

TRUYỀN THÔNG VÔ TUYẾN 6G: CÁC ĐẶC ĐIỂM KÊNH TRUYỀN DẪN Ở BĂNG TẦN TERAHERTZ

● ĐOÀN BẢO SƠN

TÓM TẮT:

Thách thức của việc gia tăng lưu lượng truyền thông do sự trao đổi thông tin lớn đòi hỏi sự cải tiến mang tính đột phá về tốc độ truyền dữ liệu trong các hệ thống truyền thông vô tuyến hiện tại và tương lai. Mạng truyền thông 5G được triển khai hiện tại sẽ khó đáp ứng yêu cầu về tốc độ dữ liệu và độ trễ cực thấp của các ứng dụng này. Những thách thức này được coi là động lực quan trọng đối với sự phát triển của hệ thống truyền thông trong kỷ nguyên mới của mạng vô tuyến (mạng thế hệ thứ sáu, 6G). Truyền thông terahertz (THz) là công nghệ chủ chốt của 6G và có triển vọng ứng dụng rộng rãi. Nền tảng để thiết kế một hệ thống truyền thông không dây trong phổ tần mới và môi trường mới là các kênh vô tuyến, nên cần phải có các nghiên cứu về các kênh truyền vô tuyến THz cho các mạng truyền thông tương lai 6G. Bài báo này xem xét và phân tích các đặc điểm truyền dẫn chính của hệ thống truyền thông vô tuyến 6G.

Từ khóa: băng tần terahertz, mô hình truyền dẫn, truyền thông terahertz, vô tuyến.

1. Đặt vấn đề

Sau khi triển khai thương mại mạng thế hệ thứ năm (5G)/tiếp sau 5G (beyond 5G - B5G) với quy mô lớn, người ta đã bắt đầu xem xét rộng rãi hệ thống thông tin di động thế hệ thứ sáu (6G). Mạng 6G được kỳ vọng sẽ tiếp tục mang lại những thay đổi lớn đối với sản xuất và đời sống của con người. Công nghệ Terahertz (THz) và ánh sáng khả kiến có thể là cơ sở để 6G sử dụng các tài nguyên phổ tần mới cũng như phương pháp điều chế mới của mômen động lượng quỹ đạo, có kiến trúc 3D và quản lý tính di động thông minh để mở rộng phạm vi phủ sóng dựa trên sự tích hợp thông tin di động mặt đất và vệ tinh [1]. Mặc dù truyền thông sóng milimet (mmWave) (30 - 100 GHz) đã được chính thức phê duyệt trong các mạng di động 5G gần đây, nhưng nó khó hỗ trợ tốc độ dữ liệu ở mức Tbps vì băng thông

20 GHz có sẵn của nó. Truyền thông terahertz (THz) được coi là một công nghệ chính để đáp ứng các nhu cầu trong tương lai đối với mạng 6G [2]. Công nghệ truyền thông THz đang phát triển nhanh chóng và có những cải tiến trong lĩnh vực anten và kiến trúc bộ thu phát làm cho nó tiến gần hơn với thực tế. Phổ tần THz có thể được xem là khắc phục các vấn đề liên quan đến sự khan hiếm phổ tần và giới hạn dung lượng của các hệ thống vô tuyến hiện tại [3]. Để hiện thực hóa mạng 6G với những xu hướng mới này và khởi tạo công nghệ, các kênh vô tuyến 6G cơ bản cần được nghiên cứu toàn diện, vì các kênh này là nền tảng cho thiết kế hệ thống, tối ưu hóa mạng lưới và đánh giá hiệu suất của mạng 6G [4]. Vì vậy, nghiên cứu này xem xét và phân tích hệ thống truyền thông vô tuyến 6G chủ yếu tập trung vào các đặc điểm của kênh truyền dẫn.

2. Các chỉ số hiệu quả chủ yếu của mạng 6G

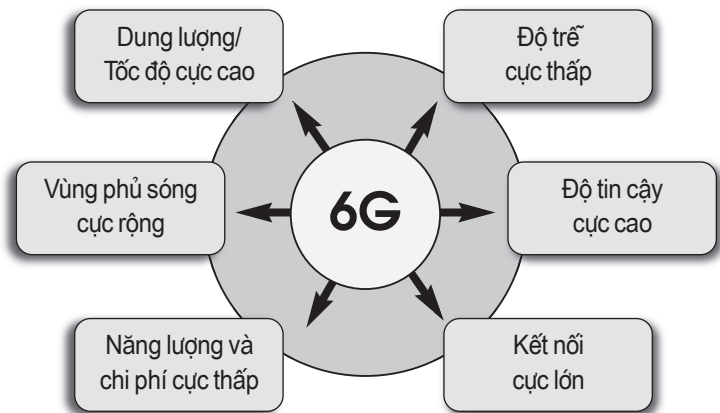
Trong các mạng vô tuyến hiện nay, cách thức tạo ra, chia sẻ và sử dụng các công nghệ thông tin và truyền thông sáng tạo đã kích thích sự cải tiến mang tính đột phá về tốc độ truyền dữ liệu. Tốc độ dữ liệu cao nhất dự kiến đạt 10 Gbps trong 5G và liên tục được cải thiện. Bên cạnh đó, nhờ sự hấp dẫn của mô hình Internet of Things (IoT), kết nối không dây cho phép một số lượng lớn thiết bị được kết nối ở mọi nơi trong tương lai. Theo xu hướng này, các tuyến Terabit trên giây (Tbps) dự kiến sẽ trở thành hiện thực trong thập kỷ tới [5]. Mạng 6G sẽ hỗ trợ các dịch vụ nâng cao như ảnh 3 chiều di động có độ trung thực cao và sao chép kỹ thuật số. Tất cả các dịch vụ này đều yêu cầu tốc độ mạng và độ ổn định mà hệ thống 5G không thể cung cấp. Để đáp ứng các dịch vụ này, cần phải thỏa mãn 3 tham số: hiệu suất, kiến trúc và độ tin cậy [6].

