

# Trên sóng milimet và Đài di động THz

## Kênh di chuyển đường sắt thông minh

Ke Guan Thành viên, IEEE, Guangkai Li Thành viên sinh viên, IEEE, Thomas K"urner Thành viên cấp cao, IEEE, Andreas F. Molisch Fellow, IEEE, Bile Peng, Ruisi He Member, IEEE, Bing Hui, Junhyeong Kim, và Zhangdui Zhong Senior Member, IEEE

Tóm tắt—Là một mô hình giao thông xanh và hiệu quả được thừa nhận rộng rãi, giao thông đường sắt được kỳ vọng sẽ phát triển thành một kỷ nguyên mới của "di động đường sắt thông minh", nơi cơ sở hạ tầng, tàu hỏa và hành khách sẽ được kết nối với nhau để đạt được khả năng di chuyển tối ưu, an toàn cao hơn và chi phí thấp hơn. Do đó, cần có kết nối không dây tốc độ dữ liệu cao liền mạch với băng thông lên đến hàng chục GHz. Yêu cầu băng thông khổng lồ như vậy thúc đẩy việc khám phá các dải sóng milimet (mm) và Terahertz (THz) chưa được sử dụng đúng mức. Trong bài báo này, các động lực phát triển thông tin liên lạc bằng sóng milimet và THz cho đường sắt được làm rõ bằng cách xác định trước tiên các ứng dụng và kịch bản cần thiết cho tính di động của đường sắt thông minh. Các mô phỏng dò tia ở 100 GHz ngụ ý rằng để hình thành các chùm ăng ten định hướng có mức tăng cao, các chiến lược tạo chùm động và thiết kế chuyển giao nâng cao là rất quan trọng đối với tính khả thi của truyền thông THz để cho phép di chuyển đường sắt thông minh.

Thuật ngữ chỉ mục —sóng milimet, kênh vô tuyến, thông tin liên lạc đường sắt, thông tin liên lạc THz

Đối với tính di động của đường sắt thông minh, thông tin liên lạc đường sắt được yêu cầu phát triển từ việc chỉ xử lý các ứng dụng báo hiệu quan trọng, sang các ứng dụng tốc độ dữ liệu cao khác nhau: giám sát video độ phân giải cao (HD) trên tàu và trên đường, kết nối tốc độ dữ liệu cao theo thời gian thực trên tàu, thông tin vận hành tàu, video HD điều phối tàu theo thời gian thực và thông tin về hành trình. Các ứng dụng này có thể được thực hiện trong các tình huống đường sắt khác nhau. Các yêu cầu về băng thông khổng lồ – lên đến hàng chục GHz – trong các tình huống này tạo thành động lực mạnh mẽ để phát triển truyền thông sóng milimet (mm) và THz vì chúng có thể cung cấp các đơn đặt hàng có băng thông lớn hơn so với phân bổ không dây hiện tại và cho phép các mảng ăng ten có chiều rất cao cho tăng thêm thông qua định dạng chùm [4]. Để hỗ trợ hiệu quả cho việc thiết kế, mô phỏng và phát triển các hệ thống thông tin liên lạc bằng sóng mm và THz, cần phải hiểu đầy đủ về các đặc tính của kênh truyền.

### I. GIỚI THIỆU

Ngày nay, vận tải đường sắt đã trở thành một mô hình vận tải xanh và hiệu quả quan trọng, bởi vì nó cung cấp khối lượng rất lớn, tiết kiệm năng lượng hơn, tác động môi trường thấp hơn đáng kể và ít tốn kém hơn để xây dựng so với các phương thức vận tải khác [1]. Để đạt được các mục tiêu về hiệu quả, an toàn và tiện lợi, vận tải đường sắt dự kiến sẽ phát triển thành một kỷ nguyên mới của "di động đường sắt thông minh", nơi cơ sở hạ tầng, tàu hỏa, hành khách và hàng hóa sẽ ngày càng được kết nối với nhau [2]. Để hiện thực hóa tầm nhìn này, cần phải hiện thực hóa kết nối không dây tốc độ dữ liệu cao liền mạch trong giao thông đường sắt, đây là yếu tố chính cho các thể hệ Hệ thống Giao thông Thông minh (ITS) mới [3].

Công trình này được hỗ trợ bởi Viện Xúc tiến Công nghệ Thông tin & Truyền thông (IITP) tài trợ bởi chính phủ Hàn Quốc (MSIP) (Số R0101-15-244, Phát triển công nghệ truyền thông di động 5G cho các dịch vụ thông minh siêu kết nối) và D151100000115004 (Ủy ban khoa học và công nghệ Bắc Kinh).

Bản quyền (c) 2015 IEEE. Việc sử dụng cá nhân tài liệu này được chấp nhận. Tuy nhiên, phải xin phép IEEE để sử dụng tài liệu này cho bất kỳ mục đích nào khác bằng cách gửi yêu cầu tới pubs-permissions@ieee.org.

Ke Guan, Guangkai Li, Ruisi He và Zhangdui Zhong đang làm việc tại Phòng thí nghiệm Trọng điểm Nhà nước về Kiểm soát và An toàn Giao thông Đường sắt, Đại học Giao thông Bắc Kinh, 100044 Bắc Kinh, Trung Quốc (e-mail: kguan@bjtu.edu.cn). Tác giả tương ứng: Bile Peng, e-mail: peng@ifn.ing.tu-bs.de.

Thomas K"urner, Bile Peng và Ke Guan đang làm việc tại Institut f"ur Nachrichtentechnik, Technische Universit"at Braunschweig, 38106 Braunschweig, Germany, (e-mail: {kuerner, peng, guan}@ifn.ing.tu-bs.de).

Andreas F. Molisch thuộc Khoa Kỹ thuật Điện, Đại học Nam California, Los Angeles, CA 90089 Hoa Kỳ (e-mail: Andreas.Molisch@ieee.org).

Bing Hui và Junhyeong Kim làm việc tại Phòng thí nghiệm Nghiên cứu Internet Truyền thông, Viện Nghiên cứu Điện tử và Viễn thông, Daejeon, Hàn Quốc (e-mail: huibing,jhkim41jf@etri.re.kr).

Bài viết này xem xét tình hình nghiên cứu hiện đại về sóng mm và kênh THz về khía cạnh lan truyền, mảng ăng ten đa đầu vào và đa đầu ra (MIMO) và các phương pháp tạo chùm tia. Dựa trên điều này, chúng tôi xác định các thách thức kỹ thuật và đưa ra các khuyến nghị cho các nghiên cứu sâu hơn, đặc biệt là đối với tính di động của đường sắt thông minh. Cuối cùng, các mô phỏng dò tia sơ bộ được thực hiện ở 100 GHz cho kịch bản "Đào tạo đến cơ sở hạ tầng".

Phần còn lại của bài báo này được tổ chức như sau: Phần II giới thiệu các ứng dụng và kịch bản cho tính di động của đường sắt thông minh, đồng thời làm rõ sự cần thiết của việc phát triển truyền dẫn sóng mm và THz. Trong Phần III, các giới hạn của công nghệ hiện tại hoạt động ở tần số thấp hơn 6 GHz và tính khả thi của việc sử dụng sóng mm và THz cho phép di chuyển đường sắt thông minh sẽ được thảo luận. Trong Phần IV, nghiên cứu hiện đại về sóng mm và kênh THz được xem xét; những thách thức và giải pháp chính tương ứng được nêu bật. các kênh sóng mm và THz được so sánh với ứng dụng của tính di động của đường sắt thông minh trong Phần V. Các mô phỏng dò tia và thông tin chi tiết tương ứng được mô tả trong Phần VI. Cuối cùng, kết luận được rút ra trong Phần VII.

### II. YÊU CẦU BĂNG THÔNG CỦA SMART RAIL DI ĐỘNG

#### A. Yêu cầu ứng dụng tốc độ dữ liệu cao

Đối với tính di động của đường sắt thông minh, thông tin liên lạc của đường sắt được yêu cầu phát triển thành các ứng dụng tốc độ dữ liệu cao khác nhau (ví dụ: [5], [6]):

- Giám sát video HD trên xe và trên đường rất quan trọng đối với các mối quan tâm về an toàn và an ninh (ví dụ: xe ô tô bị kẹt ở điểm giao cắt đường sắt, tấn công khủng bố, trường hợp khẩn cấp, v.v.).
- Kết nối tốc độ dữ liệu cao theo thời gian thực trên bo mạch để duyệt web, hội nghị truyền hình, truyền phát video, v.v.
- Tương tự, các hệ thống phát video HD không dây dành cho giải trí trên máy bay (IFE) [7] đang được phát triển.
- Thông tin vận hành tàu cung cấp thông tin quan trọng liên quan đến tín hiệu điều khiển và thoại, hiệu suất tàu trên tuyến và tình trạng thiết bị tàu.
- Video HD điều phối tàu theo thời gian thực giữa tàu và trung tâm điều khiển tàu (TCC) cần thiết cho các hệ thống không người lái và vá tàu.
- Thông tin hành trình tự động cập nhật thông tin hành trình cho tất cả hành khách thông qua đa phương tiện, ví dụ: truyền video HD, thực tế ảo (VR) và thậm chí cả ảnh ba chiều 3D trong tương lai như phần bổ sung của hành trình.

B. Các kịch bản truyền thông, thách thức và yêu cầu về băng thông

- Các ứng dụng được thảo luận trong Phần II-A có thể được thực hiện trong năm tình huống giao tiếp (xem Hình 1):
- Tàu đến cơ sở hạ tầng mô tả các liên kết giữa các điểm truy cập (AP)/bộ thu phát của (mạng cục bộ không dây của) tàu và cơ sở hạ tầng. Các liên kết như vậy cần phải mạnh mẽ với sự hỗ trợ cho tốc độ dữ liệu rất cao, độ trễ thấp, cũng như tính khả dụng gần như 100% khi di chuyển với tốc độ lên tới 500 km/h [8].
  - Trong toa xe mô tả các liên kết cung cấp truy cập không dây giữa các AP trong toa xe và bộ thu phát của thiết bị người dùng (UE) của hành khách hoặc các cảm biến bên trong toa xe. Các liên kết như vậy sẽ hỗ trợ các video HD thời gian thực với độ trễ thấp. Xem xét việc sử dụng băng thông vài chục MHz để hỗ trợ video HD nén và giả sử khoảng một trăm hành khách của toa xe hai tầng muốn sử dụng video tốc độ cao, thì sẽ cần tổng băng thông vài GHz cho một toa xe. Bên cạnh yêu cầu băng thông lớn, vấn đề nhiều người dùng cũng là một khó khăn lớn khác.

Để giải quyết vấn đề này, một ăng-ten có tính định hướng cao có thể giảm thiểu đáng kể đối với những người dùng ở xa trong khi một mảng MIMO lớn với tiền mã hóa cưỡng bức bằng không có thể giảm đáng kể nhiễu đối với những người dùng thậm chí ở gần người dùng mục tiêu [9].

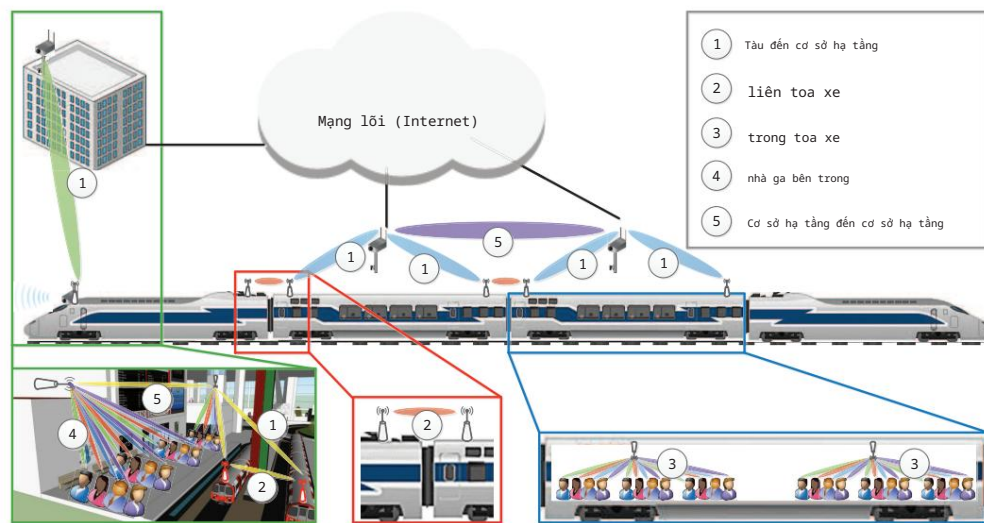
- Liên toa xe mô tả một mạng không dây giữa các toa xe để tránh chi phí cao cho việc nối dây một đoàn tàu để truy cập mạng hoặc sự bất tiện khi đi dây lại khi một đoàn tàu được cấu hình lại. Nó yêu cầu tốc độ dữ liệu cao và độ trễ thấp vì các AP được sắp xếp trong mỗi toa xe sao cho mỗi AP đóng vai trò là trạm khách cho các AP trong các toa khác, đồng thời đóng vai trò là AP cho tất cả các trạm trong toa của nó [ 10]. Do đó, kịch bản này có thể yêu cầu tốc độ dữ liệu cao hơn so với kịch bản “Trong toa xe”.
- Trạm bên trong mô tả các liên kết giữa các AP và UE trong các ga xe lửa/tàu điện ngầm. Trong trường hợp này, người dùng yêu cầu quyền truy cập vào các ứng dụng băng thông rộng di động (ví dụ: 1

- Gbps, dự kiến sẽ được hỗ trợ bởi IMT-2020 cho người dùng trong nhà [8]) và trạm sẽ cung cấp cơ sở hạ tầng liên lạc cố định/không dây để hỗ trợ các ứng dụng vận hành cũng như thương mại nói chung [11].
- Cơ sở hạ tầng đến cơ sở hạ tầng mô tả video HD và các thông tin khác trong tương tác thời gian thực giữa nhiều camera và AP, ví dụ: đường trục không dây tốc độ dữ liệu cao, được hỗ trợ bởi các luồng hai chiều với tốc độ dữ liệu rất cao và độ trễ thấp [11 ].

Tóm lại, đối với các kịch bản “Trạm bên trong” và “Kết nối cơ sở hạ tầng với cơ sở hạ tầng”, bằng cách sử dụng quy trình đánh giá được mô tả trong [12], các yêu cầu về băng thông là từ vài trăm MHz đến vài GHz, tùy thuộc vào các điều kiện cụ thể. Đối với các kịch bản “Intra-toa xe” và “Inter-toa xe”, băng thông lên đến 3,6 GHz và lên đến hàng chục GHz sẽ được yêu cầu tương ứng. Là giao diện chính giữa mạng trên tàu và mạng cố định, kịch bản “Tàu đến cơ sở hạ tầng” truyền một luồng tổng hợp các kịch bản Liên/Trong toa xe. Do đó, nó yêu cầu băng thông hàng chục GHz để chứa tốc độ dữ liệu hơn 100 Gbps. Rõ ràng, tốc độ dữ liệu cao và yêu cầu băng thông lớn như vậy thúc đẩy việc khám phá các dải sóng mm và THz chưa được sử dụng đúng mức. Hai cách tiếp cận có thể cho phép truyền tốc độ dữ liệu cao như vậy. Đầu tiên là nhằm vào các hệ thống hoạt động ở băng tần 60 GHz với phổ vài GHz nhưng yêu cầu hiệu suất phổ cao. Cách tiếp cận thứ hai áp dụng hiệu suất phổ vừa phải và yêu cầu băng thông cực cao ngoài 20 GHz chỉ có thể được xác định trong dải tần số THz [13]. Các hệ thống hoạt động ở các tần số đó được gọi là hệ thống thông tin liên lạc bằng sóng mm và THz.

III. GIAO TIẾP SÓNG MM VÀ THZ CHO PHÉP DI ĐỘNG ĐƯỜNG SẮT THÔNG MINH

- A. Giới hạn của các công nghệ truy cập không dây hiện tại trong giao thông đường sắt
- Trong vài năm qua, nhiều công nghệ khác nhau đã được giới thiệu để thực hiện truy cập không dây băng thông rộng trong giao thông đường sắt. Đối với các ứng dụng không quan trọng, các công nghệ truyền thông Thế hệ thứ tư (4G), chẳng hạn như Long-Term Evolution Advanced (LTE-A) là những giải pháp tiềm năng tốt để cung cấp khả năng truy cập Internet trên tàu hỏa [14]. WiMax đang được sử dụng ở Anh để cung cấp truy cập Internet trên một số tuyến đường sắt [15]. Trong [16], các tác giả cho rằng các dịch vụ nhắm đến khách du lịch nên dựa trên các tiêu chuẩn kết nối thị trường trên tàu hỏa (ví dụ: WiFi 802.11g) và cũng tồn tại trong các nhà ga hoặc các điểm truy cập có liên quan khác. Hơn nữa, một kiến trúc hai chặng đã được đề xuất để khắc phục tình trạng suy giảm thâm nhập đáng kể của tín hiệu vô tuyến được truyền vào và ra khỏi toa tàu cao tốc, trong đó tất cả người dùng trong tàu được coi là người dùng ảo lớn, tín hiệu truyền của họ trước tiên được tổng hợp tại một roler di động được triển khai trên toa tàu và sau đó được phân phối qua đường liên kết giữa tàu và mặt đất giữa roler di động và các trạm cơ sở trên mặt đất. Đối với ứng dụng báo hiệu đường sắt, các tác giả của [17] gợi ý rằng các hệ thống như IEEE 802.20 (Truy cập không dây băng thông rộng di động) và IEEE 802.11 có thể được sử dụng để báo hiệu đường sắt thay vì các hệ thống dựa trên cáp hiện đang được sử dụng. Hơn thế nữa,



Hình 1. Năm kịch bản giao tiếp về tính di động của đường sắt thông minh

LTE cho Đường sắt (LTE-R) [18] được coi là giải pháp mạng băng rộng cho các nhà khai thác đường sắt. Tuy nhiên, tất cả các công nghệ hiện tại này đều hỗ trợ tốc độ dữ liệu từ vài Mbps cho đến 100 Mbps, tốc độ này vẫn thấp hơn tới ba bậc độ lớn so với thông lượng mong muốn. Một lý do quan trọng là vì các công nghệ hiện tại hoạt động ở tần số thấp hơn 6 GHz, trong đó băng thông rất hạn chế hạn chế khả năng tiềm năng của các hệ thống truyền thông không dây. Do đó, để có đủ băng thông, chúng tôi được khuyến khích nhảy vào các dải tần số cao hơn.

