

WIRELESS COMMUNICATION THROUGH INTELLIGENT REFLECTING SURFACENguyen Thanh Tung^{1*}, Nguyen Thi Thanh Binh², Vu Chien Thang¹¹TNU - University of Information and Communication Technology, ²Thai Nguyen University

ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Received: 02/3/2021</p> <p>Revised: 27/5/2021</p> <p>Published: 31/5/2021</p>	<p>In today's wireless communication system, media is considered as random object between transmitter and receiver, which reduces signal quality due to spontaneous factors of radio waves. In addition, 5th generation (5G) high-speed mobile networks as well as the future challenges of 6G networks require effective supporting technologies. In order to overcome the negative effects of propagation waves, a number of works are proposed to control the wireless channel in the direction of optimization. The authors will conduct research on intelligent surface technology that helps control radio waves, contributing to improving the overall performance of the communication system. The article provides information on structure, principle of operation, applicability, superiority of reconfigurable passive reflective surface, several channel estimation models and proposing directions. developed for smart radio systems that incorporate this emerging technology. The results of the paper can be used as a knowledge foundation, as a reference in learning, research and teaching in the information technology and communication fields.</p>
<p>KEYWORDS</p> <p>Reconfigurable intelligent surface</p> <p>Intelligent reflecting surfaces</p> <p>Beyond 5G</p> <p>6G</p> <p>Smart radio environment</p>	

TRUYỀN THÔNG KHÔNG DÂY QUA BỀ MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINHNguyễn Thanh Tùng^{1*}, Nguyễn Thị Thanh Bình², Vũ Chiến Thắng¹¹Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông - ĐH Thái Nguyên, ²Đại học Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO	TÓM TẮT
<p>Ngày nhận bài: 02/3/2021</p> <p>Ngày hoàn thiện: 27/5/2021</p> <p>Ngày đăng: 31/5/2021</p>	<p>Trong hệ thống truyền thông không dây hiện nay, phương tiện truyền tin được coi là đối tượng hoạt động ngẫu nhiên giữa máy phát và bộ thu, điều này làm giảm chất lượng tín hiệu do các yếu tố tự phát của sóng vô tuyến. Bên cạnh đó, mạng di động tốc độ cao thế hệ thứ 5 (5G) cũng như các thách thức của mạng 6G trong tương lai đòi hỏi phải có các công nghệ hỗ trợ hiệu quả. Để có thể khắc phục các tác động tiêu cực của sóng lan truyền, một số công trình được đề xuất nhằm điều khiển kênh không dây theo hướng tối ưu hóa. Nhóm tác giả sẽ tiến hành khảo sát các nghiên cứu về công nghệ bề mặt thông minh giúp kiểm soát sóng vô tuyến, góp phần nâng cao hiệu năng chung của hệ thống truyền tin. Bài viết cung cấp các thông tin về cấu tạo, nguyên lý hoạt động, khả năng ứng dụng, tính ưu việt của bề mặt phản xạ thụ động có thể tái cấu hình, một số mô hình ước lượng kênh, đồng thời đề xuất các hướng phát triển cho các hệ thống vô tuyến thông minh tích hợp công nghệ mới nổi này. Kết quả của bài báo có thể được sử dụng làm nền tảng kiến thức, tài liệu tham khảo trong học tập, nghiên cứu và giảng dạy thuộc lĩnh vực công nghệ thông tin và truyền thông.</p>
<p>TỪ KHÓA</p> <p>Bề mặt thông minh có thể cấu hình lại</p> <p>Bề mặt phản xạ thông minh</p> <p>Sau 5G</p> <p>6G</p> <p>Môi trường vô tuyến thông minh</p>	

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.4081>

* Corresponding author. Email: nttung@ictu.edu.vn

1. Giới thiệu

Trong nỗ lực không ngừng nhằm tăng dung lượng của mạng không dây và hỗ trợ truyền nhận dữ liệu tốc độ cao, các nhà thiết kế đã tìm cách tối ưu hóa mọi khía cạnh của hệ thống truyền thông. Điều này đã bắt đầu với các dạng sóng, cách ghép kênh hiệu quả và ngày càng tiến gần đến dung lượng tối đa lý thuyết bằng cách sử dụng các kỹ thuật mã hóa, điều chế thích ứng tiên tiến hơn. Các mạng di động ngày càng dày đặc với việc tái sử dụng tần số tích cực và các kỹ thuật điều phối giữa các tế bào đã được phát triển để đối phó với nhiễu. Để giải quyết sự thiếu hụt phổ tần, các hệ thống thông tin liên lạc đã dần chuyển sang các dải tần số cao hơn, tới các vùng phổ chưa sử dụng. Tuy nhiên, dung lượng của mạng vẫn bị giới hạn bởi bản chất ngẫu nhiên, không tin cậy của quá trình truyền nhận không dây và phổ khả dụng. Do đó, việc chúng ta có thể làm là hiểu nó, mô hình hóa và chống lại sự khó đoán của nó bằng cách xử lý tín hiệu phức tạp ở máy phát và máy thu. Điều này bao gồm các kỹ thuật đa dạng, như định dạng chùm, mã hóa và điều khiển thích nghi.

Theo báo cáo tháng 2/2019 của Cisco [1], đến năm 2022, số lượng thiết bị và kết nối được hòa mạng sẽ lên đến 28,5 tỷ và 12,3 tỷ, trong đó dành cho mạng di động, tổng lưu lượng dữ liệu dự kiến sẽ tăng lên 77 exabyte mỗi tháng. Bên cạnh đó, sau nhiều năm nghiên cứu và phát triển, tiêu chuẩn giao tiếp di động thế hệ thứ 5 (5G) thương mại (3GPP Release 15) đã được hoàn thành vào tháng 6/2018. Tính đến giữa năm 2019, mạng không dây 5G đã được triển khai ở một số quốc gia nhất định, và các thiết bị di động tương thích 5G đang được đưa ra thị trường. Sự ra đời của 5G đã dẫn đến một tầm nhìn mới về truyền thông di động, bao gồm: truyền thông độ trễ thấp siêu tin cậy URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication), băng thông rộng di động nâng cao MBB (Enhanced Mobile Broadband) và giao tiếp kiểu máy lớn mMTC (massive Machine Type Communication). Các công nghệ lớp vật lý đầy hứa hẹn để đáp ứng các yêu cầu của các ứng dụng nêu trên bao gồm vô tuyến nhận thức CR (Cognitive Radio), giao tiếp hợp tác, đa đầu ra đa đầu vào massive MIMO (massive Multiple Input Multiple Output), sóng milimet, ghép kênh phân chia theo tần số trực giao OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), v.v. [2]. Tuy nhiên, một điều chắc chắn rằng, trong quá trình tiêu chuẩn hóa mạng không dây 5G, không có công nghệ duy nhất cho phép nào có thể hỗ trợ tất cả các yêu cầu ứng dụng 5G. Từ góc độ này, các nhà nghiên cứu đã bắt đầu hướng đến các công nghệ sau 5G (B5G - Beyond 5G) và thế hệ mạng di động thứ 6 (6G). Dự báo 6G sẽ bắt đầu thương mại hóa vào năm 2030 và sẽ cung cấp dung lượng lớn hơn [3]. Cụ thể, nếu chúng ta so với 5G, mạng 6G cho phép liên kết với tốc độ cao hàng trăm Giga b/s đến Tera b/s (nhanh hơn 100-1000 lần so với 5G). Điều này sẽ đạt được thông qua các công nghệ khác nhau, như sử dụng phổ tần số cao hơn so với các thế hệ không dây trước đó ở dải tần terahertz (0,06-10 THz). 6G cũng sẽ có thể cung cấp độ trễ cực thấp (<1ms) để hỗ trợ các ứng dụng như y học, thực tế ảo VR (Virtual Reality), mạng lưới kết nối trong công nghiệp IIoT (Industrial Internet of Things), phương tiện được kết nối và tự động (Connected and Automated Vehicles - CAV), v.v. Các yêu cầu của người dùng, các ứng dụng và phạm vi sử dụng cũng như xu hướng mạng mới sẽ mang lại nhiều vấn đề kỹ thuật thách thức hơn, đòi hỏi các mô hình truyền thông mới, đặc biệt là ở lớp vật lý.