Các yêu cầu đối với công nghệ vô tuyến được 6G hiện thực hóa thông qua quá trình phát triển 5G được thể hiện trong Hình 1. Cùng với các yêu cầu cao hơn của 5G, các yêu cầu mới chưa được xem xét trong 5G đã được bổ sung và chúng được mở rộng hơn. Hơn nữa, cũng như với 5G, không phải tất cả các yêu cầu đều cần được đáp ứng cùng một lúc, nhưng sẽ cần có sự liên kết các yêu cầu mới đối với các dịch vụ mới trong tương lai [7].

Việc thiết kế hệ thống mạng 6G dựa trên các chỉ số hiệu quả chính (KPI). Các giá trị dự kiến đã xuất hiện trong thực tế gần đây khi Bộ phận Tiêu chuẩn hóa Viễn thông của ITU (ITU-T) đang thực hiện trên một tập hợp các khuyến nghị chính thức cho các chỉ số KPI [8]. Bảng 1 cho thấy các giá trị này và đối chiếu chúng với các chỉ số liên quan đến 5G. Các KPI này đóng vai trò là thước đo cơ bản để đánh giá hiệu quả hệ thống. Đặc biệt, chúng ta quan tâm đến các loại KPI sau đây [8]:

1) *Dung lượng hệ thống (System Capacity)*: Loại KPI này chủ yếu đề cập đến các số liệu liên quan đến thông lượng hệ thống. Tốc độ dữ liệu cao nhất, tốc độ dữ liệu trải nghiệm, hiệu suất phổ đỉnh, hiệu

Hình 1: Các yêu cầu đối với công nghệ vô tuyến 6G (7)



Bảng 1. Sự tiến hóa từ các hệ thống vô tuyến 5G đến 6G (8)

Các chỉ số hiệu quả chủ yếu (KPI)	5G	6G
Dung lượng (Capacity)		
Tốc độ đỉnh (Gbps)	20	1000
Tốc độ trải nghiệm (Gbps)	0,1	1
Hiệu suất phổ đỉnh (b/s/Hz)	30	60
Hiệu suất phổ trải nghiệm (b/s/Hz)	0,3	3
Băng thông kênh cực đại (GHz)	1	100
Dung lượng lưu lượng vùng phủ (Mbps/m ²)	10	1000
Mật độ kết nối (devices/km ²)	10 ⁶	10 ⁷
Độ trễ (Latency)		
Độ trễ End-to-end (ms)	1	0,1
Trễ Jitter (ms)	NA	10 ⁻³
Quản lý (Management)		
Hiệu suất năng lượng (Tb/J)	NA	1
Độ tin cậy (Tỷ lệ lỗi gói)	10 ⁻⁵	10 ⁻⁹
Khả năng di động (km/h)	500	1000

suất phổ trải nghiệm, băng thông kênh tối đa, dung lượng lưu lượng truy cập khu vực và mật độ kết nối là các chỉ số trong lớp này. Trong trường hợp này, các chỉ số về tốc độ dữ liệu trải nghiệm và hiệu suất phổ đề cập đến các giá trị phải được đảm bảo cho 95% tất cả các vị trí của người dùng.

2) *Độ trễ hệ thống (System Latency)*: Chỉ số độ trễ từ đầu đến cuối, cùng với độ jitter trễ là các chỉ số trong loại KPI này. Jitter là một KPI mới cho 6G

để định lượng các biến về độ trễ trong hệ thống và nó không được đề cập trong các hệ thống 5G.

3) *Quản lý hệ thống (System Management)*: Loại KPI này chủ yếu liên quan đến các số liệu chỉ ra việc quản lý và điều phối mạng như hiệu quả năng lượng, độ tin cậy và tính di động. Đặc biệt, mạng 6G giới thiệu hiệu suất năng lượng mục tiêu là 1 Tb/J trong khi hệ thống 5G không chỉ định KPI mục tiêu cho chỉ số hiệu quả năng lượng.

