứu được mở rộng từ mô hình DPC sang mô hình CAHO trong mạng UAV-VANET, bằng cách kết hợp tối ưu lưu trữ với vị trí dừng của UAV cho dịch vụ truyền video hợp tác. Nếu DPC tập trung vào lưu trữ tại RSU và phương tiện, thì CAHO khai thác lớp không gian trên không, trong đó, UAV như các nút lưu trữ và truyền dẫn linh hoạt. Mô hình CAHO xem xét đồng thời ba biến tối ưu gồm lưu trữ video tại RSU, quyết định lưu trữ tại UAV và vị trí dừng của UAV nhằm bù đắp các khoảng trống lưu trữ giữa các RSU. Cách tiếp cận này cho phép mở rộng khả năng phục vụ của hệ thống trong các kịch bản mạng động và hạn chế của RSU.

3.2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Mô hình CAHO được xây dựng cho dịch vụ truyền video hợp tác trong UAV-VANET với mục tiêu tối ưu đồng thời lưu trữ tại RSU, lưu trữ tại UAV và vị trí dừng của UAV như Hình 3.1. Trên cơ sở đó, bài toán hướng tới cực tiểu hóa thời gian phục vụ trung bình và sử dụng hiệu quả tài nguyên lưu trữ trong hệ thống. Nhờ sự phối hợp giữa lớp lưu trữ mặt đất và trên không, CAHO có khả năng bù đắp các khoảng trống lưu trữ của RSU và hỗ trợ truyền video liên tục cho các phương tiện trong môi trường mạng động.



Hình 3.1: Mô hình CAHO cho truyền video trong UAV-VANETs

3.3. TÍNH TOÁN CÁC THÔNG SỐ HỆ THỐNG

3.3.1. Mô hình T1D-PPP cho RV

Xét mô hình T1D-PPP mô tả phân bố không gian của các VU trên các tuyến đường một chiều với p_i là xác suất yêu cầu video i , khi đó phân bố của

các phương tiện yêu cầu (RV) đối với video i cũng tuân theo một quá trình Poisson một chiều độc lập, ký hiệu là Φ_i^{RV} , với mật độ λ_i^{RV} được tính bởi:

$$\lambda_i^{RV} = p_i \lambda \quad (3.1)$$

Độ phổ biến của video i được mô hình hóa bằng phân bố Zipf, như công thức (1.1).

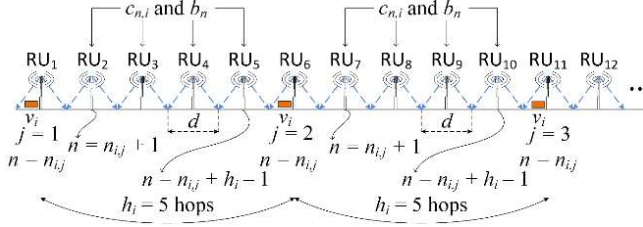
3.3.2. Lưu trữ tại RSU và UAV

1) Lưu trữ tại RSU

Đối với lưu trữ tại RSUs, bán kính lưu trữ h_i của video i được xác định theo công thức (1.2).

2) Lưu trữ tại UAV

Các RSU không lưu trữ video i tạo thành các khoảng trống lưu trữ với số lượng $N - J_i$. Do số lượng UAV là hữu hạn, không thể bố trí UAV cho mọi khoảng trống. Vì vậy, mỗi UAV cần được tối ưu để vừa lựa chọn lưu trữ một tập con video, vừa dừng tại các RSU phù hợp nhằm bù đắp hiệu quả các khoảng trống lưu trữ và duy trì truyền video (Hình 3.2 với $h_i = 5$). Một UAV dừng phía trên RSU n (với $n \neq n_{i,j}$) sẽ truyền video i đến các RV nếu $c_{n,i} = 1$, ngược lại, nếu $c_{n,i} = 0$ thì UAV không lưu trữ video i .



Hình 3.2: Ví dụ về lưu trữ và hover với $h_i = 5$

3.3.3. Dung lượng truyền từ RSU đến phương tiện (R2V)

Để xác định dung lượng truyền R2V, đoạn đường do một RSU bao phủ được chia thành K vùng (zones), với các tham số chi tiết được liệt kê trong bảng 1.1. Dung lượng truyền cho mỗi RV yêu cầu video i tại vùng k , do RSU n phục vụ, được xác định như sau:

$$C_{n,k,i}^{R2V} = \begin{cases} \frac{p_{k,i}^{RV} R_k}{V_{k,i}}, & \text{if } n = n_{i,j}, \\ 0, & \text{if } n \neq n_{i,j}, \end{cases} \quad (3.2)$$

Trong đó:

- $p_{k,i}^{RV}$ là xác suất tồn tại ít nhất một RV yêu cầu video i trong vùng k ;
- $V_{k,i}$ là số lượng RVs yêu cầu video i trong vùng k .

