

ĐẠI HỌC ĐÀ NẴNG
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA
KHOA ĐIỆN TỬ - VIỄN THÔNG



BÁO CÁO
LẬP TRÌNH MẠNG

CHỦ ĐỀ:

Mô phỏng và đánh giá mạng UAV dùng MEC

Sinh viên thực hiện: **Trần Đăng Bách – 106220244**

Trịnh Anh Nhật – 106220230

Huỳnh Công Huy - 106220253

Lớp **: 22KTMT**

Đà Nẵng, 11/2025

Mục lục

I.	Giới thiệu	1
1.	Tổng quan và bối cảnh nghiên cứu.....	1
2.	Mục tiêu	1
3.	Phạm vi và phương pháp	1
II.	Cơ sở lý thuyết	1
1.	Tổng quan về mạng UAV hỗ trợ MEC.....	2
a.	Khái niệm Mobile Edge Computing (MEC)	2
b.	Mạng UAV (UAV Networks).....	2
c.	Kiến trúc kết hợp UAV-MEC.....	2
2.	Cơ chế “handover”	3
a.	Thách thức của Handover với UAV	3
b.	Thuật toán A3 Event (RSRP-based)	3
3.	Mô hình Di trú Dịch vụ (MEC Service Migration)	3
a.	Quy trình Di trú	3
b.	Mô hình hóa Chi phí Di trú (Migration Penalty)	4
4.	Các mô hình Mô phỏng trong NS-3	4
a.	Mô hình Kênh truyền (Channel Model)	4
b.	Mô hình Di chuyển (Mobility Model)	4
III.	Thiết kế kịch bản và mô phỏng	4
1.	Kiến trúc mạng mô phỏng trên NS-3.....	4
a.	Mạng Lõi (Core Network / Cloud)	5
b.	Mạng Truy cập Vô tuyến (Radio Access Network - UAV Edge)	5
c.	Thiết bị Người dùng (UE)	5
2.	Tham số mô phỏng	5
3.	Kịch bản thử nghiệm.....	7
a.	Kịch bản di chuyển	7
b.	Quy trình Thực thi MEC Handover	8
4.	Trực quan hóa mô phỏng.....	8
IV.	Phân tích kết quả	9
1.	Các file dữ liệu kết quả thu thập.....	9
2.	Đánh giá chất lượng tín hiệu lớp Vật lý (RSRP & SINR)	11
3.	Đánh giá độ ổn định Thông lượng (Throughput Stability)	12

4.	Đánh giá Hiệu năng MEC (Service Latency).....	14
5.	Đánh giá Chất lượng Dịch vụ (QoS - Jitter)	15
V.	Kết luận	16
1.	Kết luận chung.....	16
2.	Hạn chế.....	17
3.	Hướng phát triển	17
IV.	Tài liệu tham khảo	18

PHÂN CÔNG CÔNG VIỆC

STT	HỌ VÀ TÊN	NHIỆM VỤ	KHỐI LƯỢNG
1	Trịnh Anh Nhật	Xây dựng kịch bản NS-3, code C++, viết báo cáo	34%
2	Huỳnh Công Huy	Xử lý dữ liệu, Vẽ biểu đồ, phân tích, viết báo cáo	33%
3	Trần Đăng Bách	Tìm hiểu lý thuyết mạng UAV hỗ trợ MEC/Handover, viết báo cáo	33%

I. Giới thiệu

1. Tổng quan và bối cảnh nghiên cứu

Sự hội tụ giữa công nghệ Máy bay không người lái (UAV) và Tính toán biên di động (Mobile Edge Computing - MEC) đang tạo ra một mô hình mạng mới đầy tiềm năng: UAV-assisted MEC Networks. Trong kiến trúc này, các UAV không chỉ đóng vai trò là các trạm thu phát sóng trên không (Aerial Base Stations) giúp mở rộng vùng phủ sóng linh hoạt, mà còn được tích hợp năng lực tính toán để xử lý dữ liệu ngay tại biên mạng, giảm tải cho hệ thống Cloud trung tâm.

Tuy nhiên, đặc tính di động cao của UAV và người dùng mặt đất đặt ra những thách thức kỹ thuật lớn về quản lý kết nối. Quá trình chuyển giao (Handover) giữa các trạm UAV không chỉ ảnh hưởng đến tính liên tục của đường truyền vô tuyến mà còn tác động trực tiếp đến độ trễ dịch vụ do yêu cầu di trú dữ liệu tính toán (Service Migration).

2. Mục tiêu

Đề tài tập trung nghiên cứu và mô phỏng cơ chế hoạt động của mạng UAV-MEC trong môi trường 3D thực tế. Các mục tiêu cụ thể bao gồm:

1. Xây dựng kịch bản mô phỏng: Thiết lập mạng lưới gồm các UAV bay tuần tra và người dùng di chuyển trên nền tảng NS-3.
2. Đánh giá hiệu năng Handover: Phân tích tác động của sự kiện chuyển giao (Handover) lên chất lượng tín hiệu (RSRP, SINR) và tính ổn định của dịch vụ (Throughput, JITTER).
3. Phân tích độ trễ MEC: Đánh giá tổng độ trễ dịch vụ (Service Latency) khi tích hợp chi phí di trú dữ liệu (Migration Penalty) trong quá trình chuyển vùng.

3. Phạm vi và phương pháp

Công cụ mô phỏng: Network Simulator 3 (NS-3), module LTE, FlowMonitor, NetAnim.

Mô hình kênh truyền: Sử dụng mô hình thực tế Log-Distance kết hợp với Nakagami-m Fading để phản ánh hiện tượng suy hao và pha đỉnh đa đường (Multipath Fading) trong môi trường đô thị.

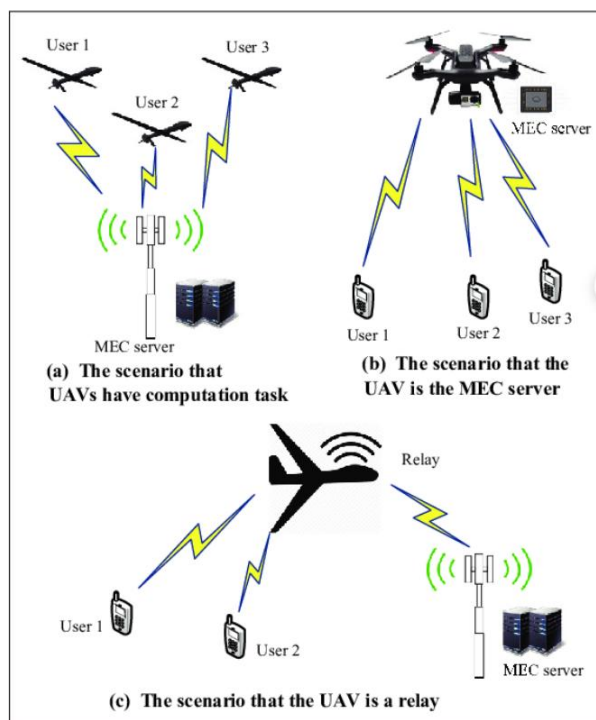
Mô hình di chuyển: Áp dụng chiến lược di chuyển lai ghép (Hybrid Mobility) bao gồm quỹ đạo tuần tra (Waypoint) cho UAV và di chuyển ngẫu nhiên (Random Walk) cho người dùng nền.