Thành phố thông minh, mạng lưới kết nối vạn vật IoT (Internet of Things) và Công nghiệp 4.0 đều có thể trở thành hiện thực khi có kết nối tin cậy, an toàn và tốc độ cao được thực hiện. Cùng với sự phổ biến của các thiết bị hỗ trợ các công nghệ, thì các vấn đề tối ưu hóa mạng cũng gặp phải thách thức để cải thiện hiệu suất năng lượng/ phổ tần EE/SE (Energy or Spectrum Efficiency), đáp ứng các yêu cầu về tốc độ dữ liệu của người dùng và chất lượng dịch vụ QoS (Quality of Service) [4]. Hiện tại, việc tối ưu hóa hiệu suất của các mạng không dây tập trung vào phía người dùng hoặc bộ điều khiển mạng. Tuy nhiên, môi trường vô tuyến vẫn là một yếu tố khó kiểm soát, khó biểu diễn trong các biểu thức toán học. Vì thuộc tính ngẫu nhiên, quá trình truyền tín hiệu thường trải qua phản xạ, nhiễu xạ và tán xạ trước khi đến máy thu theo những con đường khác nhau với nhiều bản sao của tín hiệu gốc bị suy giảm và trễ. Hiệu ứng làm suy giảm kênh (channel fading) trở thành một yếu tố hạn chế chính đối với việc tối đa hóa hiệu suất EE/SE.

Nói chung, tốc độ thực tế có thể đạt được qua một liên kết không dây bị giới hạn bởi thứ tự điều chế và số luồng không gian, cả hai đều được quyết định theo hiện thực kênh. Thứ tự điều chế được chỉnh định tùy theo cường độ tín hiệu nhận được tại máy thu, là hệ quả của độ lợi kênh. Để giữ cho tỷ lệ lỗi thấp và tránh truyền ngược, người dùng ở biên sẽ buộc phải dùng điều chế bậc thấp hơn và do đó phải chịu nhận ít tín hiệu. Mặt khác, số luồng không gian được điều chỉnh theo số eigenmodes (miền tần số tuyến tính) mà kênh sử dụng. Một liên kết đường nhìn LOS (Line Of Sight) có thể có được độ lợi kênh cao, nhưng kênh lại bị hạn chế về số luồng.

Các hệ thống truyền thông không dây truyền thống dựa vào các dải tần từ vài trăm Megahertz đến vài Gigahertz bởi các đặc tính lan truyền thuận lợi ở các băng tần này, dễ dàng triển khai các bộ thu phát hiệu quả và chi phí thấp. Mặc dù tồn tại một dải phổ khổng lồ ở vùng sóng milimet mmWave (30-100 GHz), nhưng trước đây chưa được tận dụng vì chưa quan tâm những tần số này không phù hợp với truyền thông không dây, đặc biệt là truyền thông di động ngoài trời. Các kết quả đo lường chuyên sâu đã cho thấy tiềm năng của mmWave khi kết hợp với các mảng antenna định hướng có độ lợi cao [5]. Điều này đã dẫn đến sự quan tâm lớn đến truyền thông không dây trong dải mmWave và đòi hỏi phải đánh giá lại các kỹ thuật mô hình kênh. Giao tiếp ở tần số cao này đặt ra rất nhiều thách thức. Kênh ở các tần số này có tính đối nghịch so với dải dưới 6 GHz. Sự nhiễu xạ không còn là một cơ chế lan truyền tin cậy với LOS, phản xạ và tán xạ trở nên chiếm ưu thế, có nghĩa là sẽ có những ảnh hưởng nghiêm trọng đến công suất nhận được trung bình. Mặc dù kỹ thuật lá chắn tia thích ứng có thể cải thiện độ tin cậy của các liên kết mmWave, nhưng việc truyền nhận dữ liệu ở các tần số này vẫn còn rất hạn chế về mặt không gian, chỉ có một số lượng nhỏ đường truyền giữa máy phát và máy thu. Điều này trái ngược với giả định tán xạ phong phú, thường được sử dụng trong các kênh dưới 6 GHz.

Gần đây, với sự ra đời của các bề mặt thông minh có thể cấu hình lại RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces) [6] và làm nảy sinh khái niệm mới nổi về môi trường vô tuyến thông minh [7], chúng ta có thể một phần kiểm soát các kênh không dây chính, để cung cấp các đặc tính lan truyền thuận lợi hơn. Thay vì coi sự phản xạ và tán xạ trong môi trường là những hiện tượng không thể quản lý được hay các tác động của chúng chỉ được mô hình hóa ngẫu nhiên, thì có thể coi đó là một phần của các tham số hệ thống mà ta cần tối ưu. Để giải quyết nhiều thách thức của truyền thông không dây, các bề mặt có khả năng tái cấu hình nhằm kiểm soát sự lan truyền tự nhiên của sóng điện từ EM (ElectroMagnetic), chống lại tác động tiêu cực của việc làm suy hao đa đường, chủ động thay đổi nhận dạng kênh, biến kênh không dây thành một khối có thể điều khiển được theo hướng tối ưu hóa để cải thiện hiệu suất tổng thể của hệ thống. Trong môi trường vô tuyến thông minh, mạng không dây có thể điều khiển bằng phần mềm, đóng vai trò tích cực trong việc truyền và xử lý thông tin, nơi mọi không gian của mạng có khả năng tự thích ứng với những biến động của hệ thống, giúp kết nối không bị gián đoạn và đảm bảo QoS, v.v [7].

Trong một số công trình nghiên cứu gần đây, xuất hiện một số định nghĩa khác để đặc tả tính năng của bề mặt phản xạ thông minh, có thể kể đến:

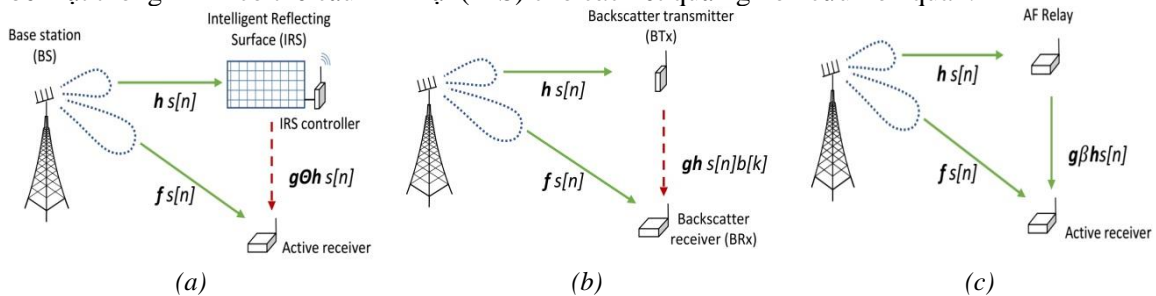
✓ *Bề mặt phản xạ thông minh IRS (Intelligent Reflecting Surfaces) [6]:* bao gồm một mảng các đơn vị, mỗi đơn vị có thể độc lập gây ra một số thay đổi đối với tín hiệu tới. Sự thay đổi nói chung có thể là về pha, biên độ, tần số, hoặc thậm chí là phân cực. Về bản chất, IRS định cấu hình môi trường không dây thông minh để giúp truyền giữa người gửi và người nhận, khi các giao tiếp trực tiếp có chất lượng xấu.

