

GIẢI PHÁP KẾT NỐI MẠNG LƯỚI UAV TRÊN NỀN TẢNG THÔNG TIN DI ĐỘNG THỂ HỆ MỚI

Trần Tuấn Hưng^{1}, Nguyễn Hoài Giang¹*

**Tác giả liên hệ, Email: trhung_hu@yahoo.com*

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 02/06/2025

Ngày phản biện đánh giá: 08/09/2025

Ngày bài báo được duyệt đăng: 15/10/2025

DOI: 10.59266/houjs.2025.714

Tóm tắt: Phương tiện bay không người lái (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) là các thiết bị có tính ứng dụng rộng rãi, trong cả đời sống dân sự và hoạt động quân sự. Chỉ giới hạn trong lĩnh vực dân sự, bài báo thảo luận về các phương án đảm bảo mạng lưới kết nối cho UAV tầm thấp và tầm cao dựa vào các nền tảng công nghệ mạng viễn thông di động 4G, 5G và 6G trong tương lai.

Từ khóa: kết nối UAV, mạng 4G/5G/6G, UTM (UAV traffic Management), AI, học máy

I. Đặt vấn đề

Phương tiện bay không người lái (UAV - Unmanned Aerial Vehicle) là thuật ngữ chỉ những phương tiện bay được điều khiển tự động theo chương trình định trước, hoặc được điều khiển từ xa bởi trạm mặt đất hoặc máy bay có người lái, có thể thu hồi hoặc tự hủy sau khi hoàn thành nhiệm vụ mà không cần phi công điều khiển trực tiếp.

Tuy lịch sử phát triển UAV khởi đầu với mục đích quân sự (và hiện tại trên thế giới vẫn đang được sử dụng nhiều trong các hoạt động chiến sự), trong những năm gần đây, mức độ phổ biến của UAV trong các ứng dụng dân dụng và thương mại đã

tăng vọt nhờ sự tiên bộ của công nghệ chế tạo UAV và việc giảm chi phí chế tạo vận hành. Tùy vào mục đích sử dụng và tính năng kỹ thuật, UAV có thể hoạt động ở tầm thấp (dưới ngưỡng 4-5km) hoặc ở tầm cao (trên 4-5km). Ở cả tầm thấp và tầm cao, đều có thể liệt kê hàng loạt các lĩnh vực mà UAV có thể được sử dụng hiệu quả cho các mục đích dân sự. Với UAV tầm thấp, các ứng dụng điển hình bao gồm quan trắc kiểm soát môi trường, kiểm soát giao thông, tìm kiếm cứu nạn, chuyển phát hàng hóa, giám sát khu vực rừng, bờ biển, vùng sâu vùng xa... Với UAV tầm cao, có thể nhắc đến các ứng dụng như thử nghiệm các tác động môi trường khí

¹ Khoa Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại học Mở Hà Nội

quyển, vận chuyển hàng hóa, thu thập ảnh chụp địa lý GIS (*Geographic Information Systems*)... Nhiều công ty nghiên cứu thị trường đã đưa ra dự báo về quy mô và tốc độ tăng trưởng của thị trường UAV thương mại, một số trong số đó được tóm lược trong Bảng 1. Có thể thấy, do quy mô khảo sát, cách thức thực hiện khảo sát, cách dự đoán khác nhau, nên giữa các

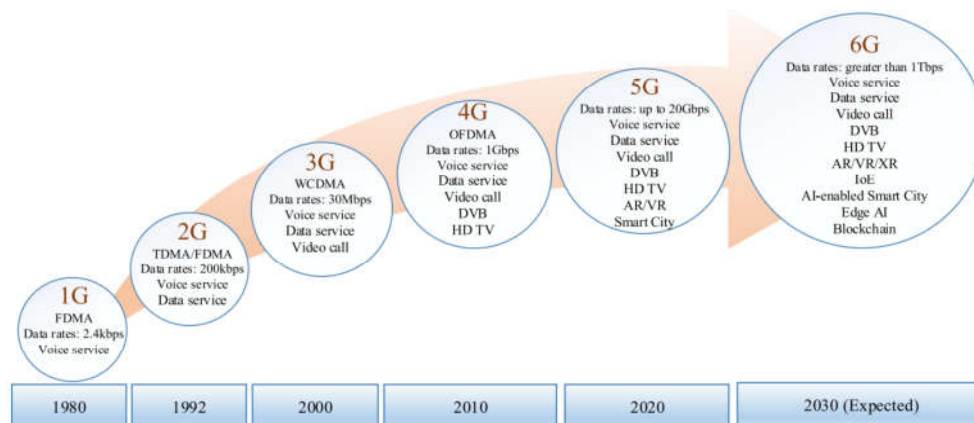
con số dự báo được các công ty nghiên cứu thị trường đưa ra có sự khác biệt nhất định. Tuy nhiên, điểm chung trong các dự báo là tốc độ tăng trưởng kép hàng năm CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) từ 2024 trở đi đều được dự báo ở mức ấn tượng trên 10%, dấu hiệu rõ ràng cho thấy sự phổ biến và sử dụng UAV thương mại ngày càng gia tăng mạnh mẽ.