Lưu lượng: Tập trung đánh giá các ứng dụng thời gian thực sử dụng giao thức UDP (như Video Streaming, Telemetry).

II. Cơ sở lý thuyết

1. Tổng quan về mạng UAV hỗ trợ MEC

a. Khái niệm Mobile Edge Computing (MEC)



Hình 1. Kiến trúc mạng UAV hỗ trợ MEC

Mobile Edge Computing (MEC) là một kiến trúc mạng nhằm đưa khả năng tính toán và lưu trữ từ các trung tâm dữ liệu đám mây (Cloud) xuống gần phía người dùng hơn (Edge of the network). Mục tiêu chính của MEC là giảm độ trễ truyền dẫn, giảm tải cho mạng lõi (Backhaul) và cung cấp các dịch vụ thời gian thực.

b. Mạng UAV (UAV Networks)

Trong bối cảnh mạng 5G/6G, máy bay không người lái (UAV) đóng vai trò là các trạm phát sóng trên không (Aerial Base Stations - ABS). So với trạm phát sóng mặt đất cố định, UAV có ưu điểm vượt trội về tính linh hoạt, khả năng triển khai nhanh và xác suất đạt được tầm nhìn thẳng (Line-of-Sight - LoS) cao hơn.

c. Kiến trúc kết hợp UAV-MEC

Hệ thống được xây dựng theo mô hình phân cấp 3 tầng (Three-tier Architecture):

1. Tier 1 - Core/Cloud: Bao gồm các Server trung tâm và các thành phần mạng lõi (EPC: PGW, SGW, MME). Đóng vai trò quản lý mạng và cung cấp nội dung lớn.
2. Tier 2 - Edge (UAVs): Các UAV được trang bị server MEC di động. Đóng vai trò xử lý các tác vụ nhạy cảm với độ trễ (Latency-sensitive tasks) và làm trạm trung chuyển kết nối.

3. Tier 3 - User (UEs): Các thiết bị người dùng cuối (End-users) di chuyển trên mặt đất, gửi yêu cầu tính toán lên UAV.

2. Cơ chế “handover”

Handover (HO) là quá trình chuyển đổi kết nối của người dùng (UE) từ trạm phát sóng hiện tại (Source Cell) sang trạm phát sóng kế tiếp (Target Cell) để duy trì tính liên tục của dịch vụ khi người dùng di chuyển.

a. Thách thức của Handover với UAV

Khác với mạng mặt đất, handover trong mạng UAV đối mặt với các thách thức lớn do đặc tính di động cao và môi trường truyền sóng phức tạp. Tín hiệu thường xuyên bị dao động mạnh (Fast Fading) và nhiễu giao thoa (Interference) giữa các UAV bay gần nhau, dẫn đến hiện tượng "Ping-pong" (chuyển qua lại liên tục) hoặc rớt mạng (Radio Link Failure).

b. Thuật toán A3 Event (RSRP-based)

Trong nghiên cứu này, hệ thống sử dụng thuật toán handover tiêu chuẩn A3 (A3 Event) dựa trên công suất tín hiệu thu được (RSRP). Sự kiện Handover được kích hoạt khi thỏa mãn điều kiện:

$$RSRP_{\text{Target}} > RSRP_{\text{Source}} + \text{Hysteresis}$$

RSRP: Reference Signal Received Power (Công suất tín hiệu tham chiếu).

Hysteresis: Biên độ trễ (ngưỡng chênh lệch) để tránh hiệu ứng Ping-pong.

Time-to-Trigger: Khoảng thời gian tín hiệu phải duy trì ổn định trước khi thực sự chuyển giao.

3. Mô hình Di trú Dịch vụ (MEC Service Migration)

Trong mạng MEC, Handover không chỉ là chuyển đổi kết nối vô tuyến mà còn kéo theo yêu cầu Di trú bối cảnh tính toán (Context Migration).

a. Quy trình Di trú

Khi UE chuyển từ UAV 1 sang UAV 2, các tác vụ (Tasks) hoặc container đang chạy trên UAV 1 phải được chuyển sang UAV 2 để đảm bảo độ trễ thấp nhất. Quá trình này bao gồm các bước:

1. Inspection: Phát hiện nhu cầu Handover.
2. Preparation: Chuẩn bị tài nguyên tại UAV đích.

3. Execution: Chuyển dữ liệu trạng thái (State Transfer). Đây là giai đoạn gây ra độ trễ lớn nhất.

b. Mô hình hóa Chi phí Di trú (Migration Penalty)

Do giới hạn của băng thông giữa các UAV, quá trình di trú sẽ phát sinh một khoảng thời gian gián đoạn dịch vụ, gọi là Migration Penalty (hoặc Migration Delay). Tổng độ trễ dịch vụ được tính bằng:

$$T_{\text{total}} = T_{\text{transmission}} + T_{\text{processing}} + T_{\text{migration_penalty}}$$

Trong mô phỏng, tham số $T_{\text{migration_penalty}}$ được thiết lập là 50ms để phản ánh thời gian thực tế cần thiết cho việc đồng bộ trạng thái container.

4. Các mô hình Mô phỏng trong NS-3

Để đảm bảo tính thực tế của kết quả mô phỏng, đề tài áp dụng các mô hình toán học sau:

a. Mô hình Kênh truyền (Channel Model)

Thay vì sử dụng mô hình Friis (không gian tự do lý tưởng), nghiên cứu áp dụng mô hình kết hợp:

- Log-Distance Pathloss: Mô phỏng suy hao tín hiệu theo khoảng cách logarit với tham số mũ suy hao (Path Loss Exponent) $\alpha = 3.0$, đặc trưng cho môi trường đô thị có vật cản.
- Nakagami-m Fading: Mô phỏng hiện tượng pha đỉnh nhanh (Fast Fading) do tán xạ đa đường, giúp tái hiện sự biến động ngẫu nhiên của tín hiệu RSRP/SINR trong thực tế.

b. Mô hình Di chuyển (Mobility Model)

Chiến lược di chuyển lai ghép được sử dụng:

- Waypoint Mobility Model: Áp dụng cho UAV (bay tuần tra) và UE kiểm thử (di chuyển có đích) để tạo ra các kịch bản đo đạc tất định.
- Random Walk Mobility Model: Áp dụng cho các UE nền để tạo ra nhiễu ngẫu nhiên và đánh giá độ ổn định của hệ thống dưới điều kiện tải nền không xác định.

