



Mạng không dây thế hệ mới sẽ có yếu tố linh hoạt đa năng, trong đó các mạng sử dụng cùng thiết kế cho cả truyền thông và cảm biến trở thành công nghệ quan trọng cho hệ thống 6G. Ảnh: ST.

Mạng 6G và khả năng khai thác ở các dải tần mmWave và THz

ThS. Nguyễn Gia Bắc

Viện Chiến lược, Học viện Chiến lược Khoa học và Công nghệ, Bộ Khoa học và Công nghệ

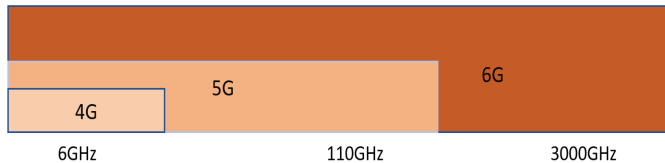
“

Sự phát triển vượt bậc của các ứng dụng di động và nhu cầu kết nối toàn cầu ngày càng tăng đang thúc đẩy ngành công nghiệp viễn thông tiến tới thế hệ mạng 6G với những khả năng vượt trội so với 5G hiện tại. Trong bối cảnh này, việc khai thác các dải tần mmWave và THz nổi lên như một hướng đột phá quan trọng, mở ra tiềm năng mở rộng phổ tần gấp 10 lần so với các thế hệ mạng trước đây.

”

Công nghệ vô tuyến ở dải tần mmWave và THz

Các tổ chức nghiên cứu và ngành công nghiệp không dây đang thúc đẩy khai thác dải tần mmWave hiện có và băng tần THz mới để đáp ứng nhu cầu truyền thông di động toàn cầu. Từ năm 2019, Ủy ban Truyền thông Liên bang Hoa Kỳ (FCC) đã mở dải tần từ 95 GHz đến 3 THz cho thử nghiệm và chọn một số băng tần cho ứng dụng không cần cấp phép, thể hiện tiềm năng phổ tần cho 6G. Khả năng mở rộng phổ vượt xa 5G hiện tại, đáp ứng các trường hợp sử dụng mới của 6G (hình 1).



Hình 1. Phổ tần số sử dụng cho các thế hệ mạng khác nhau.

Bảng thông rộng lớn trong dải mmWave và THz hoàn toàn đáp ứng tốc độ dữ liệu cao hơn terabit/giây cho hệ thống thông tin di động và truyền dẫn backhaul. Tiềm năng ghép kênh không gian được mở rộng, tăng tốc độ dữ liệu trong đơn vị thể tích (bit/giây/m³) cho kết nối 3D đa liên kết. Dải tần bước sóng ngắn hơn tăng độ chính xác cho cảm biến, hình ảnh và định vị chính xác cao. Liên lạc vô tuyến công suất thấp với băng thông rộng tăng độ bảo mật cho ứng dụng thương mại và quân sự. Liên lạc công suất cực thấp trở nên khả thi khi các thành phần máy phát và ăng ten được bố trí gần nhau.

Các thách thức kỹ thuật

Hoạt động ở dải tần trên 110 GHz đặt ra nhiều thách thức cho giao diện vô tuyến và hệ thống xử lý tín hiệu tốc độ cao terabit/giây, bao gồm suy hao thấp, tản nhiệt, chuyển đổi tương tự/số (bảng 1).

Bảng 1. Các thách thức đặt ra cho giao diện không gian khi hoạt động ở dải tần trên 110 GHz và đề xuất công nghệ có khả năng đáp ứng.

Các thách thức của giao diện vô tuyến mới	Kỹ thuật tiên tiến để khắc phục
Suy hao đường truyền nghiêm trọng và hấp thụ khí quyển.	Độ lợi ăng ten từ ultra-massive MIMO với các mô hình kênh đa đường THz chính xác, thực tế.
RF front-end, quang tử học và chuyển đổi dữ liệu.	Công nghệ bán dẫn tiết kiệm năng lượng, khả năng mW dựa trên InP, GaAs, SiGe và CMOS.
Kiến trúc ăng ten, thấu kính và định dạng búp sóng.	Vật liệu siêu cấu trúc để chặn, hấp thụ, tăng cường hoặc uốn cong sóng điện từ ở tần số THz.
Giảm tỷ lệ công suất đỉnh trên công suất trung bình (PAPR).	Dạng sóng mới để hỗ trợ các kênh có độ rộng GHz.
Giảm độ phức tạp và duy trì hiệu quả cho hoạt động THz.	Tín hiệu, kênh và giao thức mới.