Hai giá trị này được xác định lần lượt như sau:

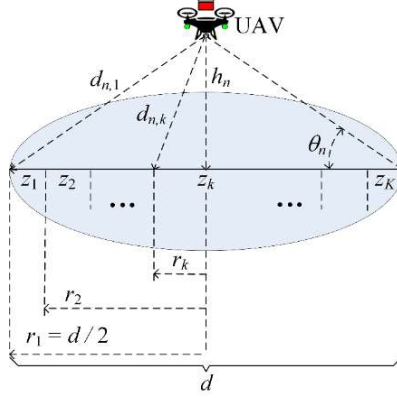
$$p_{k,i}^{RV} = 1 - e^{-d_k \lambda_i^{RV}}, \quad (3.3)$$

$$V_{k,i} = d_k \lambda_i^{RV} \quad (3.4)$$

với d_k là chiều dài của vùng k .

3.3.4. Dung lượng truyền từ RSU đến phương tiện (R2V)

Tại các RSU không lưu trữ video i ($n \neq n_{i,j}$), UAV dừng phía trên trục giữa của đoạn đường ở độ cao h_n và truyền video i đến các RVs thông qua mô hình kênh không-đối-đất như trong hình 3.3. Mô hình này bao gồm hai loại liên kết: đường truyền nhìn thẳng (LoS) và không nhìn thẳng (NLoS).



Hình 3.3: Mô hình vùng phủ của UAV trong đoạn đường n

Suy hao đường truyền cho liên kết LoS hoặc NLoS giữa UAV và RV diễn hình trong vùng k thuộc đoạn đường n được xác định bởi:

$$\psi_{n,k}^A = \left(\frac{4\pi f_c d_{n,k}}{c} \right)^2 \eta_n^A, A \in \{\text{LoS}, \text{NLoS}\}, \quad (3.5)$$

Trong đó:

- f_c là tần số sóng mang,
- c là vận tốc ánh sáng,
- η_n^A là hệ số suy hao đối với liên kết LoS hoặc NLoS,
- $d_{n,k}$ là khoảng cách lớn nhất từ UAV đến RV trong vùng k .

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

$$\bar{\psi}_{n,k} = \psi_{n,k}^{\text{LoS}} P_{n,k}^{\text{LoS}} + \psi_{n,k}^{\text{NLoS}} P_{n,k}^{\text{NLoS}} \quad (3.6)$$

$$= \left(\frac{4\pi f_c d_{n,k}}{c} \right)^2 (\eta_n^{\text{LoS}} P_{n,k}^{\text{LoS}} + \eta_n^{\text{NLoS}} P_{n,k}^{\text{NLoS}}),$$

trong đó, xác suất xảy ra đường truyền LoS được tính bởi:

$$P_{n,k}^{LoS} = \frac{1}{1 + \kappa_n \exp[-v_n(\xi_{n,k} - \kappa_n)]}, \quad (3.7)$$

trong đó, κ_n và v_n là các tham số phụ thuộc môi trường truyền dẫn của đoạn đường n (Bảng 3.2), và:

$$\xi_{n,k} = \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{h_n}{r_k}\right)$$

Giả sử UAV được cấp phát tài nguyên phổ tần xuống (downlink) và không có nhiễu, tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) của kênh truyền từ UAV đến RV trong vùng k được xác định bởi:

$$\gamma_{n,k,i} = \frac{b_n c_{n,i} (\bar{\psi}_{n,k})^{-1} P}{\sigma^2}, \quad (3.8)$$

$$\gamma_{n,k,i} = \frac{b_n c_{n,i} (\bar{\psi}_{n,k})^{-1} P}{\sigma^2},$$

trong đó, b_n là chỉ số dừng được sử dụng để xác định UAV có dừng tại RSU $n \neq n_{i,j}$ hay không, với $b_n = 1$ nếu UAV dừng và $b_n = 0$ nếu không dừng. Điều kiện $\sum_{n=1, n \neq n_{i,j}}^N b_n = M$ cho biết có tổng cộng M UAV được triển khai, trong đó $1 \leq M \leq N$. Ký hiệu P là công suất phát của UAV.

Từ biểu thức (3.8), ta thu được dung lượng truyền tương ứng, được xác định như sau:

$$C_{n,k,i}^{U2V} = \begin{cases} p_{k,i}^{RV} W \log_2(1 + \gamma_{n,k,i}), & \text{if } n = n_{i,j}, \\ 0, & \text{if } n \neq n_{i,j}, \end{cases} \quad (3.7)$$

với W là băng thông hệ thống.

Bảng 3.1: Thông số môi trường

Thông số Môi trường	κ_n	v_n	η_n^{LoS}	η_n^{NLoS}	θ_n
Ngoại ô	4.88	0.43	0.1	21	20.24°
Đô thị	9.61	0.16	1	20	42.44°
Đô thị dày đặc	12.08	0.11	1.6	23	54.62°
Đô thị cao tầng	27.23	0.08	2.3	34	75.52°

3.3.5. Thời gian phục vụ trung bình

Thời gian cần thiết để phục vụ các RV trong vùng k được xác định là thời gian phương tiện di chuyển qua vùng đó, được tính bởi:

$$t_{n,k} = \frac{d_k}{s_n}, \quad (3.10)$$

Dựa trên (3.10), thời gian phục vụ trung bình của hệ thống đối với I video, đồng thời là hàm mục tiêu của bài toán tối ưu, được xác định bởi:

$$\bar{T} = \sum_{i=1}^I p_i t_i, \quad (3.11)$$

trong đó t_i là tổng thời gian cần thiết để truyền video i thông qua sự phối hợp giữa RSUs và UAVs, được tính chi tiết trong thuật toán 3.1.