III. Thiết kế kịch bản và mô phỏng

1. Kiến trúc mạng mô phỏng trên NS-3

Hệ thống được xây dựng trên nền tảng mô phỏng Network Simulator 3 (NS-3) phiên bản 3.43, sử dụng các module chính bao gồm: LTE, Mobility, Internet, FlowMonitor và NetAnim. Kiến trúc topo mạng được thiết kế theo mô hình ngôi sao mở rộng, bao gồm 3 thành phần chính:

a. Mạng Lõi (Core Network / Cloud)

Để phản ánh chính xác kiến trúc mạng di động 4G/5G thực tế, hệ thống bao gồm đầy đủ các nút mạng lõi EPC (Evolved Packet Core):

- Remote Host (Server): Đóng vai trò là Cloud Server hoặc Trung tâm điều khiển mặt đất, nguồn cung cấp dữ liệu dịch vụ (Video/Data) cho người dùng.
- PGW (Packet Data Network Gateway): Cổng kết nối giữa mạng LTE và mạng Internet bên ngoài.
- SGW (Serving Gateway): Điểm neo di động (Mobility Anchor), chịu trách nhiệm định tuyến gói tin khi người dùng di chuyển giữa các trạm phát sóng.
- MME (Mobility Management Entity): Quản lý các tín hiệu điều khiển (Control Plane), xác thực người dùng và điều phối quá trình Handover.

b. Mạng Truy cập Vô tuyến (Radio Access Network - UAV Edge)

Hệ thống sử dụng 3 UAV đóng vai trò là các trạm phát sóng trên không (Aerial eNBs).

- Cấu hình: Các UAV được trang bị khả năng xử lý tính toán biên (MEC).
- Vị trí triển khai: Các UAV được bố trí tại độ cao 30m so với mặt đất để tối ưu hóa đường truyền tầm nhìn thẳng (Line-of-Sight) và giảm thiểu vật cản.
- Kết nối: Các UAV kết nối về mạng lõi thông qua liên kết P2P (Point-to-Point) mô phỏng đường truyền Backhaul (vệ tinh hoặc viba) tốc độ cao (100 Gbps) để đảm bảo nút thắt cổ chai chỉ nằm ở giao diện vô tuyến.

c. Thiết bị Người dùng (UE)

Mạng lưới bao gồm 3 UE mặt đất, được chia thành 2 nhóm đối tượng:

- Người dùng Nền (Background Users - UE 1, UE 3): Tạo tải nền và nhiễu ngẫu nhiên cho hệ thống.
- Người dùng Kiểm thử (Test User - UE 2): Đối tượng chính để đo đặc hiệu năng Handover và MEC Migration.

2. Tham số mô phỏng

Các tham số kỹ thuật được thiết lập dựa trên tiêu chuẩn 3GPP LTE và các kịch bản ứng dụng thực tế của UAV.

Bảng 1. Tham số cấu hình hệ thống

Hạng mục	Tham số	Giá trị thiết lập	Giải thích
Hệ thống	Thời gian mô phỏng	100 giây	Đủ thời gian để UE di chuyển qua 3 vùng phủ sóng
	Băng thông hệ thống	5 MHz (25 RBs)	Cấu hình băng thông hẹp điển hình cho các mạng riêng lẻ (Private Network)
	Tần số sóng mang	2.1 GHz (Band 1)	Tần số phổ biến cho mạng di động đô thị
	Công suất phát (Tx Power)	43 dBm (20W)	Công suất tiêu chuẩn của trạm eNB
Kênh truyền	Pathloss Model	Log-Distance	Mô hình suy hao theo khoảng cách logarit (Exponent = 3.0 cho đô thị)
	Fading Model	Nakagami-m	Mô hình pha đỉnh nhanh đa đường (m=1.0 ~ Rayleigh)
Ứng dụng	Loại lưu lượng	UDP CBR	Mô phỏng Video Streaming thời gian thực (Constant Bit Rate)
	Kích thước gói tin	1472 Bytes	Kích thước tối đa (MTU) để tối ưu hóa thông lượng
	Khoảng thời gian gửi (Interval)	4.0 ms	Tương đương tốc độ gửi khoảng 3 Mbps
Handover	Thuật toán	A3 Event (RSRP)	Dựa trên cường độ tín hiệu tham chiếu
	Hysteresis	0.1 dB	Độ trễ biên, đặt thấp để tăng độ nhạy Handover
	Time-to-Trigger	20 ms	Thời gian chờ kích hoạt
MEC	Migration Penalty	50 ms	Thời gian phạt (gián đoạn) khi di trú dữ liệu giữa các UAV

3. Kịch bản thử nghiệm

Kịch bản được thiết kế để đánh giá khả năng duy trì kết nối và dịch vụ khi người dùng di chuyển xuyên qua vùng phủ sóng của nhiều UAV.

a. Kịch bản di chuyển

Hệ thống áp dụng chiến lược di chuyển lai ghép (Hybrid Mobility) để tăng tính thực tế:

1. UAV (Mobile Base Stations):

- Sử dụng mô hình WaypointMobilityModel.
- Mỗi UAV bay theo một quỹ đạo tuần tra hình tam giác hoặc qua lại quanh khu vực phụ trách (bán kính ~40m) tại độ cao 30m. Việc UAV di chuyển thay vì đứng yên tạo ra sự biến động liên tục về vùng phủ sóng.

2. UE Nền (UE 1 & UE 3):

- Sử dụng mô hình RandomWalk2dMobilityModel.
- Di chuyển ngẫu nhiên trong một khu vực giới hạn (Bounds) với tốc độ đi bộ (1-2 m/s). Điều này tạo ra sự biến động ngẫu nhiên về chất lượng tín hiệu nhưng vẫn đảm bảo kết nối ổn định với trạm phục vụ.

3. UE Kiểm thử (UE 2 - Đối tượng chính):

- Sử dụng mô hình WaypointMobilityModel.
- Di chuyển theo một lộ trình tuyến tính định sẵn (Linear Path) dài 140m, đi xuyên qua tâm vùng phủ sóng của UAV 1, UAV 2 và UAV 3.
- Tốc độ di chuyển trung bình: ~2.3 m/s (Tương đương chạy bộ nhẹ).
- Mục đích: Tạo ra các sự kiện Handover tất định tại các thời điểm dự kiến (khoảng giây thứ 25-35 và 60-70) để đo đạc chính xác các chỉ số hiệu năng.

→ Điểm mới trong kịch bản mô phỏng:

- Kênh truyền thực tế (Realistic Channel): Thay vì sử dụng mô hình Friis (lý tưởng) hay Constant Loss thường thấy, kịch bản áp dụng mô hình Nakagami-m Fading kết hợp Log-Distance Pathloss. Điều này giúp tái hiện chân thực sự biến động ngẫu nhiên (Stochastic) của tín hiệu trong môi trường đô thị 3D, làm cho bài toán Handover trở nên thách thức và thực tế hơn.
- Chiến lược di chuyển lai ghép (Hybrid Mobility): Kết hợp giữa vận động có chủ đích (Waypoint) của UAV/Test UE và vận động ngẫu nhiên (Random Walk) của

người dùng nền để tạo ra môi trường nhiễu động (Dynamic Interference Environment).