3. Truyền thông terahertz

3.1. Đặc điểm của băng tần terahertz

Truyền thông terahertz (THz) là một trong những công nghệ quan trọng nhất của hệ thống 6G và có triển vọng ứng dụng rộng rãi. Bên cạnh đó, dải tần rộng, tốc độ cao, khả năng định hướng tốt, bảo mật cao, tán xạ thấp và thâm nhập tốt là những đặc điểm của tín hiệu terahertz. Dải tần 0,1 - 10 THz có nhiều tài nguyên phổ tiềm năng hơn và dải tần siêu rộng cho truyền thông tốc độ siêu cao, đặc biệt, có thể giảm bớt sự khan hiếm phổ và giới hạn dung lượng của các hệ thống truyền thông không dây hiện có [9]. Hệ thống THz thuận tiện hơn các dải tần khác ở chỗ có băng thông dồi dào. Tuy nhiên, việc chuyển sang các tần số cao hơn có xu hướng bị hạn chế. Ở tần số THz: a) suy hao đường truyền và phản xạ cao, b) độ sẵn sàng của các tuyến Line-of-Sight (LoS) mang tính ngẫu nhiên, và c) sự hấp thụ phân tử. Suy hao đường truyền và phản xạ là những đặc tính vốn có của các tần số tín hiệu cao hơn. Trên thực tế, những suy hao này tương tự như ở tần số mmWave, nhưng chúng rõ ràng hơn ở tần số THz. Mặc dù, sự hấp thụ phân tử và các tuyến LoS hẹp có giới hạn có các đặc tính chính đặc biệt đối với dải THz [10]. Dung lượng của truyền thông di động 6G sẽ được tăng lên bằng

cách thêm băng tần THz (275 GHz - 3THz) vào băng tần mmWave (30 - 300 GHz). Băng tần trong phạm vi 275 GHz - 3 THz vẫn chưa được phân bổ cho bất kỳ mục đích nào trên toàn thế giới; do đó, băng tần này có tiềm năng đạt được tốc độ dữ liệu cao mong muốn. (Hình 2)

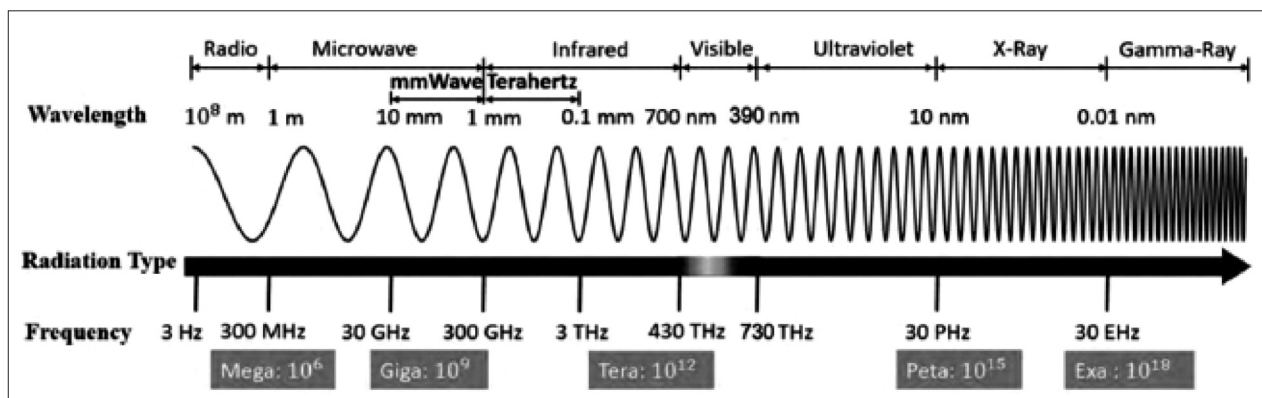
3.2. Sự khác biệt so với truyền thông trong các băng tần thông thường

Truyền thông ở tần số mmWave/THz khác biệt đáng kể so với truyền thông ở tần số vô tuyến thông thường. Điều này liên quan đến các yếu tố chính như sau [12]:

1) *Tắc nghẽn tín hiệu (Signal Blockage)*: Khả năng bị nghẽn tín hiệu mmWave/THz cao hơn các tín hiệu ở tần số thấp hơn. Truyền thông mmWave/THz chủ yếu dựa vào sự sẵn có của các tuyến tầm nhìn thẳng (LOS) do đặc điểm lan truyền rất kém của các tuyến không theo tầm nhìn thẳng (NLOS) [13]. Những tín hiệu này có thể dễ dàng bị chặn bởi các tòa nhà, xe cộ, con người và thậm chí cả tán lá. Một sự tắc nghẽn duy nhất có thể dẫn đến suy hao 20 - 40 dB. Hơn nữa, các tín hiệu mmWave/THz cũng bị tự tắc nghẽn do bản thân người sử dụng gây suy giảm khoảng 20 - 35 dB [14]. Do đó, cần phải đánh giá ảnh hưởng của tắc nghẽn trong các mô hình phân tích mạng truyền thông vô tuyến mmWave / THz [12].