#### B. Thông tin sóng MM và THz cho đường sắt

Thông tin liên lạc bằng sóng MM cho đường sắt chưa bao giờ là một "chiếc bánh trên bầu trời", mà là một nỗ lực lâu dài và không liên tục trong ít nhất 32 năm [19]. Một số thử nghiệm sơ bộ đã được thực hiện ở Đức bằng cách sử dụng điều chế ASK ở 35 và 58 GHz để liên lạc ở tốc độ 64 kb/s với tàu hỏa. Người ta đã xác định rằng tổn thất đường dẫn trong không gian trống rất cao và khả năng hấp thụ oxy/nước của dải sóng mm phải được bù bằng mức công suất phát cao, độ nhạy của máy thu hoặc độ lợi của ăng-ten.

Trong vài năm gần đây, đã có nhiều tiến bộ nhằm ngăn chặn sự phát triển của các bộ thu phát sóng mm và băng tần THz nhỏ gọn cung cấp công suất truyền cao, độ nhạy phát hiện cao và số liệu nhiễu thấp [20], [21], [22]. Hơn nữa, một phân tích ngân sách liên kết toàn diện cho liên kết giao tiếp THz được thực hiện trong [23]. Anten siêu băng rộng (UWB) và MIMO đã được thiết kế cho dải sóng mm và THz [24]. Định dạng chùm và ghép kênh không gian bằng cách sử dụng các hệ thống ăng-ten MIMO này [25], [21] có thể được sử dụng để tạo thành các mảng có thể điều khiển bằng điện, có mức tăng rất cao được đặt tại trạm gốc, trên vỏ điện thoại di động hoặc thậm chí bên trong chip [26], [27]. Các dải tần trên 6 GHz là những ứng cử viên chính đang được xem xét cho các liên kết đường trực (bên ngoài phương tiện) và liên kết truy cập (bên trong phương tiện) [28]. Vào tháng 3 năm 2015, HRRC của Nhóm lợi ích IEEE 802.15 (Truyền thông đường sắt tốc độ cao của Nhóm lợi ích) đã được thuê để nghiên cứu truyền thông không dây cung cấp tốc độ dữ liệu Gbps với

hiệu suất cao cho các nhóm người dùng bên trong các phương tiện di chuyển nhanh [29].

#### IV. CÔNG NGHỆ VÀ THÁCH THỨC VỀ NGHIÊN CỨU KÊNH MM WAVE VÀ THZ

Trong phần này, chúng tôi xem xét các công việc liên quan về đặc tính hóa kênh, mảng ăng-ten và định dạng búp sóng, đồng thời nêu bật những thách thức tương ứng và các giải pháp khả thi đặc biệt cho tính di động của đường sắt thông minh.

##### A. Phương diện truyền sóng

1) Hiện tượng lan truyền: Trong các tình huống nhìn thẳng (LOS) ở tần số vi sóng, sự giảm công suất theo khoảng cách chủ yếu được xác định bằng cách "lạm loãng" (sự lan truyền) năng lượng. Ngược lại, ở sóng mm và đặc biệt ở tần số THz, sự hấp thụ phân tử [30] trong khí quyển đóng vai trò chính. Sự khác biệt này dẫn đến các hiệu ứng sau: • Hành vi chọn lọc tần số và phụ thuộc vào khoảng cách: Do tác động lớn hơn của sự hấp thụ phân tử đối với đặc tính lan truyền trong không gian tự do cũng như sự phụ thuộc tần số của các hiệu ứng như hệ số nhiễu xạ và phản xạ, đường dẫn kết quả tổn thất ở sóng mm và THz phụ thuộc rất nhiều vào tần số hoạt động. Như đã nêu trong ITU-R M.2376 [28], một số thử nghiệm sơ bộ trong môi trường ngoài trời đến ngoài trời và trong nhà của ô vi mô đô thị, với độ cao ăng-ten máy phát và máy thu bên dưới mái nhà, đã đo được tổn thất đường truyền cho 10 GHz, 18 GHz, 28 GHz, 38 GHz, 60 GHz và 72 GHz trong cả môi trường LOS và không LOS (NLOS) [31], [4], [32], [33], [34]. Nói chung, số mũ suy hao đường truyền tăng theo tần suất (xem Bảng I). Hơn nữa, các dải sóng mm và THz dễ bị ảnh hưởng bởi các tác động môi trường hơn như sự hấp thụ khí (oxy và hơi nước), mất nước do mưa và mất tán lá, điều này thể hiện mức độ biến đổi phụ thuộc vào tần số cao (xem Khuyến nghị ITU-R P.676 và Khuyến nghị ITU-R P.838 [35],

[36]). Mất khí trong khí quyển xấp xỉ 0,50 dB/km ở tần số từ 70 GHz đến 100 GHz. Tuy nhiên, ngay cả đối với các tần số nhạy cảm nhất, chẳng hạn như 60 GHz, 200 GHz, v.v., tổn thất khí trong khí quyển nhỏ hơn 11dB/km. Có thể rút ra kết luận tương tự đối với hiệu ứng mưa: chẳng hạn, sóng mang ở tốc độ 100 GHz sẽ bị suy hao 4 dB trên 200 m trong mưa lớn (25 mm/h). Tuy nhiên, khi xem xét một số dải THz, sự hấp thụ phân tử của các phân tử hơi nước đóng một vai trò quan trọng, và do đó, nó xác định một số cửa sổ truyền dẫn, có vị trí và độ rộng phụ thuộc vào khoảng cách và thành phần phân tử của môi trường [37], [38].

- Truyền đa đường và phân tán tần số: Theo truyền thống, sự suy giảm phản xạ gương từ các bề mặt nhẵn có thể được mô hình hóa bằng các phương trình Fresnel nổi tiếng [39] với điều kiện là bề mặt được xem xét có diện tích và độ dày đủ lớn so với bước sóng. Mặt khác, ở dải sóng mm THz, các phản xạ bên trong vật liệu hoặc nhiều phản xạ tại các giao diện của phương tiện phân lớp phải được tính đến, gây ra hành vi phản xạ phụ thuộc nhiều vào tần số [13]. Ngoài ra, bước sóng trong các dải sóng mm và THz theo thứ tự cường độ của các biến thể chiều cao bề mặt. Đối với hầu hết các vật liệu xây dựng như bê tông hoặc thạch cao, tán xạ khuếch tán từ các bức tường được bao phủ bằng vật liệu thô trở nên rất phù hợp [40], [41], [42].

Trong dải tần số 300 GHz, các ấn phẩm ban đầu, chẳng hạn như [43], đã đề cập đến đặc tính của vật liệu xây dựng điển hình. Sự tán xạ đã được nghiên cứu chi tiết bằng thực nghiệm và lý thuyết [40], [41]. Xem xét các băng thông lớn (ví dụ, vượt quá 10 GHz), bản thân hiện tượng lan truyền phải được coi là phụ thuộc vào tần số. Sự phân tán tần số này của kênh đòi hỏi mô phỏng kênh băng thông rộng trong miền tần số và có thể gây ra một biến dạng nhất định của hình dạng xung được truyền [44].

Một khía cạnh quan trọng khác của quá trình lan truyền sóng mm và THz là sự phân cực. Như đã được chứng minh bằng các nghiên cứu thử nghiệm với nguyên mẫu sóng mm [28], sự suy giảm công suất do sự không phù hợp về phân cực giữa ăng-ten và quá trình khử cực do kênh gây ra có thể lên tới 10-20 dB. Các đặc tính phân cực phải được mô tả trong các kịch bản đường sắt thực tế để xác định mức độ đa dạng phân cực có thể đạt được đối với các kênh sóng mm và THz.

- Hiệu ứng nhiễu xạ và tạo bóng: Độ suy giảm nhiễu xạ rất cao (từ 30 dB trở lên) trong dải sóng mm và THz làm cho hiệu ứng nhiễu xạ trong vùng tạo bóng phía sau vật thể không đáng kể. Tuy nhiên, giống như trong mô hình kênh T G11ad ở 60 GHz [45], điều quan trọng là phải điều tra tín hiệu giảm và tăng trở lại nhanh như thế nào trong trường hợp có hiệu ứng đổ bóng động. Do đó, mô hình hóa nhiễu xạ vẫn hữu ích để mô tả động lực học của các hiệu ứng đổ bóng do các chướng ngại vật khác nhau gây ra, chẳng hạn như chuyển động của con người [46], các tòa nhà hoặc các đoàn tàu khác, trong các kịch bản di chuyển đường sắt thông minh được xác định khác nhau. Tác động của các hiệu ứng đổ bóng khác nhau đối với độ tin cậy của thông tin liên lạc có tầm quan trọng đặc biệt đối với đường sắt

kiểm soát và an toàn.

Tóm lại, sức mạnh tổng hợp của tính nhạy cảm của sự hấp thụ phân tử, mối quan hệ đã thay đổi giữa bước sóng và kích thước của vật thể và độ rộng của dải siêu băng rộng, dẫn đến sự lan truyền trong dải sóng mm và THz khác với tần số vi sóng. Cần thực hiện nhiều nỗ lực nghiên cứu hơn để giải thích các hiện tượng lan truyền phức tạp, chẳng hạn như hành vi chọn lọc tần số và phụ thuộc vào khoảng cách, phân tán tần số, các hiệu ứng đổ bóng khác nhau, có tính đến các đối tượng và hình học chính trong các kịch bản đường sắt, chẳng hạn như địa hình, theo dõi, cắt, rào cản, nhà ga, giá treo và thảm thực vật.

2) Các mô hình kênh hiện có: Một lượng lớn công việc của ngành và giới học thuật đã đi sâu vào việc đo lường và mô hình hóa kênh trong dải sóng mm và THz.

- Môi trường trong nhà: Kênh lan truyền bên trong toa xe có thể được ước tính hợp lý bởi một văn phòng trong nhà hoặc môi trường điểm truy cập trong nhà. Ở băng tần 60 GHz, một trong những mô hình MIMO trong nhà tiêu biểu nhất là mô hình kênh IEEE 802.11ad, dựa trên sự kết hợp của các kỹ thuật mô hình thống kê dựa trên dò tia và đo lường. Một số nghiên cứu gần đây dựa trên nó bao gồm các nghiên cứu lý thuyết về dung lượng [47], [48] và kỹ thuật đa dạng không gian [49] cũng như các mô hình mở rộng cho sự tắc nghẽn của con người [50] và kênh MIMO hai hướng trong môi trường phòng hội nghị [51]. Ngoài ra, các phép đo và mô hình đáp ứng kênh ở 60 GHz có sẵn trong tài liệu cho các môi trường khác nhau, chẳng hạn như phòng máy tính [52], văn phòng [53], [54], bệnh viện [55] và cabin máy bay [56].

Ngoài mô hình IEEE 802.11ad, IEEE 802.15 TG3c được thiết lập tốt cho truyền thông trong nhà 60 GHz [45]. Mô hình TG3c bao gồm các môi trường dân cư, văn phòng, thư viện, máy tính để bàn và ki-ốt, trong khi mô hình TGad bao gồm phòng hội nghị, phòng khách và tủ nhỏ. Có thể xem xét kỹ lưỡng sự lan truyền sóng mm cả trong nhà và ngoài trời trong [57]. Trong dải tần 300 GHz, phép đo kênh trong nhà siêu băng thông rộng đầu tiên trong môi trường văn phòng ở 300 GHz bắt nguồn từ năm 2011 [58]. Do bước sóng rất ngắn ở tần số sóng mang khoảng 300 GHz, sóng lan truyền gần như quang học và có thể được mô hình hóa chính xác bằng cách sử dụng phương pháp quang học tia [59], phương pháp này có thể được áp dụng thêm để tạo ra các mô hình kênh ngẫu nhiên để đơn giản và tổng quát hơn [59] 60]. Tổng quan về các hoạt động nghiên cứu liên quan đến sự lan truyền sóng THz và mô hình kênh vô tuyến được đưa ra bởi [61].

- Môi trường ngoài trời: Đã có những nghiên cứu gần đây về các đặc tính lan truyền của kênh ngoài trời cho thấy tiềm năng sử dụng dải sóng mm cho thông tin di động, ví dụ: [32], [33]. Một đánh giá tài liệu chi tiết được cung cấp trong [57] và [62].

Tuy nhiên, mặc dù ITU-R khuyến nghị sử dụng phổ tần trên 6 GHz để hỗ trợ người dùng di động điểm phát sóng di động như tàu cao tốc di chuyển 500 km/h, các phép đo kênh trong dải sóng mm và THz trong các kịch bản di chuyển đường sắt thông minh không dễ dàng có sẵn.

BẢNG I  
SO SÁNH TỔN THẤT ĐƯỜNG DÀNH CHO CÁC KỊCH BẢN LOS VÀ NLOS TRONG CÁC TẦN SỐ 10 GHZ, 38 GHZ VÀ 60 GHZ

Tần số Số	10 GHz 2	38 GHz 2	60 GHz
mũ suy hao đường dẫn			2,25
LOS Số mũ suy hao đường dẫn	3,5	3,71	3,76
NLOS Khoảng cách [m]	20 100 200	20 100 200	20 100 200
Suy hao LOS [dB]	78.2 92.0 98.0 111.8 118.6	58.0 72.0 78.0 91.0 96.0	114.6 125.0 104.1 130.1
141.2 108.5 134.8	146.1 14.1 23.0 27.5		
Đồng bằng [dB]	11,8 22,6 27,0	26.1 31.1	12.4

Các phương pháp mô hình xác định, chẳng hạn như mô phỏng dò tia [63], vẫn là công cụ chính. Ở 30 GHz, các tác giả của [64] đã mô hình hóa một cách ngẫu nhiên các đặc điểm của kênh, ví dụ: số mũ suy hao đường dẫn, khoảng cách tự tương quan và giảm tương quan của mờ dần bóng, v.v., trong một kịch bản đường sắt điển hình với công cụ dò tia đã được xác minh [65]. Các tác giả của [66], đã xây dựng một môi trường đường sắt tốc độ cao tuyến tính và phân tích các đặc tính lan truyền bằng phương pháp dò tia. Qua mô phỏng cho thấy hệ số K lớn khi khoảng cách giữa máy phát và máy thu ngắn, và khi khoảng cách giữa máy phát và máy thu lớn thì mức độ suy hao lớn, khác nhiều so với môi trường trong nhà. Sử dụng các mô phỏng, các tác giả của [67] đã đánh giá một hệ thống sợi-mm-sóng liền mạch để truyền ngược từ nhà ga trung tâm đến ăng-ten trên tàu hỏa. Băng tần E (60-90 GHz) và băng tần W (75-110 GHz) được coi là hứa hẹn hơn do băng thông khả dụng lớn và độ suy giảm khí quyển thấp.

Nói chung, các mô hình kênh hiện tại chủ yếu dành cho môi trường tiêu chuẩn trong nhà và ngoài trời. Thông thường, đường sắt xuất hiện dưới dạng một trường hợp sử dụng nhỏ của “điểm nóng di chuyển” trong các tài liệu tiêu chuẩn, ví dụ: [28]. Làm thế nào để đưa các đặc điểm của kênh đường sắt vào các mô hình kênh là một thách thức mở, ví dụ: làm thế nào để tính đến tác động của rung động và áp lực gió khi đoàn tàu di chuyển vào và ra khỏi đường hầm trên các tuyến nổi từ tàu đến cơ sở hạ tầng; cách đánh giá các hiệu ứng đổ bóng khác nhau do các đối tượng chuyển động gây ra và ảnh hưởng của chúng đối với độ tin cậy của liên kết. Về phương pháp mô hình hóa, đối với các môi trường tốc độ cao, các mô hình dựa trên hình học thường phù hợp hơn so với các mô hình đường trễ khai thác, bởi vì chúng có thể dễ dàng mô hình hóa tính không cố định vốn có của các môi trường đó [68]. Các mô hình dựa trên hình học như vậy có thể có dạng mô hình kênh ngẫu nhiên dựa trên hình học truyền thống (GSCM) hoặc kết hợp các cấu trúc hình học xác định với các thành phần ngẫu nhiên [69], [70].

Một thách thức khác là động lực của kênh. Hầu hết các phép đo hiện tại ở dải sóng mm và THz được thực hiện cho các kênh tĩnh. Vào năm 2014, Samsung đã trình diễn lần đầu tiên trên thế giới về khả năng truyền 1,2 Gbps ở 28 GHz với tốc độ hành trình 110 km/h bằng cách sử dụng công nghệ tạo chùm tia kép [71]. Bằng chứng này cho thấy tiềm năng mạnh mẽ của sóng mm và băng tần THz cho các ứng dụng di động. Như đã chỉ ra trong [46],

bóng tia động gây ra sự thay đổi theo thời gian của tổn thất đường dẫn. Tán xạ vào người có thể tạo ra các dịch chuyển Doppler bổ sung và có thể dẫn đến phổ Doppler rộng hơn. Điều tương tự cũng xảy ra nếu các bộ thu phát di chuyển tương đối với nhau. Việc thiếu hiểu biết sâu sắc về các động lực học như vậy sẽ cản trở việc thực hiện truyền thông sóng mm và THz trong bất kỳ môi trường động nào. Mỗi quan hệ giữa thời gian kết hợp kênh (liên quan chặt chẽ đến trải phổ Doppler) và độ rộng chùm tia đã được nghiên cứu trong [72], [73], [74]. Các kết quả trong [74] cho thấy rằng có một băng thông hoạt động tối ưu dẫn đến thời gian kết hợp lớn. Điều này cần được nghiên cứu về mặt lý thuyết và thực nghiệm trong năm kịch bản giao thông đường sắt cho công việc trong tương lai.

B. Ăng-ten

Truyền thông sóng MM và THz yêu cầu ăng-ten hỗ trợ băng thông hàng chục GHz và do đó, cần ăng-ten siêu băng thông rộng và đa băng tần [20]. Hơn nữa, các mảng ăng-ten là cần thiết để cung cấp độ lợi để khắc phục suy hao đường dẫn rất cao trong dải sóng mm và THz.