Thuật toán 3.1: Phân phối video CAHO

Input: S_i

$t_i = 0$

Output: t_i

```

1: for  $j = 1 : J_i$  do
2:    $n_{i,j} = h_i(j - 1) + 1$ 
3:   for  $k = 1 : K$  do
4:     if  $S_i > 0$  then
5:        $S_i = S_i - t_{n_{i,j},k} C_{n_{i,j},k,i}^{R2V}$ 
6:        $t_i = t_i + t_{n_{i,j},k}$ 
7:     else
8:       break
9:     end if
10:  end for
11:  for  $n = n_{i,j} + 1 : n_{i,j} + h_i - 1$  do
12:    if  $n \leq N$  then
13:      for  $k = 1 : K$  do
14:        if  $S_i > 0$  then
15:           $S_i = S_i - t_{n,k} C_{n,k,i}^{U2V}$ 
16:           $t_i = t_i + t_{n,k}$ 
17:        else
18:          break
19:        end if
20:      end for
21:    end if
22:  end for
23: end for

```

3.4. THIẾT KẾ TỐI ƯU CAHO

3.4.1. Bài toán tối ưu CAHO

Dựa trên hàm mục tiêu được xác định trong (3.11), đồng thời xét đến các ràng buộc về tài nguyên lưu trữ tại RSU và UAV, bài toán tối ưu CAHO được phát biểu như sau:

$$\min \bar{T} \quad (3.12a)$$

$$h_i, b_n, c_{n,i}$$

Với các ràng buộc:

$$1 \leq h_i \leq N - 1, \forall i, \quad (3.12b)$$

$$S^{RSU} + S^{UAV} \leq \delta N \sum_{i=1}^I S_i, \quad (3.12c)$$

$$\sum_{n=1}^N b_n \leq M \quad (3.12d)$$

trong đó, ràng buộc (3.12c) giới hạn tổng dung lượng lưu trữ được sử dụng bởi các RSU và UAV. Hai đại lượng S^{RSU} và S^{UAV} lần lượt biểu thị tài nguyên lưu trữ tiêu thụ tại RSU và UAV, được xác định như sau:

$$S^{RSU} = \sum_{i=1}^I J_i S_i, \quad (3.13)$$

$$S^{UAV} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I c_{n,i} b_n S_i. \quad (3.14)$$

3.4.2. Giải bài toán bằng GA

Trong nghiên cứu này, GA được áp dụng để giải bài toán tối ưu CAHO trong (3.12). Tuy nhiên, GA chỉ hỗ trợ trực tiếp các ràng buộc dạng cận trên-cận dưới đơn giản như ràng buộc (3.12b), trong khi các ràng buộc phức tạp hơn, chẳng hạn (3.12c) và (3.12d), cần được xử lý gián tiếp thông qua phương pháp hàm phạt. Theo đó, bài toán tối ưu có ràng buộc được chuyển đổi thành một bài toán không ràng buộc bằng cách tái biểu diễn các ràng buộc (3.12c) và (3.12d) như sau:

$$\begin{cases} \Delta S = \delta N \sum_{i=1}^I S_i - S^{RSU} - S^{UAV} \geq 0, \\ \Delta M = M - \sum_{n=1}^N b_n \geq 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Từ đó, hàm phạt được xây dựng dưới dạng:

$$F = \rho_1 (\min\{0, \Delta S\})^2 + \rho_2 (\min\{0, \Delta M\})^2, \quad (3.16)$$

trong đó, ρ_1 và ρ_2 là các hệ số điều chỉnh mức độ phạt khi nghiệm vi phạm các ràng buộc tương ứng.

Các hệ số phạt ρ_1 và ρ_2 được điều chỉnh tăng dần trong quá trình tối ưu để bảo đảm nghiệm tìm được thỏa mãn các ràng buộc. Ban đầu, hai hệ số này được đặt ở mức nhỏ, sau đó chỉ tăng khi ràng buộc tương ứng của nó vẫn còn bị vi phạm; ngược lại, nếu ràng buộc đã được thỏa mãn thì hệ số phạt được giữ nguyên để tránh ảnh hưởng không cần thiết đến hàm mục tiêu. Quá

trình này được lặp lại cho đến khi các hạng tử vi phạm trong hàm phạt tiến về 0. Ở giai đoạn cuối, bước tăng của ρ_1 và ρ_2 được giảm xuống để tránh biến động lớn và giúp quá trình hội tụ ổn định hơn. Cuối cùng, bài toán tối ưu CAHO được chuyển thành bài toán tối ưu không ràng buộc như sau:

$$\min_{h_i, b_n, c_{n,i}} T_F = \bar{T} + F \quad (3.17)$$

3.4.3. Thuật toán GA cho bài toán CAHO

Chi tiết việc áp dụng GA để giải bài toán (3.17) được trình bày trong thuật toán 3.2. Do bài toán đồng thời chứa biến nguyên h_i và các biến nhị phân $c_{n,i}$, b_n , mỗi cá thể được biểu diễn bởi hai chuỗi con riêng: $X_1^{(z)}$ mã hóa các biến nguyên h_i , và $X_2^{(z)}$ mã hóa các biến nhị phân $c_{n,i}$, b_n . Cách biểu diễn này cho phép áp dụng phù hợp các toán tử di truyền cho từng nhóm biến. GA được thực hiện thông qua các bước chọn lọc, lai ghép và đột biến, lặp lại cho đến khi thỏa mãn điều kiện dừng. Quá trình tối ưu kết thúc khi giá trị hàm phạt trung bình nhỏ hơn 10^{-3} trong 10 thế hệ liên tiếp, hoặc khi số thế hệ đạt đến giới hạn cực đại $N_G = 100$.

Thuật toán 3.2: GA cho CAHO

Đầu vào: Thông số trong bảng 3.3, $Gen = 1$

Đầu ra: $T_F^*(h_i^*, c_{n,i}^*, b_n^*)$

1. Khởi tạo ngẫu nhiên
 - N_P chuỗi con $\{X_1^{(z)}\}$ với $z = 1, 2, \dots, N_P$, mỗi chuỗi bao gồm I biến nguyên tối ưu $\{h_i\}$.
 - N_P chuỗi con $\{X_2^{(z)}\}$, mỗi chuỗi gồm $(N \times I + N)$ bit để biểu diễn một tập gồm $N \times I$ biến tối ưu nhị phân cho $\{c_{n,i}\}$ và N biến tối ưu nhị phân cho $\{b_n\}$.
2. Tính giá trị hàm thích nghi (fitness) theo công thức (3.17) được tập $\{T_F^{(z)}\}$ tức là $\{T_F^{(z)}(X_1^{(z)}, X_2^{(z)})\}$.
3. Trong khi điều kiện dừng TC chưa thỏa mãn, thực hiện:
4. Đặt $\{X^{(z)}\} = \{[X_1^{(z)}][X_2^{(z)}]\}$ cùng giá trị hàm phạt $T_F^{(z)}$ tương ứng vào tập xếp hạng để lai tạo.
5. Lựa chọn $N_{PG} = N_P \times N_G$ cá thể tốt nhất có giá trị hàm thích nghi nhỏ nhất bằng toán tử lấy mẫu phổ quát ngẫu nhiên [18] để lai ghép, được tập:

$$\{X^{(t)}\} = \{[X_1^{(t)}][X_2^{(t)}]\}, t=1, 2, \dots, N_{PG}$$

6. Chọn một cặp cá thể bố mẹ để tạo cá thể con bằng phép lai ghép một điểm với xác suất P_{ci} và P_{cb} lần lượt áp dụng cho $X_1^{(t)}$ và $X_2^{(t)}$.
7. Thực hiện đột biến các cá thể con $\{X_1^{(t)}\}$ và $\{X_2^{(t)}\}$ tương ứng với các xác suất P_{mi} và P_{mb} tương ứng, bằng phép đảo bit nhằm khôi phục các đặc trưng di truyền tích cực có thể đã bị mất trong các bước trước, để thu được: $\{X^{(t),*}\} = \{[X_1^{(t),*}][X_2^{(t),*}]\}$
8. Lặp lại bước 2 để có $T_F^{(t),*}(X_1^{(t),*}, X_2^{(t),*})$
9. Chèn $\{X^{(t),*}\}$ và $\{T_F^{(t),*}\}$ vào quần thể hiện tại để thu được tập mới $\{X^{(z)}\}$ và $\{T_F^{(z)}\}$.
10. Cập nhật $Gen = Gen + 1$.
11. Kết thúc vòng lặp.
12. Tìm giá trị hàm thích nghi tốt nhất $T_F^*(h_i^*, c_{n,i}^*, b_n^*) \in \{T_F^{(z)}(X_1^{(z)}, X_2^{(z)})\}$

Trong thực tế, CAHO phù hợp với triển khai tập trung tại một MBS để điều phối các RSU, UAV và nội dung phổ biến trong một đoạn đường giới hạn. Tuy nhiên, khi quy mô hệ thống tăng, việc thu thập thông tin trạng thái và chi phí tính toán trở nên khó khăn. Do đó, cần lựa chọn hợp lý số lượng RSU, UAV và video do mỗi MBS quản lý để bảo đảm tính khả thi.