✓ *Bề mặt thông minh có thể cấu hình lại RIS (Reconfigurable Intelligent Surface) [8]:* mặt phẳng có thể tái cấu hình bằng phần mềm để điều khiển pha chung của tất cả các phần tử tán xạ, các pha phản xạ và góc của tín hiệu RF tới có thể được tùy chỉnh để tạo ra hiệu ứng đa đường mong muốn. Tín hiệu RF phản xạ có thể được bổ sung để cải thiện công suất tín hiệu nhận được hoặc kết hợp triệt tiêu để giảm thiểu nhiễu.

✓ *Bề mặt thông minh lớn LIS (Large Intelligent Surface) [9]:* bề mặt rộng với lượng antenna lớn, cho phép truyền dữ liệu chủ động, thay vì phản xạ thụ động tín hiệu từ các trạm gốc như trong trường hợp IRS.

- ✓ *Siêu bề mặt thông minh lớn LIM (Large intelligent metasurface)/ siêu bề mặt có thể lập trình/ cấu hình lại* [10]: bề mặt được thiết kế từ các siêu nguyên tử.
- ✓ *Mảng phản xạ thông minh (Smart reflect-arrays)* [11]: bề mặt có chức năng phản xạ thay vì được sử dụng để truyền dẫn được cung cấp bởi các relay khuếch đại, chuyển tiếp hoặc giải mã.
- ✓ *Bề mặt được phần mềm tạo ra SDS (Software Defined Surface) và siêu bề mặt được phần mềm xác định SDMs (Software Defined Metasurfaces)* [12]: sự tương tác giữa bề mặt và sóng tới được lập trình để thay đổi bản chất.
- ✓ *Bề mặt thông minh thụ động PIS (Passive intelligent surface)/ gương thông minh thụ động* [13]: Bề mặt phản xạ thụ động mà không tiêu thụ công suất phát.
- ✓ *Tường thông minh (Intelligent wall)* [14]: để chuyển đổi Bề mặt chọn lọc tần số FSS (Frequency Selective Surface) giữa bật và tắt để định hình môi trường lan truyền thông minh.
- ✓ *Gương thông minh (Intelligent mirror)* [15]: Tạo liên kết LOS bằng cách xoay IRS hoặc thay đổi mặt sóng điện từ.

Tuy khác nhau về cách gọi và phạm vi sử dụng nhưng bản chất chung của các bề mặt đều hướng đến mục tiêu thay đổi phương thức truyền nhận tín hiệu truyền thống, giúp nâng cao hiệu năng tổng thể của hệ thống thông tin liên lạc không dây. Để nhất quán, bài báo sử dụng thuật ngữ bề mặt thông minh có thể cấu hình lại (RIS) cho các kết quả nghiên cứu liên quan.



Hình 1. Mạng truyền thông không dây (a): RIS hỗ trợ, (b): BackCom hỗ trợ, (c): AF hỗ trợ

RIS có sự khác biệt so với các công nghệ liên quan hiện đang được sử dụng trong mạng không dây, chẳng hạn như bộ khuếch đại và chuyển tiếp AF (Amplify and Forward) [16], định dạng chùm MIMO (massive MIMO) [17] và truyền thông tán xạ ngược BackCom (Backscatter Communications) [18]. Mặc dù hoạt động của RIS tương tự như nhiều antenna relay, nhưng khác với các chuyển tiếp ở cách sử dụng các phần tử thụ động, RIS có thể điều khiển hoàn toàn hệ thống lái chùm tín hiệu mà không cần cung cấp năng lượng chuyên dụng và vi mạch tích cực để ước tính kênh, giải mã thông tin, khuếch đại, chuyển tiếp. Các bộ AF chủ động tạo ra tín hiệu RF mới, RIS không sử dụng bộ phát tích cực mà chỉ phản xạ tín hiệu RF xung quanh dưới dạng một mảng thụ động nên không tiêu thụ thêm năng lượng. RIS có một số tương đồng với công nghệ massive MIMO, trong đó các dây antenna lớn được sử dụng để cải thiện hiệu suất phổ và thông lượng. Do đó, RIS sẽ đóng một vai trò quan trọng trong mạng truyền thông 6G tương tự như massive MIMO trong mạng 5G và có thể coi công nghệ RIS là massive MIMO 2.0. Điều khác biệt mà massive MIMO không thể điều chỉnh môi trường truyền thông không dây như RIS, bên cạnh đó công suất có thể thu được trên 1 m^2 diện tích bề mặt RIS có mối quan hệ tuyến tính với công suất phát trung bình, thay vì là logarit trong trường hợp triển khai massive MIMO [19]. Luật tỷ lệ của công suất nhận được của RIS như một hàm của khoảng cách trái ngược với luật tỷ lệ quy định đường đi của truyền thông tán xạ ngược. Kích thước hình học của RIS, nếu được tối ưu hóa thích hợp, có thể mang lại lợi ích liên kết tốt hơn so với BackCom [20]. RIS cung cấp khả năng kiểm soát các kênh không dây, bản thân nó có thể không phải là nguồn cung cấp thông tin. BackCom sử dụng tín hiệu RF xung quanh để mã hóa thông tin của nó. Hình 1 [21] mô tả sự khác biệt của RIS so với các công nghệ BackCom và AF. RIS trong (a) đưa vào ma trận dịch pha Θ để định cấu hình kênh phản xạ tương đương. AF trong (c) đưa vào hệ số khuếch đại công suất

β để chuyển tiếp tín hiệu nhận được. Máy thu giải mã thông tin nguồn thứ n ($s[n]$) cho các truyền thông có RIS và AF hỗ trợ, trong khi ở (b) nó nhằm mục đích giải mã thông tin được chuyển thứ k ($b[k]$) từ $s[n]$ trong truyền thông tán xạ ngược không dây.

Một số các đặc điểm của RIS phân biệt với các công nghệ hỗ trợ truyền thông không dây khác có thể kể đến như [8]:

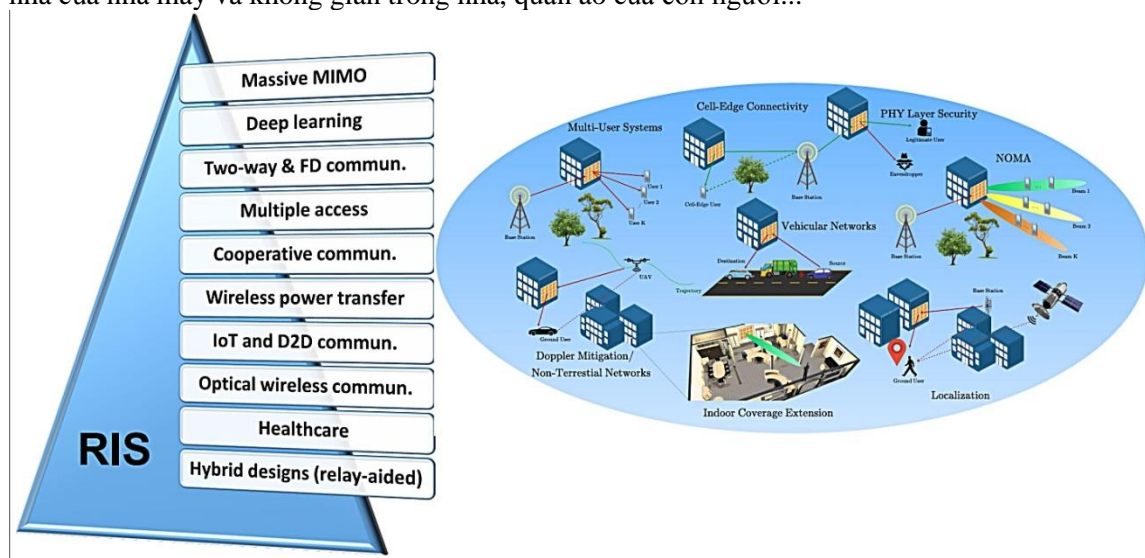
- Chúng gần như thụ động, lý tưởng là không cần sử dụng bất kỳ nguồn năng lượng nào hoặc được cấp nguồn không dây dựa trên năng lượng thu hoạch RF.