1) Ăng-ten siêu băng thông rộng và đa băng tần: Ăng-ten cổ điển, chẳng hạn như ăng-ten sừng, ăng-ten paraboloid, v.v., đã được sử dụng rộng rãi trong các hệ thống truyền dữ liệu không dây thử nghiệm ở 300 GHz. Các ăng-ten này có thể cung cấp băng thông bức xạ theo thứ tự 10 phần trăm tần số trung tâm của chúng cũng như mức tăng cao. Một ăng-ten Cassegrain với mức tăng tối đa là 51 dBi được trình bày trong [75]. Tuy nhiên, việc thiếu khả năng thích ứng định hướng khiến chúng chỉ phù hợp với truyền thông giữa cơ sở hạ tầng với cơ sở hạ tầng. Vì mục đích tích hợp, các ăng-ten mới tiềm năng dựa trên vật liệu nano và siêu vật liệu là những lựa chọn thay thế tốt. Ví dụ, người ta đã chứng minh rằng graphene có thể được sử dụng để chế tạo ăng-ten nano plasmon, khai thác hành vi của các dao động tổng thể của các điện tích bề mặt để bức xạ trong dải THz [20]. Đáp ứng tần số của ăng-ten nano dựa trên graphene có thể dễ dàng điều chỉnh linh hoạt bằng phương pháp pha tạp vật liệu, nghĩa là thay đổi linh hoạt các tính chất điện bằng phương pháp sai lệch tính điện [24].

2) Mảng ăng-ten: Kích thước nhỏ của ăng-ten sóng mm và THz cho phép tích hợp một số lượng lớn ăng-ten với diện tích nhỏ. Tuy nhiên, việc có ADC/DAC trên mỗi phần tử ăng-ten có thể là một thách thức về tổng chi phí và mức tiêu thụ điện năng. Do đó, kiến trúc mảng pha trong miền tần số vô tuyến được khuyến nghị bởi ITU-R

[28] vì nó có thể giảm số lượng ADC/DAC trong khi vẫn giữ được mức tăng định dạng chùm tia cao. Sau đây là các cuộc thảo luận về các công nghệ mảng ăng-ten khác nhau:

- Dây ăng-ten thích ứng đầy đủ: Các thiết kế in bằng đồng cổ điển có sẵn ở tần số 60 GHz; những thách thức trong dải sóng mm chủ yếu là độ phức tạp và hiệu suất của các mô-đun máy phát/máy thu. Do đó, một mảng ăng ten thích ứng hoàn toàn là khả thi từ khía cạnh thiết kế phần tử ăng ten cả về chi phí và hiệu suất. Theo [28], Bảng II cung cấp tốc độ dữ liệu có thể đạt được so với băng thông hệ thống sử dụng số lượng phần tử ăng-ten khác nhau, giả sử công suất phát là 30 dBm và hệ số nhiễu là 10 dB, ở tần số 60 GHz trong điều kiện LOS ngoài trời. Có thể thấy rằng tốc độ dữ liệu tăng không chỉ cùng với số lượng phần tử ăng-ten mà còn với băng thông. Do đó, làm thế nào để phát triển các phương pháp tiếp cận băng thông rộng hoặc thậm chí siêu băng thông rộng để tổng hợp mẫu mảng ăng ten trở nên quan trọng.

BẢNG II  
TỐC ĐỘ DỮ LIỆU CÓ THỂ ĐẠT ĐƯỢC SỬ DỤNG NHIỀU SỐ KHÁC NHAU  
PHẦN TỬ ăng-ten ở 60 GHZ DƯỚI LOS NGOÀI TRỜI  
ĐIỀU KIỆN

Số phần tử ăng-ten: 1	
Băng thông [MHz]	10 100 1000
Tốc độ dữ liệu [Mbps]	65 320 900
Số phần tử ăng-ten: 10	
Băng thông [MHz]	10 100 1000
Tốc độ dữ liệu [Mbps]	100 650 3200
Số phần tử ăng-ten: 100	
Băng thông [MHz]	10 100 1000
Tốc độ dữ liệu [Mbps]	140 1000 6500
Số phần tử ăng-ten: 1000	
Băng thông [MHz]	10 100 1000
Tốc độ dữ liệu [Mbps]	180 1300 10000

- Mảng ăng-ten dạng mô-đun: Do suy hao trên các đường cấp nguồn, kiến trúc mảng ăng-ten truyền thống – các phần tử ăng-ten được kết nối với chip mạch tích hợp tần số vô tuyến (RFIC) thông qua các đường cấp nguồn – cho phép triển khai các mảng ăng-ten có kích thước tương đối nhỏ lên đến 8 × 8 do đó đạt được mức tăng khoảng 15-20 dBi. Tuy nhiên, nếu chúng ta coi một mảng ăng-ten truyền thống là một mô-đun và xây dựng nó bằng cách sử dụng một bộ định dạng búp sóng, thì độ mở của mảng ăng-ten mô-đun và tổng công suất truyền có thể vượt quá mức của một mô-đun mảng phụ riêng lẻ tỷ lệ thuận với số lượng phụ. -các mô-đun mảng được sử dụng (ví dụ: mười lần hoặc thậm chí nhiều hơn) [28]. Do đó, có thể tạo ra các chùm tia hẹp hơn nhiều, và do đó, có thể đạt được độ lợi ăng ten lớn hơn nhiều với mảng mô-đun. Do đó, vấn đề làm thế nào để phân tích các hiệu ứng tương tác và ghép nối giữa một số lượng lớn các phần tử ăng-ten gần đó trở nên nghiêm trọng hơn. Dựa trên thông tin từ ITU-R [28], Bảng III cho thấy mức tăng mảng cho băng tần 60 GHz khi sử dụng số lượng mô-đun khác nhau, trong đó mỗi mô-đun có 16 phần tử. Trong Bảng III EIRP là bức xạ đẳng hướng hiệu dụng

quyền lực. Có thể thấy rằng khi sử dụng 16 mô-đun, hệ số khuếch đại của mảng có thể đạt được 27 dBi, đủ để giữ độ dài liên kết (dài hơn 500 m với SNR 10 dB) trong kịch bản “Train-to-hạ tầng”. Khi một bộ xử lý băng cơ sở kết nối không chỉ một mà nhiều đơn vị tạo chùm tia, các chùm của mô-đun mảng pha riêng lẻ (dạng con) có thể được điều khiển theo nhiều hướng khác nhau để đạt được một số mục tiêu, chẳng hạn như tăng cường tính đa dạng của ghép kênh không gian. Điều này rất phù hợp với các kịch bản “Bên trong nhà ga” và “Trong toa xe”, nơi nhiều người dùng cần liên lạc đồng thời.

BẢNG III  
ARRAY GAIN KHI SỬ DỤNG MÔ-ĐUN MẢNG CON KHÁC  
CÁC SỐ CHO BAN NHẠC 60 GHZ

Mảng ăng-ten mô-đun			
Mô-đun mảng phụ Công suất Tx Độ lợi mảng Số EIRP [dBm]	[dBi]	[dBm]	1 10 15 25
4		16	21
			27
8	16	19	22
			27

C. Phương pháp Beamforming

So với định dạng chùm tương tự sử dụng các mảng theo pha với một chuỗi tần số vô tuyến (RF), định dạng chùm kỹ thuật số mang lại tính linh hoạt cao, nhưng cũng đòi hỏi khắt khe nhất về công suất và chi phí – mối quan tâm đặc biệt quan trọng đối với các giao diện sóng mm và THz do số lượng lớn của các phần tử ăng ten, băng thông rất rộng và bộ chuyển đổi tương tự sang số (ADC) và chuyển đổi từ số sang tương tự (DAC) rất nhanh [28], [76]. Bằng cách kết hợp định dạng búp sóng tương tự trong miền RF và định dạng búp sóng kỹ thuật số ở dải cơ sở, định dạng búp sóng kết hợp [77], [78], [79] có thể nhận được các lợi ích của cả ghép kênh không gian và định dạng búp sóng, do đó, cũng được ITU khuyến nghị [28] . Về mặt thiết kế thuật toán, trong số các sơ đồ cụ thể khác nhau, chúng tôi đề cập đến:

- Định dạng búp sóng dựa trên sách mã: Cách tiếp cận này kiểm soát các búp sóng ăng ten thu được thông qua sách mã được xác định trước. Tiêu chuẩn IEEE 802.15.3c đã xác định một bộ mã định dạng búp sóng chung được xác định trước cho các ứng dụng trong nhà và xem xét số lượng phần tử ăng-ten nhỏ hơn 100 [76]. Hạn chế chính đối với phương pháp này đến từ chi phí cho số lượng phần tử ăng ten lớn hơn.
- Định dạng chùm dài hạn: Khi hướng góc ở cấp độ vĩ mô của kênh thay đổi ở thang thời gian chậm hơn nhiều, kênh có thể được tập trung trong các không gian con không đổi trong khoảng thời gian dài hơn. Các tín hiệu có thể được xác định và căn chỉnh trên các không gian con này bằng một quy trình chuẩn được gọi là tạo chùm tia dài hạn [80]. Do đó, tỷ lệ phản hồi và theo dõi có thể giảm đáng kể.
- Định dạng chùm tia dựa trên ước tính góc lệch (AoD): Khi sử dụng các thuật toán xử lý mảng cổ điển, chẳng hạn

nhu tối đa hóa kỳ vọng tổng quát xen kẽ không gian (SAGE) [81] hoặc sử dụng một số kỹ thuật xử lý tín hiệu mới, chẳng hạn như cảm biến nén (CS) [82], thuật toán theo dõi đường dẫn [83] và học Bayesian thừa thớt (SBL) [84], AoD và sức mạnh của các thành phần đa đường dẫn (MPC) có thể được ước tính. Với kiến thức về kênh không gian của người dùng, định dạng búp sóng tương tự có thể được áp dụng thông qua ứng dụng của trọng số pha ăng ten [76].

- Tạo chùm tia phân cực-ghép kênh: Trong kênh LOS, sự phân cực có thể được khai thác để kết hợp các quá trình tạo chùm tia và ghép kênh [85]. Trong trường hợp này, hai luồng ghép kênh bằng cơ sở IQ được hỗ trợ để khớp với hai phân cực trực giao. Theo cách này, ghép kênh không được thực hiện trong miền không gian mà trong miền phân cực. Trong các kênh NLOS, vẫn có khả năng truyền hai luồng dữ liệu qua hai phân cực, nhưng có thể bị suy giảm nhất định do hiện tượng phân cực chéo.

Sự hiểu biết đúng đắn về hành vi của sóng mm và kênh THz trong các điều kiện lan truyền cụ thể trong các kịch bản đường sắt là rất quan trọng đối với việc thiết kế các sơ đồ định dạng chùm khả thi. Vì trong số năm kịch bản được xác định, các liên kết trong kịch bản "Tàu hỏa đến cơ sở hạ tầng" thể hiện tính di động cao nhất, trước tiên chúng tôi sẽ phân tích chi tiết kịch bản này, sau đó thảo luận về các phương pháp định dạng chùm cho bốn kịch bản còn lại.

1) Cách tiếp cận Beamforming cho kịch bản "Tàu đến cơ sở hạ tầng": Thông thường kênh có LOS trong kịch bản này, nhưng có một số trường hợp bộ thu phát trên tàu có thể mất LOS, ví dụ: khi tàu đi qua các chướng ngại vật bán kín, chẳng hạn như qua cầu [86], ga xe lửa [87], [88], v.v. Đối với các kênh LOS, do có thể dễ dàng dự đoán quỹ đạo của đoàn tàu và có rất ít người dùng trong trường hợp này, nên định dạng búp sóng dựa trên sách mã cũng như định dạng búp sóng dựa trên ước tính AoD có thể hoạt động tốt.

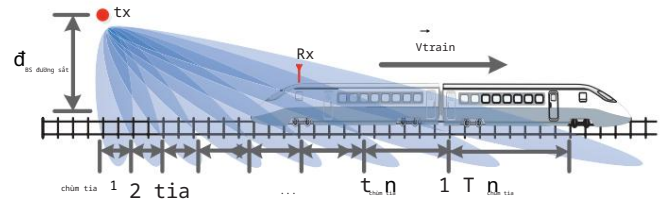
Đối với các vị trí NLOS, tham khảo các công trình trong [89] (chỉ ra rằng máy thu trong lõi đô thị NLOS có thể nhận được hai đến bốn chùm tia không gian riêng biệt với công suất thu mạnh), có thể duy trì độ dài liên kết trên 100 m bằng cách sử dụng mức tăng liên kết bằng nhau kết hợp cho hai đến ba chùm không gian được phóng tại Tx. Cũng trong trường hợp này, do biết trước vị trí của đoàn tàu, định dạng chùm dựa trên sách mã và định dạng chùm dựa trên ước tính AoD khá hứa hẹn.

Chắc chắn, thách thức lớn của kịch bản này là tính cơ động cao của đoàn tàu, đòi hỏi sự hình thành chùm tia thích ứng rất nhanh. Ở đây, chúng tôi xác định một số liệu có tên là "thời lượng của chùm tia" là khoảng thời gian khi máy thu trên tàu rơi vào thủy chính của chùm tia hiện tại từ Tx. Tương ứng, trước khi máy thu hết thời lượng hiện tại, chùm tiếp theo (lân cận) phải được hình thành kịp thời để giữ cho các dịch vụ di động liên mạch. Lưu ý rằng chúng tôi xác định "thời lượng của chùm tia" liên quan đến thống kê kênh bậc hai; Các trạng thái kênh tức thời có thể được tạo ra thông qua pha định quy mô nhỏ, nghĩa là giao thoa giữa các thành phần đa đường trong một băng thông chùm, có thể thay đổi nhanh hơn.

Thông qua các tính toán hình học rất đơn giản trong (1), có thể thấy rằng thời lượng của chùm tia  $T_{\text{beam}}(n)$  được xác định chung bởi khoảng cách giữa máy phát hoặc trạm gốc (BS) và đường ray dBs đường ray, tốc độ của xe lửa

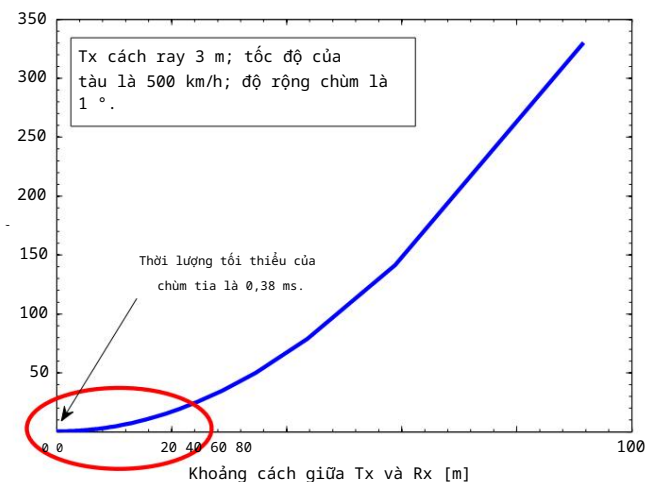
Vtrain và Wbeam bằng thông chùm.  $n$  là chỉ số của tia (phương).

Như được hiển thị trong Hình 2, máy thu càng xa Tx thì thời lượng của chùm tia càng dài. Như vậy, trường hợp xấu nhất - thời lượng tối thiểu của một tia (giá trị nhỏ nhất của  $T_{\text{beam}}(n)$ ) - xảy ra khi đoàn tàu đi qua máy phát bên cạnh đường ray.



Hình 2. Phác thảo hình học để cung cấp dịch vụ di động liên mạch giữa tàu hỏa với cơ sở hạ tầng bằng cách sử dụng định dạng chùm

Như minh họa trong Hình 3, khi tốc độ của tàu là 500 km/h, khoảng cách giữa máy phát và đường ray là 3 m và độ rộng chùm tia là 1°. Trong trường hợp này, để giữ cho các dịch vụ di động liên mạch, thời gian của cấu hình liên kết phải ngắn hơn thời lượng tối thiểu của một búp sóng.



Hình 3. Thời lượng của chùm tia so với khoảng cách giữa máy phát và máy thu

Ngoài ra, Hình 4 cho thấy thời lượng tối thiểu của chùm tia khi giả sử máy phát cách xa đường ray 3 m, độ rộng chùm tia từ 1 đến 10° và tốc độ của tàu là từ 100 km/h đến 500 km/h ứng dụng tính toán trong Bảng IV. Rõ ràng, chùm tia hẹp hơn và tốc độ cao hơn cùng nhau làm giảm thời lượng tối thiểu của chùm tia, và do đó, yêu cầu theo dõi chùm tia rất nhanh. Về điểm này, ngoài việc tìm kiếm toàn diện truyền thống, một số giao thức đào tạo búp sóng thích nghi mới được đề xuất để sử dụng các khái niệm đào tạo búp sóng thích nghi mới và đào tạo búp bề đa cấp cho điều chế cố định và thích nghi, tương ứng [90]. Trong thực tế, sẽ rất có giá trị khi khai thác đặc điểm nổi bật của đường sắt là tránh đào hầm. Trong hệ thống điều khiển đường sắt,

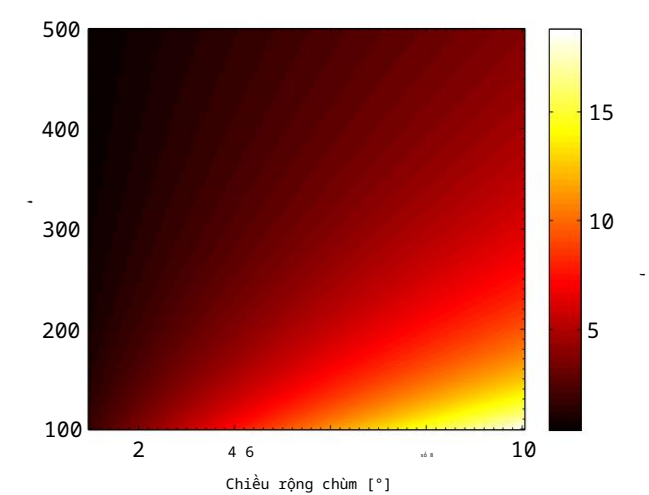
$$T_{\text{tia}}(n) = \frac{\frac{2\text{dBS đường ray}}{V_{\text{train}}} \cdot \text{rất năng} \cdot \frac{W_{\text{beam}}}{2}}{\frac{\text{dBS đường sắt}}{V_{\text{train}}} \cdot \text{tần} \cdot \frac{W_{\text{beam}}}{2}} \cdot \frac{n-1}{n-1} \cdot \frac{n-2}{n-2} \cdot \frac{W_{\text{beam}}}{W_{\text{beam}}} \cdot \frac{\tan W_{\text{beam}}}{\tan W_{\text{beam}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{W_{\text{beam}}}{W_{\text{beam}}}, n \geq 1 \quad (1)$$

nhiều hệ thống thông tin liên lạc, bao gồm GSM cho đường sắt (GSM-R), LTE cho đường sắt (đang được tiêu chuẩn hóa), liên lạc vệ tinh (GPS, Galileo, v.v.), mạch đường ray và Balise, có thể bản địa hóa đoàn tàu kịp thời và thậm chí trong nâng cao. Ưu điểm của các đoàn tàu là vị trí của chúng có thể dự đoán được, vì vậy kênh không cần phải đo liên tục, đặc biệt khi LOS tồn tại. Thay vào đó, hướng định dạng chùm tia có thể được xác định bằng phép ngoại suy từ thông tin vị trí đoàn tàu được lưu trữ [90]. Ngoài vị trí tàu, thông tin về môi trường như các tòa nhà cũng có thể được khai thác để xác định đường dẫn NLOS. Tuy nhiên, mặc dù chúng tôi nhấn mạnh khả năng kỹ thuật này, nhưng hiệu suất thực sự sẽ phụ thuộc vào độ tin cậy và hiệu quả của sức mạnh tổng hợp của các hệ thống thông tin liên lạc nói trên.