2) *Hướng tính cao (High Directivity)*: Hướng tính cao là tính năng chính thứ hai của truyền thông mmWave/THz. Suy hao đường truyền ở các tần số cao này có thể được khắc phục bằng cách sử dụng một số lượng lớn các anten ở phía máy phát và / hoặc phía máy thu [13]. Đặc biệt, có thể sử dụng một số lượng lớn các anten ở dạng nhỏ, vì anten ở các tần số này nhỏ hơn các anten ở tần số thông

Hình 2: Phổ tần và bước sóng của sóng terahertz (11)



thường do bước sóng nhỏ hơn. Một mảng anten lớn được sử dụng để thiết lập tuyến truyền thông có hướng tính cao. Độ lợi định dạng chùm cao có độ rộng chùm tia nhỏ làm tăng cường độ tín hiệu của các tuyến phục vụ trong khi nhiễu được giảm ở các máy thu. Tuy nhiên, hướng tính cao cũng gây ra vấn đề “deafness” và độ trễ.

3) *Hấp thụ khí quyển (Atmospheric Absorption)*: Khi sóng điện từ lan truyền trong khí quyển, các phân tử của các thành phần khí quyển bao gồm oxy và nước sẽ hấp thụ chúng. Do đó, suy hao đường truyền là khó tránh khỏi. Những tổn thất này lớn hơn ở một số tần số nhất định, trùng với tần số cộng hưởng cơ học của các phân tử khí [15]. Trong dải mmWave và THz, suy hao khí quyển chủ yếu là do các phân tử nước và oxy trong khí quyển, tuy nhiên, không có ảnh hưởng nổi bật của suy hao khí quyển ở các tần số microwave. Những suy hao này tiếp tục hạn chế khoảng cách truyền mmWave/THz và giảm vùng phủ sóng của chúng. Do đó, hệ thống thông tin THz yêu cầu quy hoạch trạm gốc dày đặc hơn nhiều [12].

4. Đặc điểm kênh truyền sóng

4.1. Các kênh truyền dẫn mmWave và terahertz

Sóng milimet (mmWave) có dải tần 30 - 300 GHz và terahertz nằm trong dải tần 0,1 - 10 THz. Do đó, băng tần 100 - 300 GHz có một số đặc điểm chung với mmWave và terahertz, như băng thông lớn, hướng tính cao, suy hao đường truyền lớn, hiệu ứng tắc nghẽn, hấp thụ khí quyển và tán xạ khuếch tán nhiều hơn [16]. Trong khi, mmWave được đề xuất để đạt được tốc độ truyền dữ liệu cấp gigabyte trên giây lên đến vài trăm mét với băng thông vài gigahertz, terahertz đạt được tốc độ truyền dữ liệu cấp terabyte trên giây lên đến hàng chục mét với băng thông vài chục gigahertz. Các tần số THz có suy hao đường truyền, hấp thụ khí quyển và tán xạ khuếch tán cao hơn so với các dải mmWave. Kênh mmWave đã được đánh giá ở một số dải tần điển hình, đó là dải tần 26/28-, 32-, 38/39-, 60- và 73-GHz. [4].

Theo lý thuyết thông tin vô tuyến, khi sử dụng các anten có độ lợi không đổi, suy hao đường truyền trong không gian tự do tăng với f^2 , trong đó f là tần số sóng mang và giảm với f^2 khi sử dụng các anten có diện tích không đổi ở cả 2 đầu cuối. Do đó, các anten có hướng tính cao có thể gây ra suy hao đường truyền trong không gian tự do đối với một hệ số hình thức nhất định. Điều này đã thúc đẩy nhu

cầu về mảng MIMO lớn ở tần số mmWave và mảng MIMO siêu lớn ở tần số THz. Trong dải mmWave, khí quyển có thể hấp thụ (tùy thuộc vào f), làm suy giảm tín hiệu nhận được dưới dạng $\exp(-\alpha_{atm}d)$, trong đó d là khoảng cách giữa trạm gốc và thiết bị của người dùng. Hệ số suy hao, α_{atm} , phụ thuộc vào f , cũng như các điều kiện khí quyển, chẳng hạn như sương mù và mưa. Suy hao khí quyển trong dải THz cao hơn nhiều so với dải mmWave [17].

4.2. Mô hình kênh trong dải terahertz

Trong dải THz, các đặc tính của kênh khá khác biệt so với các đặc tính của dải tần thấp hơn (mmWave và cmWave) và cao hơn (hồng ngoại và ánh sáng nhìn thấy). Do đó, mặc dù các mô hình kênh tần số thấp hơn đã được đề xuất [2], những phương pháp này không thể áp dụng cho các kênh THz mà cần được sửa đổi và điều chỉnh để mô tả chính xác các đặc trưng của tín hiệu terahertz, bao gồm các hiện tượng hấp thụ phân tử mạnh và kết quả là các cửa sổ quang phổ thích ứng với cự ly [18], chọn lọc tần số và tạo ra các hiệu ứng mở rộng thời gian [19]. Các phương pháp nghiên cứu cho mô hình kênh vô tuyến vật lý có thể được phân thành các phương pháp tiếp cận xác định, ngẫu nhiên (hoặc thống kê) và kết hợp.