- Chúng được xem như một bề mặt tiếp giáp, lý tưởng là bất kỳ điểm nào cũng có thể định hình sóng khi tác động lên nó bằng cách lập trình bằng phần mềm.

- Chúng không bị ảnh hưởng bởi nhiễu máy thu, lý tưởng là không cần bộ chuyển đổi tương tự sang số ADC hay số sang tương tự DAC và bộ khuếch đại công suất. Do đó, chúng không không tạo ra tiếng ồn, nhiễu khi phản xạ tín hiệu và cung cấp truyền dẫn song công vốn có.

- Chúng có đáp ứng toàn dải, lý tưởng là có thể hoạt động ở bất kỳ tần số hoạt động nào.

- Chúng có thể được lắp đặt dễ dàng và hoạt động bền vững, RIS được làm từ các phần tử tán xạ thụ động chi phí thấp được nhúng trong siêu bề mặt, có thể ở bất kỳ hình dạng nào, do đó mang lại tính linh hoạt cao trong triển khai và thay thế. Ví dụ, trên mặt tiền của các tòa nhà, trần nhà của nhà máy và không gian trong nhà, quần áo của con người...



Hình 2. Hệ thống truyền thông sử dụng RIS hỗ trợ đa người dùng

Những đặc điểm riêng biệt này khiến cho truyền thông có sự hỗ trợ của RIS trở thành công nghệ độc đáo, khắc phục các tác động tiêu cực của hệ thống thông tin liên lạc truyền thống, khử nhiễu, đảm bảo độ tin cậy, tăng sự bảo mật, tối ưu hóa kênh truyền, nâng cao hiệu phổ, tiết kiệm năng lượng, mở rộng phạm vi phủ sóng, đáp ứng các yêu cầu về tốc độ dữ liệu của người dùng và chất lượng dịch vụ, góp phần nâng cao hiệu năng chung của toàn bộ hệ thống truyền thông không dây. Các kịch bản ứng dụng của RIS khá đa dạng, từ hệ thống Wi-Fi chia sẻ phương tiện đến vùng mmWave, THz, thậm chí cả truyền thông quang học, bao phủ dải tần băng thông rộng, v.v. Hình 2 mô tả một số ứng dụng của RIS vào các công nghệ mới, triển vọng như: giải pháp hiệu quả khi liên kết trạm gốc (bộ phát) BS (Base Station) với người dùng (User) ở những vùng tín hiệu không tốt [22], RIS đóng vai trò là một điểm truy cập PSK (Pre-Shared Key) ảo [23], một bộ tạo tín hiệu RF truyền một sóng mang không điều chế tới RIS với kiến trúc không có bộ khuếch đại công suất, bộ trộn, bộ lọc [24], RIS đáp ứng điều chế không gian ở cả hai phía truyền và nhận, một giải pháp thay thế massive MIMO [25], [26], hệ thống MISO/MIMO ảo dựa trên RIS [27], [28], RIS làm tăng cường bảo mật PHY (một tính năng quan trọng còn thiếu trong 5G) [29],

[30], ứng dụng của RIS trong mạng giao thông (mạng xe cộ Vehicular Networks) để tăng sự tin cậy, an ninh, khắc phục tắc nghẽn LOS, cảm biến phát hiện người đi bộ [31], [32], RIS trong mạng NOMA [33]-[35], trong hệ thống MIMO phức tạp thấp (Low-Complexity MIMO) [36], [37] giúp giảm nhiễu, tăng công suất, RIS trong mạng trên không, trên phương tiện không người lái UAV (Unmanned Aerial Vehicle) để khắc phục tắc nghẽn LOS, hỗ trợ mạng mặt đất, người dùng trên không và vận chuyển hàng hóa backhauling [38], [39], RIS cải thiện tỷ lệ người dùng thứ cấp/người nhận (SU-Rx) trong mạng vô tuyến nhận thức CR [40], giảm hiệu ứng Doppler [41], RIS giúp mở rộng vùng phủ sóng trong mạng 5G, B5G và 6G [42], khả năng của RIS trong hệ thống OFDM [43], RIS hỗ trợ nhận dạng tư thế người [44], bản địa hóa vô tuyến (định vị nội bộ) RL (Radio Localization) [45], điện toán biên di động MEC (Mobile Edge Computing) [46], v.v, và nhiều ứng dụng trong các hệ thống lai khác [47].

Được thúc đẩy bởi tiềm năng của công nghệ mới nổi này, bài viết này nhằm cung cấp thông tin tổng quan, các tên gọi khác nhau nhưng chung tính năng của RIS, nêu rõ sự khác biệt cơ bản của nó với các công nghệ khác, đưa ra ứng dụng tiềm năng của RIS trong các hệ thống vô tuyến thông minh. Ở phần 2 tác giả cung cấp nền tảng căn bản về nguyên lý hoạt động, cấu tạo của RIS. Một số mô hình ước lượng kênh truyền sử dụng được trao quyền bởi RIS được trình bày ở phần 3, từ các vấn đề cần thực tế thấy được lý do tại sao việc sử dụng các bề mặt thông minh có thể cấu hình lại đòi hỏi phải xem xét lại các mô hình lý thuyết hiện đang được sử dụng trong mạng không dây. Trong phần 4 đưa một số hướng nghiên cứu và phát triển, và cuối cùng phần 5 là kết luận của bài báo.

2. Hoạt động và cấu tạo cơ bản của RIS

Trong môi trường vô tuyến thông minh [7], một hoặc nhiều RIS có thể được sử dụng để truyền không dây theo hướng có lợi cho hiệu suất tổng thể hệ thống. Về bản chất, bất kỳ bề mặt thụ động nào có thể được thiết kế lại để có thể điều khiển sóng điện từ tới và thay đổi điều kiện kênh đều có thể được gọi là RIS. Hai cách triển khai nền tảng đó là: RIS dựa trên phản xạ truyền thống và RIS thiết kế từ các siêu bề mặt.

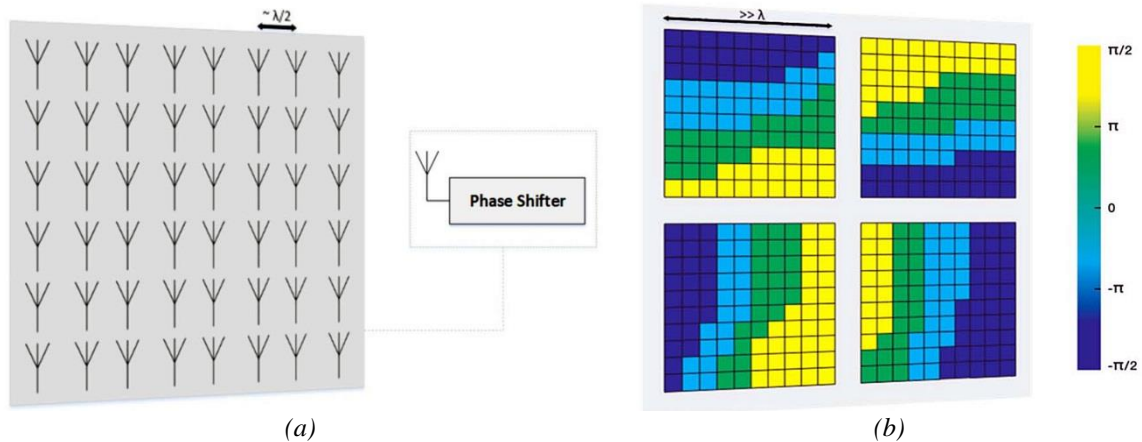
2.1. RIS dựa trên mảng phản xạ thụ động

Trong Hình 3 (a) cho thấy cách đơn giản nhất để triển khai bề mặt thông minh có thể cấu hình lại là sử dụng một mảng phản xạ thụ động, trong đó antenna của các phần tử có thể được điều khiển để tán xạ ngược hoặc làm lệch pha tín hiệu tới [48]. Mỗi phần tử có ảnh hưởng hạn chế đến sóng lan truyền, nhưng nếu có số lượng lớn có thể kiểm soát được sóng tới hiệu quả và hướng các chùm tia tập trung ở những vị trí thuận lợi [49].