Cần có nhiều nỗ lực hơn trong việc đánh giá và xác nhận ý tưởng này cho các nghiên cứu tiếp theo.

Một cách tiếp cận đầy hứa hẹn để giảm tác động của các biến thể thời gian nhanh của kênh là OTFS (không gian tần số thời gian trực giao) [91], [92], sử dụng các hàm cơ bản được tập trung tốt trong miền Doppler trễ. Vì phổ Doppler trễ chỉ thay đổi rất chậm theo thời gian, do đó các ký hiệu khác nhau trải qua cùng một kênh ổn định.

Một thách thức khác của việc áp dụng định dạng chùm tia cho giao tiếp bằng sóng mm và THz là bước sóng cực ngắn đòi hỏi sự dịch pha rất chính xác của từng phần tử ăng ten. Vấn đề này được giải quyết trong [93] và [94].



Hình 4. Thời lượng tối thiểu của một chùm tia khi giả sử máy phát cách đường ray 3 m, độ rộng chùm tia từ 1 đến 10 và tốc độ của tàu từ 100 km/h đến 500 km/h

2) Phương pháp tiếp cận Beamforming cho bốn kịch bản còn lại: Không giống như trong kịch bản “Tàu đến cơ sở hạ tầng”, các kênh trong bốn kịch bản được xác định còn lại không có tính di động cao. Tuy nhiên, mỗi kịch bản có các tính năng khác nhau và

BẢNG IV

THỜI GIAN TỐI THIỂU CỦA MỘT CHÙM, GIẢ SỬ  
MÁY PHÁT CÁCH ĐƯỜNG DÂY 3 M

Wbeam	Tốc độ tàu [km/h]				
	100	200	300	400	500
	1,88 ms 0,94 ms 0,63 ms 0,47 ms 0,38 ms 3,77 ms				
1 2	1,88 ms 1,26 ms 0,94 ms 0,75 ms				
3	5,65 ms 2,83 ms 1,88 ms 1,41 ms 1,13 ms 7,54 ms				
	3,77 ms 2,51 ms 1,88 ms 1,51 ms 9,42 ms 4,71 ms 3.14				
4 5	ms 2.35 ms 1.88 ms 11.30 ms 5,65 ms 3.77 ms 2.82 ms				
6	2.26 MS 13,17 15,05 ms 7,52 ms 5,01 ms 3,76 ms 3,01				
	ms 16,92 ms 8,46 ms 5,64 ms 4,23 ms 3,38 ms 18,80				
7 8	ms 9,40 ms 6,26 ms 4,70 ms 3,76 ms				
9 10					

tác động của chúng đối với các kênh và phương pháp tạo chùm tia được thảo luận như sau:

- Kịch bản “Inter-toa xe”: Đây là kênh LOS và bán tĩnh với phương sai thời gian rất hạn chế. Do đó, nó ít nhạy cảm hơn với sự can thiệp của việc theo dõi chùm tia. Có thể khai thác tất cả các phương pháp định dạng chùm nói trên. Định dạng chùm tia dựa trên ước tính AoD sẽ rất thuận lợi do có các AoD cố định trong kịch bản này và kịch bản “Giữa các toa xe”. Mặt khác, thách thức chính là làm thế nào để giải quyết các lỗi hướng ăng-ten do dao động và chuyển động tương đối của các toa xe liên lạc, đặc biệt khi tàu chạy trên đường ray cong hoặc nghiêng hoặc chịu gió thổi mạnh. Để khắc phục hiệu ứng này, một số kỹ thuật căn chỉnh chùm tia hiệu quả, ví dụ, sử dụng lấy mẫu không gian con thích ứng và sách mã chùm tia phân cấp [95] trở nên cần thiết.
- Kịch bản “Intra-toa xe”: Đây là môi trường trong nhà với hơn 100 người dùng với tính di động thấp. Vì người dùng gần như tĩnh (du cư), chi phí hoạt động của hệ thống tạo chùm sẽ không phải là vấn đề lớn và do đó, tất cả bốn phương pháp tiếp cận tạo chùm đã nói ở trên đều có thể được xem xét. Đối với một toa xe nhất định, cấu trúc của toa xe và cơ sở vật chất trong đó là cố định, các vùng góc mà người dùng ưa thích (hành khách ngồi trên ghế) hoặc hướng mà bức xạ có thể xảy ra về mặt vật lý có thể được biết thông qua các mô phỏng kênh cụ thể tại địa điểm hoặc phép đo trước. Điều này đặc biệt đúng đối với các dải sóng mm và THz, bởi vì trong các dải tần này, các chương ngại vật vật lý có thể tạo thành các bộ suy giảm rất mạnh, do đó hạn chế đáng kể phạm vi góc mà từ đó các tín hiệu hữu ích có thể đến trong một toa xe nhất định. Do đó, toàn bộ các vùng góc có thể được chia thành các khu vực và được sắp xếp theo mức độ ưu tiên. Thông tin này có thể được sử dụng trong đào tạo chùm tia tương tác, do đó nhận ra cấu hình liên kết nhanh. Trong các mô phỏng của [34], liên kết có thể được thiết lập trong giới hạn trễ của video và VoIP



dịch vụ như được tóm tắt trong [96]. Do đó, ngay cả khi liên kết không dây bị ngắt kết nối trong khi nó phục vụ các luồng video hoặc VoIP, chúng tôi có thể thiết lập lại liên kết trước khi ngắt kết nối phiên.

- Kịch bản “Trong ga”: Kịch bản này tương tự như kịch bản “Trong toa xe”, nhưng với nhiều người dùng hơn và khoảng cách giữa các người dùng thậm chí còn ngắn hơn (ngắn hơn 0,5 m). Tính di động thấp của người dùng cho phép sử dụng cả bốn cách tiếp cận. Định dạng chùm dựa trên sách mã sẽ mang lại mức tăng cao hơn so với định dạng chùm dựa trên ước tính AoD do sự phân tán phong phú trong kịch bản này. Ngoài ra, sự xuống cấp của tính trực giao lẫn nhau và bóng động có thể ảnh hưởng đến hiệu suất của các phương pháp tạo chùm tia trong kịch bản này và kịch bản “Trong toa xe”. • Kịch bản “Hạ tầng nổi với hạ tầng”: Tương tự như kịch bản “Giữa các toa tàu”, cả 4 phương án đều khả thi trong kịch bản này. Tuy nhiên, với tư cách là một liên kết trái tay cố định, khoảng cách liên kết truyền thông dài hơn, kết hợp với suy hao đường dẫn nghiêm trọng ở tần số sóng mm và THz, khiến cho việc căn chỉnh các chùm tia truyền và nhận trở thành một vấn đề khó khăn và quan trọng. Mặc dù có thể khai thác một số kỹ thuật căn chỉnh chùm tia nhất định, vẫn không thể sử dụng các mảng lớn hơn mà không có rủi ro giảm hiệu suất tương ứng do lệch chùm tia do gió gây ra [95].

Tất cả các cuộc thảo luận về năm kịch bản được tóm tắt trong Bảng V, có thể hướng dẫn các nỗ lực Nghiên cứu và Phát triển về các phương pháp tạo chùm thích hợp cho tính di động của đường sắt thông minh.

V. SO SÁNH GIỮA SÓNG MM VÀ THZ CHO  
DI ĐỘNG ĐƯỜNG SẮT THÔNG MINH

Trong các phần trước của bài báo này, chúng ta chủ yếu thảo luận về các đặc điểm của sóng mm và THz để phân biệt với vi sóng. Trong phần này, chúng tôi so sánh giao tiếp sóng mm và THz chủ yếu từ quan điểm kênh để tìm ra cái nào có lợi hơn cho tính di động của đường sắt thông minh. Việc xem xét đầu tiên là băng thông có sẵn cho truyền thông di động ít dây. Đối với dải sóng mm, băng thông khả dụng là từ 1 GHz (ở 28 GHz) đến 9 GHz (ở 60 GHz). Do đó, thực tế là đạt được tốc độ dữ liệu 1 Gbps hoặc thậm chí 10 Gbps với hiệu suất phổ vừa phải. Mặt khác, có sẵn các băng thông cực cao vượt quá 20 GHz trong dải tần số THz và do đó, việc truyền tốc độ dữ liệu cao hơn (tức là vượt quá 100 Gbps) có thể dễ dàng hơn. Do đó, đối với mọi liên kết đơn lẻ giữa UE và AP (bên trong nhà ga hoặc toa xe), sóng mm phải đủ để cung cấp các ứng dụng video HD thời gian thực không bị chặn; nhưng đối với các kênh tổng hợp, ví dụ: trong kịch bản “Train-to-cơ sở hạ tầng”, tần số THz hứa hẹn hơn.

Việc xem xét thứ hai là băng thông. Để bù lại tổn hao đường dẫn cao hơn ở tần số THz, sẽ cần có băng thông chùm hẹp hơn nhiều (thậm chí 1 ). Đối với kịch bản “Đào tạo đến cơ sở hạ tầng”, nếu sử dụng các giao thức đào tạo chùm tia hiện tại liên quan đến tìm kiếm toàn diện hoặc sắp xếp thứ tự tìm kiếm khu vực ưu tiên, sóng mm có thể thực tế hơn, vì chùm tia tương đối rộng hơn giúp dễ dàng duy trì thời gian cấu hình liên kết trong độ trễ giới hạn của các dịch vụ video HD hoặc VoIP.

Mặt khác, nếu chúng ta có thể dự đoán chính xác thông tin vị trí của tàu, thì có thể tránh được (hoặc ít nhất là giảm thiểu đáng kể) việc đào tạo chùm tia và sau đó có thể bỏ qua nhược điểm đã nói ở trên về thời gian cấu hình liên kết dài hơn ở THz. Đối với các kịch bản “Giữa các toa xe” và “Từ cơ sở hạ tầng đến cơ sở hạ tầng”, để khắc phục tình trạng giảm hiệu suất do lệch chùm tia do gió gây ra, vẫn cần phát triển các kỹ thuật căn chỉnh chùm tia hiệu quả, vốn khó khăn hơn đối với THz với độ rộng chùm tia hẹp hơn.

Việc xem xét thứ ba là động lực phát triển các kế hoạch truyền thông mới. Mặc dù các sơ đồ truyền thông cổ điển có thể được sử dụng ở tần số THz, nhưng chúng không thể hưởng lợi đầy đủ từ các đặc tính phụ thuộc tần số rất mạnh vào khoảng cách của dải THz [20]. Những đặc thù này của kênh thúc đẩy sự phát triển của các sơ đồ truyền thông mới, chẳng hạn như điều chế đa sóng mang nhận biết khoảng cách (DAMC) [97], sơ đồ định dạng chùm kết hợp với sử dụng truyền DAMC [98], v.v. Về vấn đề này, truyền thông THz sẽ thậm chí còn có triển vọng rộng lớn hơn.

Do đó, tóm lại, thông tin liên lạc bằng sóng mm thiết thực hơn để kích hoạt phiên bản cơ bản của tính di động của đường sắt thông minh trong 5 năm tới. Trong vòng 5 đến 10 năm tới, chúng tôi hy vọng rằng các phiên bản đầy đủ và nâng cao của tính di động của đường sắt thông minh cung cấp kết nối tốc độ dữ liệu cao liên mạch ngoài 100 Gbps có thể được kích hoạt bằng giao tiếp THz. Bảng VI tóm tắt các so sánh giữa truyền thông sóng mm và THz cho tính di động của đường sắt thông minh.

VI. MÔ PHỎNG TRUY CẬP RAY Ở TẦN SỐ 100 GHZ CHO KỊCH BẢN “ĐÀO TẠO ĐẾN CƠ SỞ HẠ TẦNG”

Trong phần này, các phương pháp tạo chùm tia cụ thể khác nhau được trừu tượng hóa thành hai chiến lược tạo chùm tia động. Chúng được tích hợp vào mô phỏng dò tia của chúng tôi ở tốc độ 100 GHz cho kịch bản “Tàu hỏa đến cơ sở hạ tầng” trong môi trường đô thị điển hình. Điều này cho chúng ta cơ hội thảo luận định lượng về cách điều khiển các chùm tia ở máy phát và máy thu cho các tình huống đường sắt thực tế.

A. Thiết lập mô phỏng

BẢNG VII CÀI ĐẶT MÔ PHỎNG	
Kịch bản	Khu đô thị ở Bắc Kinh
Vật liệu cấu thành ngoại thất công trình	Bê tông (60%), kính (30%), kim loại (10%)
loại ăng ten	Ăng-ten định hướng [99]
Ăng-ten	25 dBi ở 100 GHz 10
Anten HPBW	- Mặt phẳng E, 12 - Mặt phẳng H 10 m và 3 m 1
Chiều cao của Tx và Rx	km 360 km/h 1 GHz
Khoảng thời gian giữa các BS	
Tốc độ tàu	100 GHz 20 dBm
Băng thông hệ thống cho một liên kết	[100] 1,25 mm
tần số sóng mang	
Truyền tải điện của RF	
Khoảng thời gian giữa các mẫu kênh	

Các thông số chính của thiết lập mô phỏng được đưa ra bởi Bảng VII, với các mô tả chi tiết sau:

BẢNG V  
TÍNH KHẢ THI CỦA CÁC TIẾP CẬN BEAMFORMING TRONG CÁC KỊCH BẢN DI ĐỘNG ĐƯỜNG SẮT THÔNG MINH

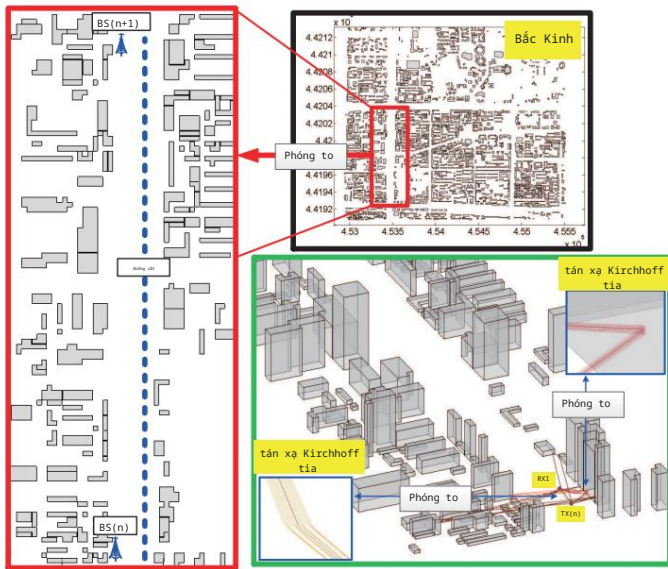
kịch bản (Di động đường sắt thông minh)	Đường sắt đến cơ sở hạ tầng	Chôn cất- toa xe	Nội bộ toa xe	nhà ga bên trong	cơ sở hạ tầng-to- cơ sở hạ tầng
trong nhà/ngoài trời	Ngoài trời	Ngoài	trong nhà	trong nhà	Ngoài trời
Liên kết cố định/di động	Liên kết di động	trời Liên kết bán	Liên kết di động	Liên kết di động	Liên kết bán cố định
Vận tốc của người dùng	Cao, lên tới 500 km/h	cố định Ánh sáng, dao dành cho người đi bộ,	Thấp, dành cho người đi bộ, toa xe ca. 1 m/s	Thấp, đi bộ/mở ✓	Ánh sáng, sai vị trí ăng-ten
LOS/NLOS	LOS NLOS			s LOS với bóng đổ ✓	LOS
Beamforming dựa trên sách mã	✓	✓	✓		✓
✓ định dạng tia dựa trên ước tính AoD		✓	✓	✓	✓
Beamforming dài hạn		✓	✓	✓	✓
Phân cực-ghép kênh ✓ định dạng chùm tia	✓	✓	✓	✓	✓
Những thách thức kỹ thuật	Theo dõi chùm tia nhanh chùm tia hoặc theo dõi, nhưng tia cách căn chỉnh chùm tia và kỹ thuật ngoại suy của các vị trí đoàn tàu là bắt buộc	Không cần theo dõi đi, nhưng tia cần đi	Có thể đào tạo chùm tia nhanh thông qua thử tự tìm kiếm khu vực ưu tiên; sự xuống cấp của tính trực giao lẫn nhau và bóng tối cần được giải quyết		Không cần theo dõi chùm tia, nhưng cần có kỹ thuật căn chỉnh chùm tia