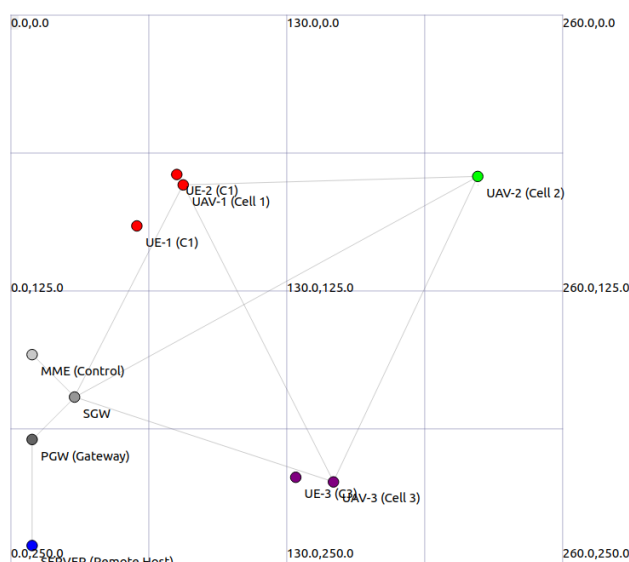
b. Quy trình Thực thi MEC Handover

Quy trình xử lý trong mã nguồn diễn ra theo các bước sau:

1. Giám sát: Hệ thống liên tục đo RSRP và SINR mỗi mili-giây.
2. Kích hoạt: Khi UE 2 di chuyển ra vùng biên, tín hiệu từ UAV phục vụ giảm xuống thấp hơn tín hiệu từ UAV hàng xóm (vượt ngưỡng Hysteresis), sự kiện A3 được kích hoạt.
3. Chuyển mạch: Mạng lõi thực hiện ngắt kết nối với UAV cũ và thiết lập đường dẫn dữ liệu mới (Path Switching) qua SGW đến UAV mới.
4. Di trú (Migration): Module MEC ảo hóa phát hiện sự thay đổi Cell ID của UE. Hệ thống tự động cộng thêm một khoảng thời gian trễ (Migration Penalty = 50ms) vào tổng độ trễ dịch vụ (Service Latency) để mô phỏng quá trình chuyển giao trạng thái ứng dụng (Context Transfer).

4. Trực quan hóa mô phỏng

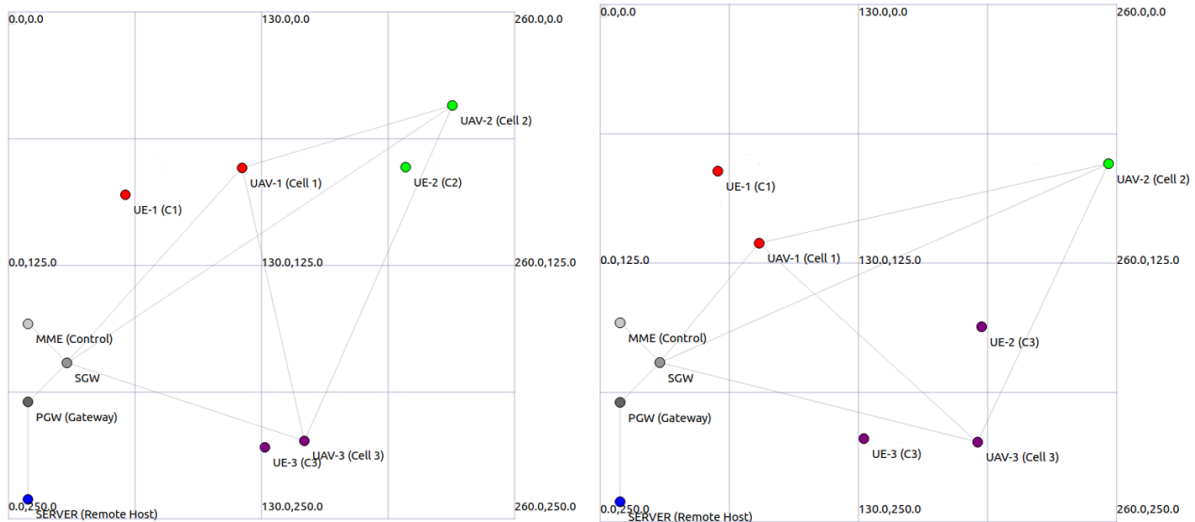
Để kiểm chứng tính chính xác của topo mạng và kịch bản di chuyển, nhóm sử dụng công cụ NetAnim để trực quan hóa quá trình mô phỏng. Hình ảnh dưới đây minh họa cấu trúc mạng thực tế được triển khai trong mã nguồn NS-3.



Hình 2. Tô-pô mạng mô phỏng trên NetAnim.

- Khối Mạng lõi (Core Network): Được bố trí thẳng hàng ở phía bên trái, bao gồm Remote Host (Server - Xanh dương), PGW, SGW và MME.

- Khối Mạng biên (UAV Edge): Gồm 3 UAV (các chấm tròn lớn) được bố trí theo hình tam giác để phủ sóng khu vực. Các UAV này được cấu hình di chuyển theo quỹ đạo tuần tra (Waypoint Mobility) thay vì đứng yên.
- Người dùng (UEs): Các chấm tròn nhỏ. Màu sắc của UE tương ứng với UAV mà nó đang kết nối (Ví dụ: UE màu đỏ kết nối với UAV 1).



Hình 3. Quá trình di chuyển và chuyển giao kết nối của UE2

- Hình 3 ghi lại thời điểm UE 2 di chuyển ra khỏi vùng phủ sóng của UAV 1 và tiến vào vùng phủ sóng của UAV 2.
- Quan sát trên NetAnim, UE 2 thay đổi màu sắc (ví dụ: từ Đỏ sang Xanh lá), biểu thị sự kiện Handover đã diễn ra thành công về mặt logic kết nối.
- Đồng thời, các UE nền (UE 1, UE 3) thực hiện di chuyển ngẫu nhiên (Random Walk) quanh khu vực phục vụ, tạo ra môi trường mô phỏng động sát với thực tế.

IV. Phân tích kết quả

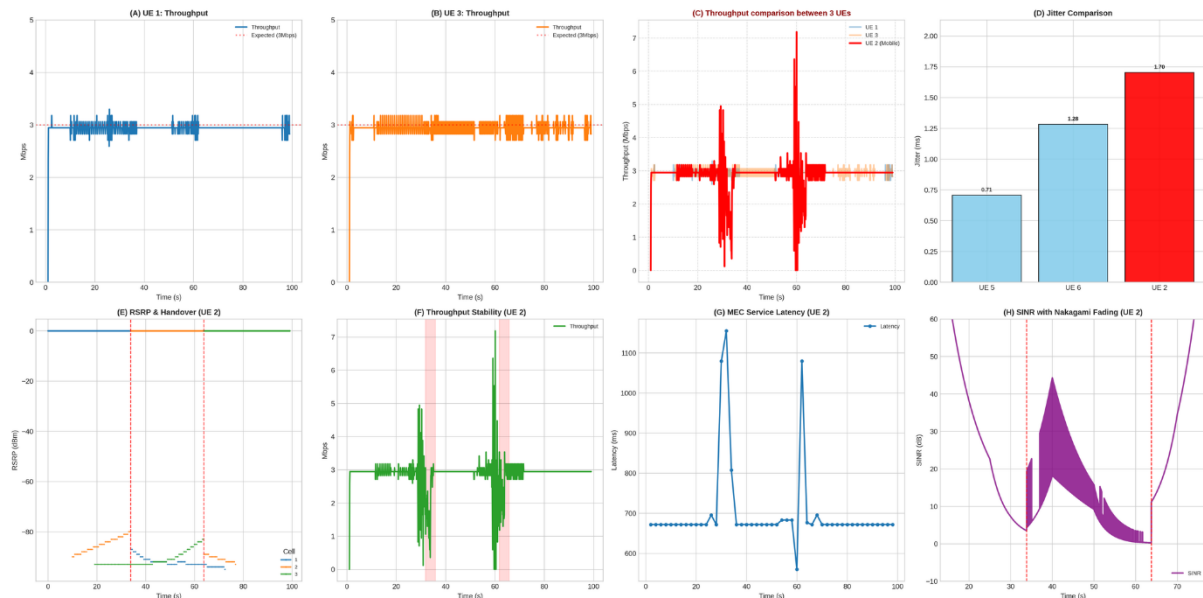
1. Các file dữ liệu kết quả thu thập

Để đánh giá toàn diện hệ thống, mô phỏng thực hiện trích xuất dữ liệu thời gian thực và thống kê tổng hợp ra các file CSV sau:

Bảng 2. Các file dữ liệu kết quả

Tên File	Nội dung lưu trữ	Ý nghĩa
rsrp.csv	Time, IMSI, CellId, RSRP (dBm)	Theo dõi cường độ tín hiệu của từng UE theo thời gian thực để xác định điểm Handover và vùng phủ sóng.

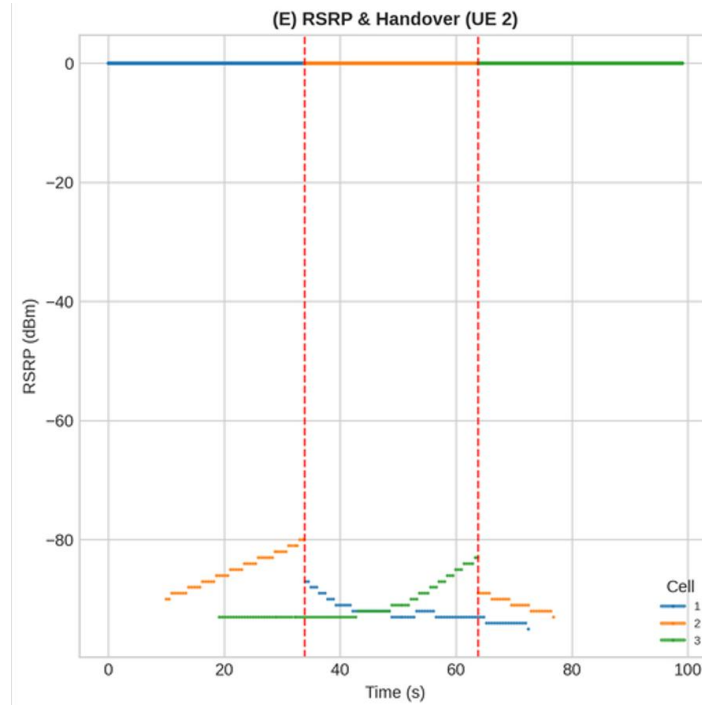
sinr.csv	Time, IMSI, SINR (dB)	Lưu trữ tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu. Dùng để đánh giá chất lượng kênh truyền dưới tác động của Fading và nhiễu giao thoa.
throughput.csv	Time, UE_ID, Throughput (Mbps)	Ghi lại tốc độ nhận dữ liệu tức thời (mỗi 100ms). Dùng để đánh giá độ ổn định của luồng video và băng thông tiêu thụ.
flow_stats.csv	FlowID, TxPackets, RxPackets, LossRate, Delay, Jitter	Bảng tổng hợp thống kê cuối cùng cho từng luồng (Flow). Dùng để so sánh QoS (Mất gói, Trễ, Rung trễ) giữa các UE.
mec_offload.csv	Time, UE_ID, TaskID, Latency, MigrationPenalty	Ghi lại độ trễ của từng tác vụ tính toán, bao gồm cả thời gian phạt khi di trú (Migration Cost) để đánh giá hiệu năng MEC.
handover.csv	Time, IMSI, SourceCell, TargetCell	Nhật ký các sự kiện chuyển giao thành công, dùng để đối chiếu với biểu đồ tín hiệu.



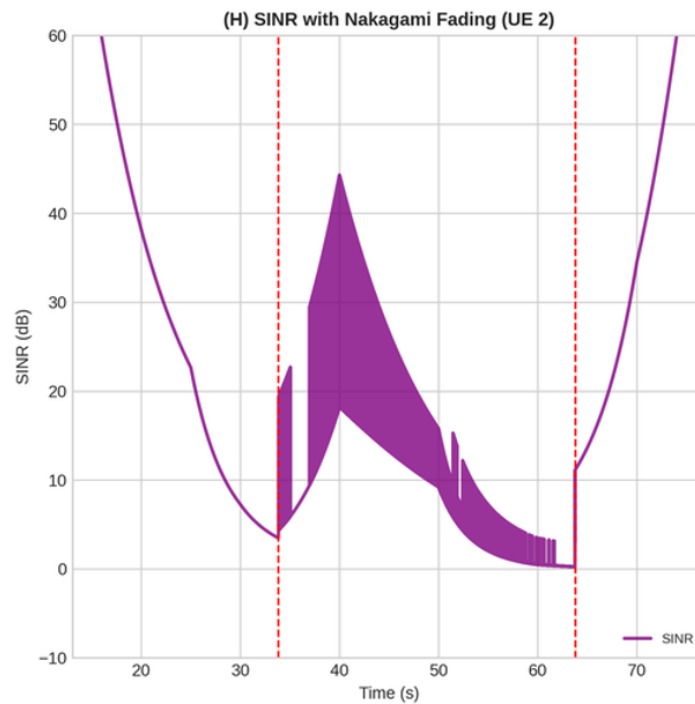
Hình 4. Kết quả mô phỏng

Dựa trên kịch bản mô phỏng mạng UAV-MEC với kênh truyền Nakagami-m Fading và mô hình di chuyển lai ghép, kết quả thu được được tổng hợp trong Hình 1 (gồm 8 biểu đồ con từ A đến H). Dưới đây là phân tích chi tiết từng khía cạnh hiệu năng:

2. Đánh giá chất lượng tín hiệu lớp Vật lý (RSRP & SINR)