2.2. RIS được thiết kế dựa trên các siêu bề mặt

Hình 3 (b) việc triển khai RIS phức tạp hơn, được thực hiện bằng cách sử dụng siêu bề mặt [50], có dạng phẳng hai chiều sử dụng các vật liệu EM nhân tạo. Ban đầu chúng được phát triển cho các ứng dụng về lĩnh vực quang học để thay thế các ống kính tùy chỉnh giá thành cao.

Siêu bề mặt bao gồm số lượng lớn các cấu trúc cộng hưởng bước sóng sâu nằm gần nhau, được gọi là các điểm ảnh (pixels) hoặc siêu nguyên tử (meta-atoms) [50]. Không gian giữa hai siêu nguyên tử riêng biệt hoặc liền kề nhau đều nhỏ hơn nhiều so với độ dài bước sóng. Kích thước rất nhỏ cùng với số lượng lớn phần tử mang lại nhiều bậc tự do trong việc điều khiển các sóng EM tới. Đặc biệt, siêu bề mặt có thể tùy chỉnh gần như liên tục độ khuếch đại và pha trên sóng tới [51] cũng như quyền kiểm soát đối với sóng phản xạ. RIS chứa các thành phần bán dẫn (ví dụ các diode varactor hoặc màn hình tinh thể lỏng), có khả năng tái cấu hình theo thời gian thực để thay đổi kiến trúc và hoạt động của siêu bề mặt [52]. Khả năng điều chỉnh động rất quan trọng trong các ứng dụng không dây cho phép thích ứng với việc nhận biết sự biến đổi của kênh.



Hình 3. Hai mô hình triển khai căn bản của RIS (a): RIS dựa trên mảng phân xạ thụ động, (b): RIS được thiết kế dựa trên các siêu bề mặt

3. Mô hình ước lượng kênh

Các mô hình kênh không dây được RIS hỗ trợ trong môi trường lan truyền là rất cần thiết để nghiên cứu, phân tích và mô phỏng thông tin. Đây là điều quan trọng trong việc đánh giá hiệu năng của RIS, cũng như so sánh với các công nghệ khác. Phương pháp triển khai của RIS đóng một vai trò trong việc quyết định sử dụng kỹ thuật mô hình nào phù hợp. Xét trường hợp M antenna của máy phát giao tiếp với N antenna của máy thu và L phần tử RIS, tín hiệu nhận được:

$$\mathbf{y} = \sqrt{G_d} \mathbf{H}_{env} \mathbf{x} + \sqrt{G_r} \mathbf{H}_{RIS} \mathbf{x} + \mathbf{n} = \mathbf{H}_{eff} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

Trong đó, \mathbf{x} là vector truyền, \mathbf{n} là vector nhiễu trắng Gaussian (white Gaussian noise) tại N antenna của máy thu. \mathbf{H}_{env} đại diện cho kênh không điều khiển được giữa máy phát và máy thu (không chịu ảnh hưởng của RIS), \mathbf{H}_{RIS} đại diện cho kênh truyền qua RIS. $\sqrt{G_d}$ và $\sqrt{G_r}$ lần lượt là độ tăng liên quan đến \mathbf{H}_{env} và \mathbf{H}_{RIS} . $\mathbf{H}_{eff} = \sqrt{G_d} \mathbf{H}_{env} + \sqrt{G_r} \mathbf{H}_{RIS}$ là kênh tăng cường hiệu quả tổng thể của RIS mà bộ thu phát nhận được.

Hiệu quả kênh trong thông tin liên lạc có hỗ trợ RIS khác với hệ thống đa antenna được mã hóa truyền thống. Trong các hệ thống thông thường, kênh tương đương được cho bởi $\mathbf{H}_{eff} = \mathbf{H}_{env} \mathbf{P}$, trong đó \mathbf{P} là bộ tiền mã hóa được áp dụng, điều này khác với (1). Hơn nữa, các phần tử của bộ tiền mã hóa truyền thống có thể nhận bất kỳ giá trị nào thỏa mãn một số ràng buộc (ví dụ: công suất, v.v) trong khi hiệu quả kênh RIS phụ thuộc vào môi trường lan truyền và chỉ có thể điều khiển một phần thông qua RIS. Mặc dù điều này làm cho quá trình tối ưu hóa RIS nói chung trở nên khó khăn hơn, nhưng tổng thể thì tốt hơn các hiệu ứng trộn và các bộ tiền mã hóa [53], cho phép nhà thiết kế kiểm soát được nhiều hơn các kênh hiệu quả.

3.1. Mô hình kênh tán xạ ngược

Giả định mỗi phần tử trong RIS là một antenna đa hướng cơ bản chịu tác động của sự suy giảm, sử dụng kênh tán xạ ngược dyadic [54] để lập mô hình kênh thông qua RIS, đây là kỹ thuật mô hình hóa RIS ở cấp độ tán xạ. Khi đó, kênh qua RIS, \mathbf{H}_{RIS} , là:

$$\mathbf{H}_{RIS} = \mathbf{F} \mathbf{Q} \mathbf{G} \quad (2)$$

Trong đó, \mathbf{F} là kênh $N \times L$ từ RIS đến máy thu, \mathbf{G} là kênh $L \times M$ từ máy phát đến RIS. Ma trận \mathbf{Q} : $L \times L$, đại diện cho sự tương tác của RIS với dạng sóng truyền qua. Giả sử không có sự ghép nối giữa các phần tử RIS, ma trận tương tác có thể được viết dưới dạng

$$\mathbf{Q} = \text{diag} (\beta_1 e^{i\theta_1}, \beta_2 e^{i\theta_2}, \dots, \beta_L e^{i\theta_L}) \quad (3)$$

Trong đó, $\beta_i \in [0, 1]$ và $\theta_i \in [0, 2\pi)$ và có thể được điều khiển bằng cách thay đổi tải phức tạp của antenna tương tự như thể tán xạ ngược [55]. Lưu ý rằng, sự dịch chuyển pha có thể là liên tục hoặc rời rạc dựa trên việc triển khai.

Từ (2), đối với bất kỳ giả định nào cho \mathbf{G} và \mathbf{F} , phân phối kênh tổng thể sẽ được đưa ra bởi kết quả của chúng, loại mờ dần xếp tầng có nhiều tác động bất lợi đến hiệu suất so với loại suy hao thông thường.

3.2. Mô hình kênh không gian tán xạ

Kỹ thuật này tránh được một số hạn chế của mô hình tán xạ ngược theo tầng được trình bày ở trên và tái tạo tốt hơn các cơ chế lan truyền qua RIS dựa trên siêu bề mặt. Giả sử mỗi phần tử trong RIS lớn hơn nhiều so với bước sóng, ta có thể mô hình hóa mỗi phần tử tạo ra một đường lan truyền riêng biệt, bằng cách sử dụng mô hình không gian tham số [56] để ước lượng kênh thông qua RIS như sau:

$$\mathbf{H}_{\text{RIS}} = \sum_{\ell=1}^L \alpha_{\ell} q_{\ell} \mathbf{a}_R(\theta_{R,\ell}, \phi_{R,\ell}) \mathbf{a}_T^*(\theta_{T,\ell}, \phi_{T,\ell}) \quad (4)$$

Trong đó, đại lượng vô hướng phức α_{ℓ} đại diện cho độ lợi đường dẫn thứ ℓ không chịu ảnh hưởng của phần tử RIS, đại lượng vô hướng phức q_{ℓ} là hiệu ứng được điều khiển bởi phần tử RIS thứ ℓ , \mathbf{a}_R và \mathbf{a}_T đại diện cho các vector lái mảng tại máy thu và máy phát tương ứng, θ là góc phương vị, ϕ là góc nâng.