BẢNG VI  
SO SÁNH GIỮA MM WAVE VÀ THZ TRUYỀN THÔNG CHO THÔNG MINH RAIL DI ĐỘNG

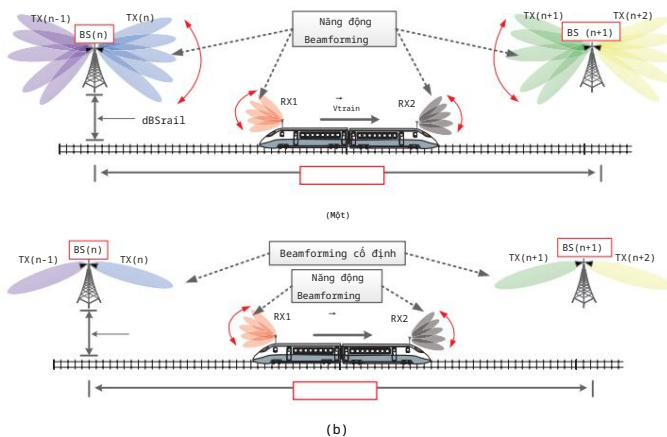
Dải tần sóng MM		THz	Bình luận
Bảng thông khả dụng	1 GHz - 9Ghz	Vượt ra 20 GHz	Sóng MM: tốc độ dữ liệu có thể đạt được: 1 Gbps - 10 Gbps THz: tốc độ dữ liệu có thể đạt được: vượt quá 100 Gbps, phù hợp với các kênh tổng hợp, ví dụ: trong kịch bản “Truyền từ cơ sở hạ tầng” THz cần thời gian đào tạo chùm tia lâu hơn và nhạy cảm hơn với lệch chùm tia do gió Các đặc điểm
Bảng thông	Rộng hơn	Thu hẹp hơn	phụ thuộc rất lớn vào khoảng cách và tần số của dải THz thúc đẩy sự phát triển của các sơ đồ truyền thông mới, ví dụ, điều chế DAMC [97], sơ đồ tạo búp sóng kết hợp [98]
Động lực phát triển các chương trình truyền thông mới	ít hơn	Hơn	Sóng MM: kích hoạt phiên bản đầu tiên của tính di động của đường sắt thông minh vào năm 2020 THz: kích hoạt các phiên bản đầy đủ và nâng cao của tính di động của đường sắt thông minh với kết nối tốc độ dữ liệu cao liền mạch vượt quá 100 Gbps
Triển khai di chuyển đường sắt thông minh	bên trong kế tiếp năm năm	Trong 5-10 năm tới	

- Môi trường và thiết lập hệ thống: Như thể hiện trong Hình 5, một phần của CBD (Khu thương mại trung tâm) ở Bắc Kinh, Trung Quốc, được chọn để thể hiện kịch bản “Tàu hỏa đến cơ sở hạ tầng” khi đường sắt nằm trong khu vực đô thị. Bản đồ trong khung màu đen ở Hình 5 hiển thị một phần của CBD ở Bắc Kinh, trong đó một khu vực hình chữ nhật dài 1 km (hình chữ nhật màu đỏ) được tái tạo trong trình mô phỏng dò tia. Trong kịch bản mô phỏng, khoảng cách giữa các trạm cơ sở liên tiếp (BS) được đặt là 1 km. Ngoài ra, chiều cao của Tx tại các BCL là 10 m; chiều cao của Rx trên tàu là 3 m; tốc độ của tàu được đặt là 360 km / h. Bê tông được coi là vật liệu chính cho mặt ngoài công trình với hằng số điện môi  $\epsilon = 5,31$   $j0,24$  ở 100 GHz [101]. Thủy tinh và kim loại được coi là một phần của vật liệu xây dựng. Hằng số điện môi của chúng lần lượt là  $\epsilon = 6,27$   $j0,19$  và  $\epsilon = 1$   $j107$  ở 100 GHz [101]. Mặt đường là nhựa đường với hằng số điện môi được giả định là  $\epsilon = 3,18$   $j0,10$  ở 100 GHz [102]. Tần số sóng mang được đặt là 100 GHz và hệ thống

bảng thông cho một liên kết truyền thông là 1 GHz. Chiều cao trung bình hình vuông gốc của độ nhám (RMS) đối với bê tông, kính, kim loại và đường là 0,2 mm, 0 mm, 0 mm, 0,34 mm và độ dài tương quan của chúng lần lượt là 38,6 mm, 0 mm, 0 mm, 4,2 mm [102], [103], [104]. • Các tham số ăng-ten và chiến lược tạo chùm tia: Trong mô phỏng, chúng tôi sử dụng ăng-ten định hướng tử [99] với mức tăng tối đa là 25 dBi ở 100 GHz; độ rộng chùm bán công suất (HPBW) cho mặt phẳng E và mặt phẳng H lần lượt là 10 và 12 . Hình 6 chỉ ra rằng ăng-ten định hướng khi vào hai hướng dọc theo đường ray. Trong khi đó, đoàn tàu có hai ăng-ten định hướng ở đầu và đuôi [105], [106]. dBS rail=10 m cho biết khoảng cách giữa BS và đường ray. Trong phần sau, chúng tôi tập trung vào kênh liên kết giữa máy phát thứ n và máy thu đầu tiên. Hai chiến lược tạo búp sóng động được coi là tương đương với hiệu ứng lái của các ăng-ten định hướng. Hình 6(a) mô tả động-



Hình 5. Sơ đồ kịch bản đô thị trong nghiên cứu này, trong đó khung màu đen biểu thị bản đồ của một phần CBD ở Bắc Kinh, khung màu đỏ hiển thị kịch bản dài 1 km và khung màu xanh lá cây hiển thị ảnh chụp nhanh trong tia- mô phỏng theo dõi.



Hình 6. (a) Chiến lược tạo chùm tia động-to-động. (b) Chiến lược tạo chùm tia từ cố định đến động.

chiến lược tạo chùm tia động. Nó yêu cầu tự động theo dõi các tín hiệu của các mục tiêu đang di chuyển ở cả phía máy phát và máy thu. Hình 6(b) thể hiện chiến lược tạo chùm tia cố định sang động. Nó yêu cầu theo dõi tự động cho máy thu, có nghĩa là hướng của ăng-ten tại máy thu luôn hướng đến Tx. Đồng thời, hướng của ăng-ten tại máy phát là hướng tĩnh đến điểm giữa của đường ray giữa hai trạm gốc.

- Cơ chế lan truyền: Đối với mô phỏng, chúng tôi sử dụng trình mô phỏng dò tia kênh động và băng thông rộng tự phát triển, kết hợp trình mô phỏng dò tia từ phương tiện đến phương tiện [65] và trình giả lập dò tia THz băng thông rộng [107]. Cái trước được xác nhận bằng các phép đo mở rộng trong [65], [108]; cái sau được hiệu chỉnh và xác minh bằng một số lượng lớn các phép đo trong [107], [109]. Đối với sự phản ánh, trong các mô phỏng trước đây của chúng tôi trong

cùng một kịch bản đô thị, chúng tôi thấy rằng để theo dõi bậc phản xạ thứ 4 làm tăng đáng kể khối lượng công việc nhưng chỉ tăng thêm ít hơn 1% năng lượng. Do đó, tối đa bậc 3 của các phản xạ được theo dõi trong các mô phỏng để đánh đổi giữa độ chính xác mô phỏng và độ phức tạp tính toán. Đối với tán xạ, mô hình tán xạ Kirchhoff được sử dụng trong mô phỏng này, mô hình này được sử dụng rộng rãi để đưa ra dự đoán chính xác phù hợp cho sóng s phân tán từ các bề mặt gồ ghề ngẫu nhiên [110], [111], [112]. Với thông tin về độ cao RMS và độ dài tương quan bề mặt của tất cả các vật liệu, mô hình tán xạ Kirchhoff [113] có thể được đánh giá và triển khai trong trình giả lập dò tia. • Phương pháp dò tia kênh động và băng thông rộng: Vì băng thông hệ thống cho một liên kết truyền thông là 1 GHz, chúng tôi sử dụng phương pháp dò tia băng tần con, nghĩa là đáp ứng xung kênh (CIR) cho một ảnh chụp nhanh được tạo bởi một số băng con tại nhiều điểm tần số trung tâm [109], [114]. Dựa trên các mô phỏng trước đây của chúng tôi trong cùng một kịch bản với băng thông 1 GHz, 30 băng con được xác định là thiết lập phù hợp trong nghiên cứu này. Để nắm bắt cả đặc điểm kênh quy mô lớn và quy mô nhỏ, khoảng thời gian giữa hai ảnh chụp nhanh được lấy mẫu của kênh là 1,25 mm, nhỏ hơn một nửa bước sóng ở 100 GHz.

## B. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Trong tiểu mục này, tỷ lệ tín hiệu trên tạp âm (SNR), độ trễ trải rộng và độ trải rộng Doppler của kênh giữa máy phát thứ n và máy thu đầu tiên ở 100 GHz được đặc trưng bằng hai chiến lược định dạng bức sóng tương ứng.

1) Tỷ lệ tín hiệu trên tạp âm (SNR): Hình 7 cho thấy SNR của hai chiến lược tạo chùm tia so với khoảng cách giữa máy phát và Rx. SNR được tính bằng:

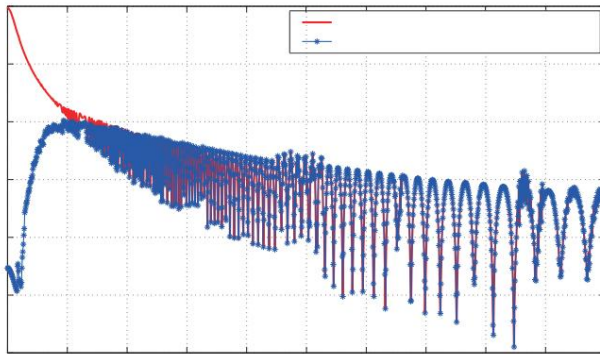
$$\text{SNR (dB)} = P \quad (174 + 10 \cdot \log_{10} (W) + \text{NF}) \quad (2)$$

trong đó P là công suất nhận được mà hiện tượng pha định quy mô nhỏ được loại bỏ bằng cách lấy trung bình các mẫu ở khoảng cách 40 bước sóng [115]. Băng thông hệ thống W là 1 GHz. -174 là mật độ công suất nhiễu phổ cho băng thông 1 Hz (tính bằng dBm/Hz). Con số tiếng ồn NF được đặt là 10 dB.

Từ Hình 7, có thể thấy rằng với sự trợ giúp của việc tạo chùm tia, suy hao đường truyền cao ở 100 GHz có thể được bù một cách hiệu quả và do đó, độ dài liên kết có thể dài hơn 500 m (10 dB SNR làm ngưỡng). Đối với khoảng cách từ 100 m đến 1000 m, có thể đạt được hơn 85% SNR từ 10 dB đến 30 dB bằng cả hai chiến lược tạo chùm tia.

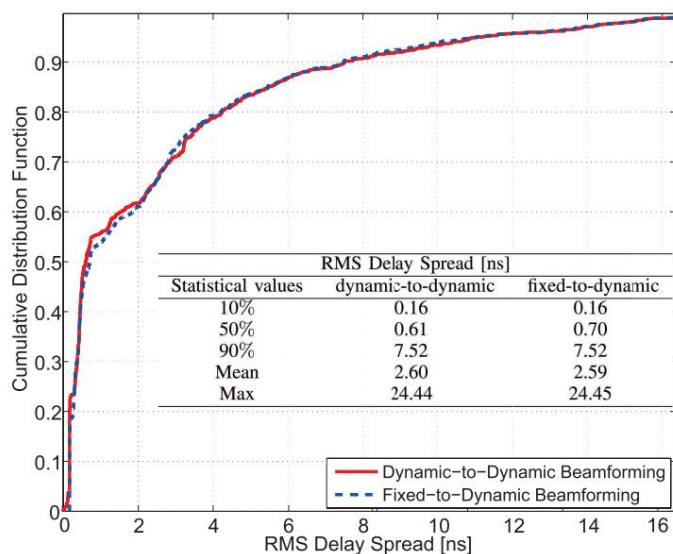
Tuy nhiên, trong khu vực có khoảng cách ngắn hơn 100 m, SNR của chiến lược tạo chùm tia cố định sang động giảm đi nhanh chóng. Điều này phản ánh một nhược điểm của việc sử dụng định dạng chùm tia từ cố định đến động – thành phần LOS sẽ nằm ngoài thủy chính của chùm cố định khi máy thu ở gần Tx.

2) Trải trễ: Đối với các đặc tính kênh trong miền trễ, có thể thu được tổng quan về kết quả mô phỏng bằng các khoảng khắc chuẩn hóa của cấu hình trễ công suất (PDP) [116]. Các chức năng phân phối tích lũy (CDF)



Hình 7. SNR của kênh với hai chiến lược định dạng búp sóng khác nhau so với khoảng cách giữa bộ phát và Rx

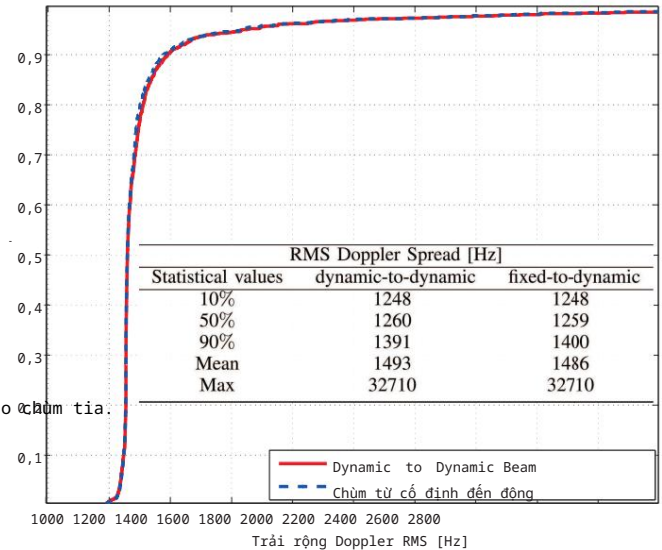
mức chênh lệch độ trễ RMS được minh họa trong Hình 8. 50% mức chênh lệch độ trễ RMS nhỏ hơn 1 ns và giá trị trung bình là khoảng 2,6 ns cho cả hai chiến lược định dạng tia. Vì vậy, sự chênh lệch độ trễ thời gian ngắn xuất phát từ suy hao đường truyền cao ở 100 GHz và hiệu ứng lọc không gian của các chiến lược tạo chùm tia. Tuy nhiên, chúng vẫn đủ dài để gây nhiễu liên ký hiệu (ISI) cho tín hiệu có băng thông 1 GHz, nghĩa là thời lượng ký hiệu 1 ns.



Hình 8. Hàm phân phối tích lũy của trải rộng độ trễ RMS với hai chiến lược tạo chùm tia khác nhau

3) Trải rộng Doppler: Các hiệu ứng Doppler thể hiện sự giải thích vật lý về sự thay đổi tần số bằng chuyển động của các thiết bị thu phát và vật thể [116]. Trong các kết quả mô phỏng dò tia, độ dịch chuyển Doppler cho mỗi tia được tính bằng cách nhân vận tốc với cosin của góc giữa vận tốc và tia. Hai CDF của trải rộng RMS Doppler được so sánh trong Hình 9, trong đó đối với cả hai chiến lược tạo chùm tia, 80% trải rộng RMS Doppler nằm trong khoảng từ 1248 Hz đến 1400 Hz. Mặc dù chùm ăng-ten định hướng làm giảm số lượng đa đường hiệu quả và do đó thường làm giảm trải phổ Doppler, số liệu này vẫn cao hơn nhiều so với các trường hợp

ở tần số dưới 6 GHz. Tuy nhiên, vì băng thông rộng hơn nhiều cũng sẽ được sử dụng nên thời lượng ký hiệu ngắn hơn có thể được sử dụng, tùy thuộc vào độ trải trễ của kênh, sơ đồ hoa tiêu và sơ đồ truyền dẫn cụ thể được sử dụng. Do đó, ảnh hưởng của trải rộng Doppler lớn như một yếu tố hạn chế sẽ cần được đánh giá cẩn thận trong các nghiên cứu trong tương lai. Do đó, liệu sự lan truyền Doppler có phải là yếu tố hạn chế đối với sóng mm và truyền thông THz hay không nên được đánh giá trong nghiên cứu trong tương lai.



Hình 9. CDF của RMS Doppler trải rộng với hai chiến lược tạo chùm tia khác nhau.

4) Thảo luận: Từ các đặc điểm kênh được phân tích ở trên, chúng ta có thể có được những hiểu biết và đề xuất sau cho lớp vật lý và thiết kế hệ thống: • Việc sử dụng ăng-ten định hướng độ lợi cao hoặc chiến lược tạo chùm tia là bắt buộc để duy trì “Tàu đến cơ sở hạ tầng” liên kết đủ độ dài (dài hơn 500 m) ở băng tần THz. Như được hiển thị trong Hình 7, độ dài liên kết có thể dài hơn 500 mét bằng cách sử dụng ăng-ten định hướng hoặc định dạng chùm tia ở cả phía máy phát và máy thu. Do đó, xét về độ dài liên kết, có thể cung cấp liên lạc di động ngoài trời ở băng tần THz cho các phương tiện đang di chuyển.

- Định dạng búp sóng động là rất quan trọng để giữ cho kênh có SNR cao, trải phổ trễ thấp và trải phổ Doppler thấp. Cụ thể hơn, định dạng chùm động ở cả hai bên phát và thu hoạt động tốt hơn so với định dạng chùm động chỉ ở một bên. Hiệu ứng lọc không gian của định dạng chùm tia có thể ngăn chặn hiệu quả sự lan truyền độ trễ và sự lan truyền Doppler, giúp đạt được tốc độ dữ liệu Gbps với hiệu suất cao cho người dùng bên trong các phương tiện di chuyển nhanh.
- Chiến lược định dạng chùm từ cố định đến động có thể là một lựa chọn tốt nếu việc triển khai định dạng chùm động ở cả hai phía (ví dụ: cách được trình bày trong [106]) quá phức tạp hoặc không kinh tế. Tuy nhiên, các chiến lược chuyển giao nâng cao sẽ được sử dụng khi điều kiện kênh trở nên tồi tệ hơn. Chẳng hạn, như trong Hình 7, khi máy thu ở gần Tx, kênh bị

tổn thất rất cao. Sau đó, chuyển giao sẽ được thực hiện ở đây, một chiến lược rất khác so với các trường hợp hiện tại của thông tin di động ở tần số dưới 6 GHz, trong đó việc chuyển giao thường xảy ra ở vị trí giữa của các trạm cơ sở liên tiếp.