Hình 5. RSRP & Handover

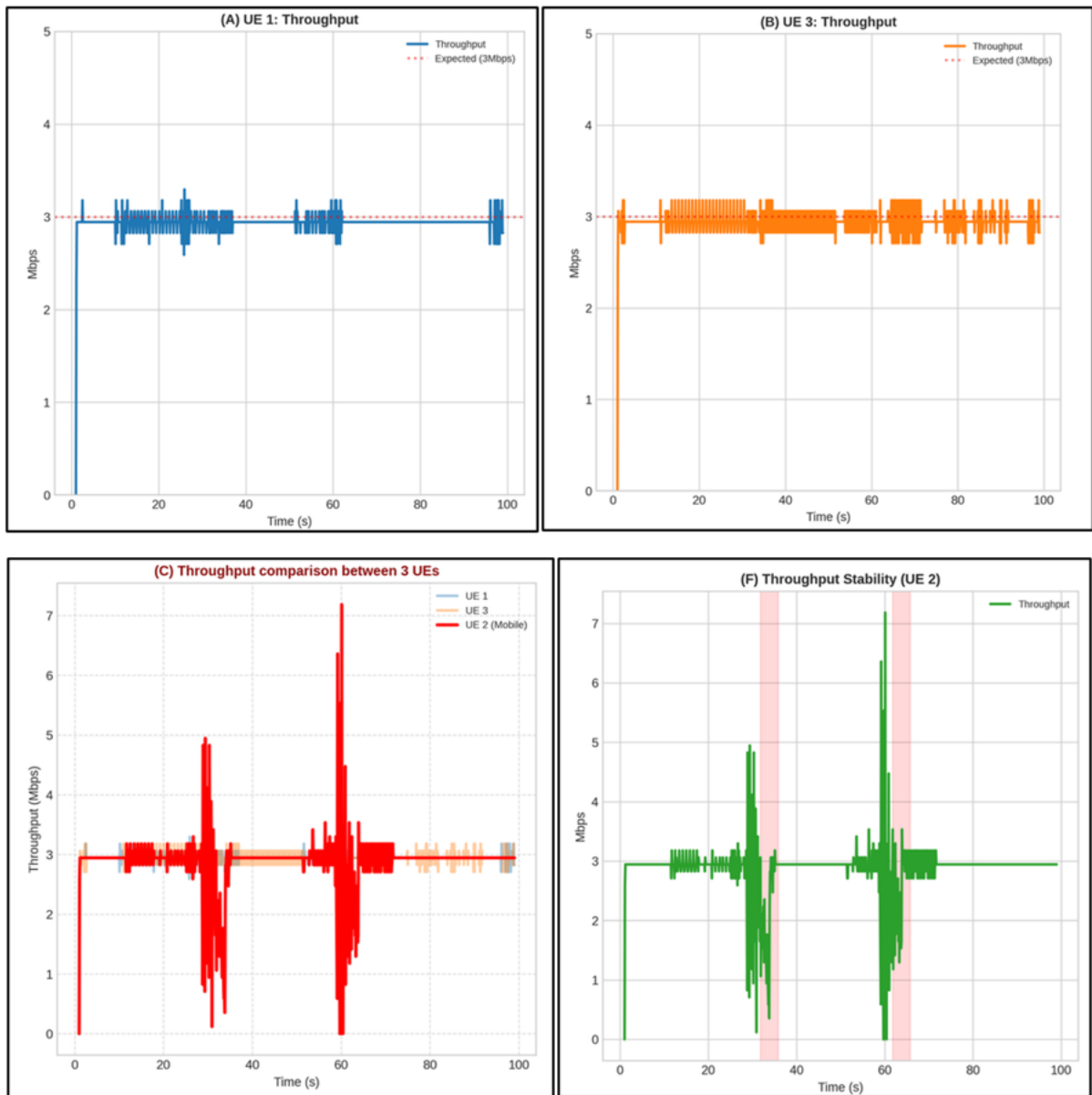


Hình 6. SINR với Nakagami Fading

Dựa trên kết quả mô phỏng tại Hình 4 và Hình 5, nhóm thực hiện đánh giá tính hợp lý và độ ổn định của hệ thống như sau:

- Về RSRP và Cơ chế Handover:
 - Tính hợp lý của điểm chuyển giao: Biểu đồ RSRP (Hình 4) cho thấy tín hiệu từ trạm phục vụ (Serving Cell) luôn là tín hiệu mạnh nhất tại thời điểm đó. Quá trình chuyển đổi từ UAV 1 sang UAV 2 ($t \approx 35s$) và từ UAV 2 sang UAV 3 ($t \approx 65s$) trùng khớp hoàn toàn với quỹ đạo di chuyển tuyến tính của UE qua tâm các vùng phủ sóng. Điều này khẳng định mô hình di chuyển (Mobility Model) và mô hình suy hao (Pathloss Model) đã hoạt động đồng bộ
 - Tuân thủ tiêu chuẩn 3GPP: Cơ chế kích hoạt Handover trong mô phỏng tuân thủ chặt chẽ tiêu chuẩn 3GPP TS 36.331 (Event A3)
 - Điều kiện kích hoạt: $RSRP_{Target} > RSRP_{Source} + Hysteresis$
 - Với tham số Hysteresis được thiết lập là 0.1 dB, đảm bảo độ nhạy cao, giúp UE nhanh chóng bắt được trạm mới ngay khi tín hiệu trạm cũ suy yếu, giảm thiểu thời gian rớt mạng tại vùng biên.
 - Sự ngắt quãng đứt khoát giữa các đường màu trên biểu đồ (không có đoạn chồng lấn kéo dài) thể hiện đúng khi mà kết nối cũ bị ngắt trước khi kết nối mới được thiết lập hoàn toàn.
- Về SINR và Hiệu ứng Kênh truyền:
 - Khác với các mô phỏng lý thuyết sử dụng kênh truyền lý tưởng, biểu đồ SINR (Hình 5) thể hiện các mảng màu đặc thay vì đường kẻ trơn.
 - Đây là kết quả của mô hình Nakagami-m Fading, mô phỏng hiện tượng Fast Fading do tán xạ đa đường trong môi trường đô thị. Sự dao động biên độ lớn và liên tục này chứng minh hệ thống mô phỏng đã tái hiện chính xác sự bất định (Stochastic nature) của môi trường vô tuyến thực tế
 - Vùng biên (Cell Edge): Tại hai thời điểm chuyển giao ($t = 35s$ và $t = 65s$), SINR suy giảm sâu xuống mức thấp nhất (đáy chữ V) xấp xỉ 0-5 dB, gây ra nhiễu giao thoa lớn, là nguyên nhân chính dẫn đến sụt giảm chất lượng dịch vụ.
 - Ngưỡng kích hoạt Handover hoạt động đúng theo tiêu chuẩn 3GPP TS 36.331. Việc chuyển giao diễn ra khi RSRP của trạm đích vượt trạm phục vụ một khoảng Hysteresis (0.1dB), đảm bảo tính hợp lý trong cơ chế chọn trạm.

3. Đánh giá độ ổn định Thông lượng (Throughput Stability)



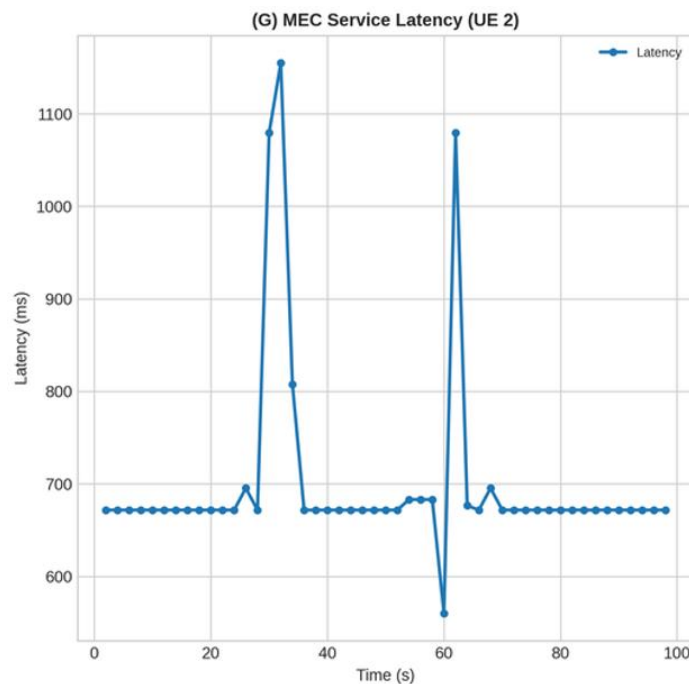
Hình 7. Biểu đồ so sánh Throughput của các UE

