

Mạng 3 chiều hợp nhất cho thế hệ di động 6G: Kiến trúc và tiềm năng ứng dụng

ThS. Đàm Mỹ Hạnh

Trường Đại học Giao thông Vận tải



Nhu cầu ngày càng tăng về kết nối tốc độ cao, đáng tin cậy và ở khắp mọi nơi đã thúc đẩy sự phát triển của nhiều mạng truyền thông khác nhau, bao gồm mạng trên mặt đất, mạng vệ tinh và mạng trên không. Mỗi mạng đều có những điểm mạnh và hạn chế riêng nhưng sự xuất hiện của mạng ba chiều (3D) hợp nhất đang được xem là một giải pháp tiềm năng để vượt qua ranh giới của cơ sở hạ tầng truyền thống và cung cấp kết nối 3D liền mạch trên tất cả các phân đoạn mạng: không gian, trên không trung và mặt đất.

Nỗ lực chuẩn hóa toàn cầu cho mạng 3 chiều hợp nhất

Sự phát triển của khái niệm mạng 3D hợp nhất đã thúc đẩy nỗ lực toàn cầu nhằm thiết lập các giao thức và kiến trúc chuẩn hóa. Các tổ chức hàng đầu bao gồm: ITU-R, IEEE và 3GPP đang tích cực tham gia vào việc chuẩn hóa để xác định các thông số kỹ thuật và khuôn khổ cho công nghệ mới nổi này nhằm đảm bảo khả năng tương tác và tương thích giữa các phân đoạn mạng khác nhau, cho phép truyền thông liền mạch trên cả ba chiều: không gian, trên không trung và trên mặt đất.

ITU-R đóng vai trò quan trọng trong việc phối hợp quản lý phổ tần truyền thông vô tuyến toàn cầu và đảm bảo hài hòa các quy định cho các mạng phi mặt đất (NTN), phát triển các khuyến nghị cho các mạng phi mặt đất, làm cơ sở cho sự phát triển các hệ thống 6G NTN, để đặt nền tảng cho mạng 3D hợp nhất trong tương lai.

Nhóm làm việc IEEE 802.11 đang nghiên cứu việc tích hợp các điểm truy cập trên không vào các mạng Wi-Fi hiện có. Ngoài ra, nhóm làm việc IEEE 802.15 chịu trách nhiệm về các mạng khu vực cá nhân không