- Phương pháp xác định giải quyết (gần đúng) các phương trình Maxwell trong một môi trường nhất định và có thể đạt được độ chính xác cao, nhưng cần dữ liệu chi tiết về dạng hình học và đặc tính điện từ (hằng số điện môi, hệ số suy hao) của môi trường và có độ phức tạp tính toán cao [2].

- Các mô hình kênh thống kê chủ yếu dựa trên các phép đo và mô tả các loại môi trường (ví dụ: môi trường văn phòng trong nhà) hơn là các vị trí cụ thể. Trong khi việc tham số hóa các mô hình như vậy từ các phép đo đòi hỏi nhiều công sức, việc tạo ra các mô hình thực có độ phức tạp thấp hơn nhiều so với các mô hình xác định. Do đó, các mô hình kênh xác định phù hợp cho việc quy hoạch triển khai, trong khi các mô hình thống kê thích hợp cho việc phát triển và thử nghiệm các hệ thống không dây.

- Các mô hình kênh hỗn hợp, kết hợp các phương pháp xác định và thống kê có sự cân bằng giữa độ chính xác và hiệu quả. Ví dụ, các đường truyền ưu thế trong phổ THz, chẳng hạn như LoS và các đường truyền phản xạ, được ghi lại riêng lẻ dựa trên phương pháp xác định, trong khi các

đường truyền dẫn khác, chẳng hạn như đường truyền dẫn tán xạ và nhiễu xạ, có thể được tạo ra theo thống kê [2].

4.3. Mô hình suy hao truyền dẫn tại các tần số mmWave và THz

Các đặc tính mức độ rộng, bao gồm suy hao đường truyền và fading che bóng, đặc trưng cho sự biến đổi của công suất thu khi vị trí của máy phát (Tx), máy thu (Rx) hoặc cả hai, thay đổi. Hiện tượng fading che bóng, thường là do sự che chắn của các chướng ngại vật, mô tả sự thay đổi công suất thu (khi được tính trung bình trên fading ở quy mô nhỏ) xung quanh suy hao đường truyền. Suy hao đường truyền có thể do một hoặc nhiều tác động vật lý gây ra ảnh hưởng đến các thành phần đa đường khác nhau truyền từ Tx đến Rx. Những hiệu ứng này, như suy hao đường dẫn trong không gian tự do, suy hao phản xạ, tán xạ khuếch tán và nhiễu xạ, tất cả đều phụ thuộc vào tần số và có thể dẫn đến suy hao đường truyền dẫn cao hơn ở tần số THz. So với tần số thấp hơn, suy hao khí quyển và tán xạ khuếch tán đáng quan tâm ở dải tần này [2].

1) *Suy hao trải trễ*: Suy hao trải trễ tăng theo bậc hai với tần số, nếu khẩu độ của anten thu hẹp khi tần số tăng ở cả hai đầu cuối trong khi độ lợi của anten không phụ thuộc vào tần số, đã được định nghĩa bởi định luật Friis. Ngoài ra, suy hao trải trễ này giảm theo bình phương tần số, khi xem xét các anten có diện tích vật lý không đổi và độ lợi phụ thuộc vào tần số ở cả 2 đầu cuối. Nói chung, suy hao đường truyền dẫn trong không gian tự do của tuyến vô tuyến THz dài 10m trên 100 dB [20], đã tạo ra những thách thức đáng kể.

Độ trải trễ phụ thuộc vào các mẫu anten cụ thể mà các phép đo được thực hiện. Hai đại lượng thường được sử dụng: (i) trải trễ đa hướng, giả định anten đa hướng (hoặc thậm chí là đẳng hướng) ở cả hai đầu cuối và (ii) trải trễ có hướng, là trải trễ gặp phải khi sử dụng anten định hướng ở cả hai kết cuối [2]. Trễ Doppler tỷ lệ thuận với tần số và tốc độ của người dùng, ở tần số mmWave cao hơn đáng kể so với tần số dưới 6 GHz. Ví dụ: trễ Doppler ở 30 GHz và 60 GHz cao hơn 10 và 20 lần so với 3 GHz [12].

Suy hao trải trễ tín hiệu Terahertz do kéo dẫn tín hiệu có thể được tính bằng công thức Friis dưới dạng hàm của tần số tín hiệu, khoảng cách truyền và tốc độ ánh sáng dưới dạng phương trình (1):

$$PL_{spr}(f, d) = 20 \log \left(\frac{4\pi fd}{c} \right) \quad (1)$$

Trong biểu thức (1), f là tần số tín hiệu, d là khoảng cách giữa máy phát và máy thu, và c là tốc độ ánh sáng.