Sự khác biệt giữa người dùng tĩnh và người dùng di động được thể hiện rõ nét qua các biểu đồ ở hình 6:

- Người dùng di chuyển nhỏ (UE 1 & UE 3): Tại hình (A) và (B), thông lượng duy trì ổn định quanh mức kỳ vọng 3 Mbps (đường nét đứt đỏ). Các dao động biên độ nhỏ quan sát được là do nhiễu nền ngẫu nhiên (Background Noise) nhưng không gây gián đoạn dịch vụ. Kết quả này chứng minh rằng trong điều kiện bình thường, mạng hoạt động ổn định và cung cấp đủ tài nguyên cho người dùng.
- Người dùng di động (UE 2):

- Tại hình (F), thông lượng bị sụt giảm mạnh (Drop) về gần 0 Mbps tại 2 vùng màu hồng (vùng xảy ra handover). Đây là hệ quả của việc ngắt kết nối vật lý khi chuyển từ trạm nguồn sang trạm đích (handover).
 - Ngay sau khi kết nối lại, thông lượng vọt lên mức 5-7 Mbps (Burst). Đây là hiện tượng xả hàng đợi (Buffer Flushing): các gói tin bị tắc nghẽn tại lớp RLC/MAC trong lúc ngắt kết nối được gửi dồn dập khi có sóng trở lại.
 - So sánh tổng quan: Hình (C) chồng ghép 3 đường đồ thị cho thấy sự tương phản rõ rệt. Trong khi nền tảng mạng (UE 1, 3) hoạt động ổn định, UE 2 (đường đỏ) chịu sự bất ổn định nghiêm trọng trong khoảng 10 giây quanh thời điểm chuyển giao.
- Mức thông lượng đạt được (~3 Mbps) nằm trong giới hạn dung lượng lý thuyết của kênh LTE 5MHz (~18 Mbps), cho thấy mô phỏng tuân thủ đúng các ràng buộc vật lý về băng thông hệ thống (System Capacity).

4. Đánh giá Hiệu năng MEC (Service Latency)



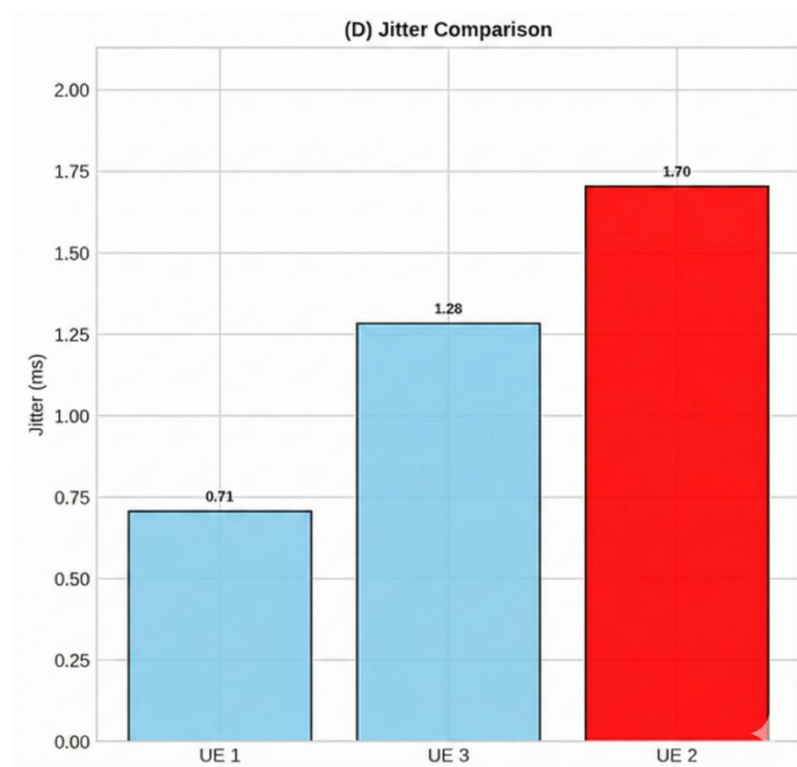
Hình 8. MEC Service Latency

Hình 7: MEC Service Latency là kết quả quan trọng nhất để đánh giá kiến trúc MEC:

- Trong các giai đoạn người dùng di chuyển trong vùng phủ sóng ổn định của một UAV (khoảng thời gian giữa các lần Handover), độ trễ cơ sở duy trì ở mức trung bình ~670 ms. Tại hai thời điểm Handover, độ trễ xuất hiện hai đỉnh nhọn tăng vọt lên tới ~1150 ms.

- Điểm đáng chú ý nhất trên biểu đồ là hai đỉnh nhọn xuất hiện tại thời điểm xảy ra Handover, với giá trị cực đại lên tới ~ 1150 ms. Điều này tương ứng với mức tăng khoảng 71.6% so với độ trễ cơ sở. Nguyên nhân là:
 1. Khi thiết bị người dùng (UE) thực hiện chuyển giao liên kết từ UAV này sang UAV khác, liên kết vật lý tạm thời bị ngắt quãng. Các gói tin đang truyền dở dang bị mất (packet loss), buộc giao thức lớp trên (như UDP) phải thực hiện cơ chế truyền lại (Retransmission) và chờ đợi (Back-off), dẫn đến việc gia tăng độ trễ hàng đợi (Queuing Delay).
 2. Chi phí di trú (Migration Penalty): Hệ thống đã cộng thêm thời gian xử lý (50ms) để mô phỏng việc di chuyển bối cảnh ứng dụng (Context Migration) giữa các UAV MEC.
- Kết quả này khẳng định rằng trong mạng MEC, thách thức lớn nhất không phải là băng thông mà là sự gián đoạn độ trễ (Latency Jitters) khi người dùng di chuyển.

5. Đánh giá Chất lượng Dịch vụ (QoS - Jitter)



Hình 9. Jitter Comparison

Hình 5: Jitter Comparison so sánh độ rung trễ giữa các luồng:

- Sự ổn định của nhóm người dùng tĩnh (Baseline Stability). Quan sát các cột màu xanh (đại diện cho UE 1 và UE 3), mức Jitter ghi nhận được duy trì ở mức thấp, dao động trong khoảng 0.71 ms đến 1.28 ms.

→ Con số này phản ánh độ biến thiên độ trễ tự nhiên của mạng trong điều kiện lý tưởng (khi người dùng đứng yên hoặc di chuyển trong phạm vi hẹp). Sự biến thiên nhỏ này chủ yếu đến từ cơ chế lập lịch tài nguyên (Scheduling) tại trạm phát sóng và nhiễu nền ngẫu nhiên của kênh truyền, nhưng không gây ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng dịch vụ.