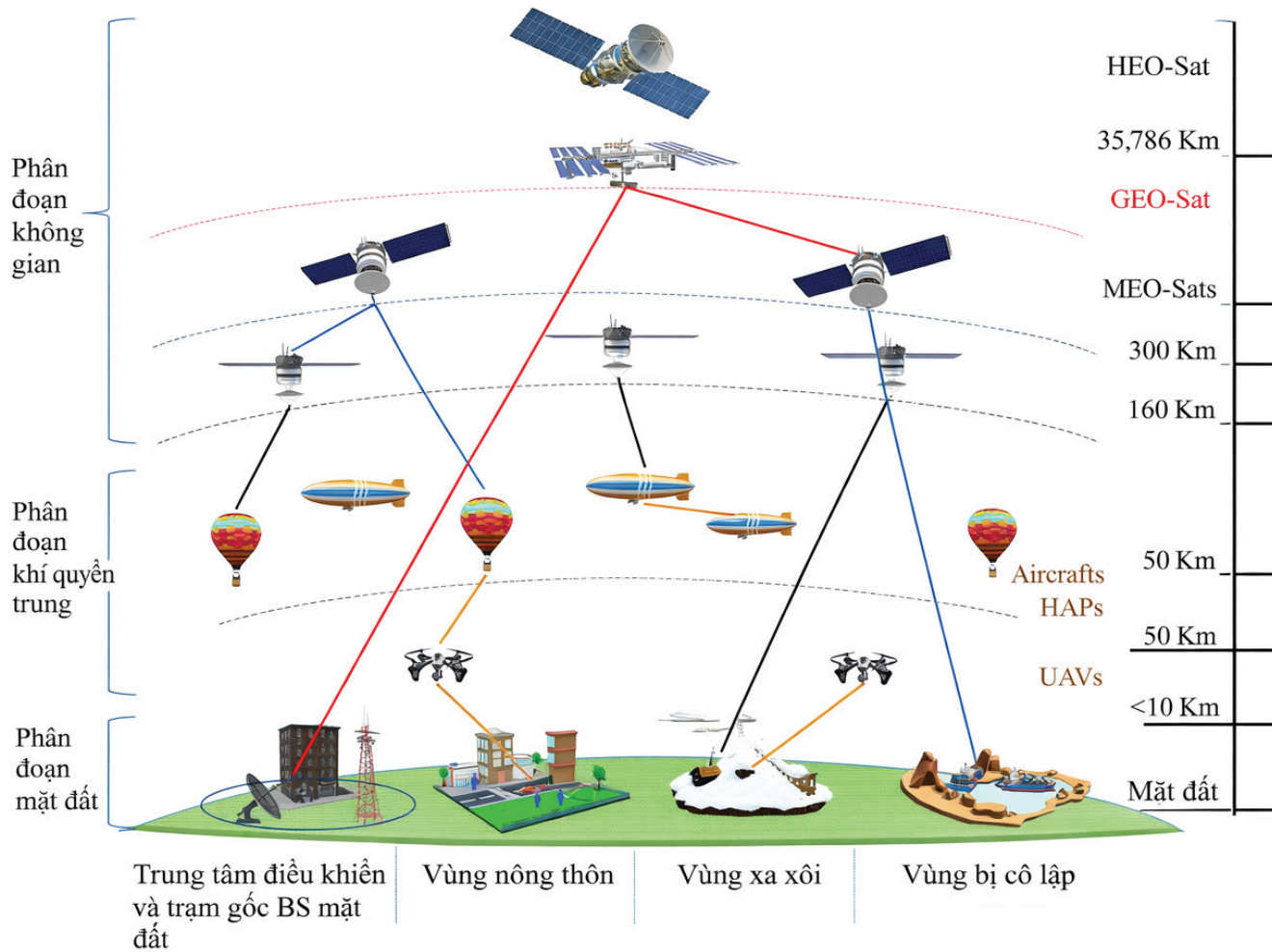
dây công suất thấp, việc sử dụng UAV cho các ứng dụng kết nối truyền dẫn trung gian (backhaul) và chuyển tiếp.

3GPP đang tích cực khám phá việc tích hợp các nút trên không trung và hệ thống vệ tinh vào kiến trúc 5G NR và 6G NR.

Một số dự án nghiên cứu tiên phong hỗ trợ mạng 3D hợp nhất đang được tiến hành trên toàn thế giới, bao gồm 6G Flagship Initiative ở Phần Lan, Hexa-X ở Châu Âu và Open 6GHub và 6G Takeoff ở Đức.

Mạng 3 chiều hợp nhất

Mạng di động 6G dự kiến sẽ đưa ra một sự thay đổi lớn trong kiến trúc mạng, tập trung vào các kiến trúc lai tích hợp nhiều phương thức mạng khác nhau. Mạng 6G này sẽ hội tụ các miền khác nhau, từ các mạng cự ly ngắn, dung lượng cực cao đến những vùng xa xôi thông qua các lớp không gian mạng mới. Cách tiếp cận này giúp khắc phục hạn chế của các mạng hiện nay của phương pháp tiếp cận mạng phi mặt đất trong thế hệ di động 5G được chuẩn hóa bởi 3GPP, cho phép khai thác toàn diện và sâu sắc hơn các thành phần mạng bay.



Hình 1. Minh họa khái niệm về mạng 3D hợp nhất. Nguồn: ĐMH.

Một hướng chuyển đổi như vậy đòi hỏi sự tích hợp liền mạch và tăng cường hiệp lực của nhiều loại hình topo mạng khác nhau, bao gồm: mạng không gian (vệ tinh), mạng trên không trung (UAV và HAP) và mạng trên mặt đất (mạng di động).