3.5. ĐÁNH GIÁ KẾT QUẢ

3.5.1. Thiết lập thông số

Trong phần đánh giá hiệu năng, các thông số hệ thống và của GA được thiết lập như trong Bảng 3.4. Đồng thời, các thông số môi trường truyền dẫn ở những đoạn đường khác nhau được chọn ngẫu nhiên và tổng hợp trong Bảng 3.3 nhằm phản ánh tính không đồng nhất của điều kiện truyền trong các kịch bản VANET thực tế.

Bảng 3.2: Thông số hệ thống CAHO

Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
M, N	5, 25	UAV, RSU
I	10	video
K	7	vùng/RSU
S_i	Ngẫu nhiên trong khoảng 0.25 đến 2.5	Gbit
s_n	Ngẫu nhiên trong khoảng 30 đến 60	km/h
d	250	m
λ	0.025	VUs/m

α	1	
δ	0.5	
W	10	MHz
P	5	W
σ^2	10^{-12}	W
c	3×10^8	m/s
f_c	2	GHz
ρ_1, ρ_2	$10^{-6}, 1$	
N_P	3000	cá thể
N_G	100	thế hệ
P_G	0.9	
P_{ci}, P_{cb}	0.9, 0.6	
P_{mi}, P_{mb}	$10^{-12}, 10^{-12}$	

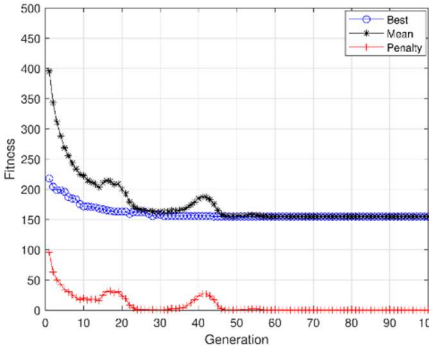
Để đánh giá hiệu quả của CAHO, nghiên cứu so sánh phương pháp đề xuất với bốn phương pháp đối sánh gồm RAHO, RACR, RACU và NUAV, tương ứng với các trường hợp tối ưu không đầy đủ hoặc không triển khai UAV. Các phương pháp này khác nhau ở thành phần được tối ưu, bao gồm vị trí dừng của UAV, lưu trữ tại RSU và lưu trữ tại UAV (Bảng 3.4). Để bảo đảm tính công bằng, các phương pháp đối sánh đều được thiết lập với dung lượng lưu trữ bằng hoặc xấp xỉ CAHO. Vì vậy, sự khác biệt về hiệu năng chủ yếu phản ánh hiệu quả của chiến lược tối ưu đề xuất.

Bảng 3.3: Giá trị tối ưu của các phương pháp so sánh

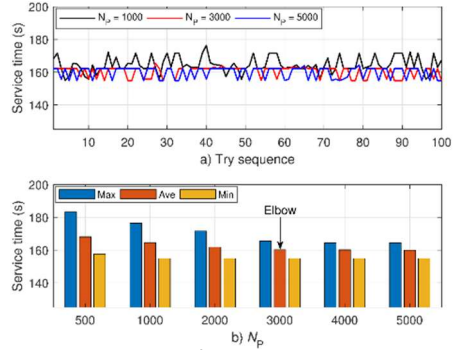
Phương pháp \ Giá trị tối ưu	h_i	$c_{n,i}$	b_n
RAHO	Y	Y	N
RACR	N	Y	Y
RACU	Y	N	Y
NUAV	Y	N	N
CAHO	Y	Y	Y

3.5.2. Đánh giá GA

Hiệu quả của GA được thể hiện qua quá trình hội tụ và tính ổn định của nghiệm. Hình 3.4 cho thấy ở giai đoạn đầu, khoảng cách giữa Best và Mean lớn, phản ánh khả năng khám phá tốt; về sau hai giá trị này hội tụ dần, đồng thời Penalty giảm về 0, cho thấy thuật toán đạt nghiệm tối ưu và thỏa mãn các ràng buộc.



Hình 3.4: Tốc độ hội tụ của GA trong phương pháp CAHO



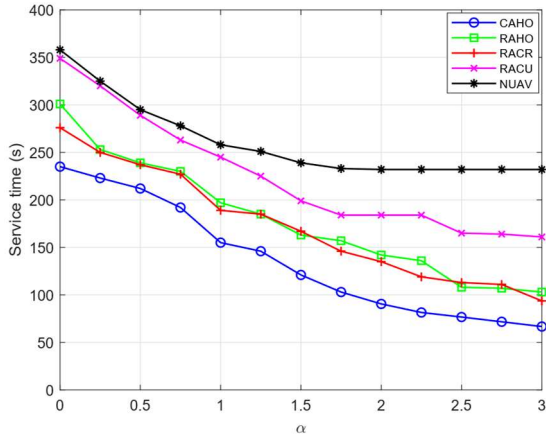
Hình 3.5: Độ ổn định và chính xác của GA trong phương pháp CAHO

Tính ổn định và độ chính xác của GA tiếp tục được kiểm chứng qua nhiều lần chạy độc lập với các kích thước quần thể khác nhau. Kết quả ở Hình 3.5 cho thấy khi kích thước quần thể nhỏ, nghiệm thu được dao động nhiều hơn và thời gian phục vụ thường cao hơn. Ngược lại, với quần thể lớn hơn, đặc biệt từ $N_p = 3000$ trở lên, thuật toán cho kết quả ổn định hơn và đạt được giá trị thời gian phục vụ thấp hơn. Điều này khẳng định GA có khả năng hội tụ tốt và đủ tin cậy để giải bài toán CAHO.