Nói chung, tham số q_{ℓ} sẽ được kiểm soát bởi RIS, bất kể công nghệ thực hiện. Hơn nữa, một phần tử RIS dựa trên siêu bề mặt cũng có thể điều khiển góc phản xạ, và do đó các góc tới tại máy thu: $\theta_{R,\ell}$ và $\phi_{R,\ell}$ sẽ thay đổi phản ứng của mảng nhận tương ứng. Tuy nhiên, việc thay đổi các góc phản xạ đòi hỏi phải tối ưu hóa toàn bộ gradient pha của siêu bề mặt. Về bản chất, công thức này đại diện cho RIS như một cụm các phản xạ kiểm soát được có độ lợi phức tạp. Các mô hình không gian theo cụm có độ chính xác cao thường được sử dụng trong các tiêu chuẩn không dây [57]. Lưu ý rằng, q_{ℓ} xác định dựa trên định lượng hiện tại của RIS trong khi α_{ℓ} có thể ngẫu nhiên để mô hình hóa sự suy hao do tán xạ xung quanh bộ thu [58], [56]. Bằng công thức này, có thể xác định được đặc tính thống kê của sự suy giảm nhỏ ở máy thu mà không cần phải giả định theo kiểu nổi tầng.

3.3. Suy hao đường truyền phạm vi rộng

Một vấn đề quan trọng khác liên quan đến mô hình hóa kênh là làm thế nào để lập mô hình suy hao đường truyền quy mô lớn từ bộ phát đến bộ thu thông qua RIS. Mô hình hóa chính xác tổn thất đường truyền qua RIS rất quan trọng trong việc đánh giá hiệu suất của các liên kết truyền thông có RIS hỗ trợ so với các kỹ thuật khác [59]. Nó cũng là một khía cạnh khác biệt giữa phản xạ thông thường với siêu bề mặt RIS.

Trong trường hợp RIS triển khai dựa trên mỗi phần tử là một antenna có kích thước theo $\lambda/2$, mỗi phần tử hoạt động tán xạ khuếch tán, chỉ nhận một điểm trên mặt sóng tới, sau đó phân tán theo mọi hướng xung quanh, dẫn đến tổn thất công suất về phía máy thu. Suy hao đường dẫn tỷ lệ với tích của các khoảng cách [60], [61], n là số đường dẫn bị mất:

$$PL_{\text{scattered}} \propto \frac{1}{(d_{\text{sr}} \times d_{\text{rd}})^n} \quad (5)$$

Còn RIS dựa trên siêu bề mặt, mỗi phần tử có kích thước với cường độ lớn hơn bước sóng, mỗi phần tử nhận một phần của mặt sóng tới và chuyển hướng nó theo một góc phản xạ khả trình, không lan rộng thêm, trong trường hợp này, có sự bất thường đó là góc phản xạ không bằng góc tới [62]. Suy hao đường đi qua một phần tử RIS đơn lẻ sẽ tỷ lệ với tổng khoảng cách [60], [61], tức là:

$$P_{L_{\text{reflected}}} \propto \frac{1}{(d_{sr} + d_{rd})^n} \quad (6)$$

. Hướng nghiên cứu và phát triển

Trong phần này, dựa trên kết quả nghiên cứu các từ các công trình [1] – [62], chúng tôi đưa ra một số hướng nghiên cứu tiềm năng của RIS ứng dụng trong mạng không dây:

Hướng nghiên cứu 1: Tạo chùm tia tập trung cho các thiết bị IoT. Các mạng di động 5G và mới hơn trong tương lai sẽ hoạt động trong các kênh sóng milimet, nơi cần tăng cường antenna định hướng tốt để đạt được thông tin liên lạc tốc độ cao, tin cậy. Một số thiết bị IoT sẽ có kích thước quá nhỏ để hỗ trợ các mảng antenna cần thiết để đạt được đủ độ lợi định dạng chùm để thiết lập liên kết với một trạm gốc ở xa. RIS có thể được sử dụng để cung cấp cho các thiết bị này với độ lợi tạo chùm tia lớn, lớn hơn nhiều so với khả năng cung cấp của chúng do kích thước hạn chế của chúng. Lưu ý rằng, cả RIS và trạm gốc sẽ được cố định tại chỗ, điều này giúp đơn giản hóa việc tối ưu hóa dạng chùm giữa RIS và trạm gốc.

Hướng nghiên cứu 2: Thực nghiệm xác nhận tỷ lệ tổn thất đường dẫn. Mất đường dẫn qua RIS sẽ là một yếu tố quan trọng trong việc xác định tính thực tế của truyền thông có RIS hỗ trợ. RIS được nhận định sẽ giúp cho các kênh chuyển tiếp và tán xạ ngược không bị suy giảm do sự lan truyền của tín hiệu tại nút chuyển tiếp. Tuy nhiên, điều này vẫn cần được kiểm chứng bằng thực nghiệm và là một hướng nghiên cứu đầy thách thức.

Hướng nghiên cứu 3: Cảm biến RF và bán địa hóa (định vị nội bộ). Kích thước khẩu độ lớn của RIS và khả năng định hình môi trường lan truyền của nó có thể nâng cao đáng kể khả năng cảm biến RF. Kênh có thể được thay đổi để tạo điều kiện thuận lợi cho cảm biến RF, sau đó được giám sát với độ chính xác cao. Tuy nhiên, vấn đề tối ưu hóa cấu hình của RIS để tăng cường cảm biến RF vẫn còn phải được tiếp tục nghiên cứu. Hiệu suất liên quan đến độ chính xác định vị của các hệ thống được hỗ trợ bởi RIS phụ thuộc rất nhiều vào vị trí của các tâm phản xạ. Do đó, quan trọng là phải tìm ra những vị trí tối ưu để đặt những siêu bề mặt này, đây là một nhiệm vụ đầy thách thức.

Hướng nghiên cứu 4: Ước lượng và cảm biến kênh tiết kiệm năng lượng. RIS bao gồm một mảng lớn các phần tử tán xạ thụ động thường được kết nối với nhau và được điều khiển bởi bộ điều khiển trung tâm. Tính ưu việt của việc sử dụng RIS dựa vào việc cấu hình lại độ lệch pha của từng phần tử tán xạ, theo điều kiện kênh từ máy phát đến máy thu của nó. Điều này đòi hỏi khả năng cảm biến kênh và xử lý tín hiệu, và nó trở nên khó khăn nếu không có kỹ thuật chuyên dụng ở các phần tử tán xạ thụ động. Ước tính kênh bền vững và hiệu quả trên thực tế vẫn là một trong những công nghệ quan trọng đối với các hệ thống không dây có RIS hỗ trợ.

Hướng nghiên cứu 5: Các giao thức thực tế để trao đổi thông tin. Để có thể đạt được ước tính và cảm biến kênh của RIS cần phải trao đổi thông tin giữa nó và bộ thu phát tích cực để đồng bộ hóa với các khung truyền khác nhau và cấu hình lại các sơ đồ tạo chùm tia thụ động theo các điều kiện kênh của người dùng. Do đó, cần có một giao thức để RIS có thể giao tiếp với các bộ thu phát thông thường. Việc trao đổi thông tin có thể được thực hiện dễ dàng đối với các bộ thu phát sử dụng kênh điều khiển chuyên dụng, nhưng nếu không được cung cấp đủ năng lượng, RIS thụ động sẽ trở nên khó khăn hơn trong việc phát hiện và giải mã thông tin từ các bộ thu phát tích cực khác. Do đó, việc thiết kế một giao thức để trao đổi thông tin phải có mức tiêu thụ điện năng thấp để hoạt động bền vững bằng cách thu năng lượng không dây. Đồng thời, nó phải hiệu quả về mặt kinh tế, giảm thiểu xung đột với các hệ thống hiện có.