Bảng 1: Một số dự đoán về quy mô và tốc độ tăng trưởng của thị trường UAV thương mại

Tổ chức đưa ra dự báo	Nội dung dự báo về quy mô và tốc độ tăng trưởng toàn cầu của thị trường UAV thương mại
Công ty nghiên cứu thị trường Reliable Research Report (Mỹ), https://www.reliableresearchreports.com/	Mức tăng trưởng CAGR 13,3% cho giai đoạn từ 2024 đến 2031.
Công ty nghiên cứu thị trường SkyQuest (Mỹ), https://www.skyquestt.com/	Thị trường tăng từ 3,73 tỷ USD năm 2023 lên 11,82 tỷ USD năm 2031, mức tăng trưởng hàng năm CARG 15,5% cho giai đoạn 2024-2031.
Công ty nghiên cứu thị trường MarketsandMarkets (Ấn Độ) https://www.marketsandmarkets.com/	Đến 2029 thị trường đạt giá trị 9,34 tỷ đô, mức tăng trưởng hàng năm CAGR 11,2% từ năm 2024.

Kết nối tốt mạng lưới UAV, từ góc độ trao đổi các thông tin điều khiển giữa các UAV với trung tâm điều khiển, trao đổi dữ liệu từ mặt đất với các UAV, và giữa các UAV với nhau, là yếu tố then chốt để vận hành và đưa UAV vào ứng dụng thực tế. Để làm được điều này, một số mạng lưới UAV chuyên biệt được thiết kế theo những nguyên tắc kỹ thuật và bộ giao thức trao đổi dữ liệu riêng biệt, thường sử dụng dải tần số ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) hoặc dải tần số riêng. Phương thức vận hành này, tất nhiên có những ưu thế không thể chối cãi liên quan đến quyền và bí mật sở hữu nắm giữ công nghệ, đặc biệt là trong các ứng dụng mang tính quân sự.

Trong lĩnh vực dân sự, và đây cũng là lĩnh vực mà bài báo này giới hạn để xem xét, xu hướng kết nối mọi lúc mọi nơi là tiền đề cho một cách tiếp cận khác rất có tính logic và khả thi. Đó là kết nối mạng lưới UAV bằng cách tận dụng nền tảng hạ tầng các mạng viễn thông di động mặt đất. Điều này càng có tính thực tiễn cao hơn khi các tiêu chuẩn mạng di động đã, đang và sẽ trải qua các bước tiến vượt bậc về công nghệ nền tảng, các tính năng và khả năng kết nối. Những năm gần đây, các thế hệ mạng di động đã đi qua các bước phát triển 4G, 5G và xu hướng hướng tới 6G trong tương lai. Hình 1 hiển thị lộ trình phát triển của các thế hệ mạng viễn thông di động với các trường hợp sử dụng (*use cases*) điển hình.



Hình 1. Lộ trình phát triển của các thế hệ mạng di động mặt đất [2]

Mỗi thế hệ mạng di động mới so với thế hệ cũ đều có những bước tiến đáng kể liên quan đến đặc tính hoạt động và sự mở rộng cũng như tính ưu việt của các trường hợp sử dụng. Bảng 2 cung cấp tổng hợp sự so sánh một số đặc tính cơ bản của mạng 4G, 5G và 6G trong tương lai [1]. Các thế

hệ mạng di động từ 5G trở đi đều bao gồm những đặc tính có thể tận dụng tốt để hỗ trợ kết nối mạng lưới UAV, và điều đó cũng được thể hiện trong các phiên bản tiêu chuẩn kỹ thuật (Release) do tổ chức 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) công bố trong những năm gần đây.

Bảng 2: Một số đặc tính kỹ thuật quan trọng của mạng di động qua các thế hệ 4G, 5G, 6G

Đặc tính kỹ thuật	4G	5G	6G
Tốc độ dữ liệu tối đa	1Gbps	10Gbps	1Tbps
Hỗ trợ tính di động	tới 350km/h	tới 500km/h	>1000 km/h
Tích hợp mạng vệ tinh	không	không	hoàn toàn
Trí tuệ nhân tạo	không có	có phần nào	đầy đủ
Độ trễ điểm-điểm (E2E)	100ms	10ms	<1ms
Độ chính xác của định vị	10m	1m	mức cm
Mật độ kết nối	100.000/km ²	> 1 triệu/ km ²	> 10 triệu /km ²
Độ tin cậy	< 99%	khoảng 99,9%	> 99,999%
Hoạt động trên dải tần số Thz	không	rất hiếm hoi	phổ biến

Yêu cầu về kết nối mạng lưới UAV diện rộng

Những yêu cầu đặc thù mang tính thiết yếu để vận hành mạng lưới UAV bao gồm đảm bảo an toàn cho mạng lưới UAV, kiểm soát định danh UAV và quản lý, kiểm soát không lưu cho UAV (được nhắc đến với thuật ngữ UTM: *UAV Traffic Management*). Như vậy, để vận hành hiệu quả mạng lưới UAV có quy mô lớn đòi hỏi việc trao đổi thông tin qua kênh vô

tuyến phải rộng khắp, ổn định, tin cậy và an toàn.

Áp dụng các công nghệ mạng di động 4G/5G/6G vì vậy phải hướng tới mục đích là kiểm soát chặt chẽ và đảm bảo liên lạc thông suốt trong mạng lưới UAV qua nền tảng mạng di động mặt đất, đảm bảo kết nối không dây có độ tin cậy cao trong không gian ba chiều giữa các UAV với nhau, giữa các UAV với trung tâm điều khiển và với người sử dụng. Bên cạnh đó,

các công nghệ nền tảng bao hàm trong 4G/5G/6G, như sử dụng dải tần số cao, trí tuệ nhân tạo tích hợp sẵn... nên được khai thác để tối ưu hóa vận hành mạng lưới UAV, tăng cường khả năng truyền và xử lý dữ liệu của UAV.

II. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

2.1. Kết nối UAV tầm thấp

Kịch bản logic cho các UAV bay ở tầm thấp (độ cao dưới vài km) là tận dụng hạ tầng mạng di động sẵn có và coi mỗi UAV như là một thiết bị đầu cuối UE (*User Equipment*) trong mạng. Tuy nhiên, cơ sở hạ tầng mạng di động hiện tại chỉ chủ yếu được tối ưu cho các thiết bị UE hoạt động trên hoặc gần mặt đất ở độ cao không quá 10m. Trong khi đó, khác với các thiết bị đầu cuối thông thường trên mặt đất, các UAV-UE có những đặc tính riêng, kéo theo những thách thức nhất định. Đó là:

• **Tính di động trong không gian ba chiều:** UAV di chuyển nhanh trong không gian ba chiều và có thể thay đổi độ cao liên tục, ảnh hưởng đáng kể đến các thông số của kênh truyền dẫn vô tuyến giữa UAV và trạm phát sóng BS (*Base Station*) trên mặt đất. Điều này gây ra những dao động bất thường trong công suất tín hiệu nhận được và giảm chất lượng liên kết của UAV kết nối qua nền tảng mạng di động, tăng số lần UAV phải thực thi chuyển giao kết nối (*handover*) đến các trạm BS chủ khác nhau một cách thường xuyên.

• **Độ nghiêng và búp sóng phụ của ăng-ten trạm BS:** Các trạm BS trên mặt đất được thiết kế để phục vụ các thiết bị người dùng thông thường, gần mặt đất.

Do đó, các búp sóng chính (*mainlobe*) của ăng-ten trạm BS được triển khai thường có độ nghiêng hướng về mặt đất, và các UAV bay trên không trung thường chỉ được phục vụ bởi một hoặc nhiều búp sóng phụ (*sidelobe*) với hướng góc và độ lợi ăng-ten nhỏ hơn. Ngoài ra, trong đặc tính phát sóng của ăng-ten (*antenna pattern*) của trạm BS, luôn tồn tại một số điểm không có sóng (*nulls*), có nghĩa là trạm BS sẽ không cung cấp được độ phủ sóng liên tục trên không (có các lỗ hổng mất sóng). Vì những yếu tố như vậy liên quan đến ăng-ten, cộng thêm sự di chuyển trên không của UAV, sự liên kết của UAV đến trạm BS chủ của mạng di động sẽ bị mang tính rời rạc, không liên tục.

• **Đặc thù kênh kết nối giữa UAV và trạm BS chủ:** Trong khu vực thành thị, đường kênh kết nối thẳng trực tiếp LoS (*Line of Sight*) giữa UAV và trạm BS chủ thường sẽ bị cản trở bởi những tòa nhà cao tầng. Do đó trao đổi thông tin trên kênh kết nối giữa UAV-UE và trạm BS chủ có cường độ tín hiệu bị suy yếu, ảnh hưởng đến độ ổn định và tốc độ dữ liệu của đường truyền.

Mặt khác, với các UAV bay ở tầm đủ cao, đường kênh kết nối thẳng trực tiếp LoS giữa UAV và trạm BS chủ trở nên khả thi. Tuy nhiên, khi đó lại không chỉ tồn tại một đường nhìn thẳng LoS (từ UAV đến trạm BS chủ), mà còn tồn tại nhiều đường LoS khác từ UAV đến các trạm BS lân cận khác. Điều này dẫn đến hiện tượng nhiễu sóng mạnh từ các trạm BS lân cận cho cả đường truyền lên (từ UAV đến trạm BS chủ) và đường truyền xuống (từ trạm BS chủ đến UAV). Như vậy đường

kết nối giữa UAV và trạm BS chủ, dù là đường nhìn thẳng trực tiếp LoS, hay là đường có bị chặn bởi các vật thể, đều kéo theo các vấn đề tương ứng cần phải giải quyết, cụ thể là nhiễu sóng, và sóng yếu không ổn định.

Trên thế giới, trên nền hạ tầng các mạng di động 4G đang hoạt động, các thử nghiệm thực tế và nghiên cứu đều chỉ ra rằng khi cung cấp kết nối cho UAV, mạng 4G đang gặp phải các thách thức nêu ở trên, và chưa giải quyết được những thách thức đó. Nhiều giải pháp kỹ thuật được cộng đồng khoa học nghiên cứu và phát triển, đề xuất áp dụng để cải tiến thêm cho công nghệ mạng 4G (như những giải pháp liên quan đến khử nhiễu, quản lý/điều chỉnh thông minh hệ thống ăng ten [3], [4]...), nhưng đó vẫn chỉ có thể coi là những giải pháp đơn lẻ, mang tính tình thế. Trên thực tế 3GPP trong Release 15 (công bố vào năm 2018) cũng đã chuẩn hóa một số giải pháp cải tiến cho 4G nhằm giải quyết bài toán chống nhiễu cho các kết nối UAV, nhưng chỉ giải quyết được ở mức độ giảm nhẹ phần nào. Theo dõi xu hướng dịch chuyển của cộng đồng nghiên cứu và của các công ty viễn thông cung cấp giải pháp thương mại, có thể đưa ra nhận định rằng các nguyên lý chuẩn cho thiết kế và triển khai mạng di động ở thế hệ 4G cần phải được sửa chữa, thay đổi nhiều thì mới có thể đáp ứng được yêu cầu cung cấp kết nối cho mạng lưới UAV. Và như vậy, cách hợp lý hơn là chuẩn hóa ngay từ đầu những tiêu chuẩn mới cho thiết kế và triển khai từ mạng di động từ thế hệ 5G trở đi để bao hàm sẵn những giải pháp có thể đáp ứng được các yêu cầu về kết nối UAV.