3.5.3. Đánh giá hiệu suất CAHO

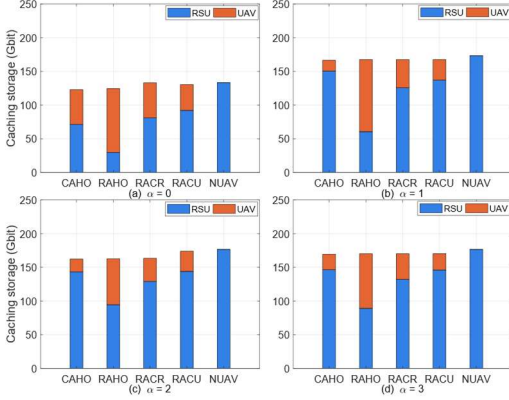
1) Hiệu năng theo tham số α

Hình 3.6 cho thấy khi tham số α tăng, thời gian phục vụ của tất cả các phương pháp đều giảm, do hệ thống có thể tập trung tài nguyên lưu trữ vào các video phổ biến hơn. Trong các phương pháp được so sánh, CAHO luôn đạt thời gian phục vụ thấp nhất nhờ tối ưu đồng thời lưu trữ tại RSU và UAV cũng như vị trí dừng của UAV.



Hình 3.6: Thời gian phục vụ theo α

Kết quả này khẳng định hiệu quả nổi bật của CAHO trong việc phối hợp tối ưu giữa lớp lưu trữ mặt đất và trên không. Đồng thời, các kết quả so sánh cũng cho thấy UAV giữ vai trò quan trọng trong việc cải thiện hiệu năng hệ thống, nhưng để khai thác hiệu quả lớp lưu trữ này, cần phải tối ưu đồng thời cả vị trí UAV và chiến lược lưu trữ nội dung.

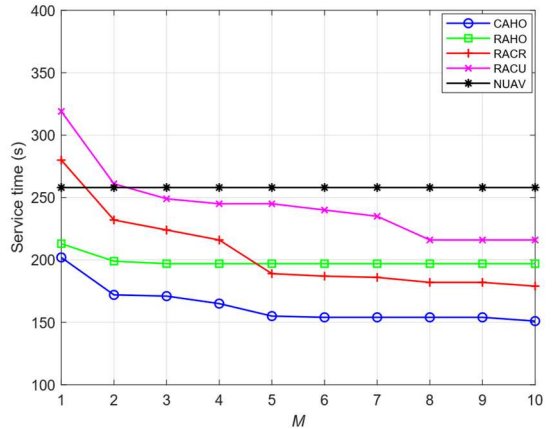


Hình 3.4: Dung lượng lưu trữ theo α

Kết quả này cho thấy ưu thế của CAHO không nằm ở việc sử dụng nhiều dung lượng lưu trữ hơn, mà ở khả năng khai thác và phân bổ hiệu quả tài nguyên lưu trữ phân tán. Đồng thời, việc tối ưu vị trí dừng của UAV cũng góp phần quan trọng để nâng cao hiệu năng và giảm nhu cầu lưu trữ dư thừa.

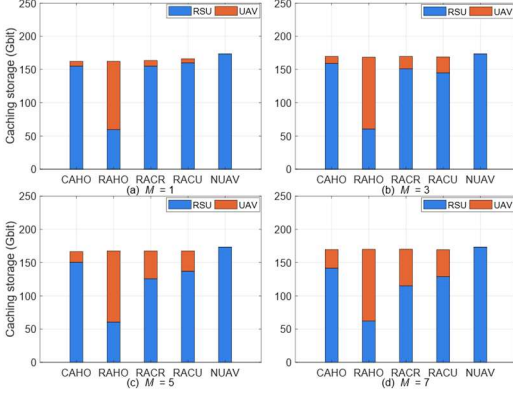
2) Hiệu năng theo số lượng UAV M

Hình 3.8 cho thấy khi số lượng UAV M tăng, thời gian phục vụ của các phương pháp có triển khai UAV đều giảm, nhưng mức cải thiện sẽ dần bão hòa khi số UAV đủ lớn. Trong đó, CAHO luôn đạt thời gian phục vụ thấp nhất nhờ tối ưu đồng thời vị trí dừng của UAV và chiến lược lưu trữ nội dung.



Hình 3.8: Thời gian phục vụ theo M

Kết quả này khẳng định CAHO khai thác hiệu quả lớp hạ tầng trên không, giúp bù đắp các khoảng trống lưu trữ giữa các RSU và nâng cao rõ rệt hiệu năng phục vụ video trong hệ thống.