2) *Suy hao khí quyển*: Suy hao hấp thụ phân tử do các phân tử khí phân cực trong môi trường truyền sóng hấp thụ năng lượng sóng THz. Cả hiệu ứng trải trễ và hiệu ứng khí quyển đều làm suy giảm truyền sóng THz. Ở tần số THz, chủ yếu hơi nước và các phân tử oxy tạo ra các đỉnh hấp thụ và hình thành các cửa sổ phổ. Các cửa sổ phổ này trải dài trên các băng thông đa GHz, phụ thuộc nhiều vào khoảng cách [21]. Suy hao trong khí quyển không xuất hiện ở tần số microwave, nhưng suy hao này do các phân tử oxy ở sóng mmWave, hơi nước và các phân tử carbon dioxide [22]. Mặc dù suy hao này không đáng kể ở tần số thấp hơn (sub-6 GHz), nhưng sóng tần số cao hơn bị suy giảm đáng kể vì bước sóng của chúng có thể so sánh với kích thước của các hạt bụi, gió, tuyết và các thành phần khí. Hai loại khí hấp thụ chính ở tần số mmWave là oxy (O_2) và hơi nước (H_2O) [12]. Bản chất vật lý của sự hấp thụ này - còn được gọi là sự hấp thụ phân tử - là các sóng điện từ có tần số cụ thể kích thích các phân tử không khí gây ra rung động bên trong, trong đó một phần năng lượng của sóng truyền được chuyển thành động năng và mất đi. Các phân tích trên khẳng định rằng việc lựa chọn băng tần phải được điều chỉnh cẩn thận cho phù hợp với khoảng cách dự kiến giữa trạm gốc và thiết bị của người dùng [17].

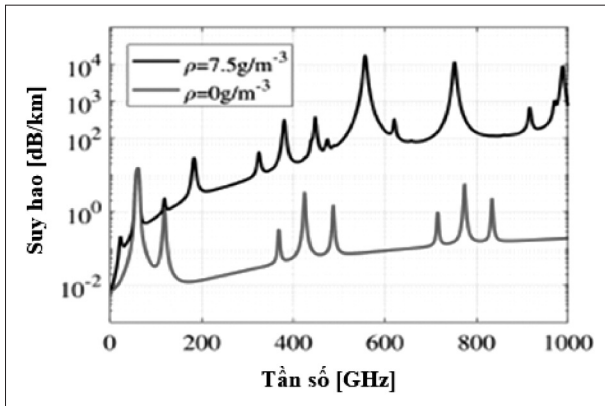
Suy hao hấp thụ $PL_{abs}(f, d)$ do hấp thụ phân tử tín hiệu terahertz có thể được viết như biểu thức (2):

$$PL_{abs}(f, d) = 10 \cdot \beta_m(f) \cdot d \cdot \log_{10} e \quad (2)$$

Trong đó: $\beta_m(f)$ là hệ số hấp thụ phân tử. Hệ số hấp thụ phân tử của môi trường đối với tín hiệu có tần số f phụ thuộc vào nhiệt độ, áp suất và thành phần trung bình của các phân tử.

Hình 3 cho thấy suy hao khí quyển trong dải THz rõ rệt hơn so với suy hao trong dải microwave hoặc mmWave. Ngoài ra, có một số đỉnh suy hao, như $f = 60$ GHz, 120 GHz, 183 GHz, 325 GHz, 380 GHz,... nên tránh khi thiết kế hệ thống thông tin cho khoảng cách trung bình hoặc xa hơn. Thay vào đó, các cửa sổ phổ giữa các đỉnh suy hao có lợi hơn cho mục đích này. Hơn nữa, đối với các tần số lên đến 300 GHz, suy hao trong khí quyển thấp hơn 10 dB/km. Tuy nhiên, đối với tần số cao hơn, đặc biệt là đối với tần số trên 600 GHz, tác động

Hình 3: Suy hao khí quyển (2)



này nghiêm trọng hơn nhiều và do đó cần được xem xét thích hợp ngay cả đối với khoảng cách ngắn hơn [2].

3) *Suy hao tán xạ và phản xạ*: Khi sóng điện từ tác động lên các bề mặt gồ ghề, sự tán xạ khuếch tán được tạo ra, ở đó các đường truyền dẫn phân tán đi theo các hướng khác nhau. Điều này là do khi bước sóng giảm xuống còn mm và sub-mm ở tần số THz, có thể so sánh với độ gồ ghề bề mặt của các vật thể thông thường. Suy hao do phản xạ phụ thuộc vào độ dày điện của bề mặt vật thể và tần số. Cụ thể, cả độ lệch tiêu chuẩn chiều cao và chiều dài tương quan của bề mặt gồ ghề đều ảnh hưởng đến công suất tập trung dọc theo hướng đó. Mức công suất tán xạ bị ảnh hưởng nhiều hơn bởi thông số chiều cao hiệu dụng, thông số này giảm dần theo tần số. Bên cạnh đó, độ rộng chùm tia tán xạ liên quan nhiều hơn đến tham số tương quan bề mặt, tỷ lệ với tần số. Khi tần số rất lớn và độ gồ ghề nghiêm trọng, bề mặt gồ ghề sẽ khuếch tán đồng đều ra mọi hướng [22]. Suy hao tín hiệu do tán xạ phân tử và hạt trong môi trường truyền LOS có thể được tính toán bằng cách sử dụng hệ số tán xạ $\alpha_{scat}(f)$ như định luật Beer-Lambert nghịch đảo theo phương trình (3):

$$PL_{scat}(f, d) = 10 \cdot \alpha_{scat}(f) \cdot d \cdot \log_{10} e \quad (3)$$

Ở tần số thấp hơn, hiện tượng phản xạ là đáng kể, trong khi hiện tượng tán xạ là không đáng kể vì hầu hết các bề mặt đều nhẵn so với sóng. Kết quả là, phản xạ nổi trội hơn ở các dải mmWave thấp hơn trong khi độ tán xạ ở mức vừa phải. Tuy nhiên, khi tần số tăng trong dải THz, sự tán xạ trở nên đáng kể vì độ gồ ghề trên bề mặt của các bức tường và địa hình xây dựng có thể so sánh với

bước sóng mang. Do đó, các thành phần tín hiệu phản xạ tại THz ít đáng kể hơn so với các đường tán xạ [12].