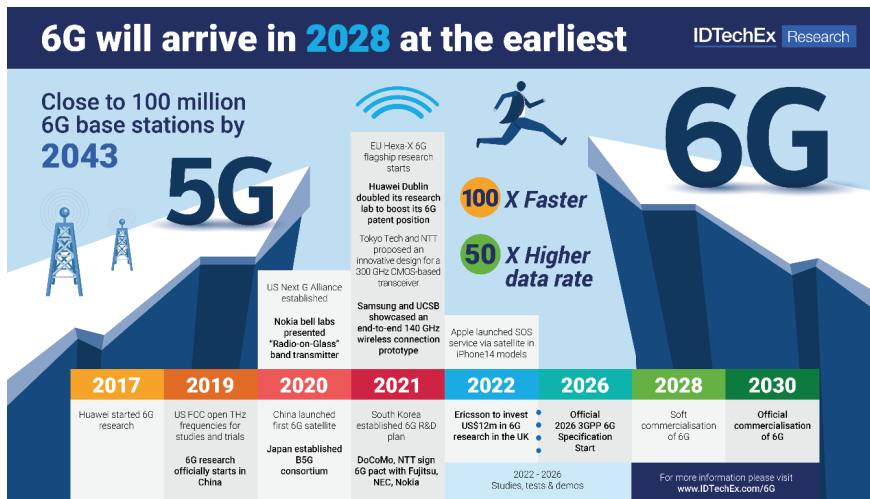
Nghiên cứu phát triển mmWave cho mạng thế hệ tiếp theo

Các nghiên cứu đang thực hiện cho hệ thống mmWave thế hệ tiếp theo hướng tới việc hỗ trợ một số lượng lớn phần tử ăng ten với độ rộng búp sóng đủ hẹp, cân nhắc định dạng thiết kế cho thiết bị người dùng (UE) và các vấn đề liên quan đến giá thành, giới hạn kích thước, công suất, tản nhiệt và qua đó xác lập những thách thức cần giải quyết. Khi xem xét trên một thiết kế UE cụ thể, các tham số thiết kế tập trung vào giải quyết tốt cho phạm vi phủ sóng và hiệu suất sử dụng phổ tần của thiết bị. Việc tối ưu hoá vị trí các modul đa ăng ten tại UE sẽ tránh được các tác động có hại từ các phần tử bức xạ khác của UE.

Các kỹ thuật quản lý búp sóng hiện nay dựa trên kỹ thuật định dạng búp sóng theo cấp độ (hierarchical beamforming) được phát triển để giảm độ trễ, tiêu thụ điện năng và hiện tượng quá nhiệt. So với dải tần hoạt động dưới 6GHz (sub-6 GHz), việc tiêu thụ năng lượng ở dải tần mmWave là cao hơn, chủ đề nghiên cứu thu hút sự quan tâm lớn ở đây là thiết kế một chu kỳ hoạt động theo kiểu “ngủ-thức” hiệu quả cho thiết bị để hạn chế tiêu thụ năng lượng. Những thách thức xa hơn bao gồm cách tiếp cận quản lý búp sóng dựa trên việc áp dụng học máy/trí tuệ nhân tạo (ML/AI) để tận dụng ưu thế của ML/AI về xử lý thông tin quá khứ nhằm đưa ra dự báo về ứng viên tốt nhất cho mô hình quản lý búp sóng hiện tại. Tuy nhiên, những cách tiếp cận này cần được phát triển có kế thừa từ các kỹ thuật quản lý búp sóng hiện có và quan trọng hơn, nó phải giảm tiêu thụ điện năng sau khi đã tính cả chi phí và năng lượng liên quan đến sử dụng thuật toán dự báo.