Trên thực tế, trong tiêu chuẩn công nghệ mạng di động 5G, mạng truy nhập 5G NR (*New Radio*) có hàm chứa những đặc tính kỹ thuật có thể được tận dụng để vượt qua các thách thức ở trên, điển hình là:

● **Sử dụng linh hoạt dải tần số đi kèm tốc độ cao:** 5G có tốc độ truyền dữ liệu cao nhờ vào tính năng hỗ trợ và cho phép thiết lập và lựa chọn các tập tham số khác nhau áp dụng cho cho kênh truyền vật lý của đường lên và đường xuống (tập tham số bao gồm các tham số như khoảng cách giữa các sóng mang, độ lớn khe thời gian, băng thông của kênh truyền... Từng tập tham số được tham chiếu đến như một bộ tham số số học - *numerology*). Băng thông của một kênh truyền vô tuyến trong 5G có thể lên tới 400 MHz ở các dải tần số cao (trên 24 GHz), sóng mang gộp có thể chứa tối đa 16 sóng mang thành phần. Những yếu tố đó mang lại tốc độ truyền tải dữ liệu cao, phù hợp cho các UAV được sử dụng trong các ứng dụng thực tế ảo (*VR: Virtual Reality*), truyền tải hình ảnh và video chất lượng cao. Ngoài ra, việc 5G có thể hoạt động trong các phổ tần số thấp, trung bình, và cao, từ dưới 1 GHz đến trên 24 GHz, cho phép lựa chọn dải tần phù hợp cho từng trường hợp sử dụng UAV với yêu cầu hiệu năng, tốc độ dữ liệu riêng.

● **Công nghệ ăng-ten tiên tiến:** 5G dựa vào các công nghệ ăng-ten tiên tiến như các cơ chế MIMO tập trung sóng (*beamforming*) và MIMO lớn (*massive MIMO*), trong khi vẫn hỗ trợ cơ chế MIMO một người dùng (*single-user MIMO*) và cơ chế MIMO nhiều người dùng (*multi-user MIMO*). Trong cơ chế MIMO một người

dùng, 5G NR hỗ trợ 8 luồng dữ liệu cho đường xuống, 4 luồng dữ liệu cho đường lên. Các con số tương ứng là 16 và 4 trong cơ chế MIMO nhiều người dùng. Nhờ đó, thông lượng của mạng lưới UAV có kết nối dựa trên nền tảng mạng di động 5G sẽ được tăng lên đáng kể. Hơn nữa, 5G khai thác khả năng quản lý chùm tia (*beam management*), sử dụng các chùm tia hẹp (*narrow beam*), tính năng gửi chùm tia quét (*beam sweeping*) để gửi tuần tự các tia SSB (*Synchronization Signal Block*) theo các hướng khác nhau để UE có thể chọn kết nối có tín hiệu RSRP (*Reference Signal Received Power*) mạnh nhất. Những tính năng này tăng cường vùng phủ sóng, tăng thông lượng cho mạng UAV, đồng thời làm giảm nhiễu tương tác.

● **Khả năng tương thích thuận, hướng tới tương lai (*forward compatibility*):** Một định hướng thiết kế đặc thù của 5G NR là khả năng tương thích hướng tới tương lai, cho phép áp dụng các tính năng và cấu phần mới để hỗ trợ các kịch bản sử dụng mới xuất hiện. Để hỗ trợ hiệu quả việc sử dụng rộng rãi các UAV cho các mục đích mới, chắc chắn sẽ cần thiết phải đưa vào các tính năng mới và tương thích trong tương lai.

● **Công nghệ chia lát mạng (*network slicing*):** Công nghệ này cho phép nhiều mạng logic hoạt động hiệu quả bằng cách chia sẻ cơ sở hạ tầng vật lý chung và cung cấp các dịch vụ khác nhau. Điều này cho phép tối ưu hóa mạng để đáp ứng các yêu cầu khác nhau (như độ trễ, bảo mật và độ tin cậy) cho việc điều khiển và kiểm soát UAV và truyền tải dữ liệu trong các ứng dụng UAV khác nhau.

● **Thiết kế siêu tối giản (*Ultra-lean design*):** Mục tiêu của thiết kế siêu tối giản của 5G NR là tối thiểu hóa việc phải truyền tải tín hiệu liên tục, đặc biệt đối với các tín hiệu tham chiếu và tín hiệu đồng bộ hóa. Vì thế, thiết kế ultra-lean có lợi cho tiết kiệm năng lượng và giảm thiểu nhiễu tương tác, là những điểm mấu chốt cần phải giải quyết cho trường hợp UAV-UE.