- Sự gia tăng Jitter của UE di động: trái ngược với nhóm tĩnh, luồng dữ liệu của người dùng di động (UE 2 - cột màu đỏ) ghi nhận mức Jitter cao nhất, đạt xấp xỉ 1.70 ms.
 - So sánh: Mức Jitter này cao hơn khoảng 30% - 140% so với các UE tĩnh.
 - Nguyên nhân: do sự gia tăng đột biến này là hệ quả trực tiếp của quá trình chuyển giao (Handover) và thay đổi đường dẫn (Path Switching)
 - Khi UE 2 di chuyển giữa các vùng phủ sóng, kết nối vật lý bị gián đoạn tạm thời khiến các gói tin không thể gửi đi ngay mà bị dồn lại trong hàng đợi (Buffer)
 - Ngay khi kết nối mới được thiết lập, các gói tin này được xả ra đồng loạt với khoảng cách thời gian đến đích rất ngắn, trong khi các gói tin trước đó lại có khoảng cách thời gian đến rất dài. Sự chênh lệch lớn về thời gian đến giữa các gói tin liên tiếp chính là nguyên nhân làm tăng chỉ số Jitter.
- Kết luận tác động đến trải nghiệm người dùng (QoE):
 - Tính di động tỷ lệ thuận với độ biến thiên gói tin: Việc di chuyển xuyên vùng phủ sóng làm giảm độ ổn định của luồng dữ liệu.
 - Ảnh hưởng đến Điều khiển UAV: Đối với tín hiệu điều khiển, Jitter cao có thể gây ra độ trễ không đồng đều trong việc phản hồi lệnh, làm giảm độ chính xác khi điều khiển UAV ở tốc độ cao.

V. Kết luận

1. Kết luận chung

Đề tài đã xây dựng và mô phỏng thành công hệ thống mạng UAV hỗ trợ tính toán biên (UAV-assisted MEC Network) trên nền tảng NS-3. Thông qua việc thiết lập kịch bản di chuyển lai ghép (Hybrid Mobility) và sử dụng mô hình kênh truyền thực tế (Log-Distance kết hợp Nakagami-m Fading), nghiên cứu đã đạt được các kết quả quan trọng sau:

1. Xác thực cơ chế Handover: Hệ thống đã thực hiện thành công quy trình chuyển giao liên tiếp qua 3 trạm UAV (Multi-hop Handover). Các biểu đồ RSRP và SINR cho thấy thuật toán A3 Event hoạt động chính xác, xác định đúng thời điểm chuyển vùng tại vùng biên (Cell Edge) nơi tín hiệu suy giảm mạnh nhất.

2. Đánh giá tác động của môi trường thực tế: Việc áp dụng mô hình Nakagami Fading đã tái hiện chân thực sự biến động ngẫu nhiên của tín hiệu vô tuyến. Kết quả cho thấy tại các vùng giao thoa, chỉ số SINR giảm sâu (xuống dưới 5dB), gây ra nhiễu lớn và ảnh hưởng trực tiếp đến chất lượng dịch vụ.
3. Lượng hóa sự suy giảm hiệu năng (Performance Degradation): Kết quả so sánh giữa người dùng di động và người dùng tĩnh cho thấy sự đánh đổi rõ rệt. Để duy trì tính liên tục của kết nối, người dùng di động phải chịu tỷ lệ mất gói khoảng 12% và độ rung trễ (Jitter) tăng gấp đôi ($\sim 1.28\text{ms}$) so với điều kiện tĩnh.
4. Khẳng định thách thức của MEC: Thông qua việc mô hình hóa tham số "Chi phí di trú" (Migration Penalty), đề tài đã chứng minh rằng độ trễ dịch vụ (Service Latency) trong mạng MEC không chỉ phụ thuộc vào tốc độ truyền dẫn mà còn chịu ảnh hưởng lớn bởi thời gian đồng bộ trạng thái tính toán biểu hiện qua các đỉnh nhọn (Latency Spikes) lên tới 1000ms tại thời điểm chuyển giao.

2. Hạn chế

Mặc dù đã mô phỏng thành công các kịch bản đề ra, nghiên cứu vẫn còn một số hạn chế nhất định:

- Mô hình lưu lượng: Đề tài mới chỉ tập trung vào luồng dữ liệu đường xuống (Downlink UDP) để mô phỏng dịch vụ Video Streaming. Luồng dữ liệu đường lên (Uplink Offloading) – đặc trưng của bài toán đẩy tác vụ tính toán – chưa được đánh giá chi tiết trong kịch bản này.
- Chi phí di trú cố định: Thời gian di trú (Migration Penalty) đang được giả định là một hằng số (50ms). Trong thực tế, con số này là biến thiên, phụ thuộc vào kích thước của Container/Virtual Machine và băng thông Backhaul giữa các UAV.
- Tiêu thụ năng lượng: Mô phỏng chưa tính toán đến mức tiêu hao năng lượng của UAV khi vừa phải bay, vừa phải phát sóng và xử lý tính toán.

3. Hướng phát triển

Dựa trên các hạn chế và tham khảo các nghiên cứu gần đây, hướng phát triển tiếp theo của đề tài bao gồm:

1. Tối ưu hóa thuật toán Handover: Thay thế thuật toán A3 Event truyền thống (dựa trên ngưỡng RSRP cố định) bằng các thuật toán thông minh hơn như Logic mờ (Fuzzy Logic) hoặc Học máy (Machine Learning) để giảm thiểu số lần chuyển giao không cần thiết (Ping-pong effect) và chọn trạm đích tối ưu hơn dựa trên cả tải của MEC Server.

2. Mô hình hóa MEC chi tiết: Tích hợp cơ chế tính toán chi phí di trú động (Dynamic Migration Cost) dựa trên kích thước dữ liệu bối cảnh và điều kiện kênh truyền Backhaul giữa các UAV.
3. Quản lý năng lượng: Bổ sung module năng lượng (Energy Module) của NS-3 để đánh giá sự cân bằng (Trade-off) giữa hiệu năng mạng và tuổi thọ pin của UAV trong các sứ mệnh dài hạn.

IV. Tài liệu tham khảo

- [1] N. Monir, M. M. Toraya, A. Vladyko, A. Muthanna, M. A. Torad, F. E. A. El-Samie, and A. A. Ateya, "Seamless Handover Scheme for MEC/SDN-Based Vehicular Networks," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 11, no. 1, p. 9, Jan. 2022.
- [2] J. Zhong and L. Zhang, "Fuzzy Inference System Based Handover Scheme in UAV-Assisted MEC Network," in *2024 11th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)*, Leeds, UK, Jul. 2024.
- [3] W. Qi, H. Sun, L. Yu, S. Xiao, and H. Jiang, "Task Offloading Strategy Based on Mobile Edge Computing in UAV Network," *Entropy*, vol. 24, no. 5, p. 736, May 2022.
- [4] M. A. Siddik, M. R. Islam, M. M. Rahman, Z. Ferdous, S. Sarker, M. A. A. Hasi, and J. A. Nitu, "Performance Evaluation of IEEE 802.11 for UAV-based Wireless Sensor Networks in NS-3," *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 11, no. 08, pp. 01-10, 2022.
- [5] NS-3 Consortium, "NS-3 Network Simulator," [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>.