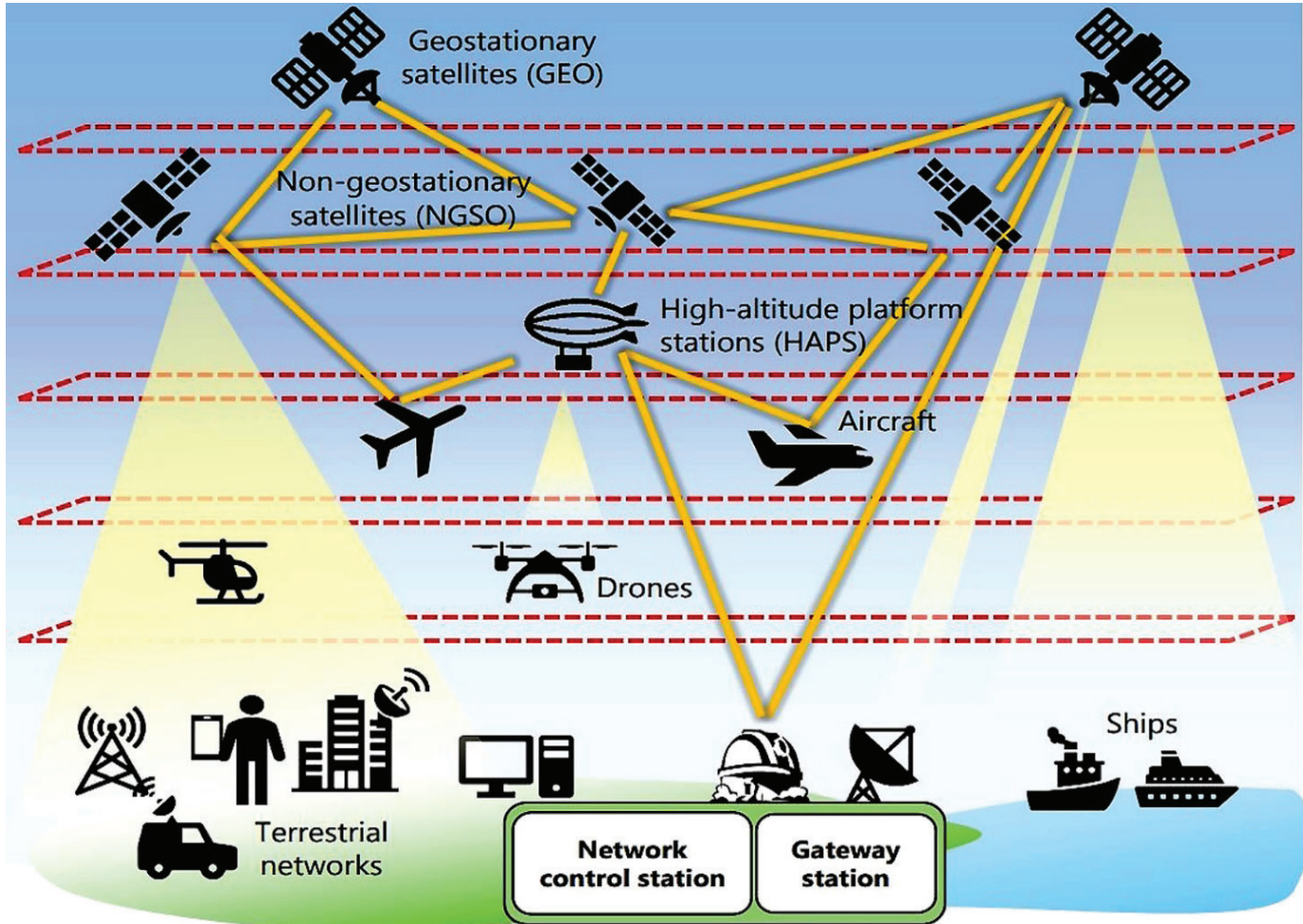
Ở hình 1, kiến trúc dọc bao gồm ba lớp riêng biệt này tích hợp các mạng trên mặt đất và các mạng không nằm trên mặt đất, hòa hợp chúng thành một mạng 3D hợp nhất toàn diện và gắn kết. Các lớp tích hợp, từ dưới lên trên, bao gồm mạng trên mặt đất, mạng trên không trung và các lớp mạng không gian.

Mạng trên mặt đất đề cập đến cơ sở hạ tầng mạng di động tế bào không đồng nhất, kết nối đa dạng các

trạm gốc (BS) bao gồm các BS macro micro và pico, đồng thời tích hợp các trạm mặt đất vệ tinh.

Mạng trên không trung gồm các thực thể hoạt động ở nhiều độ cao khác nhau từ 100 mét đến 50 km. Lớp này được chia thành hai loại nút truyền thông: UAV có độ cao hoạt động giới hạn ở 10 km và HAP điều phối kết nối trong phạm vi lên đến 50 km, chủ yếu tập trung quanh độ cao 20 km.