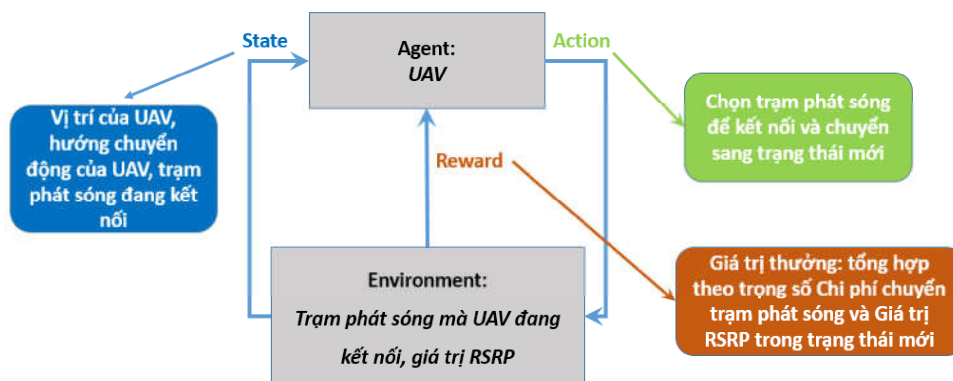
Hiệu năng của các mạng UAV kết nối qua nền tảng mạng di động có thể được tăng cường hơn nữa bằng cách tận dụng các giải pháp trí tuệ nhân tạo (*AI: Artificial Intelligence*) trên nền tảng các thuật toán học máy ML (*Machine Learning*). Điều này phù hợp với xu hướng thiết kế tiêu chuẩn cho mạng thế hệ 6G, khi trí tuệ nhân tạo AI được tích hợp trong mạng sẽ là một trong những đặc tính chính của 6G, và như vậy sẽ đóng một vai trò hữu hiệu trong kết nối UAV. Cụ thể, các giải pháp dựa trên AI có thể được sử dụng để nhận dạng UAV hiệu quả, quản lý lưu lượng, lập kế hoạch đường bay UAV, hỗ trợ tối ưu hóa triển khai mạng, quản lý tài nguyên, tối ưu hóa chuyển giao kết nối.

Hãy xem xét một ví dụ cụ thể về áp dụng AI. Trong kịch bản UAV như vai trò UE của mạng di động, hỗ trợ tính năng di động trong không gian ba chiều của UAV một cách hiệu quả là điểm mấu chốt để giải quyết các thách thức của mạng lưới UAV kết nối qua nền tảng mạng di động. Dựa trên cường độ tín hiệu tham chiếu RSRP (*Reference Signal Received Power*), các UAV di chuyển trên không có thể phải thực thi chuyển giao kết nối (*handover*) đến các trạm BS khác nhau một cách thường xuyên. Thậm chí do

lỗi với các đường kết nối không dây, có thể xảy ra một chuỗi các sự kiện chuyển giao kết nối qua lại trong thời gian ngắn (*pingpong handover*). Việc cung cấp kết nối UAV liên mạch liên tục trên không đòi hỏi phải sử dụng các cơ chế chuyển giao chặt chẽ và hiệu quả. Về vấn đề này, học tăng cường (*RL: Reinforcement Learning*), một lĩnh vực con của học máy ML, có thể đóng một vai trò quan trọng trong việc phát triển các quy tắc chuyển giao tối ưu mang tính AI để đảm bảo kết nối đáng tin cậy với chi phí chuyển giao tối thiểu.

Hãy cùng so sánh hiệu năng của cơ chế chuyển giao dựa trên RL (gọi tắt là cơ chế RL) và cơ chế chuyển giao theo cách tiếp cận truyền thống (gọi tắt là cơ chế tối đa), nghĩa là khi UAV luôn muốn kết nối với trạm BS cung cấp giá trị RSRP cao nhất. Khi liên kết của UAV đến trạm BS chủ bị rời rạc không liên tục, cơ chế tối đa dẫn đến một số lượng đáng kể các lần chuyển giao. Ngược lại, cơ chế chuyển giao dựa trên RL có thể nắm bắt được sự cân bằng giữa tiêu chí RSRP và tiêu chí

về số lần chuyển giao bằng cách sử dụng hàm thưởng (*Reward function*) được định nghĩa bằng sự kết hợp có trọng số của giá trị RSRP và chi phí chuyển giao. Trong cơ chế RL (xem Hình 2), UAV như một tác nhân (*Agent*) đang ở trong một trạng thái (*State*) nhất định. Dưới sự biến động của môi trường (*Environment*), UAV sẽ thực hiện một hành động (*Action*) để chuyển sang một trạng thái mới (*New State*), đồng thời nhận giá trị thưởng (*Reward*) cho hành động chuyển sang trạng thái mới đó. Giá trị *Reward* mang ý nghĩa “thưởng” khi là giá trị dương. Nhưng *Reward* cũng có thể âm, mang ý nghĩa là giá trị “phạt”, nếu như UAV-Agent chọn một trạng thái mới không có những lợi ích đủ tốt. Mục tiêu của cơ chế RL là Agent UAV qua quá trình hoạt động sẽ tự học để tạo lập được chiến lược chuyển giao kết nối *handover* tối ưu, lựa chọn trạng thái mới (kết nối vào trạm BS chủ mới) sao cho giá trị của hàm thưởng là tối đa (chính xác hơn là tối đa hóa giá trị cộng dồn có trọng số của hàm thưởng - *sum of discounted rewards*). Độc giả quan tâm có thể tham khảo chi tiết hơn tại [5]).