4) *Xác suất nhiễu xạ, fading che bóng và LOS*: Khi tần số sóng tăng, hiệu suất nhiễu xạ giảm do che khuất bởi các bức tường xây dựng hoặc người và các chướng ngại vật khác. Trong thực tế, đường nhiễu xạ thường có thể được bỏ qua trừ khi máy thu được đặt trong một vùng rất kín gần ranh giới bóng tối. Hơn nữa, phương sai fading che bóng trở nên đáng chú ý hơn trong các trường hợp tần số cao hơn, do suy hao nhiễu xạ lớn hơn. Hiệu ứng che bóng, kích thước của vùng Fresnel đầu tiên, giảm theo căn bậc hai của bước sóng. Mặc dù, xác suất tầm nhìn thẳng (LoS) về cơ bản không phụ thuộc vào tần số, công suất truyền giảm gần như đồng nhất với sự gia tăng của tần số khi tín hiệu gặp vật thể [22]. Hiệu ứng fading che bóng thường được đặc trưng bởi một biến ngẫu nhiên có phân phối Gaussian trung bình bằng 0, với độ lệch chuẩn (σ_{SF}). Các giá trị σ_{SF} dưới 1 dB ở môi trường trong nhà, thấp hơn so với môi trường bên ngoài.

5) *Nhiều hấp thụ*: Ngoài suy hao công suất tín hiệu, sự hấp thụ phân tử tạo ra rung động bên trong các phân tử, dẫn đến phát ra bức xạ điện từ có cùng tần số với tần số của sóng tới gây ra rung động này. Kết quả tạo ra nhiễu xen vào, được gọi là nhiễu hấp thụ, được tạo ra bởi sự hấp thụ phân tử. Các mô hình thường sử dụng nhiệt độ nhiễu tương đương của môi trường xung quanh do hấp thụ phân tử [12]. Nhiễu phân tử $PL_{noise}(f, d)$ do năng lượng phóng điện phân tử có thể được xác định bằng phương trình (4):

$$PL_{Noise}(f, d) = 10 \cdot \log_{10}[K_B \cdot W \cdot \theta_n(f, d)] \quad (4)$$

Trong biểu thức (4), W là băng thông kênh, K_B là hằng số Boltzmann (1.380649×10^{-23} J/K) và θ_n là nhiệt độ nhiễu.

Suy hao đường truyền tín hiệu THz là thành phần chính trong thiết kế và giải thích các tuyến truyền dẫn vô tuyến. Suy hao đường truyền tín hiệu có thể xảy ra do một số hiệu ứng như suy hao truyền dẫn không gian tự do hoặc suy hao trải tín hiệu, suy hao hấp thụ do tương tác tín hiệu với các phân tử trong khí quyển vì cộng hưởng phân tử do ôxy và hơi nước trong khí quyển. Suy hao đường truyền tín hiệu THz tỷ lệ thuận với tần số tín hiệu truyền, khoảng cách giữa máy phát và máy thu và thành phần môi trường trong truyền dẫn vô tuyến. Suy hao đường truyền tổng cộng của tín hiệu THz là $PL_{Total}(f, d)$ bao gồm hàm suy hao trải trễ $PL_{spt}(f,$

d), hàm suy hao hấp thụ $PL_{spr}(f, d)$, hàm suy hao tán xạ $PL_{scat}(f, d)$ và hàm nhiễu $PL_{Noise}(f, d)$ như biểu thức (5) [3]:

$$PL_{Total}(f, d) = PL_{spr}(f, d) + PL_{abs}(f, d) + PL_{scat}(f, d) + PL_{Noise}(f, d) \quad (5)$$

5. Kết luận

Nghiên cứu này đã phân tích tổng quan về các kênh truyền thông vô tuyến THz, bao gồm truyền thông terahertz và mô tả đặc tính kênh truyền 6G.