VII. PHẦN KẾT LUẬN

Tính di động của đường sắt thông minh trong tương lai đòi hỏi hệ thống liên lạc hiệu suất cao. Trong bài báo này, chúng tôi đã giới thiệu các ứng dụng và kịch bản cần thiết cho tính di động của đường sắt thông minh, phân tích các yêu cầu về băng thông và làm rõ động cơ phát triển thông tin liên lạc bằng sóng mm và THz cho đường sắt. Tính khả thi về kỹ thuật tương ứng được chứng minh bằng công nghệ nghiên cứu kênh hiện đại nhất về truyền sóng, mảng ăng-ten và phương pháp tạo chùm tia. Tuy nhiên, vẫn còn nhiều thách thức cần được giải quyết trong từng khía cạnh.

Liên quan đến các khía cạnh truyền sóng, cần thực hiện nhiều nỗ lực nghiên cứu hơn để khám phá bản chất của các hiện tượng lan truyền phức tạp, chẳng hạn như các hành vi phụ thuộc vào khoảng cách và chọn lọc tần số, phân tán tần số, các hiệu ứng tạo bóng khác nhau. Các mô hình kênh sóng MM và THz bao gồm các tính năng đường sắt vẫn là những vấn đề mở và do đó, cần có thêm các phép đo động lực học và mô phỏng dò tia.

Đối với mảng ăng-ten, các ăng-ten siêu băng thông rộng và đa băng tần trở nên cần thiết cho thông tin liên lạc bằng sóng mm và THz. Các ăng-ten mới đầy tiềm năng dựa trên vật liệu nano và siêu dữ liệu là những lựa chọn thay thế tốt cho các thiết bị di động và cá nhân của hành khách. Hơn nữa, truyền dẫn đa ăng-ten sử dụng cấu trúc ăng-ten theo pha mô-đun rất phù hợp với các tình huống “Bên trong nhà ga” và “Trong toa xe” khi nhiều người dùng yêu cầu giao tiếp đồng thời.

Khai thác kiến trúc tạo chùm kết hợp cho đường sắt có khả năng thu được lợi ích từ cả ghép kênh không gian và tạo chùm. Phương pháp tạo chùm dựa trên ước tính AoD có thể được sử dụng rộng rãi trong năm kịch bản đường sắt. Hiệu suất của định dạng chùm dựa trên sách mã phụ thuộc vào tính di động. Định dạng chùm dài hạn cũng như định dạng chùm dựa trên ước tính AoD khả thi hơn đối với các kịch bản ios có kịch bản gần như cố định, tức là các kịch bản “Giữa các toa xe” và “Từ cơ sở hạ tầng đến cơ sở hạ tầng”. Cả hai kênh LOS và NLOS, ghép kênh phân cực có thể được khai thác để cải thiện thông lượng.

Đối với kịch bản “Tàu đến cơ sở hạ tầng”, chúng ta nên khai thác đặc điểm nổi bật của đường sắt, tức là các vị trí tàu có thể dự đoán được, để giảm các yêu cầu về độ trễ nghiêm ngặt đối với đào tạo chùm tia - một khả năng kỹ thuật quan trọng cần được xác thực thông qua thử nghiệm tiếp theo học. Trong bốn kịch bản còn lại, sự suy giảm tính trực giao, hiệu ứng đổ bóng động và kỹ thuật căn chỉnh chùm tia là những vấn đề mở cần được giải quyết khẩn cấp.

Sau khi so sánh sóng mm với THz về băng thông khả dụng, độ rộng chùm tia, động lực phát triển các sơ đồ truyền thông mới và tiêu chuẩn hóa, chúng tôi kết luận rằng sóng mm sẽ hứa hẹn hơn để kích hoạt phiên bản cơ bản của tính di động của đường sắt thông minh trong 5 năm tới, trong khi các phiên bản đầy đủ và nâng cao của tính di động của đường sắt thông minh sẽ phụ thuộc nhiều hơn vào THz trong vòng 5 đến 10 năm tới. Cuối cùng, các mô phỏng dò tia ở 100 GHz và định lượng tương ứng

các cuộc thảo luận nhấn mạnh rằng để hình thành các chùm tenna định hướng có độ khuếch đại cao ở cả phía máy phát và máy thu, các chiến lược tạo chùm động và thiết kế chuyển giao nâng cao có tầm quan trọng đối với tính khả thi của truyền thông THz cho phép di chuyển đường sắt thông minh.

NHÌN NHẬN

Các tác giả xin cảm ơn các nhà phê bình ẩn danh đã đọc kỹ và nhận xét mang tính xây dựng, giúp cải thiện bài báo này rất nhiều. Tiến sĩ Ke Guan cảm ơn Quý Alexander von Humboldt vì sự hỗ trợ mà ông nhận được khi là nghiên cứu viên tại Đại học Technische“at Braunschweig.

NGƯỜI GIỚI THIỆU

[1] “Cải cách đường sắt: Bộ công cụ cải thiện hiệu quả hoạt động của ngành đường sắt,” Ngân hàng Thế giới, Tech. Dân biểu, 2011.

[2] “Chương trình làm việc HORIZON 2020 2014 - 2015 11. Giao thông thông minh, xanh và tích hợp được sửa đổi,” Quyết định của Ủy ban Châu Âu, Tech. Dân biểu C(2014)4995, tháng 7 năm 2014.

[3] B. Ai, X. Cheng, T. K“urner, Z. Zhong, K. Guan, R. He, L. Xiong, D. Matolak, D. Michelson, và C. Briso-Rodriguez, “Những thách thức để ngăn chặn thông tin liên lạc không dây cho đường sắt tốc độ cao,” Giao dịch của IEEE trên Hệ thống Giao thông Thông minh, tập. 15, không. 5, trang 2143-2158, 2014.

[4] ÖNG Akdeniz, Y. Liu, M. K. Samim, S. Sun, S. Rangan, TS Rappaport, và E. Erkip, “Mô hình hóa kênh sóng milimet và đánh giá dung lượng di động,” Tạp chí IEEE về các lĩnh vực được chọn trong truyền thông, tập. 32, không. 6, trang 1164-1179, tháng 6 năm 2014.

[5] J. Moreno, J. Riera, L. De Haro và C. Rodriguez, “Khảo sát về các dịch vụ liên lạc vô tuyến đường sắt trong tương lai: thách thức và cơ hội,” Tạp chí Truyền thông IEEE, tập. 53, không. 10, trang 62-68, tháng 10 năm 2015.

[6] B. Ai, K. Guan, M. Rupp, T. K“urner, X. Cheng, X. Yin, Q. Wang, G. Ma, Y. Li, L. Xiong, và J. Ding, “Mạng truyền thông di động định hướng dịch vụ đường sắt trong tương lai,” Tạp chí Truyền thông IEEE, tập. 53, không. 10, trang 78-85, tháng 10 năm 2015.

[7] “Bộ hỗ trợ cho các dịch vụ & hệ thống xung quanh phần a - Băng thông rộng 60 GHz liên kết,” [Trực tuyến]. Có sẵn: <http://www.easy-a.de/>.

[8] “Tầm nhìn IMT - khuôn khổ và mục tiêu tổng thể về sự phát triển của IMT trong tương lai cho năm 2020 và xa hơn nữa,” số. Công nghệ. Dân biểu ITU-R M.2083-0, 2015.

[9] EG Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson và TL Marzetta, “MIMO khổng lồ cho các hệ thống không dây thế hệ tiếp theo,” Tạp chí Truyền thông IEEE, tập. 52, không. 2, trang 186-195, 2014.

[10] D. Fokum và V. Frost, “Một cuộc khảo sát về các phương pháp truy cập internet băng thông rộng trên tàu hỏa,” Hướng dẫn Khảo sát Truyền thông của IEEE, tập. 12, không. 2, trang 171-185, lần thứ hai 2010.

[11] “Kịch bản, yêu cầu và KPI cho hệ thống di động và không dây 5G,” Dự án METIS, Tech. Người đại diện Bàn giao D1.1, tháng 4 năm 2013.

[12] “Mô tả nhu cầu phổ tần và nguyên tắc sử dụng,” dự án METIS, Tech. Người đại diện Bàn giao D5.3, tháng 8 năm 2014.

[13] T. K“urner và S. Priebe, “Hướng tới truyền thông THz - hiện trạng trong nghiên cứu, tiêu chuẩn hóa và quy định,” Tạp chí Hồng ngoại, Máy đo độ sáng và Sóng Terahertz, trang. Ấn phẩm điện tử (10 trang), <http://dx.doi.org/10.1007/s10762-013-0014-3>, tháng 8 năm 2013.

[14] M.-C. Chuang và MC Chen, “Kiến trúc proxy di động cho các dịch vụ video trên môi trường đường sắt tốc độ cao trong mạng LTE-A,” Tạp chí Hệ thống IEEE, tập. 9, không. 4, trang 1264-1272, tháng 12 năm 2015.

[15] M. Aguado, O. Onandi, P. Agustín, M. Higuero, và E. Jacob Taquet, “WiMax trên đường ray,” Tạp chí IEEE Vehicular Technology, tập. 3, không. 3, trang 47-56, tháng 9 năm 2008.

[16] G. Barbu, “Tàu điện tử - giao tiếp băng thông rộng với các đoàn tàu đang di chuyển,” Có sẵn: <https://www.uic.org/>, tháng 6 năm 2010.

[17] M. Aguado, E. Jacob, P. Saiz, J. Unzilla, M. Higuero và J. Matias, “Hệ thống tin hiệu đường sắt và xu hướng mới trong truyền thông dữ liệu không dây,” trong Hội nghị Công nghệ Xe cộ lần thứ 62 của IEEE năm 2005, tập 2, tháng 9 năm 2005, trang 1333-1336.

[18] K. Guan, Z. Zhong và B. Ai, “Đánh giá LTE-R bằng mô hình kênh đường sắt tốc độ cao,” trong Proc. Quốc tế thứ 3 Conf. cộng đồng. Điện toán Di động, Thanh Đảo, Trung Quốc, 2011, trang 461-464.

- [19] H. Meinel và A. Plattner, "Sự truyền sóng milimet dọc theo các đường ray," Kỷ yếu IEE, trang 688-694, 1983.
- [20] I. Akyildiz, J. Jornet, và C. Han, "Teranet: mạng truyền thông siêu băng rộng trong dải Terahertz," IEEE Wireless Communications, vol. 21, không. 4, trang 130-135, tháng 8 năm 2014.
- [21] E. Ojefors, J. Grzyb, Y. Zhao, B. Heinemann, B. Tillack và U. Pfeiffer, "Chipset SiGe 820GHz dành cho các ứng dụng hình ảnh hoạt động Terahertz," trong Hội nghị Mạch thể rắn quốc tế IEEE năm 2011 Tổng hợp các bài báo kỹ thuật (ISSCC), tháng 2 năm 2011, trang 224-226.
- [22] J. Antes, F. Boes, T. Messinger, U. Lewark, T. Mahler, A. Tessmann, R. Henneberger, T. Zwick và I. Kallfass, "Giao tiếp không dây sóng milimet nhiều gigabit trong truyền dẫn thực tế môi trường," Giao dịch của IEEE về Khoa học và Công nghệ Terahertz, tập. 5, không. 6, trang 1078-1087, 2015.
- [23] T. Schneider, A. Wiatrek, S. Preußler, M. Grigat, và R.-P. Braun, "Phân tích ngân sách liên kết cho các liên kết không dây cố định terahertz," Giao dịch của IEEE về Khoa học và Công nghệ Terahertz, tập. 2, không. 2, trang 250-256, 2012.
- [24] J. Jornet và I. Akyildiz, "Ăng-ten nano plasmonic dựa trên graphene để liên lạc băng tần Terahertz trong mạng nano," Tạp chí IEEE về các lĩnh vực được chọn trong truyền thông, tập. 31, không. 12, trang 685-694, tháng 12 năm 2013.
- [25] A. Adhikary, E. Al Safadi, M. Samimi, R. Wang, G. Caire, T. Rappaport, và A. Molisch, "Phân chia không gian chung và ghép kênh cho các kênh sóng mm," Tạp chí IEEE về Selected Các lĩnh vực trong Truyền thông, tập. 32, không. 6, trang 1239-1255, tháng 6 năm 2014.
- [26] Y. Zhang và D. Liu, "Các giải pháp ăng-ten trên chip và ăng-ten trong gói cho các thiết bị sóng milimet tích hợp cao dành cho truyền thông không dây," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, tập. 57, không. 10, trang 2830-2841, tháng 10 năm 2009.
- [27] F. Rusek, D. Persson, B. K. Lau, E. Larsson, T. Marzetta, O. Edfors, và F. Tufvesson, "Mở rộng quy mô mimo: Cơ hội và thách thức với mảng cực lớn," Tạp chí Xử lý tín hiệu IEEE, tập 30, không. 1, trang 40-60, tháng 1 năm 2013.
- [28] "Tính khả thi về mặt kỹ thuật của IMT trong các băng tần trên 6 GHz," số. Công nghệ. Trả lời. ITU-R M.2376-0, 2015.
- [29] "Nhóm làm việc IEEE 802.15 cho WPAN," Có sẵn: <http://grouper.ieee.org/groups/802/15/>.
- [30] J. Jornet và I. Akyildiz, "Mô hình hóa kênh và phân tích dung lượng cho các mạng nano không dây điện tử trong băng tần Terahertz," Giao dịch của IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 10, không. 10, trang 3211-3221, tháng 10 năm 2011.
- [31] A. Maltsev, E. Perahia, R. Maslennikov, A. Sevastyanov, A. Lomayev, và A. Khoryaev, "Tác động của các đặc tính phân cực đối với các hệ thống liên lạc vô tuyến trong nhà 60-GHz," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, tập 9, trang 413-416, 2010.
- [32] T. Rappaport, S. Sun, R. Mayzus, H. Zhao, Y. Azar, K. Wang, G. Wong, J. Schulz, M. Samimi, và F. Gutierrez, "Truyền thông di động băng sóng milimet cho Di động 5G: Nó sẽ hoạt động!" Truy cập IEEE, tập. 1, trang 335-349, 2013.
- [33] T. Rappaport, F. Gutierrez, E. Ben-Dor, J. Murdock, Y. Qiao, và J. Tamir, "Các phép đo và mô hình lan truyền sóng milimet băng thông rộng sử dụng ăng-ten chùm thích ứng cho thông tin di động đô thị ngoài trời," Giao dịch của IEEE về Ăng-ten và Truyền truyền, tập. 61, không. 4, trang 1850-1859, tháng 4 năm 2013.
- [34] S. Wyne, K. Haneda, S. Ranvier, F. Tufvesson và A. Molisch, "Hiệu ứng tạo chùm tia đối với các đặc điểm kênh sóng mm được đo," Giao dịch của IEEE về truyền thông không dây, tập. 10, không. 11, tr. 3553-3559, tháng 11 năm 2011.
- [35] "Suy giảm bởi các khí trong khí quyển," không. Công nghệ. Dân biểu ITU-R P.676-8, 2009.
- [36] "Mô hình suy hao cụ thể đối với mưa để sử dụng trong các phương pháp dự báo," số. Công nghệ. Dân biểu ITU-R P.838-2, 2003.
- [37] C. Han, A. Bicen, và I. Akyildiz, "Mô hình hóa kênh đa tia và đặc tính băng rộng cho truyền thông không dây trong dải terahertz," Giao dịch của IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 14, không. 5, trang 2402-2412, tháng 5 năm 2015.
- [38] C. Han và I. Akyildiz, "Mô hình hóa và phân tích đầu cuối ba chiều cho truyền thông băng tần terahertz hỗ trợ graphene," Giao dịch IEEE về Công nghệ Xe cộ, tập. PP, không. 99, trang 1-1, 2016.
- [39] E. Hecht, Quang học. Addison Wesley: Addison Wesley, 1998.
- [40] R. Piesiewicz, C. Jansen, D. Mittleman, T. Kleine-Ostmann, M. Koch, và T. Kurner, "Phân tích tán xạ để mô hình hóa các hệ thống truyền thông THz," Giao dịch của IEEE trên Ăng-ten và Truyền truyền, tập. 55, không. 11, trang 3002-3009, tháng 11 năm 2007.
- [41] C. Jansen, S. Priebe, C. Möller, M. Jacob, H. Dierke, M. Koch, và T. Kurner, "Sự tán xạ khuếch tán từ các bề mặt gồ ghề trong THz com các kênh truyền thông," Giao dịch của IEEE về Khoa học và Công nghệ Terahertz, tập. 1, không. 2, trang 462-472, tháng 11 năm 2011.
- [42] W. Fan, I. Carton, J. Ø. Nielsen, K. Olesen và G. Pedersen, "Các đặc tính băng thông rộng được đo của các kênh trong nhà ở dải centimet và milimet," Tạp chí EURASIP về Mạng và Truyền thông Không dây, tập. 2016, không. 1, trang 1-13, 2016. [Trực tuyến]. Có sẵn: <http://dx.doi.org/10.1186/s13638-016-0548-x> [43] R. Piesiewicz, T. Kleine-Ostmann, N. Krumbholz, D. Mittleman, M. Koch, và T. Kurner, "Đặc tính terahertz của vật liệu xây dựng," Electronics Letters, vol. 41, không. 18, trang 1002-1004, tháng 9 năm 2005.
- [44] S. Priebe, M. Jacob và T. Kurner, "Đồ thị băng thông rộng được hiệu chỉnh để mô phỏng quá trình truyền sóng theo sóng mm và sóng dưới mm trong các kênh giao tiếp của," trong Hội nghị Không dây Châu Âu lần thứ 18 Không dây Châu Âu, Tháng 4 năm 2012, trang 1-10.
- [45] H. Harada và H. Sawada, "Mô hình hóa kênh sóng milimet cho các tiêu chuẩn hóa của IEEE802," trong Hội nghị Châu Âu lần thứ 8 về Anten và Truyền truyền (EuCAP) năm 2014, The Hague, Hà Lan, tháng 4 năm 2014, trang 644-645.
- [46] M. Jacob, S. Priebe, R. Dickhoff, T. Kleine-Ostmann, T. Schrader, và T. Kurner, "Nhiều xạ trong các kênh truyền sóng trong nhà sóng mm và sóng dưới mm," Giao dịch của IEEE trên Lò vi sóng Lý thuyết và Kỹ thuật, tập. 60, không. 3, trang 833-844, tháng 3 năm 2012.
- [47] S. Lee và W. Lee, "Công suất của các kênh nhiều đầu ra đa đầu vào milimet trong phòng hội nghị," IET Communications, tập. 6, không. 17, trang 2879-2885, tháng 11 năm 2012.
- [48] W. Fan, P. Kyosti, J. Ø. Nielsen và G. Pedersen, "Phân tích dung lượng kênh mimo băng rộng trong thiết lập buồng không phản xạ nhiều đầu dò," Giao dịch của IEEE về Công nghệ Xe cộ, tập. 65, không. 5, trang 2861-2871, tháng 5 năm 2016.
- [49] M. Park và H. K. Pan, "Kỹ thuật đa dạng không gian cho mạng WLAN IEEE 802.11ad ở băng tần 60 GHz," Thư giao tiếp của IEEE, tập. 16, không. 8, trang 1260-1262, tháng 8 năm 2012.
- [50] M. Jacob, S. Priebe, T. Kurner, M. Peter, M. Wisotzki, R. Felbecker và W. Keusgen, "Các phân tích cơ bản về sự tác động của con người ở tần số 60 GHz," trong Antennas and Propagation (EuCAP), Hội nghị châu Âu lần thứ 7 năm 2013 về. IEEE, 2013, trang 117-121.
- [51] C. Gustafson, K. Haneda, S. Wyne, và F. Tufvesson, "Về mô hình kênh và phân cụm đa đường sóng mm," Giao dịch của IEEE về Ăng-ten và Truyền truyền, tập. 62, không. 3, trang 1445-1455, tháng 3 năm 2014.
- [52] N. Azzaoui và L. Clavier, "Mô hình kênh thống kê dựa trên các quy trình ngẫu nhiên ổn định  $\alpha$  và ứng dụng cho kênh băng tần siêu rộng 60 GHz," IEEE Transactions on Communications, tập. 58, không. 5, trang 1457-1467, tháng 5 năm 2010.
- [53] P. Smulders, "Đặc tính thống kê của các kênh vô tuyến trong nhà 60-GHz," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, không. 10, trang 2820-2829, tháng 10 năm 2009.
- [54] S. Geng, J. Kivinen, X. Zhao, và P. Vainikainen, "Đặc tính kênh lan truyền sóng milimet cho thông tin liên lạc không dây tầm ngắn," IEEE Transactions on Vehicular Technology, tập. 58, không. 1, trang 3-13, tháng 1 năm 2009.
- [55] M. Kyro, K. Haneda, J. Simola, K. Nakai, K.-i. Takizawa, H. Hagiwara, và P. Vainikainen, "Mô hình hóa độ trễ và mất đường dẫn dựa trên phép đo trong môi trường bệnh viện ở tần số 60 GHz," Giao dịch của IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 10, không. 8, trang 2423-2427, tháng 8 năm 2011.
- [56] A. Garcia, W. Kotterman, U. Trautwein, D. Brckner, J. Kunisch và R. Thomae, "Đặc tính tạo bóng biến đổi theo thời gian 60 GHz trong một chiếc Airbus 340," trong Kỷ yếu của Hội nghị Châu Âu lần thứ tư về Ăng-ten năm 2010 và Truyền truyền (EuCAP), tháng 4 năm 2010, trang 1-5.
- [57] K. Haneda, "Mô hình kênh và định dạng chùm tia ở dải tần sóng milimet," Giao dịch IEICE, tập. 98-B, không. 5, trang 755-772, 2015.
- [58] S. Priebe, C. Jastrow, M. Jacob, T. Kleine-Ostmann, T. Schrader, và T. Kurner, "Các phép đo kênh và lan truyền ở 300 GHz," Giao dịch của IEEE trên Antennas và Truyền truyền, tập. 59, không. 5, trang 1688-1698, tháng 5 năm 2011.
- [59] S. Priebe, M. Kannicht, M. Jacob và T. Kurner, "Các phép đo kênh trong nhà siêu băng thông rộng và mô hình lan truyền đồ thị được hiệu chỉnh ở tần số THz," Tạp chí Truyền thông và Công nghệ Mạng, tập. 15, không. 6, trang 547-558, 2013.
- [60] S. Priebe và T. Kurner, "Mô hình ngẫu nhiên các kênh vô tuyến trong nhà THz," Giao dịch của IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 12, không. 9, trang 4445-4455, tháng 9 năm 2013.
- [61] S. P. Ho-Jin Song và T. Kurner, "Truyền thông không dây Terahertz," Sổ tay Công nghệ Terahertz, tập. CRC Press Book, trang 495-526, tháng 5 năm 2015.