Hình 2. Cơ chế chuyển giao kết nối của UAV đến các trạm BS khác nhau dựa trên thuật toán RL

Cơ chế RL như trên làm giảm đáng kể số lượng chuyển giao kết nối và giảm chi phí phát sinh liên quan đến truyền tải các tín hiệu cần thiết để phục vụ sự

chuyển giao của UAV. Số lần chuyển giao của cơ chế RL có thể giảm tới 80% so với cơ chế chuyển giao theo cách tiếp cận tối đa [5].

Các mạng UAV kết nối qua nền tảng mạng di động cũng có thể khai thác các công nghệ chủ chốt khác của 5G/6G để nâng cao hiệu năng:

- **MIMO lớn:** Bằng cách sử dụng các mảng ăng-ten lớn, các trạm BS mặt đất có thể thực hiện phát sóng với sự điều tiết linh hoạt các chùm hẹp 3D để hỗ trợ hiệu quả các UAV trên không và người dùng trên mặt đất. MIMO lớn có thể tăng cường đáng kể hiệu năng phổ và hiệu năng phủ sóng cho các mạng UAV kết nối qua nền tảng mạng di động.

- **Hoạt động trên tần số cao:** Dải tần sóng milimet của 5G và Terahertz của 6G là các giải pháp hứa hẹn để cung cấp các dịch vụ tốc độ dữ liệu cao. Hoạt động trong các tần số cao như vậy cung cấp độ khả dụng băng thông rộng và cho phép sử dụng ăng-ten kích cỡ nhỏ trong các hệ thống MIMO lớn, yếu tố chính để đáp ứng các yêu cầu tốc độ dữ liệu cao khi trao đổi thông tin với UAV.

- **Bề mặt thông minh:** Triển khai và lắp đặt các bề mặt thông minh có thể cấu hình RIS (*Reconfigurable Intelligent Surfaces*) cho phép phản chiếu tín hiệu sóng theo hướng mong muốn để cải thiện điều kiện lan truyền sóng và chất lượng đường truyền. Các hệ thống UAV kết nối qua nền tảng mạng di động có thể khai thác RIS để giải quyết vấn đề ăng-ten nghiêng xuống tại trạm BS bằng cách tối ưu hóa phản chiếu các tín hiệu truyền về phía UAV trên bầu trời và giảm thiểu nhiều kênh xuống (từ trạm BS chủ đến UAV), nhờ đó tăng vùng phủ sóng phục vụ cho các UAV.

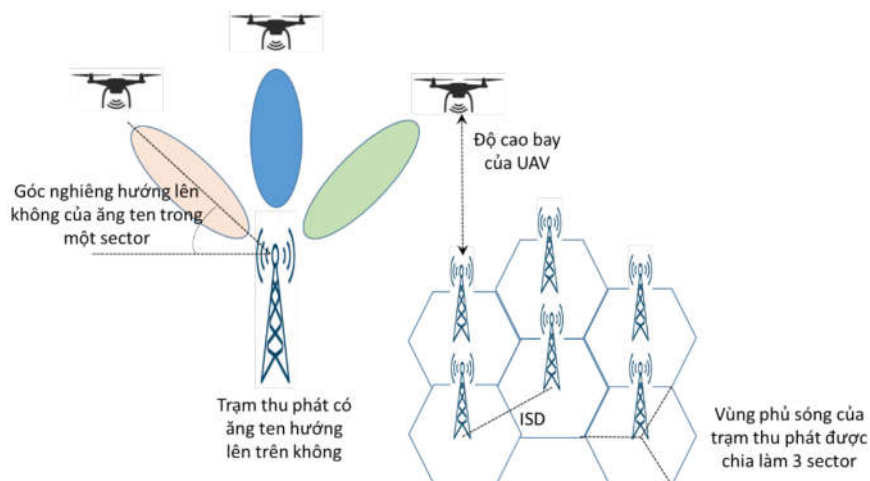
- **Thu nhận và truyền năng lượng qua môi trường không dây:** Với những

bước tiến công nghệ hướng tới phục vụ 6G, các giải pháp thu nhận năng lượng và truyền năng lượng qua môi trường không dây đang nhận được rất nhiều sự quan tâm, đặc biệt khi áp dụng cho các thiết bị bị giới hạn về dung lượng pin. Tương tự, đối với các UAV bị giới hạn về dung lượng pin, thu nhận năng lượng (ví dụ: năng lượng mặt trời, gió) và sử dụng các trạm phát sóng BS mặt đất để truyền năng lượng không dây có thể là giải pháp hứa hẹn để kéo dài hoạt động của UAV.

2.2. Kết nối UAV tầm cao

Hướng tới mục tiêu có được mạng lưới kết nối UAV bao phủ rộng khắp, cần xem xét cả biện pháp kết nối cho các UAV tầm cao (vài km hoặc cao hơn). Hiện nay, đang có hai định hướng được giới chuyên môn thảo luận: i/ cung cấp kết nối bằng băng thông rộng cho UAV hoạt động tầm cao bằng cách sử dụng liên lạc trực tiếp trên không – mặt đất (*A2G: Air-to-Ground*), và ii/) Kết hợp mạng trên không (*NTN: Non-Terrestrial Networks*) và các mạng di động trên mặt đất (*TN: Terrestrial Networks*).