Nghiên cứu phát triển các hệ thống sử dụng dải tần Sub-THz

Một số lượng lớn các nghiên cứu đang triển khai nhằm cải thiện hệ thống mmWave cũng sẽ tạo ra các tiền đề tốt để định hình hệ thống hoạt động ở dải tần Sub-THz. Thiết kế ban đầu cho sản phẩm hoạt động ở phổ tần Sub-THz này cũng sẽ theo cách tiếp cận được thiết lập trong hệ thống mmWave hiện nay. Ví dụ như việc triển khai mạch tích hợp tần số vô tuyến mới (RFIC: radio frequency integrated circuits) lên các chip hoặc lên bo mạch của các ăng ten mảng.



Các cột mốc quan trọng của 6G. (Nguồn: IDTechEx).

Trong số những thách thức về thiết kế của hệ thống sub-THz, một vấn đề chính là công suất tiêu thụ của thiết bị đầu cuối UE. Ở quy mô đơn giản, nhu cầu năng lượng cho hệ thống mmWave đảm bảo duy trì tốc độ dữ liệu Gbps trong 100 giây, cũng dẫn đến mức tiêu thụ điện năng cao phi thực tế. Vì vậy, 6G sẽ phải cung cấp hiệu năng tốt hơn nhiều so với 5G khi xét về mức độ tiêu thụ năng lượng để truyền đi các bit thông tin. Các dải tần sub-THz có băng thông lớn, nên mô hình tương quan truyền thống giữa công suất xử lý với băng thông sử dụng có thể thay đổi nhờ áp dụng các dạng sóng và luồng dữ liệu mới, thiết kế mã hoá kênh mới để cân đối hiệu suất phổ nhằm đạt hiệu quả sử dụng năng lượng tốt hơn, các ăng ten mới theo nguyên tắc thiết kế từ thấu kính quang học có khả năng cần ít công suất RF hơn, các cách tiếp cận mới để quản lý bức xạ ăng ten và cân bằng kênh, các thiết kế mới về phần cao tần để nâng cao hiệu quả các phần tử như Bộ khuếch đại công suất (PA) và Bộ khuếch đại tạp âm thấp (LNA), v.v., khi hoạt động trên các băng tần mới.

Các tần số cao hơn cho độ rộng bức xạ hẹp hơn dẫn đến giảm nhiễu, tăng thời lượng thu nhận, tăng công suất tiêu thụ và hao phí nhiệt cao hơn. Sử dụng tín hiệu có độ rộng băng thông lớn hơn sẽ bị ảnh hưởng bởi hiệu ứng thăng giáng góc ngẩng của bức xạ ăng ten (squinting effects) và điều này cần phải được giải quyết ở cấp độ hệ thống. Duy trì vùng phủ

sóng đảm bảo ở các dải tần cao hơn có thể cũng trở nên thách thức do khả năng bức xạ hạn chế của các cấu trúc ăng ten thiết kế cho UE. Xem xét hiệu suất năng lượng của phân hệ cao tần RF, khi tần số tăng, hiệu suất khuếch đại năng lượng của các bóng bán dẫn CMOS giảm, điều này có thể cần tới các giải pháp sử dụng vật liệu bán dẫn mới (không phải dạng CMOS). Hơn nữa, tạp âm phase tổng hợp sẽ tăng ở các dải tần cao hơn và làm hạn chế khả năng đạt được hiệu suất phổ cao nhất.