- [62] AF Molisch, A. Karttunen, R. Wang, CU Bas, S. Hur, J. Park và J. Zhang, "Các kênh sóng milimet trong môi trường đô thị," trong Kỷ yếu của Hội nghị Châu Âu về ăng-ten và Propagation (EUCAP), tháng 4 năm 2016, Kỷ yếu Hội nghị, tr. (Được mời).
- [63] W. Fan, I. Carton, P. Ky'osti, và GF Pedersen, "Mô phỏng các kênh dò tia trong các thiết lập buồng không phản xạ nhiều đầu dò để thử nghiệm ổ đĩa ảo," Giao dịch của IEEE về ăng-ten và Truyền truyền, tập. 64, không. 2, trang 730-739, tháng 2 năm 2016.
- [64] G. Li, B. Ai, K. Guan, R. He, Z. Zhong, L. Tian, và J. Dou, "Mô hình suy hao đường dẫn và phân tích mở dần cho các kênh có thiết lập ăng-ten khác nhau trong các đường hầm ở 30 ghz ban nhạc," trong Kỷ yếu Hội nghị Châu Âu 2016 về ăng-ten và Truyền truyền (EUCAP), tháng 4 năm 2016, Kỷ yếu Hội nghị, tr. xuất hiện.
- [65] K. Guan, Z. Zhong, B. Ai, và T. K'urner, "Mô hình lan truyền xác định cho môi trường đường sắt cao tốc thực tế," trong Hội nghị Công nghệ Xe cộ lần thứ 77 của IEEE (VTC Spring), 2013, trang .1-5.
- [66] Y. Chang, M. Furukawa, H. Suzuki và K. Fukawa, "Phân tích lan truyền bằng phương pháp dò tia cho môi trường tàu cao tốc ở 60 GHz," trong Hội nghị Công nghệ Xe cộ lần thứ 81 của IEEE (VTC Spring), tháng 5 năm 2015 2015, trang 1-5.
- [67] PT Dat, A. Kanno, N. Yamamoto, và T. Kawanishi, "WDM RoF MMW và hệ thống ăng-ten phân tán định vị tuyến tính cho thông tin liên lạc đường sắt tốc độ cao trong tương lai," Tập chí Truyền thông IEEE, tập. 53, không. 10, trang 86-94, tháng 10 năm 2015.
- [68] J. Karedal, F. Tufvesson, N. Czink, A. Paier, C. Dumard, T. Zemen, CF Mecklenbrauker, và AF Molisch, "Mô hình mimo ngẫu nhiên dựa trên hình học cho giao tiếp giữa xe với xe," Tập chí Truyền thông IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 8, không. 7, trang 3646-3657, 2009.
- [69] A. Maltsev, A. Pudseyev, I. Karls, I. Bolotin, G. Morozov, R. Weiler, M. Peter, W. Keusgen, M. Danchenko, và A. Kuznetsov, "Cách tiếp cận gần như tất định đối với mm -mô hình hóa kênh sóng trong dự án FP7 MiWEBA," "WWRF" 3, trang 1-6, 2014.
- [70] W. Fan, T. J'ams'a, J. Ø. Nielsen và GF Pedersen, "Về các phương pháp lấy mẫu góc cho các mô hình kênh không gian 3 chiều," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, tập. 14, trang 531-534, 2015.
- [71] "Samsung Electronics lập kỷ lục tốc độ 5G ở mức 7,5Gbps, nhanh hơn 30 lần so với 4G LTE," Samsung Tomorrow. [Trực tuyến]. Sẵn có: <http://global.samsungtomorrow.com/?p=43349>.
- [72] D. Chizhik, "Làm chậm kênh mimo dao động theo thời gian bằng cách tạo chùm tia," Giao dịch của IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 3, không. 5, trang 1554-1565, tháng 9 năm 2004.
- [73] GD Durgin và TS Rappaport, "Lý thuyết về hệ số hình dạng đa đường cho các kênh không dây giảm dần quy mô nhỏ," Giao dịch của IEEE về ăng-ten và Truyền truyền, tập. 48, không. 5, trang 682-693, tháng 5 năm 2000.
- [74] V. Va và RW Heath, "Mối quan hệ cơ bản giữa thời gian kết hợp kênh và băng thông chùm trong các kênh dành cho xe cộ," trong Hội nghị Công nghệ Xe cộ lần thứ 82 của IEEE (VTC Fall), tháng 9 năm 2015, trang 1-5.
- [75] T. Kosugi, A. Hirata, T. Nagatsuma và Y. Kado, "Hệ thống không dây tầm xa sóng MM," Tập chí Lò vi sóng IEEE, tập. 10, không. 2, trang 68-76, tháng 4 năm 2009.
- [76] S. Sun, T. Rappaport, R. Heath, A. Nix, và S. Rangan, "Mimo cho thông tin liên lạc không dây bước sóng milimet: tạo chùm tia, ghép kênh không gian hoặc cả hai?" Tập chí Truyền thông IEEE, tập. 52, không. 12, trang 110-121, tháng 12 năm 2014.
- [77] P. Sudarshan, NB Mehta, AF Molisch, và J. Zhang, "Xử lý trước rf dựa trên thống kê kênh với lựa chọn ăng-ten," IEEE Transactions on Wireless Communications, tập. 5, không. 12, trang 3501-3511, tháng 12 năm 2006.
- [78] O. El Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi và R. Heath, "Tiền mã hóa thừa thớt không gian trong các hệ thống mimo sóng milimet," Giao dịch của IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 13, không. 3, trang 1499-1513, tháng 3 năm 2014.
- [79] S. Kutty và D. Sen, "Beamforming cho truyền thông sóng milimet: Một cuộc khảo sát toàn diện," IEEE Communications Surveys Tutorials, tập. PP, không. 99, trang 1-1, 2015.
- [80] A. Lozano, "Định dạng chùm truyền dài hạn cho truyền phát đa hướng không dây," trong Âm học, Lời nói và Xử lý Tín hiệu, 2007. ICASSP 2007. Hội nghị quốc tế IEEE về, vol. 3, tháng 4 năm 2007, trang III-417-III- 420.
- [81] B. Fleury, D. Dahlhaus, R. Heddergott, và M. Tschudin, "Ước tính góc tới bằng rộng sử dụng thuật toán SAGE," trong Hội nghị chuyên đề quốc tế lần thứ 4 của IEEE về Kỹ yếu ứng dụng và kỹ thuật trái phở, 1996, tập. 1. IEEE, 1996, trang 79-85.
- [82] D. Berraki, S. Armour và A. Nix, "Ứng dụng cảm biến nén trong khôi phục kênh không gian thừa thớt để tạo chùm tia trong các hệ thống mmWave ngoài trời," vào năm 2014 Hội nghị Mạng và Truyền thông Không dây của IEEE (WCNC), tháng 4 năm 2014, trang 887-892.
- [83] T. Jost, W. Wang, UC Fiebig, và F. Perez-Fontan, "Phát hiện và theo dõi các đường dẫn kênh lan truyền di động," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 60, không. 10, trang 4875-4883, tháng 10 năm 2012.
- [84] Z.-M. Liu, Z.-T. Hoàng và Y.-Y. Zhou, "Một phương pháp tương thích tối đa hiệu quả để ước tính hướng đến thông qua việc học Bayesian thừa thớt," Giao dịch của IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 11, không. 10, trang 1-11, 2012.
- [85] A. Ghosh, T. Thomas, M. Cudak, R. Ratasuk, P. Moorut, F. Vook, T. Rappaport, G. Maccartney, S. Sun, và S. Nie, "Cục bộ tăng cường sóng milimet hệ thống khu vực: Cách tiếp cận tốc độ dữ liệu cao cho các mạng ít dây trong tương lai," Tập chí IEEE về Khu vực được chọn trong Truyền thông, tập. 32, không. 6, trang 1152-1163, tháng 6 năm 2014.
- [86] K. Guan, Z. Zhong, B. Ai, và T. K'urner, "Đo lường lan truyền và mô hình hóa các cầu vượt trên đường sắt cao tốc ở tần số 930 MHz," Giao dịch của IEEE về Công nghệ Xe cộ, tập. 63, không. 2, trang 502-517, tháng 2 năm 2014.
- [87] —, "Các phép đo và phân tích lan truyền cho các ga tàu của đường sắt cao tốc ở 930 MHz," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 63, không. 8, trang 3499-3516, 2014.
- [88] —, "Các mô hình thực nghiệm về suy hao do lan truyền thêm của các nhà ga trên đường sắt cao tốc," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62, không. 3, trang 1395-1408, tháng 3 năm 2014.
- [89] TS ea Rappaport, Truyền thông không dây sóng milimet. Pearson/Prentice Hall, 2015.
- [90] J. Kim và A. Molisch, "Huấn luyện chùm tia sóng milimet nhanh với định dạng chùm tia nhận," Tập chí Truyền thông và Mạng, tập. 16, không. 5, trang 512-522, tháng 10 năm 2014.
- [91] Cohere, AT&T, CMCC, D. Telekom, Telefonica và Telstra, "Dạng sóng điều chế OTFS và tín hiệu tham chiếu cho RAT mới," 3GPP R1- 163619, Tech. Dân biểu, 2016.
- [92] A. Monk, R. Hadani, M. Tsatsanis, và S. Rakib, "OTFS - không gian tần số thời gian trực giao," arXiv:1608.02993 [cs.IT], 2016.
- [93] L. Godara, "Ảnh hưởng của lỗi bộ dịch pha đối với hiệu suất của bộ tạo búp sóng mảng ăng ten," Tập chí IEEE về Kỹ thuật Đại dương, tập. 10, không. 3, trang 278-284, 1985.
- [94] B. Peng, S. Priebe và T. Kurner, "Ảnh hưởng của lỗi dịch pha đối với tính định hướng của ăng-ten của mảng pha trong liên lạc terahertz trong nhà," trong Hội nghị chuyên đề quốc tế lần thứ 11 về Hệ thống truyền thông không dây (ISWCS) năm 2014). IEEE, 2014, trang 355-359.
- [95] S. Hur, T. Kim, D. Love, J. Krogmeier, T. Thomas, và A. Ghosh, "Định dạng chùm sóng milimet cho truyền dẫn không dây và truy cập trong các mạng di động nhỏ," IEEE Transactions on Communications, tập. 61, không. 10, trang 4391-4403, tháng 10 năm 2013.
- [96] LC và cộng sự, "Truyền phiên nhanh," IEEE 802.11-10/491r2, tháng 5 năm 2010.
- [97] C. Han và I. Akyildiz, "Điều chế đa sóng mang nhận biết khoảng cách (DAMC) trong truyền thông băng tần Terahertz," trong Hội nghị Quốc tế về Truyền thông (ICC) của IEEE năm 2014, tháng 6 năm 2014, trang 5461-5467.
- [98] C. Lin và G. Li, "Chuyển chùm thích ứng với phân bố tài nguyên cho truyền thông Terahertz trong nhà nhiều người dùng nhận biết được khoảng cách," IEEE Transactions on Communications, tập. 63, không. 8, trang 2985-2995, tháng 8 2015.
- [99] C. Zech, A. Hulsman, M. Schlechtweg, L. Georgi, H. Gulan và O. Ambacher, "Thiết lập ăng-ten nhỏ gọn, phổ quát và tiết kiệm chi phí cho các ứng dụng ra-đa mmW," trong Hội nghị quốc tế năm 2013 trên Radar (Radar), tháng 9 năm 2013, trang 417-421.
- [100] H. Ito, T. Nagatsuma, A. Hirata, T. Minotani, A. Sasaki, Y. Hirota và T. Ishibashi, "Tạo sóng milimet quang tử công suất cao ở 100 GHz bằng cách sử dụng đơn vị tích hợp mạch phù hợp -đi-ốt quang mang du lịch," Kỷ yếu IEE-optoelectronics, tập. 150, không. 2, trang 138-142, 2003.
- [101] "Khuyến nghị thuộc tính ITU-R P.1238-7-Em."
- [102] E. Li và K. Sarabandi, "Các phép đo và mô hình tán xạ sóng milimet tần suất găm cố thấp cho các loại mặt đường khác nhau," Giao dịch của IEEE về ăng-ten và Truyền truyền, tập. 47, không. 5, trang 851-861, tháng 5 năm 1999.
- [103] K. Sarabandi, E. Li, và A. Nashashibi, "Mô hình hóa và phép đo tán xạ từ mặt đường ở tần số sóng milimet," Giao dịch của IEEE về ăng-ten và Truyền truyền, tập. 45, không. 11, trang 1679-1688, tháng 11 năm 1997.
- [104] B. Langen, G. Lober, và W. Herzig, "Hành vi phản xạ và truyền dẫn của vật liệu xây dựng ở 60 GHz," trong Hội nghị chuyên đề quốc tế lần thứ 5 của IEEE về Truyền thông vô tuyến cá nhân, trong nhà và di động, 1994, trang 505-509 tập 2.
- [105] J. Kim và IG Kim, "Hệ thống liên lạc băng thông rộng di động sóng milimet dựa trên hệ thống ăng-ten phân tán cho tàu cao tốc,"



trong 2013 Hội nghị quốc tế về hội tụ CNTT-TT (ICTC), tháng 10 năm 2013, trang 218-222.

[106] J. Kim, H.-S. Chung, IG Kim, H. Lee và MS Lee, “Một nghiên cứu về định dạng chùm sóng milimet cho thông tin liên lạc trên tàu cao tốc,” trong Hội nghị quốc tế về hội tụ công nghệ thông tin và truyền thông (ICTC) năm 2015, tháng 10 năm 2015, trang 1190– 1193.

[107] S. Priebe và T. Kurner, “Mô hình ngẫu nhiên các kênh vô tuyến trong nhà THz,” Giao dịch của IEEE về Truyền thông Không dây, tập. 12, không. 9, trang 4445–4455, tháng 9 năm 2013.