Trao đổi thông tin trực tiếp A2G sử dụng cơ sở hạ tầng di động có thể cung cấp các dịch vụ truyền tải dữ liệu tốc độ cao, đáng tin cậy và độ trễ thấp đến các vật thể bay ở độ cao lớn đến khoảng 10 km. Để đạt được hiệu năng tối ưu, giao tiếp A2G cần có các trạm BS chuyên dụng trên mặt đất tương tự như các trạm phát sóng mạng di động, nhưng với sự khác biệt liên quan đến các tham số triển khai như góc nghiêng ăng-ten, khoảng cách giữa các trạm thu phát (*ISD: Inter-Site Distance*), và số lượng vùng Sector được chia trên vùng phủ sóng của mỗi trạm thu phát (xem minh họa trong Hình 3).



Hình 3: Mạng di động phục vụ riêng cho kết nối trực tiếp A2G

Triển khai hiệu quả các mạng A2G đòi hỏi phải mô hình hóa hoạt động của các hệ thống 5G/6G để tối ưu hóa một loạt các tham số có tác động lẫn nhau. Giải bài toán tối ưu hóa và thiết kế hiệu quả của các mạng A2G chuyên dụng là một bước quan trọng để có thể tận dụng công nghệ di động 5G/6G. Trong nhiều phương thức khác nhau để thực hiện bài toán tối ưu hóa, một lần nữa các công cụ AI, học máy ML có thể đóng một vai trò hữu dụng.

Một hướng đi khác trong việc cung cấp kết nối cho các UAV tầm cao là kết hợp mạng di động mặt đất TN (*Terrestrial Networks*) và mạng trên không NTN (*Non-Terrestrial Networks*). Mạng NTN bao gồm những điểm nút mạng được đặt trên các vật thể vũ trụ hoặc vật thể trên không. Một vật thể vũ trụ có thể là vệ tinh phóng trên quỹ đạo tầm thấp LEO (*Low Earth Orbit*), quỹ đạo tầm trung MEO (*Medium Earth Orbit*), hoặc quỹ đạo địa đồng bộ GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*). Một vật thể trên không, như một trạm thu phát sóng tầm cao, có thể chính là UAV, máy bay, khinh khí cầu. Một trạm sóng ngoài không gian có thể là một vệ

tin quay quanh trái đất ở tầng thấp, tầng trung bình, hoặc theo quỹ đạo địa đồng bộ.

Kết hợp TN và NTN cũng là xu hướng nhắm tới của mạng di động thế hệ 6G, khi sử dụng các NTN để hỗ trợ các mạng trên mặt đất là điều tất yếu để hiện thực hóa kết nối mọi lúc, mọi nơi, toàn bộ không gian. 6G được mong đợi sẽ có thể cung cấp các giải pháp tích hợp, có những khả năng như chuyển giao hoặc đồng thời sử dụng mạng mặt đất và mạng vệ tinh trong cùng một thiết bị đầu cuối duy nhất.

Đặc biệt, kết hợp mạng di động mặt đất với các liên kết vệ tinh là rất quan trọng trong việc mở rộng kết nối cho UAV đến những vùng hẻo lánh. Mặc dù các mạng di động trên mặt đất đã ngày càng được triển khai rộng rãi, nhưng vẫn tồn tại những khu vực xa xôi, nơi có chi phí quá cao để có thể thiết lập mạng di động mặt đất. Để có thể cung cấp kết nối cho các UAV bay trong môi trường hẻo lánh như vậy, cần thiết phải bổ trợ các mạng trên mặt đất bằng mạng NTN bằng cách sử dụng các công nghệ vệ tinh và các trạm thu phát sóng tầm cao. Một trường hợp sử dụng khác là khi các mạng di động trên mặt đất bị phá hủy trong các thảm họa (ví

dự: động đất), NTN là một sự thay thế dự phòng khả thi để kết nối UAV, hỗ trợ các nỗ lực cứu hộ cứu nạn, phục hồi thảm họa hay đảm bảo an toàn công cộng. Do đó, việc kết hợp các mạng di động trên mặt đất với NTN đem lại lợi ích rất lớn.

Kết hợp mạng di động 5G mặt đất với mạng NTN đã được đưa vào các bản công bố Release 15, Release 16, và Release 17 của tổ chức 3GPP. Với công nghệ mạng 6G, chắc chắn các tiêu chuẩn hỗ trợ NTN cũng sẽ được nghiên cứu và công bố theo lộ trình phát triển trong các phiên bản Release tương lai.

III. Kết luận

Trong lĩnh vực dân sự, UAV (cả ở tầm thấp và tầm cao) đã, đang và sẽ mở ra nhiều

cơ hội ứng dụng. Điều kiện tiên quyết để hiện thực hóa được tối đa các tiềm năng sử dụng của UAV là đảm bảo kết nối ổn định, tin cậy, rộng khắp cho mạng lưới UAV: giữa các UAV với nhau, giữa các UAV và trung tâm điều khiển, giữa các UAV với người vận hành, với người sử dụng.

Các nền tảng mạng di động mặt đất 4G, 5G và 6G trong tương lai đóng vai trò quan trọng trong bài toán kết nối này. Bài báo đã phân tích và thảo luận về giải pháp tận dụng nền tảng mạng di động 4G/5G/6G để cung cấp kết nối cho UAV tầm thấp và tầm cao. Giải pháp được tóm lược và đánh giá chung về thuận lợi cùng các nhược điểm, thách thức đi kèm như trong Bảng 3.