- HAP là các phương tiện bay bán cố định, lơ lửng ở độ cao 17-25 km so với Trái đất. Chúng có một số lợi thế so với vệ tinh, bao gồm dễ triển khai, chi phí vận hành thấp và độ trễ thấp. Một số HAP có sẵn trên thị



Các tầng và độ cao của từng loại vệ tinh. Ảnh: ST.

trường bao gồm AALTO (một công ty con của Airbus), Google Loon và Stratobus.

- UAV là phương tiện bay không người lái, có thể triển khai nhanh chóng và linh hoạt để cung cấp vùng phủ sóng ở những khu vực thiếu cơ sở hạ tầng trên mặt đất. Chúng cũng có thể hoạt động như các bộ chuyển tiếp di động cho các liên kết vệ tinh - mặt đất và tạo điều kiện cho điện toán biên.

Lớp mạng không gian bao gồm các lớp vệ tinh riêng biệt. Các vệ tinh này được phân loại dựa trên độ cao quỹ đạo của chúng, bao gồm: Very LEO (vLEO), LEO, Medium Earth Orbit (MEO), GEO và High Earth Orbit (HEO). Các loại này tương ứng tăng dần trong

phạm vi độ cao 50-160 km, 160-300 km, 300-2000 km, 2000-35786 km và hơn 35786 km.

Truyền thông vệ tinh (Satcom) cung cấp nhiều dịch vụ, bao gồm băng thông rộng di động và kết nối Internet cố định cho người dùng mặt đất ở những khu vực thưa thớt về mặt địa lý, trên máy bay cũng như kết nối không dây cho các thiết bị Internet vạn vật (IoT).

Những dự án lớn trong lĩnh vực quỹ đạo vệ tinh phi địa tĩnh (NGSO) tư nhân gần đây như SpaceX, OneWeb và Kuiper của Amazon đã giảm đáng kể độ trễ liên lạc và mang lại tốc độ dữ liệu cao hơn ở công suất truyền thấp hơn so với các hệ thống quỹ đạo vệ tinh địa tĩnh (GSO) cũ. SpaceX và Kuiper được kỳ vọng đạt tốc độ dữ liệu ở mức terabit mỗi giây.

Các hệ thống Satcom có những hạn chế về độ trễ và độ tin cậy. Để đáp ứng nhu cầu trong tương lai về độ trễ cực thấp, truyền thông đáng tin cậy và tốc độ dữ liệu là terabit mỗi giây, các hệ thống Satcom cần được bổ sung bởi các mạng trên không trung như HAP và UAV.

Các dịch vụ thông tin liên lạc hàng hải có vai trò quan trọng trong việc hỗ trợ nhiều hoạt động trên đại dương, bao gồm vận chuyển, thăm dò ngoài khơi và giám sát môi trường.

Theo truyền thống, thông tin liên lạc hàng hải dựa vào các công nghệ tần số vô tuyến (RF) như tần số rất cao (VHF) và tần số cực cao (UHF) cho các dịch vụ cơ bản như gọi thoại và nhắn tin. Tuy nhiên, nhu cầu ngày càng tăng đối với các ứng dụng ngày càng cần nhiều dữ liệu và những hạn chế của các hệ thống hiện tại, đặc biệt là trong môi trường ngoài khơi, đã dẫn đến việc tích hợp thông tin liên lạc vệ tinh, thông tin liên lạc quang không dây (như quang học không gian tự do) và phát triển các hệ thống lai tiên tiến. Những công nghệ mới này nâng cao phạm vi phủ sóng, dung lượng và độ tin cậy của thông tin liên lạc hàng hải, cho phép các ứng dụng phức tạp hơn như Mạng Internet tàu thủy (Internet of Ships - IoS) và IoT hàng hải.

Cho đến nay, các hệ thống thông tin liên lạc hàng hải hiện tại có thể được coi là một phần của mạng mặt đất. Việc tích hợp thông tin liên lạc hàng hải vào mạng 3D hợp nhất tạo ra một mạng lưới toàn cầu liên mạch liên kết các hoạt động hàng hải với các hệ thống thông tin liên lạc trên mặt đất, trên không trung và vệ tinh. Sự tích hợp như vậy sẽ cho phép kết nối không bị gián đoạn cho tàu, giàn khoan ngoài khơi và các hoạt động hàng hải khác.