Hướng nghiên cứu 6: Tài nguyên cho mạng không đồng nhất HetNets (Heterogeneous Networks) được RIS hỗ trợ. Trong môi trường vô tuyến thông minh, mạng không dây có thể được hỗ trợ bởi hệ thống RIS phân tán với phần tử RIS được kiểm soát riêng cho các đối tượng khác nhau. Đây là thách thức đối với việc phân bổ thời gian thực và tối ưu hóa các đơn vị RIS để phục vụ nhiều luồng dữ liệu trong các mạng động và không đồng nhất. Điều này cần có cơ chế kiểm

soát chung để phân bổ và liên kết các đơn vị RIS một cách hiệu quả nhằm phục vụ đồng thời nhiều người dùng.

Hướng nghiên cứu 7: Cấu hình lại pha nhanh và nhẹ. Việc điều khiển pha của một phần tử tán xạ riêng lẻ phải được phối hợp với nhau để điều khiển chùm tia hiệu quả. Kích thước lớn của các phần tử tán xạ thuộc RIS có thể làm cho việc điều chỉnh pha tổng thể linh hoạt hơn, nhưng chi phí cao, gây khó cho ước lượng kênh, tiêu tốn năng lượng. Điều này đòi hỏi việc thiết kế một thuật toán điều khiển pha hiệu quả.

Hướng nghiên cứu 8: Phương pháp tiếp cận học máy (Learning Machine) để tạo chùm tia thụ động. Khác với tối ưu hóa xen kẽ, phương pháp học máy có thể hấp dẫn hơn đối với IRS để điều khiển pha nhanh và nhẹ dựa trên thông tin quan sát cục bộ của môi trường vô tuyến. Điều này có thể giúp giảm thiểu chi phí trao đổi thông tin giữa RIS và các bộ thu phát đang hoạt động. Số lượng lớn các phần tử tán xạ và khả năng cảm nhận của chúng cho biết thông tin phong phú có thể được thu thập trong quá trình cảm nhận kênh, cung cấp khả năng cho các phương pháp tiếp cận học sâu DL (Deep Learning) dữ liệu. Tuy nhiên, các phương pháp tiếp cận DL hiện nay vẫn đang đối mặt với nhiều thách thức thực tế, bao gồm các vấn đề về chi phí đào tạo, tính ổn định và khả năng thích ứng. Việc thiết kế các phương pháp tiếp cận DL phải đáp ứng các hạn chế phần cứng của hệ thống không dây hỗ trợ RIS, chẳng hạn như khả năng tính toán và giao tiếp ràng buộc của các phần tử tán xạ thụ động.

Hướng nghiên cứu 9: Sử dụng RIS trong Hệ thống cảm biến hoặc mạng cảm biến không dây thông minh. RIS có thể được sử dụng như các thiết bị cảm biến được cấu hình để giám sát thụ động môi trường vô tuyến. Các mạng có dây hoặc không dây được kết nối với bộ điều khiển RIS tập trung, tất cả thông tin cảm biến từ các phần tử tán xạ khác nhau có thể được thu thập và phân tích 1 cách tiết kiệm năng lượng, nâng cao khả năng liên lạc và tương tác.

Hướng nghiên cứu 10: Sự cân bằng giữa độ lợi mảng và suy hao đường dẫn LOS. Tồn tại một sự đánh đổi quan trọng giữa việc đạt được độ lợi mảng lớn và đảm bảo tổn thất đường dẫn LOS tối thiểu. Vì số lượng phần tử phản xạ thay đổi trên một đơn vị diện tích tùy thuộc vào kích thước của phần tử phản xạ nên kích thước vật lý tối thiểu của phần tử phản xạ (như thấu kính) tập trung năng lượng vào một tiêu điểm tùy thuộc vào khoảng cách giữa RIS và máy thu (là tiêu điểm). Mở ra hướng nghiên cứu xác định đặc điểm của sự đánh đổi, xem xét việc triển khai 3D của RIS, trong đó môi trường vô tuyến thông minh có thể được sử dụng đầy đủ về mật độ của RIS và tổng dữ liệu thu của chúng, được chuẩn hóa bằng chi phí triển khai.

Hướng nghiên cứu 11: Trí tuệ nhân tạo AI cho mạng không dây thông minh. RIS có thể được sử dụng như một trong ba chức năng sau: chuyển tiếp thụ động, bộ phát thụ động, hoặc cả hai chức năng này, trong đó chất lượng của tín hiệu sơ cấp được nâng cao bằng cách tạo tia thụ động qua relay, đồng thời thông tin thứ cấp được tạo ra từ chính RIS có thể được nhúng vào tín hiệu chính (như tán xạ ngược xung quanh). RIS có thể được trang bị cho các môi trường giám sát cảm biến, tạo ra thông tin thứ cấp để gửi đến IoT gateway trong đường lên (uplink). Việc chuyển đổi chế độ tại RIS cần phải được thực hiện từ xa và thông minh bởi trung tâm điều khiển thông qua công IoT, để xem xét các mục tiêu của người dùng và vị trí thiết bị. Số lượng lớn RIS được triển khai kết hợp với AI để hỗ trợ đường truyền chính sẽ đảm bảo định tuyến tối ưu giảm độ trễ và tăng bảo mật.

Hướng nghiên cứu 12: Khắc phục các tình huống không phải LOS. Một trong những trường hợp sử dụng hứa hẹn nhất để tận dụng các RIS trong mạng không dây bao gồm việc sử dụng chúng làm bộ phản xạ có thể cấu hình lại trong các tình huống mà đường dẫn LOS bị chặn hoặc không đủ mạnh để hỗ trợ người. Trong vùng sóng milimet, ở phổ dải D (> 100 GHz) và trong phổ ánh sáng nhìn thấy, đường dẫn LOS thường bị cản trở, khả năng nhận ra và có thể cấu hình lại các liên kết không phải LOS là một hướng nghiên cứu đầy hứa hẹn, đặc biệt là các luật chia tỷ lệ là một hàm của khoảng cách và số lượng siêu bề mặt phản xạ thu được.

Hướng nghiên cứu 13: Khắc phục lỗ trống cục bộ. Một nghiên cứu điển hình đầy hứa hẹn gồm việc sử dụng RIS để chống lại lỗ trống bị che phủ cục bộ, nơi chất lượng tín hiệu không tốt

trong các đô thị và môi trường lan truyền trong nhà. Trong các tình huống này, thông thường để khắc phục là triển khai thêm BS hoặc bộ chuyên tiếp. Tuy nhiên, các giải pháp này tốn kém và làm tăng lượng khí thải. Do đó, việc triển khai RIS là một giải pháp hiệu quả về chi phí và thân thiện với môi trường.

Hướng nghiên cứu 14: Giảm ô nhiễm EM. Một trong những tính năng chính của RIS là tái chế sóng vô tuyến theo cách thức xây dựng tiết kiệm năng lượng. Sự lan truyền đa đường thường được coi là không thể kiểm soát được và bị xung đột khi tăng độ phức tạp của máy phát và máy thu, kéo theo sự gia tăng số lượng sóng vô tuyến phát ra (tăng bức xạ EM). Phoi nhiễm bức xạ EM là một chủ đề nghiên cứu mở trong nhiều thập kỷ. Hầu hết, môi trường mmWave trong nhà được nghiên cứu cho các ứng dụng tương lai vì chúng cung cấp băng thông lớn, tốc độ cao. Tuy nhiên, bức xạ mmWave với tín hiệu tần số cao có khả năng thâm nhập sâu vào cơ thể con người, như sự nóng lên của da và mắt. Việc sử dụng RIS không phải để tạo ra các tín hiệu mới, mà là sử dụng chúng một cách thông minh. Do đó, để duy trì một hệ thống RIS hiệu quả, đề xuất xem xét một bài toán tối ưu hóa đảm bảo sự cân bằng giữa hiệu suất so với các vấn đề sức khỏe bằng cách điều chỉnh thích hợp các thông số mạng khác nhau.