Hình 3.9: Dung lượng lưu trữ theo M

khả năng tận dụng số lượng UAV hiệu quả nhất; đồng thời, số UAV cần được lựa chọn hợp lý theo từng kịch bản, lý tưởng tại điểm “khuỷu bão hòa”.

Hình 3.9 tiếp tục khẳng định vai trò của UAV như một lớp lưu trữ bổ sung linh hoạt trong UAV-VANET. Khi M tăng, hệ thống có thêm các điểm lưu trữ và truyền dữ liệu trong không gian ba chiều, giúp mở rộng vùng phủ và cải thiện khả năng phân phối nội dung. Nhờ tối ưu đồng thời vị trí dừng và chiến lược lưu trữ, CAHO khai thác hiệu quả hơn tài nguyên lưu trữ phân tán, từ đó giảm thời gian phục vụ video tốt hơn các phương pháp còn lại.

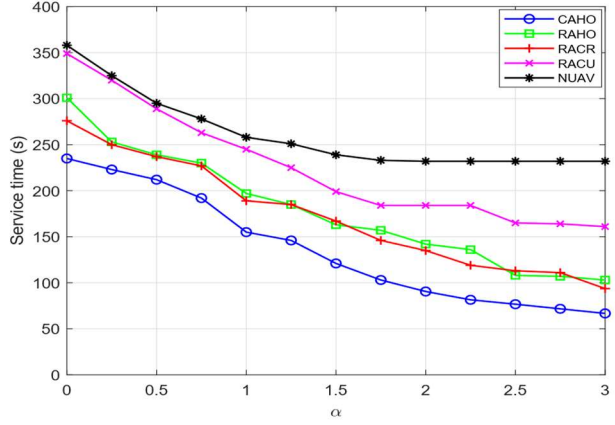
3) Hiệu năng theo mật độ phương tiện λ

Hình 3.10 cho thấy khi mật độ phương tiện λ tăng, thời gian phục vụ của các phương pháp có hỗ trợ UAV đều giảm, trong khi NUAV lại có xu hướng tăng do dung lượng liên kết R2V phải chia sẻ cho nhiều phương tiện hơn. Kết quả này cho thấy lợi thế của lớp hạ tầng UAV ngày càng rõ rệt trong các kịch bản mật độ phương tiện cao, khi các liên kết U2V có thể được khai thác hiệu quả hơn. Xu hướng này cũng phù hợp với Hình 3.11, trong đó, dung lượng lưu trữ tại UAV tăng theo λ .

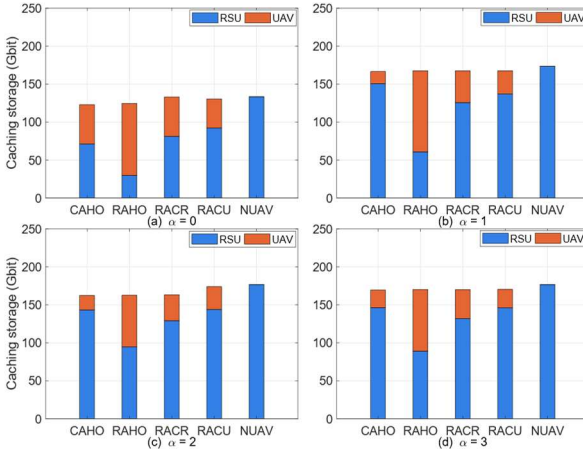
UAV có vai trò quan trọng trong việc nâng cao hiệu năng hệ thống, đặc biệt khi lưu lượng truy cập lớn. Trong mô hình CAHO, việc tối ưu đồng thời vị trí dừng của UAV và chiến lược lưu trữ nội dung cho phép tận dụng hiệu quả các liên kết U2V, từ đó giảm đáng kể thời gian phục vụ. Các đánh giá theo α , M và λ đều cho thấy xu hướng nhất quán rằng CAHO luôn đạt thời gian phục vụ thấp nhất và sử dụng tài nguyên lưu trữ hiệu quả. Từ đó giảm

Kết quả cho thấy RAHO bão hòa sớm do vị trí dừng của UAV không được tối ưu, trong khi RACR khai thác UAV hiệu quả hơn nhờ tối ưu vị trí này. Đối với NUAV, do không triển khai UAV nên hiệu năng không thay đổi theo M . Trong toàn bộ dải giá trị M , CAHO luôn đạt thời gian phục vụ thấp nhất, cho thấy

đáng kể thời gian phục vụ. Các đánh giá theo α , M và λ đều cho thấy xu hướng nhất quán rằng CAHO luôn đạt thời gian phục vụ thấp nhất và sử dụng tài nguyên lưu trữ hiệu quả.