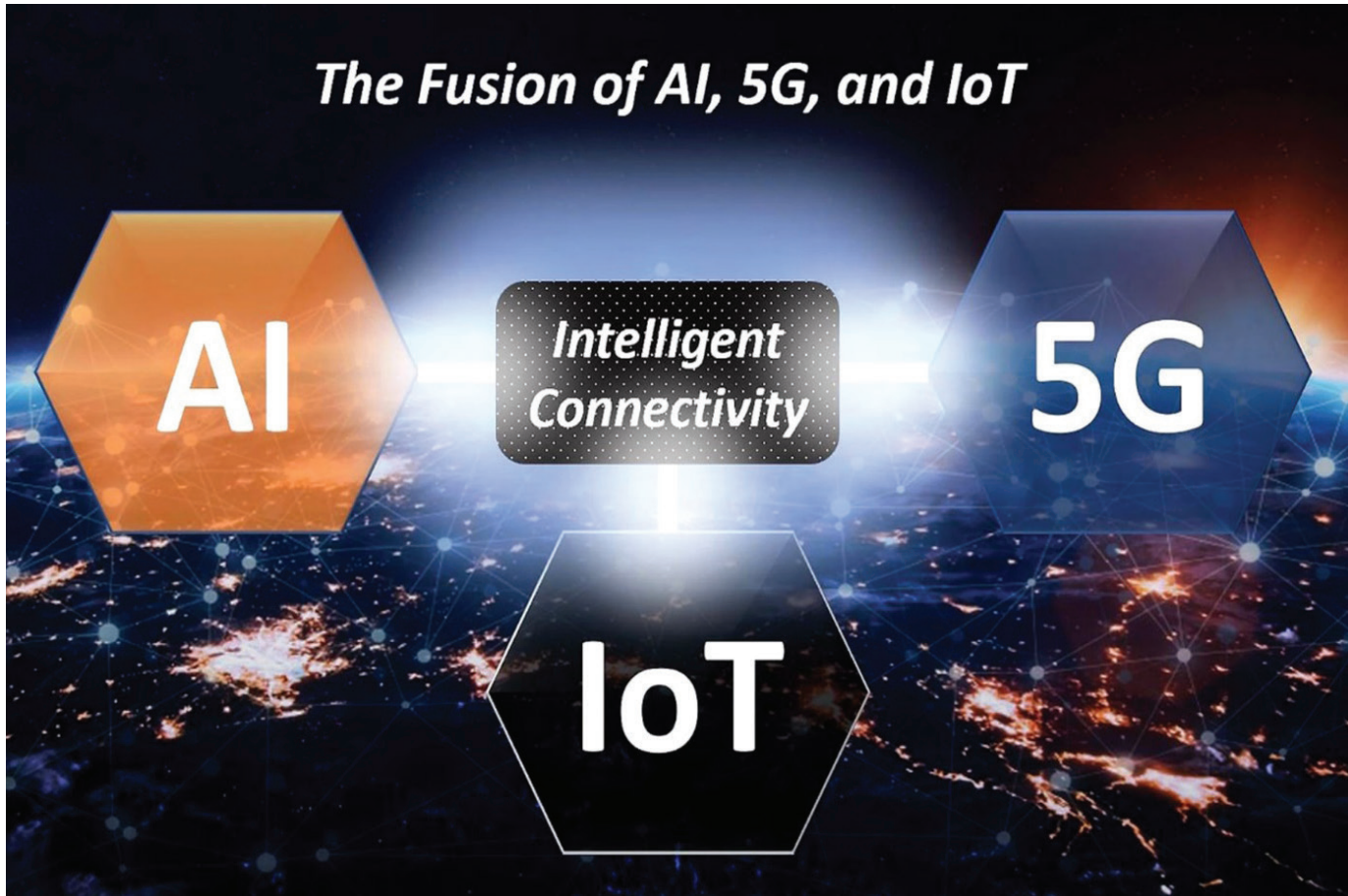
Các mạng không dây trên biển thông qua việc sử dụng các phương tiện mặt nước không người lái

(USV) được coi là công cụ hỗ trợ chính cho truyền thông hàng hải 6G thế hệ tiếp theo. USV có thể hoạt động như trạm gốc BS di động hoặc bộ chuyển tiếp để thu hẹp khoảng cách về kết nối, tăng phạm vi truyền thông, kết nối độ trễ thấp và cải thiện hiệu quả sử dụng năng lượng cho các mạng ngoài khơi.