[108] T. Abbas, J. Nuckelt, T. Kurner, T. Zemen, CF Mecklenbrauker, và F. Tufvesson, “Mô phỏng và mô tả đặc tính của kênh từ xe đến xe dựa trên phép đo: Phân tích độ chính xác và ràng buộc,” Giao dịch của IEEE về Ăng-ten & Tuyền truyền, tập. 63, không. 7, trang 3208–3218, 2015.

[109] S. Priebe, “Hưỡng tới truyền thông THz: Nghiên cứu lan truyền, mô hình hóa kênh trong nhà và điều tra nhiễu,” Ph.D. Luận án, Technische Universit at Braunschweig, 2013.

[110] JC Dainty, “Lý thuyết về sự tán xạ sóng từ các bề mặt gồ ghề ngẫu nhiên,” Tạp chí của Hiệp hội Âm học Hoa Kỳ, tập. 38, không. 11, tr. 2332, 1991.

[111] Tsang, L. Kong, JA Ding, và KungHau, “Sự tán xạ của sóng điện từ,” Wiley & Sons, tập. 18, không. 11, tr. 445, 2010.

[112] TM Elfouhaily và C.-A. Guerin, “Một cuộc khảo sát quan trọng về các lý thuyết sóng tán xạ gần đúng từ các bề mặt gồ ghề ngẫu nhiên,” Waves in Random Media, tập. tập 14, không. 4, trang R1-R40, 2004.

[113] P. Beckmann và A. Spizzichino, Sự tán xạ của sóng điện từ từ các bề mặt gồ ghề. Thư viện Radar Nhà Artech, 1987.

[114] Y. Zhao, Y. Hao, A. Alomany, và C. Parini, “Mô hình hóa kênh vô tuyến trên cơ thể UWB sử dụng lý thuyết tia và phương pháp FDTD bằng con,” Giao dịch của IEEE về Lý thuyết và Kỹ thuật Vi sóng, tập. 54, không. 4, tr. 1827-1835, tháng 6 năm 2006.

[115] WCY Lee, “Ước tính công suất trung bình cục bộ của tín hiệu vô tuyến di động,” IEEE Transactions on Vehicular Technology, tập. 34, không. 1, trang 22-27, tháng 2 năm 1985.

[116] AF Molisch, Truyền thông không dây, tái bản lần thứ 2. IEEE-Wiley, 2011.



Ke Guan (S'10-M'13) nhận bằng BE và Ph.D. bằng cấp của Đại học Giao thông Bắc Kinh lần lượt vào năm 2006 và 2014. Ông là Phó Giáo sư tại Phòng thí nghiệm Trọng điểm Nhà nước về An toàn và Kiểm soát Giao thông Đường sắt & Trường Kỹ thuật Điện tử và Thông tin, Đại học Giao thông Bắc Kinh. Năm 2015, anh được trao học bổng nghiên cứu Humboldt dành cho các nhà nghiên cứu sau tiến sĩ.

Anh ấy là người đã nhận được Giải thưởng Nhà khoa học trẻ của Liên minh Khoa học Vô tuyến Quốc tế (URSI) năm 2014. Bài viết của anh đã nhận được giải thưởng danh dự trong

cuộc thi viết luận dành cho sinh viên URSI Quốc tế lần thứ ba vào năm 2014 URSI GASS và lọt vào Chung kết Giải thưởng Bài báo Xuất sắc nhất của APEMC 2015. Năm 2009, ông là học giả thỉnh giảng tại Đại học Polit'ecnica de Madrid, Tây Ban Nha. Từ năm 2011 đến 2013, anh là học giả nghiên cứu tại Institut f'ur Nachrichtentechnik (IfN) tại Technische Universit at Braunschweig, Đức. Từ tháng 9 năm 2013 đến tháng 1 năm 2014, ông được mời thực hiện nghiên cứu chung tại Đại học Polit'ecnica de Madrid, Tây Ban Nha. Mỗi quan tâm nghiên cứu hiện tại của ông là trong lĩnh vực đo lường và mô hình hóa các kênh truyền sóng không dây, thông tin liên lạc đường sắt tốc độ cao, đặc tính kênh từ phương tiện đến x và đặc tính kênh trong nhà cho các hệ thống tầm ngắn tốc độ cao bao gồm các hệ thống thông tin liên lạc terahertz trong tương lai.

Ông là tác giả của một cuốn sách, hai chương sách, hơn 110 tạp chí và bài báo hội nghị, và một bằng sáng chế. Anh đã nhận được Giải thưởng Sinh viên Xuất sắc Huawei của Trung Quốc năm 2013 và Học bổng Quốc gia đầu tiên dành cho Tiến sĩ. Ứng cử viên D vào năm 2012. Anh giữ vai trò Chủ tịch tuyên truyền trong PIMRC 2016, Người triệu tập Phiên họp của EuCAP 2015, 2016 và 2017, đồng thời là Thành viên TPC cho nhiều hội nghị của IEEE, chẳng hạn như ICC và VTC. Ông là thành viên của sáng kiến IC1004 và CA15104.

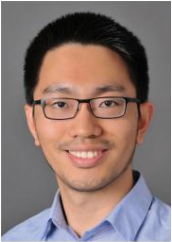


Guangkai Li (S'15) sinh ra ở Hợp Phi, Trung Quốc vào ngày 22 tháng 5 năm 1992. Anh được tuyển học vị Tiến sĩ. sinh viên tham gia Phòng thí nghiệm trọng điểm cấp nhà nước về Kiểm soát và an toàn giao thông đường sắt tại Đại học Giao thông Bắc Kinh, Bắc Kinh, Trung Quốc, vào năm 2015. Nghiên cứu của anh ấy bao gồm tối ưu hóa thuật toán dò tia dựa trên các phép đo và mô hình xác định cho kênh mmWave và terahertz trong các tình huống động.



Andreas F. Molisch (S'89-M'95-SM'00-F'05) đã nhận được Bằng. Bằng Ing., Ph.D., và habilitation của Đại học Kỹ thuật Vienna, Vienna, Áo, lần lượt vào các năm 1990, 1994 và 1999. Sau đó, ông làm việc cho AT&T (Bell) Laboratories Research (Mỹ); Đại học Lund, Lund, Thụy Điển và Mitsubishi Electric Research Labs (Mỹ). Ông hiện là Giáo sư Kỹ thuật Điện tại Đại học Nam California, Los Angeles. Mỗi quan tâm nghiên cứu hiện tại của ông là đo lường và mô hình hóa các kênh vô tuyến di động, truyền thông siêu băng rộng và bản địa hóa, truyền thông hợp tác, hệ thống nhiều đầu vào-nhiều đầu ra, hệ thống không dây cho chăm sóc sức khỏe và kiến trúc tế bào mới. Ông là tác giả, đồng tác giả hoặc biên tập bốn cuốn sách (trong số đó có sách giáo khoa Truyền thông không dây, Nhà xuất bản Wiley-IEEE), 16 chương sách, khoảng 200 bài báo, 270 bài báo hội nghị, cũng như hơn 80 bằng sáng chế và 70 đóng góp tiêu chuẩn.

Tiến sĩ Molisch đã từng là Biên tập viên của một số tạp chí và số đặc biệt, Chủ tịch Tổng hợp, Chủ tịch Ủy ban Chương trình Kỹ thuật hoặc Chủ tịch Hội nghị chuyên đề của nhiều hội nghị quốc tế, đồng thời là Chủ tịch của nhiều nhóm tiêu chuẩn hóa quốc tế. Ông là thành viên của Học viện các nhà phát minh quốc gia, thành viên của AAAS, thành viên của IET, Giảng viên xuất sắc của IEEE và là thành viên của Viện hàn lâm khoa học Áo. Ông đã nhận được nhiều giải thưởng, trong số đó có Giải thưởng Donald Fink của IEEE và Giải thưởng Eric Sumner của IEEE.



Bile Peng đã nhận bằng Cử nhân về kỹ thuật giao thông tại Đại học Tongji, Thượng Hải, Trung Quốc vào năm 2009 và bằng Thạc sĩ về kỹ thuật giao thông và di động từ Technische Univer sit at Braunschweig, Đức vào năm 2012, nơi anh hiện đang làm việc để lấy bằng tiến sĩ. .D. bằng kỹ sư điện dưới sự hướng dẫn của Prof.

Thomas Krner và đang nghiên cứu tại Institut f'ur Nachrichtentechnik (IfN) của Technische Universit at Braunschweig. Mỗi quan tâm nghiên cứu của ông bao gồm THz wireless chan

phép đo nel, mô phỏng dò tia/khởi chạy tia, mảng ăng ten có độ lợi cao cũng như ước tính kênh tĩnh và động.





Ruisi He (S'11CM'13) nhận bằng BE và Ph.D. bằng cấp từ Đại học Giao thông Bắc Kinh, Bắc Kinh, Trung Quốc, lần lượt vào năm 2009 và 2015. Ông là Học giả thỉnh giảng của Đại học Polit'ecnica de Madrid, Madrid, Tây Ban Nha, Đại học Nam California, Los Angeles, CA, Hoa Kỳ, và Đại học Công giáo Louvain, Louvain-la-Neuve, Belgium, từ năm 2010 đến năm 2014. Ông là Phó Giáo sư tại Phòng thí nghiệm Trọng điểm Nhà nước về Kiểm soát và An toàn Giao thông Đường sắt, Đại học Giao thông Bắc Kinh, kể từ năm 2015. Ông là tác giả hoặc đồng tác giả của hơn 80 bài báo nghiên cứu trên các tạp chí và hội nghị quốc tế. Các mối quan tâm nghiên cứu hiện tại của ông bao gồm đo lường và mô hình hóa các kênh lan truyền không dây, học máy và phân tích cụm trong truyền thông không dây, truyền thông đường sắt tốc độ cao và xe cộ, MIMO lớn 5G và các kỹ thuật truyền thông tần số cao. Tiến sĩ He là thành viên của COST.

Anh đã nhận được Giải thưởng Nhà khoa học trẻ của Liên minh Khoa học Vô tuyến Quốc tế (URSI) năm 2015, Bằng tiến sĩ xuất sắc nhất. Giải thưởng luận án của Đại học Giao thông Bắc Kinh, Giải thưởng sinh viên xuất sắc của IBM Trung Quốc, Giải thưởng học bổng Siemens Trung Quốc và hai giải thưởng bài viết hay nhất trong các hội nghị quốc tế. Anh giữ vai trò là Đại diện Khởi nghiệp của Ủy ban CIRadiocommunication Systems and Signal Processing, URSI, từ năm 2014 đến 2017. Anh giữ vai trò Chủ tịch Ủy ban Chương trình Kỹ thuật của APEMC 2015, Trưởng ban Tổ chức Hội thảo của VTC HSRCom2016, Người triệu tập Phiên họp của URSI GASS 2017 và là Thành viên TPC cho nhiều hội nghị của IEEE, chẳng hạn như ICC và GLOBECOM.



Junhyeong Kim nhận bằng Cử nhân Khoa Kỹ thuật Điện tử của Đại học Thanh Hoa, Bắc Kinh, Trung Quốc, năm 2008 và bằng Thạc sĩ Khoa Kỹ thuật Điện của Viện Khoa học và Công nghệ Tiên tiến Hàn Quốc (KAIST), Hàn Quốc, năm 2011. Từ năm 2011, anh làm việc cho Viện Nghiên cứu Điện tử và Viễn thông (ETRI), Hàn Quốc, năm 2011. Anh hiện cũng đang theo học bằng Tiến sĩ. bằng cấp tại Trường Kỹ sư Điện tại KAIST. Lĩnh vực nghiên cứu chính của ông bao gồm truyền thông sóng milimet, MIMO, truyền thông hợp tác và chuyển giao.



Thomas K'urner (S'91-M'94-SM'01) nhận bằng Dipl.-Ing. bằng Kỹ sư Điện năm 1990, và Tiến sĩ-Ing. năm 1993, cả hai đều từ Đại học Karlsruhe (Đức). Từ năm 1990 đến năm 1994, ông làm việc cho Institut f'ur H'ochstfrequentztechnik und Elektronik (IHE) tại Đại học Karl ruhe nghiên cứu về mô hình truyền sóng, mô tả đặc tính kênh vô tuyến và quy hoạch mạng vô tuyến.

Từ năm 1994 đến năm 2003, ông làm việc cho bộ phận quy hoạch mạng vô tuyến tại trụ sở của nhà điều hành GSM 1800 và UMTS E-Plus Mobilfunk GmbH & Co KG, D'usseldorf, nơi ông là quản lý nhóm hỗ trợ quy hoạch mạng vô tuyến chịu trách nhiệm lập kế hoạch mạng vô tuyến các công cụ, thuật toán, quy trình và tham số từ năm 1999 đến 2003. Từ năm 2003, ông là Giáo sư Đại học Toàn phần về Hệ thống Vô tuyến Di động tại Đại học Technische Braunschweig. Lĩnh vực làm việc của anh ấy là mô phỏng đặc tính kênh trong nhà và mô phỏng hệ thống cho các hệ thống tầm ngắn tốc độ cao bao gồm hệ thống liên lạc terahertz trong tương lai, các mô hình lan truyền, giao thông và di động để lập kế hoạch tự động và tự tổ chức mạng vô tuyến di động, cũng như liên lạc giữa ô tô với ô tô như độ chính xác của hệ thống định vị vệ tinh. Anh ấy đã tham gia vào một số cơ quan quốc tế như ITU-R SG 3, Nhóm các khía cạnh phổ của diễn đàn UMTS, COST 231/273/259, nơi anh ấy chủ trì nhóm làm việc 'Các khía cạnh mạng', COST 2100 và COST IC 1004. Anh ấy đã tham gia vào Các dự án châu Âu FP-5-IST-MOMENTUM về các phương pháp 'Lập kế hoạch tự động cho mạng vô tuyến quy mô lớn', ICT-FP7-SOCRATES về 'Tự tổ chức trong mạng không dây', FP7-SME-GreenNets về 'Mức tiêu thụ điện năng và lượng khí thải CO2 giảm mạng di động bằng các phương pháp quản lý mạng tự động năng cao', FP7-SEMAOUR ('Tự quản lý cho các mạng truy cập vô tuyến không đồng nhất không đồng nhất'), Medea-Qstream ('Giao tiếp không dây tốc độ dữ liệu siêu cao') và H2020-iBrow ('Truyền thông không dây phổ biến siêu băng thông rộng cải tiến thông qua bộ thu phát terahertz'). GS.

Krner đại diện cho Đại học Technische Braunschweig tại liên minh NGMN (Mạng di động thế hệ tiếp theo) với tư cách là thành viên cố vấn. Ông đã đóng góp tích cực vào tài liệu mô hình hóa kênh hỗ trợ tiêu chuẩn hóa IEEE 802.11ad. Hiện nay ông là thành viên bỏ phiếu của IEEE 802.15 và đang chủ trì IEEE 802.15 IG THz và IEEE 802.15.3d TG 100G. Ông là điều phối viên dự án của dự án TERAPAN ("Truyền thông Terahertz cho các mạng khu vực cá nhân trong tương lai") do Bộ Nghiên cứu và Phát triển Đức tài trợ. Giáo sư K'urner là thành viên Hội đồng quản trị của Hiệp hội Anten và Tuyền truyền Châu Âu (EurAAP) và chủ trì Tuyền truyền Nhóm công tác EurAAP. Ông từng là Phó Chủ tịch Tuyền truyền tại Hội nghị Châu Âu về Ăng-ten và Tuyền truyền (EuCAP) năm 2007, 2009 và 2014. Ông là thành viên sáng lập và đồng tổ chức của tất cả sáu phiên bản của Hội thảo Quốc tế về Mạng tự tổ chức (IWSON). Từ năm 2008, ông là Phó Tổng biên tập của IEEE Transactions on Vehicular Technology.

Năm 2012, ông là giảng viên khách mời tại Đại học Thành phố Dublin trong Sáng kiến Sau đại học Viễn thông ở Ireland.



Bing Hui nhận bằng Cử nhân Kỹ thuật Truyền thông tại Đại học Đông Bắc, Thẩm Dương, Trung Quốc vào năm 2005. Anh nhận bằng M. Eng. bằng cấp và bằng tiến sĩ. tốt nghiệp Cao học Công nghệ thông tin và Viễn thông, Đại học Inha, Incheon, Hàn Quốc lần lượt vào năm 2009 và 2013. Anh đã làm việc tại Khoa Kỹ thuật Điện tử, Đại học Inha, Incheon, Hàn Quốc với tư cách là nghiên cứu sinh Sau Tiến sĩ từ năm 2013 đến năm 2014.

Từ năm 2014, anh làm Nghiên cứu viên tại Viện Nghiên cứu Điện tử Viễn thông (ETRI), Daejeon, Cộng hòa Hàn Quốc.

Mối quan tâm nghiên cứu của ông bao gồm



Zhangdui Zhong (SM'16) là giáo sư và cố vấn của Ph.D. các ứng cử viên tại Đại học Giao thông Bắc Kinh. Ông hiện là giám đốc của Trường Máy tính và Công nghệ Thông tin và là Nhà khoa học trưởng của Phòng thí nghiệm Trọng điểm Nhà nước về Kiểm soát và An toàn Giao thông Đường sắt tại Đại học Giao thông Bắc Kinh. Ông cũng là giám đốc Nhóm nghiên cứu đổi mới của Bộ Giáo dục và là nhà khoa học trưởng của Bộ Đường sắt Trung Quốc. Ông là thành viên hội đồng điều hành của Hiệp hội Phát thanh Trung Quốc, và là phó giám đốc Hiệp hội Phát thanh Bắc Kinh.

Mối quan tâm của ông là truyền thông không dây cho đường sắt, lý thuyết và kỹ thuật điều khiển cho đường sắt và hệ thống GSM-R. Nghiên cứu của ông đã được sử dụng rộng rãi trong kỹ thuật đường sắt, chẳng hạn như Đường sắt Thanh Hải-Xizang, đường sắt hạng nặng Đại Đồng Tản Hoàng Đảo và nhiều tuyến đường sắt cao tốc của Trung Quốc.

Ông là tác giả/đồng tác giả của 7 cuốn sách, 5 bằng sáng chế và hơn 200 bài báo nghiên cứu khoa học trong lĩnh vực nghiên cứu của mình. Anh ấy đã nhận được MaoYiSheng