Hình 3.10: Thời gian phục vụ theo λ



Hình 3.11: Dung lượng lưu trữ theo λ

3.5.4. Độ phức tạp của mô hình CAHO

So với mô hình DPC, CAHO có chi phí tính toán hàm mục tiêu tương đương, nhưng không gian tìm kiếm lớn hơn do bổ sung lớp UAV và thêm các biến quyết định. Tuy nhiên, với $N_p = 3000$ và $N_G = 100$, GA vẫn bảo đảm độ ổn định và độ chính xác cho bài toán CAHO. Vì vậy, tương tự DPC, độ phức tạp tổng thể của GA trong mô hình CAHO được xấp xỉ bởi $\mathcal{O}(N_p \times N_G \times C_O)$, và mô hình này vẫn có khả năng áp dụng cho các hệ thống UAV-VANET quy mô lớn.

Kết quả cho thấy UAV giúp cải thiện rõ rệt hiệu năng hệ thống, đặc biệt khi mật độ phương tiện cao. Nhờ tối ưu vị trí dừng và chiến lược lưu trữ, CAHO khai thác hiệu quả các liên kết U2V, qua đó giảm thời gian phục vụ và thích nghi tốt với điều kiện mạng thay đổi.

3.6. KẾT LUẬN CHƯƠNG 3

Chương 3 đã đề xuất mô hình tối ưu kết hợp lưu trữ và vị trí dừng của UAV, gọi là CAHO, cho dịch vụ truyền video hợp tác trong UAV-VANET. Mô hình này tối ưu đồng thời lưu trữ tại RSU, lưu trữ tại UAV và vị trí dừng của UAV nhằm cực tiểu hóa thời gian phục vụ trung bình trong điều kiện tài nguyên lưu trữ và số lượng UAV có hạn. Bài toán được xây dựng trên cơ sở mô hình hóa hệ thống và được giải bằng GA đã điều chỉnh để xử lý các biến nguyên và nhị phân. Kết quả mô phỏng cho thấy CAHO luôn đạt thời gian phục vụ thấp hơn và sử dụng tài nguyên lưu trữ hiệu quả hơn so với các phương pháp đối sánh trong nhiều kịch bản khác nhau. Những kết quả này khẳng định vai trò của UAV trong việc bù đắp khoảng trống lưu trữ và nâng cao hiệu năng truyền video trong UAV-VANET.

KẾT LUẬN

1. Kết quả đạt được

Luận án xây dựng một khung nghiên cứu thống nhất cho bài toán lưu trữ và phân phối video trong UAV-VANET với mục tiêu xuyên suốt là tối thiểu hóa thời gian phục vụ. Trên cơ sở kế thừa các nghiên cứu về kiến trúc UAV-VANET, mô hình kênh truyền và các chiến lược lưu trữ nội dung, luận án chuyển trọng tâm từ các chỉ tiêu gián tiếp sang thời gian phục vụ như một đại lượng phản ánh trực tiếp cả QoS và QoE.

Trên nền tảng đó, luận án đề xuất hai mô hình tiêu biểu là DPC và CAHO. Mô hình DPC xây dựng khung tối ưu chung cho lưu trữ tại RSU và phương tiện trong mạng VANET, còn mô hình CAHO mở rộng bài toán sang không gian ba chiều bằng cách tích hợp thêm lưu trữ tại UAV và tối ưu vị trí dừng của UAV. Cả hai mô hình đều được giải bằng giải thuật di truyền được điều chỉnh phù hợp với không gian nghiệm hỗn hợp và hệ ràng buộc phức tạp của bài toán.

Điểm nổi bật của luận án là đã hình thành được một lộ trình phát triển có tính hệ thống, từ mô hình VANET hai chiều đến UAV-VANET ba chiều, trong đó tiêu chí thời gian phục vụ và khung tối ưu meta-heuristic được duy trì nhất quán. Kết quả cho thấy các mô hình đề xuất giúp cải thiện rõ rệt thời gian phục vụ, đồng thời khẳng định tiềm năng ứng dụng của hướng tiếp cận này đối với các hệ thống giao thông thông minh và mạng 5G/6G trong tương lai.

2. Hướng nghiên cứu trong tương lai

Mặc dù luận án đã đạt được những kết quả tích cực, nghiên cứu hiện tại vẫn dựa trên một số giả định lý tưởng và còn nhiều hướng mở rộng trong tương lai. Các hướng này bao gồm xây dựng mô hình có xét đến độ tin cậy của RSU và UAV, phát triển cơ chế lưu trữ động thích nghi theo trạng thái giao thông và

điều kiện kênh truyền, cũng như mở rộng mô hình phổ biến nội dung và truyền thông theo các điều kiện thực tế hơn.

Bên cạnh đó, các nghiên cứu tiếp theo có thể tích hợp thêm yếu tố năng lượng, phát triển các mô hình tối ưu đa mục tiêu và khai thác các thuật toán tối ưu lai hoặc học tăng cường sâu để giảm độ phức tạp tính toán và tăng khả năng thích nghi. Một hướng quan trọng khác là tối ưu hóa tích hợp giữa lưu trữ nội dung, vị trí UAV và quỹ đạo bay trong cùng một khung thống nhất. Những hướng mở rộng này cho thấy luận án là nền tảng cho các nghiên cứu sâu hơn, hướng tới các hệ thống UAV-VANET thực tế, linh hoạt và có khả năng triển khai ở quy mô lớn.