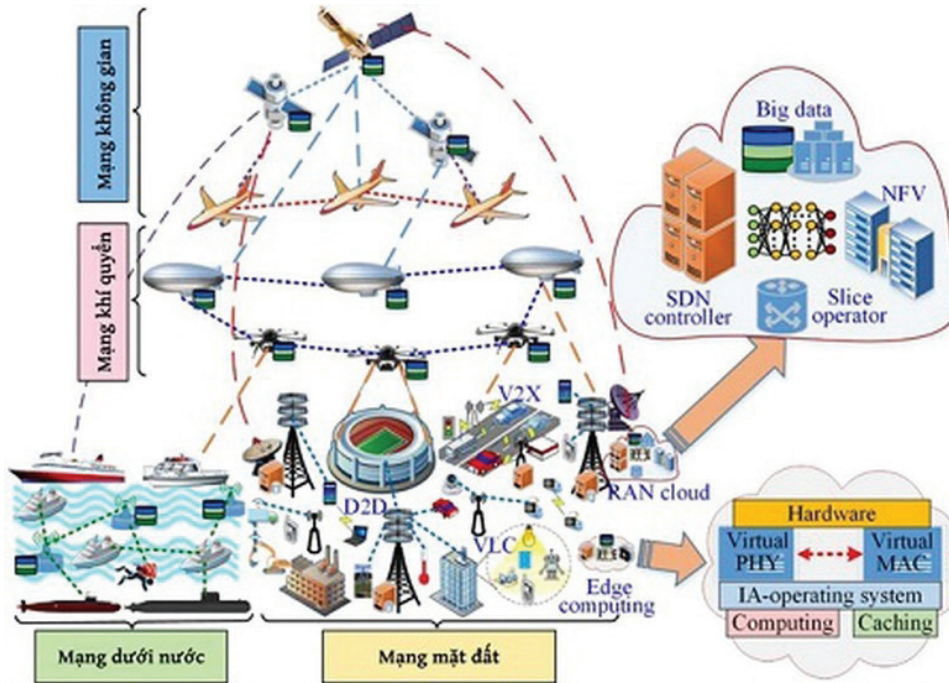
Phát triển các mạng mật độ cao

Để đảm bảo vùng phủ sóng khi triển khai ở băng tần mmWave và sub-THz, cần hình thành mạng mật độ cao với rất nhiều bộ lặp và các nút chuyển tiếp tín hiệu thông minh (đóng vai trò các nút trung gian). Tuy nhiên, cần phải tối ưu giữa chi phí - độ phức tạp - hiệu suất năng lượng cho các nút trung gian này. Các mạng mật độ cao cần được nghiên cứu với cách tiếp cận theo hướng thúc đẩy ứng dụng ML/AI để giải quyết các vấn đề như lập lịch sử dụng, điều phối và giảm thiểu nhiễu, tăng khả năng lựa chọn bức xạ ăng ten và các kết nối thích ứng với sự thay đổi. Những cách tiếp cận này cho phép mạng cung cấp giải pháp được cá nhân hoá phù hợp tới từng đối tượng sử dụng cụ thể (ví dụ: định hình lưu lượng, tối ưu hoá định tuyến hoặc hạn chế hoạt động của mạng) và mỗi nút mạng có thể chia sẻ kinh nghiệm đã học được với các nút khác thông qua các cơ chế ML liên kết.

Thiết kế mạng đồng nhất cho truyền thông và cảm biến

Mạng không dây thế hệ mới sẽ có yếu tố linh hoạt đa năng, trong đó các mạng sử dụng cùng thiết kế cho cả truyền thông và cảm biến trở thành công nghệ quan trọng cho hệ thống 6G. Khái niệm này xuất hiện do hai yếu tố chính:

Yếu tố công nghệ: Việc sử dụng phổ tần mmWave và THz mang lại băng thông dồi dào, cải thiện độ phân giải ứng dụng cảm biến so với phổ tần sub-6 GHz.



Mô hình kiến trúc mạng 6G. Nguồn: BCP.

Hoạt động ở dải tần này khiến ăng ten có búp sóng hẹp với hướng tính cao trong vùng phủ sóng nhỏ, cải thiện độ chính xác cảm biến, đặc biệt quan trọng cho dịch vụ xác định vị trí và lập bản đồ.

Yếu tố ứng dụng: Các trường hợp sử dụng mới của 6G như cặp song sinh kỹ thuật số (digital twins) và thực tại ảo mở rộng đa giác quan (XR) yêu cầu đầu vào giao tiếp và cảm nhận để tạo trải nghiệm mượt mà. Hệ thống sub-THz có băng thông lớn với cấu hình ô nhỏ (small cells) tạo cơ hội đặc biệt cho ứng dụng kết nối truyền thông và cảm biến định vị phù hợp môi trường indoor như nhà máy, công xưởng. Các hệ thống truyền thông không dây áp dụng nguyên tắc RADAR (Radio Detection and Ranging System) để định hình trường hợp sử dụng mới. Tín hiệu phát đi bị phản xạ bởi mục tiêu, quá trình xử lý tín hiệu thu về lấy ra thông tin như khoảng cách, tư thế, vận tốc và kích thước các mục tiêu trong phạm vi phủ sóng trạm gốc.