Động lực cho sự ra đời của mạng 3 chiều hợp nhất

Vùng phủ sóng rộng và khả năng phục hồi: Các mạng 3D hợp nhất cung cấp khả năng kết nối ở khắp mọi nơi, trải dài từ vùng nông thôn đến các vùng xa xôi và xa hơn nữa. Điều này có thể đạt được thông qua: Chuyển giao liên mạch (một mạng hợp nhất cho phép chuyển giao liên mạch giữa các mạng mặt đất và các mạng phi mặt đất, bảo đảm kết nối không bị gián đoạn cho người dùng khi họ di chuyển giữa các môi trường khác nhau); phạm vi phủ sóng mở rộng: Các mạng phi mặt đất có thể cung cấp vùng phủ sóng ở những khu vực mà các mạng mặt đất bị hạn chế, chẳng hạn như vùng xa xôi, vùng thiên tai và vùng cao.

Hiệu suất sử dụng phổ tần và tài nguyên được cải thiện: Các mạng 3D hợp nhất có thể đạt được những cải tiến đáng kể về hiệu suất sử dụng phổ tần và tài nguyên, cung cấp cho người dùng tốc độ dữ liệu cao hơn, độ trễ thấp hơn và chất lượng dịch vụ (QoS) được cải thiện. Điều này có thể đạt được bằng cách: Phân bổ tài nguyên động theo chiều dọc (một mạng 3D hợp nhất có thể phân bổ tài nguyên động giữa các mạng mặt đất và các mạng phi mặt đất dựa trên nhu cầu, tối ưu hóa hiệu năng vận hành của mạng và giảm chi phí); gia tăng mật độ mạng (bằng cách tích hợp các mạng mặt đất và các mạng không nằm trên mặt đất, có thể đạt được mật độ mạng dày đặc mà không cần triển khai cơ sở hạ tầng rộng rãi trên mặt đất. Điều này có thể cải thiện dung lượng của mạng và giảm độ trễ).



Kết nối thông minh của mạng 3 chiều hợp nhất bảo đảm độ liên mạch và hiệu quả trên nhiều phổ tần số. Ảnh: ST.

Giảm độ trễ trong các mạng vệ tinh LEO: Do ở gần Trái đất hơn, các vệ tinh LEO có thể giúp giảm độ trễ tổng thể trong Satcom. Điều này đặc biệt có lợi cho các ứng dụng mà việc giảm thiểu độ trễ là rất quan trọng, chẳng hạn như giám sát thời gian thực, hoạt động từ xa và dịch vụ độ trễ thấp ở những khu vực thiếu cơ sở hạ tầng trên mặt đất. Cần lưu ý rằng trong khi mạng LEO có thể giảm độ trễ so với các hệ thống vệ tinh truyền thống, chúng vẫn có độ trễ cao hơn so với các mạng hoàn toàn trên mặt đất.

Tăng cường khả năng phục hồi và độ tin cậy: Các mạng 3D hợp nhất có thể cải thiện đáng kể khả năng phục hồi và độ tin cậy, bảo đảm rằng các dịch vụ quan trọng vẫn hoạt động ngay cả khi gặp phải sự gián đoạn và thách thức.

Tính di động và sự linh hoạt: Các mạng 3D hợp nhất có thể thích ứng với tính di động của người dùng và phương tiện bằng cách chuyển đổi liên mạch giữa các kết nối trên mặt đất, trên không trung và trong không gian. Điều này rất cần thiết cho các ứng dụng liên quan đến thiết bị di động, máy bay không người lái và phương tiện tự hành vốn thường xuyên thay đổi vị trí của chúng.

Kết nối hỗn tạp: Các mạng 3D hợp nhất có thể tích hợp các công nghệ mạng khác nhau, bao gồm: mạng di động, Satcom và công nghệ sóng milimet (mmWave). Tính hỗn tạp này cho phép tối ưu hóa cho các trường hợp sử dụng và môi trường cụ thể, tối đa hóa hiệu quả và hiệu suất mạng.