Các đặc tính truyền dẫn của sóng mmWave và sub-mmWave (THz) phụ thuộc vào các điều kiện khí quyển và khí hậu thay đổi thường xuyên và do đó, rất khó dự đoán. Do đó, mô hình kênh của dải tần này tương đối phức tạp và đối với dải phổ này vẫn chưa có bất kỳ mô hình kênh hoàn hảo nào. Kết quả nghiên cứu này gợi mở ra những vấn đề cho các hướng nghiên cứu trong tương lai liên quan đến kênh vô tuyến THz ■

TÀI LIỆU THAM KHẢO:

1. You, X., et al. (2021). Towards 6G wireless communication networks: Vision, enabling technologies, and new paradigm shifts. *Science China Information Sciences*, 64(1), 1-74.
2. Han, C., et al. (2021). *Terahertz Wireless Channels: A Holistic Survey on Measurement, Modeling, and Analysis*. arXiv:2111.04522v1 [cs.IT] 8 Nov 2021.
3. Shah, S. and M. Ashraf (2018). Signal path loss measurement for future terahertz wireless propagation links. *International Journal of Engineering Works*, 5(10), 193-197.
4. Wang, C.-X., et al. (2020). 6G wireless channel measurements and models: Trends and challenges. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 15(4), 22-32.
5. Akyildiz, I.F., C. Han, and S. Nie (2018). Combating the distance problem in the millimeter wave and terahertz frequency bands. *IEEE Communications Magazine*, 56(6), 102-108.
6. Slalmi, A., et al. (2021). Toward 6G: Understanding network requirements and key performance indicators. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 32(3), e4201.
7. NTT Docomo, I. (2021). *White Paper "5G Evolution and 6G"*. Japan: NTT Docomo, INC.
8. Akyildiz, I.F., A. Kak, and S. Nie (2020). 6G and beyond: The future of wireless communications systems. *IEEE Access*, 8, 133995-134030.
9. Ji, B., et al. (2021). Several key technologies for 6G: Challenges and opportunities. *IEEE Communications Standards Magazine*, 5(2), 44-51.
10. Chaccour, C., et al. (2021). *Seven defining features of terahertz (THz) wireless systems: A fellowship of communication and sensing*. arXiv preprint arXiv:2102.07668.
11. Alsharif, M.H., et al. (2021). Toward 6G communication networks: Terahertz frequency challenges and open research issues. *Computers, Materials & Continua*, 66(3), 2831-2842.
12. Tripathi, S., et al. (2021). *Millimeter-wave and Terahertz Spectrum for 6G Wireless*. arXiv preprint arXiv:2102.10267.
13. Boccardi, F., et al. (2014). Five disruptive technology directions for 5G. *IEEE communications magazine*, 52(2), 74-80.
14. Hemadeh, I.A., et al. (2017). Millimeter-wave communications: Physical channel models, design considerations, antenna constructions, and link-budget. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(2), 870-913.
15. Marcus, M. and B. Pattan (2005). Millimeter wave propagation: spectrum management implications. *IEEE Microwave Magazine*, 6(2), 54-62.
16. Huang, J., et al. (2018). 5G millimeter wave channel sounders, measurements, and models: Recent developments and future challenges. *IEEE Communications Magazine*, 57(1), 138-145.
17. Tataria, H., et al. (2021). 6G wireless systems: Vision, requirements, challenges, insights, and opportunities. *Proceedings of the IEEE*, (99):1-34

18. Jornet, J.M. and I.F. Akyildiz (2013). Fundamentals of electromagnetic nanonetworks in the terahertz band. *Foundations and Trends® in Networking*, 7(2-3), 77-233.
19. Han, C., A.O. Bicen, and I.F. Akyildiz (2014). Multi-ray channel modeling and wideband characterization for wireless communications in the terahertz band. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 14(5), 2402-2412.
20. Guan, K., et al. (2019). Measurement, simulation, and characterization of train-to-infrastructure inside-station channel at the terahertz band. *IEEE transactions on terahertz science and technology*, 9(3): p. 291-306.
21. Han, C. and Y. Chen (2018). Propagation modeling for wireless communications in the terahertz band. *IEEE Communications Magazine*, 56(6), 96-101.
22. Han, C., et al. (2019). *Terahertz communications (TeraCom): Challenges and impact on 6G wireless systems*. arXiv preprint arXiv:1912.06040.

Ngày nhận bài: 10/1/2022

Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 10/2/2022

Ngày chấp nhận đăng bài: 20/2/2022

Thông tin tác giả:

ThS. ĐOÀN BẢO SƠN

Học viện Hàng không Việt Nam

6G WIRELESS COMMUNICATIONS: PROPAGATION CHANNEL CHARACTERISTICS OF TERAHERTZ BAND

● Master. **DOAN BAO SON**
Viet Nam Aviation Academy

ABSTRACT:

The challenge of increasing communication traffic due to the massive exchange of information require revolutionary enhancement of data transmission rates in current and future wireless communication systems. The present deployed fifth-generation (5G) wireless technology in communications will find it difficult to satisfy the data rates and ultra-low latency requirements of these applications. These challenges are considered a critical driver toward the development of communication systems to a new era of wireless network, the sixth-generation (6G) wireless technology. THz communication technology is a key technology of 6G and has broad application prospects. Since wireless channels are the foundation for designing a wireless communication system in the new spectrum and new environments, it is imperative to study the THz radio propagation channels for 6G wireless technology in communications. This article reviews and analyzes key propagation characteristics of 6G wireless communications.

Keywords: terahertz band, propagation model, terahertz communication, wireless.