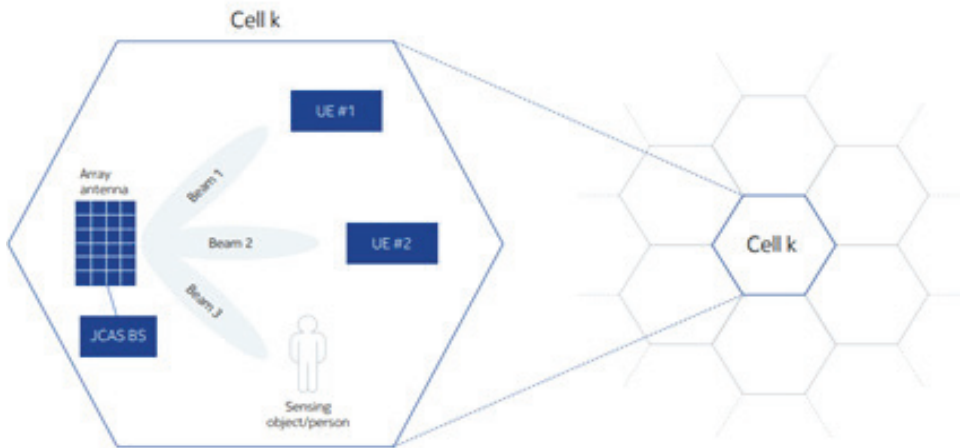
Hơn nữa, việc lựa chọn tần số sóng sử dụng trong các ứng dụng cảm biến để phát hiện đối tượng sẽ cần được tối ưu với mức độ chính xác theo yêu cầu. Việc sử dụng các dải tần số cao có độ rộng băng thông lớn và hướng tính tốt của phát xạ ăng ten, cho phép đo đạc môi trường với độ phân giải cao, phát hiện

và nhận dạng chính xác các đối tượng. Phổ tần rộng hơn mang lại khả năng cảm nhận và xác định chính xác hơn các loại mục tiêu mới cũng như các thay đổi của chúng, điều mà không thể thực hiện được trong các băng tần đang sử dụng hiện nay. Do đó, các dải tần này được áp dụng rất hiệu quả cho đo lường cảm biến độ phân giải cao trong rất nhiều ứng dụng ở môi trường trong nhà (như định vị thiết bị đầu cuối UE hoặc đối tượng với độ chính xác nằm trong dải cm và độ). Tuy nhiên, các dải tần số này phải đối mặt với thách thức trong việc duy trì kết nối dữ liệu đầu vào cảm biến cho các trường hợp sử dụng khác

sau này hay các ứng dụng ở môi trường ngoài trời như xe tự hành, do tính chất dải tần này có suy hao truyền sóng lớn và dễ bị ảnh hưởng mạnh bởi các tác nhân từ môi trường như mưa, vật che chắn như tán cây.

Ngoài ra, khi kết hợp ưu điểm giữa các dải tần mmWave/THz và tính chọn lọc tần số cho phép chúng ta xác định được chỉ số hấp thụ điện từ tương ứng. Điều này dự kiến sẽ dẫn đến những tiến bộ đáng kể trong công nghệ cảm biến không dây. Ví dụ, cảm biến với khả năng phân tích các chế phẩm khí là rất quan trọng khi dùng làm cảm biến môi trường ứng dụng trong giám sát ô nhiễm không khí.