Bảng 3: Giải pháp kết nối mạng lưới UAV

Giải pháp	Mô tả	Thuận lợi	Nhược điểm, thách thức
Tận dụng hạ tầng và công nghệ kết nối mạng 4G	- Cần phát triển thêm các giải pháp phụ trợ trên nền mạng 4G (vd. các giải pháp chống nhiễu, khử nhiễu; các giải pháp quản lý, điều chỉnh hệ thống anten...)	- Hạ tầng mạng 4G đã được vận hành phổ biến trên thực tế, nên giải pháp phụ trợ nếu đạt yêu cầu có thể được bắt đầu tích hợp triển khai ngay	- Giải pháp phụ trợ thường mang tính tình thế, xử lý những vấn đề cục bộ nhất định. - Đề không ảnh hưởng đến sự ổn định của nền tảng mạng 4G đang vận hành, việc tích hợp thêm giải pháp phụ trợ thường không đơn giản, tốn thời gian, có thể phải qua nhiều công đoạn thử nghiệm trước khi tích hợp chính thức.
Tận dụng hạ tầng và công nghệ kết nối mạng di động thế hệ mới 5G/6G	- Tận dụng những đặc tính kỹ thuật đã được chuẩn hóa và thiết kế sẵn của 5G/6G (vd. hoạt động ở dải tần số cao mang lại tốc độ dữ liệu cao, công nghệ chia lát mạng - <i>network slicing</i> , MIMO lớn, bề mặt thông minh - <i>RIS</i> , ...). - Áp dụng các giải pháp AI trên nền tảng học máy, được dành chỗ sẵn trong khung tiêu chuẩn thiết kế của mạng di động thế hệ mới. - Thiết kế các trạm BS chuyên dụng trong hạ tầng 5G/6G để cung cấp kết nối A2G cho các UAV tầm cao. - Phát triển cùng xu hướng kết hợp mạng di động mặt đất và mạng vệ tinh của 5G/6G cho kết nối UAV tầm cao.	- Những khung thiết kế kỹ thuật đã được chuẩn hóa của mạng di động 5G/6G mang lại khả năng có thể được tận dụng ngay cho trường hợp UAV. - Các tiêu chuẩn thiết kế đã dành chỗ sẵn sàng cho việc tích hợp những giải pháp AI mang lại hiệu quả cao.	- Một số giải pháp cần được tiếp tục nghiên cứu, hoàn thiện trước khi được chuẩn hóa thành đặc tả kỹ thuật (<i>technical specification</i>) trong tiêu chuẩn Release. - Mạng thế hệ mới (đặc biệt là 6G) chưa được triển khai vận hành thực tế, hoặc chưa được triển khai vận hành rộng rãi, nên cần thêm thời gian để đưa các nghiên cứu lý thuyết, các tiêu chuẩn kỹ thuật vào triển khai thực tế.

Kết nối mạng lưới UAV bằng cách tận dụng hạ tầng mạng di động thế hệ mới là lĩnh vực đang mở ra những bài toán nghiên cứu mới cần giải quyết, đặc biệt là hướng nghiên cứu phát triển các giải pháp tối ưu hóa dựa trên AI cho đặc thù mạng lưới UAV (như quản lý tài nguyên, điều phối kết nối, giám sát định vị...). Những giải pháp AI như vậy sẽ góp phần giải quyết triệt để hơn nữa tính khả thi của các tiêu chuẩn mạng di động thế hệ mới, cho phép kết nối UAV rộng khắp cả ở tầm thấp và tầm cao.

Tài liệu tham khảo:

- [1]. R. Shrestha, R. Bajracharya, and S. Kim, (June, 2021) “6G Enabled Unmanned Aerial Vehicle Traffic Management: A Perspective”, IEEE Access, Vol. 9, pp. 91119-91136.
- [2]. L. U. Khan, I. Yaqoob, M. Imran, Z. Han, C. S. Hong, (2020), “6G Wireless Systems: A Vision, Architectural Elements, and Future Directions”, IEEE Access, Vol. 8, pp. 147029-147044.
- [3]. H. C. Nguyen, R. Amorim, J. Wigard, I. Z. Kovács, T. B. Sørensen and P. E. Mogensen, (2018), “How to Ensure Reliable Connectivity for Aerial Vehicles Over Cellular Networks”, IEEE Access, Vol. 6, pp. 12304-12317.
- [4]. E. Pagliari, L. Davoli, G. Cicioni, V. Palazzi, P. Mezzanotte, F. Alimenti, L. Roselli, and A. Ferrari, (2024), “Smart Selective Antennas System (SSAS): Improving 4G LTE Connectivity for UAVs Using Directive Selective Antennas”, IEEE Access, Vol. 12, pp. 7040-7062.
- [5]. Y. Chen, X. Lin, T. Khan, and M. Mozaffari, (May, 2020), “Efficient drone mobility support using reinforcement learning”, in Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC).

UAV NETWORK CONNECTIVITY SOLUTIONS BASED ON NEXT-GENERATION MOBILE COMMUNICATION PLATFORMS

Tuan Hung Tran², Hoai Giang Nguyen²

Abstract: UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) have become widely utilized for both civil and military purposes. Restricted to civil application areas only, this article discusses potential solutions to provide UAV connectivity, including both low-altitude and high-altitude options, by exploiting the capabilities of cellular technologies 4G, 5G, and potentially 6G in the future.

Keywords: UAV connectivity, 4G/5G/6G mobile networks, UTM (UAV traffic Management), AI, machine Learning

² Hanoi Open University