Trước kia, khi tích hợp hệ thống cảm biến/hình ảnh riêng biệt vào hệ thống truyền thông sẽ làm tăng thêm chi phí cơ sở hạ tầng, điều này có thể tránh được nếu hệ thống truyền thông thế hệ mới có thể thực hiện được chức năng cảm biến/hình ảnh. Các thiết bị vô tuyến cảm biến đa băng tần mmWave/THz có thể phục vụ nhiều người dùng trên nhiều tần số, chúng thực thi chức năng RADAR, theo dõi hình ảnh/cảm biến ở nhiều tần số khác nhau hoặc kết hợp cùng nhau tại cùng thời điểm để đáp ứng bất kỳ ứng dụng nào theo yêu cầu. Bên cạnh ứng dụng RADAR, thiết bị



Hình 2. Cấu hình cơ bản của hệ thống JCAS kết hợp truyền thông và cảm biến.

cảm biến vô tuyến có thể dùng để thực hiện phân tích theo nguyên lý quang phổ. Sự thay đổi của tín hiệu trên các tần số tại thiết bị cảm biến vô tuyến cho phép xác định sự khác biệt giữa thành phần vật liệu trong vùng quan sát của thiết bị cảm biến vô tuyến.

Hình 2 tả một hệ thống cơ bản kết hợp giữa truyền thông và cảm biến JCAS (joint communication and sensing system) với khả năng định dạng búp sóng ăng ten, vừa truyền tải dữ liệu đến thiết bị của người dùng (UE) vừa cảm biến nhận dạng con người và các đối tượng khác.

Một cách để kết hợp truyền thông và cảm biến tầm ngắn trong cùng một hệ thống là sử dụng tín hiệu đường xuống được tiêu chuẩn hoá theo định dạng của tín hiệu kích hoạt. Ví dụ như các thành phần tín hiệu ghép kênh OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) trong hệ thống dựa trên truyền dẫn OFDM như 4G-LTE hoặc 5G-NR. Bằng cách này, ứng dụng cảm biến tầm ngắn có thể được sử dụng “miễn phí” mà hệ thống không cần dành riêng dung lượng cho mục đích này. Tuy nhiên, cần hết sức lưu ý lựa chọn dạng sóng và cơ chế ghép kênh chúng cho phù hợp, ví dụ như dạng sóng điều tần liên tục FMCW (frequency modulated continuous wave) và cơ chế ghép kênh theo tần số trực giao OFDM (orthogonal frequency-division multiplexing) được coi là lựa chọn tốt cho tối ưu các tham số như tỷ lệ công suất đỉnh trên công suất trung bình PAPR (Peak-to-Average-Power-Ratio), thông lượng dữ liệu và giao thức truyền

thông linh hoạt. Ngoài ra, các phương pháp làm giảm lượng thông tin mào đầu trong dữ liệu của ứng dụng cảm biến cũng cần phải được xem xét thêm.

Các tín hiệu thăm dò trong ứng dụng RADAR được phát đi trên tất cả các búp sóng ăng ten để tín hiệu thu về mang đầy đủ thông tin hình ảnh của khu vực được trạm vô tuyến bao phủ. Một búp sóng rất rộng trên giao diện không gian, hình thành từ các mảng

ăng ten (mMIMO) có thể được định dạng lại thành nhiều búp sóng hẹp với khả năng quét định kỳ, đây gọi là thủ tục quét tia sóng. Ngoài ra, với nhiều mảng ăng ten cho nhiều tia quét hơn, nó có thể phát đi và thu về nhiều tia hơn trong cùng một không gian hữu hạn, đây là chìa khoá để nâng cao độ chính xác của các ứng dụng cảm biến. Các phương pháp mới ứng dụng ML/AI để lập biểu đồ kênh được áp dụng cho các hệ thống lớn sử dụng mảng ăng ten sẽ càng cải thiện tốt hơn mức độ chính xác cho các ứng dụng cảm biến.

*
* *

Công nghệ 6G với khả năng khai thác dải tần mmWave và THz mở ra tiềm năng ứng dụng cách mạng trong nhiều lĩnh vực. Tiềm năng khai thác dải tần mmWave và THz không chỉ nâng cao hiệu suất truyền thông mà còn biến đổi căn bản cách thức kết nối và tương tác giữa con người với môi trường số, từ thành phố thông minh đến nhà máy tự động, từ xe tự hành đến thực tại ảo mở rộng. Mặc dù còn những thách thức về suy hao truyền sóng, tiêu thụ năng lượng và chi phí triển khai, việc kết hợp ML/AI trong mạng mật độ cao và công nghệ bán dẫn tiên tiến đang từng bước khắc phục các hạn chế này ✍