Hướng nghiên cứu 15: Internet vạn vật tiết kiệm năng lượng. IoT với khả năng thu thập dữ liệu từ lượng lớn các cảm biến có vô số ứng dụng. Tuy nhiên, tổng năng lượng mà các thiết bị này cần là một trong những nút thắt cản trở sự phát triển của IoT. RIS kết hợp với truyền thông tán xạ ngược là một giải pháp đầy hứa hẹn cho phép các thiết bị IoT thu thập dữ liệu chuyển thành dạng các tín hiệu phản xạ tiết kiệm năng lượng.

Hướng nghiên cứu 16: Mô hình vật lý và tuân thủ EM. Một hạn chế chính của các nghiên cứu hiện tại về RIS trong mạng không dây là thiếu các mô hình chính xác tương ứng với các thuộc tính EM. Phần lớn các công trình đều giả định rằng siêu bề mặt luôn phản xạ hoàn hảo. Tuy nhiên, phản ứng của siêu bề mặt với sóng vô tuyến phụ thuộc vào nhiều yếu tố, như góc tới, góc phản xạ, góc khúc xạ, sự phân cực của sóng tới, vật liệu chế tác và kích thước của bề mặt. Do đó, cần có các mô hình vật lý và tuân thủ EM để có được các hiệu suất tổng thể tốt hơn.

Hướng nghiên cứu 17: Mô hình lý thuyết về công nghệ thông tin và truyền thông. Việc sử dụng RIS làm cho các mô hình lý thuyết cũ sử dụng trong truyền thông không dây trở nên lỗi thời. Đặc biệt, cần phải xem xét lại công thức về hiệu suất Shannon, vì bản thân hệ thống có thể lập trình và việc phân phối đầu vào cần được điều chỉnh cho phù hợp với các trạng thái giả định. Vì khi có RIS, không chỉ đầu vào là một biến, mà bản thân hệ thống cũng trở thành một biến, và chúng cần được tối ưu hóa cùng nhau. Trong các hệ thống được RIS trao quyền cần có các phương pháp luận lý thuyết thông tin mới để mô tả đặc điểm của các kênh vật lý, phân tích mức tăng công suất, cũng như các thuật toán xử lý tín hiệu, sơ đồ mạng mới để thực hiện truyền thông không dây qua RIS.

Hướng nghiên cứu 18: Mô hình không gian để phân tích và tối ưu hóa hệ thống. Mỗi tương quan về vị trí không gian của các đối tượng, máy phát và máy thu không dễ được mô hình hóa theo cách có thể kiểm soát để tối ưu hóa, tăng hiệu suất mạng. Do đó, vấn đề mở về mô hình hóa và phân tích các mạng quy mô lớn cần được giải quyết.

Hướng nghiên cứu 19: Mô hình kênh được xác thực bằng thực nghiệm. Hiện không có mô hình kênh nào được xác thực bằng thực nghiệm cung cấp cho các nhà nghiên cứu thông tin chính xác và thực tế về thống kê mất đường dẫn, phủ bóng và mờ dần cho RIS. Do đó, đây cũng là một hướng nghiên cứu mới đầy hứa hẹn.

Hướng nghiên cứu 20: Tối ưu hóa theo hướng dữ liệu. Mạng không dây được RIS hỗ trợ là hệ thống phức tạp để lập mô hình, phân tích và thiết kế so với các mạng không dây hiện tại. Việc sử dụng các phương pháp hướng dữ liệu dựa trên học máy, học sâu, học tăng cường và học chuyển giao là những công cụ đầy hứa hẹn để đơn giản hóa việc triển khai và tăng hiệu quả của hệ thống truyền thông.

Hướng nghiên cứu 21: Thiết kế các kỹ thuật bảo mật lớp vật lý PLS (Physical Layer Security) hiệu quả, thích ứng và thông minh được RIS hỗ trợ về bảo mật, độ tin cậy, độ trễ, độ phức tạp và

thông lượng dựa trên các yêu cầu QoS. Số lượng phân tử phản xạ, độ lệch pha được thông qua bởi các phân tử phản xạ và dạng chùm tia phản xạ của RIS, có thể được kết hợp và tối ưu hóa để hạn chế các chùm tia nhận được đến các vị trí cụ thể, loại bỏ các chùm tia tại vị trí bị nghe lén, giảm tiêu thụ năng lượng trên máy phát, hoặc để tối đa hóa tín hiệu trên nhiều công với tỷ lệ giao thoa SINR (Signal to Noise plus Interference Ratio) tại máy thu dự kiến. Bên cạnh đó cũng sẽ xuất hiện thách thức bảo mật mới: kẻ tấn công có thể chiếm quyền kiểm soát RIS, sửa đổi theo ý muốn của các tín hiệu sự cố (ví dụ: hướng chùm tia tới các vị trí không mong muốn, hoặc tới vùng lợi thế của kẻ tấn công), hoặc có thể xác định vị trí RIS và tiến gần hơn về mặt vật lý, cải thiện SINR của nó. Sự ra đời của RIS sẽ chuyển các vấn đề về bảo mật dữ liệu và bảo mật lớp vật lý sang các miền ứng dụng mới, chẳng hạn như Mạng giao thông Vehicular Networks (VN), Flying Ad-hoc Networks (FANET) và Ultra-Dense Networks (UDN).

Hướng nghiên cứu 22: Các thuật toán điều khiển sóng EM. Việc hiện thực hóa các phần mềm điều khiển môi trường trong các hệ thống truyền thông không dây được RIS trao quyền vô cùng khó khăn. Các đơn vị RIS chế tạo từ siêu vật liệu bị các ràng buộc điều chỉnh trực tuyến, độ tin cậy và tốc độ cực cao vẫn chưa được khám phá đầy đủ.

Hướng nghiên cứu 23: RIS hỗ trợ truyền thông thiết bị - thiết bị D2D (Device to Device). RIS có thể được cấu hình lại động để tăng cường liên kết dữ liệu riêng lẻ của truyền thông D2D. Điều này đòi hỏi các giao thức ước lượng và cảm biến kênh hiệu quả, các thuật toán cấu hình lại pha nhanh, nhẹ. Các thông tin về các thiết bị có thể bị tắc nghẽn, lưu lượng thay đổi theo thời gian, sự phân bố năng lượng trên toàn bộ mạng và thông tin để dự đoán và chẩn đoán lỗi mạng, v.v, có thể được mạng D2D sử dụng để tối ưu hóa việc triển khai và cài đặt của các đơn vị RIS, điều khiển đường truyền của thiết bị IoT, vị trí của các nút chuyển tiếp và các trạm báo hiệu nguồn.

Hướng nghiên cứu 24: RIS kết hợp với hệ thống đa truy cập phi trực giao NOMA (Non-Orthogonal Multiple Access) để nâng cao hơn hiệu quả phổ. Mặc dù sử dụng một bề mặt lớn chứa đầy các antenna phát, nhưng các chùm tia đủ hẹp để phân biệt những người dùng khác nhau là một thách thức, đặc biệt đúng đối với các kết nối lớn. Do đó, đây là một giải pháp đầy hứa hẹn trong uplink vì nó có thể khả thi khi kết hợp lượng lớn người dùng trong một cụm. Số lượng lớn các antenna trên bề mặt có thể được khai thác cho các mục đích giảm thiểu nhiễu liên lớp nâng cao. Việc áp dụng cài đặt đa antenna nâng cao, đặc biệt là nhiều antenna ở đầu thu khi cài đặt MIMO hoặc thậm chí mMIMO tạo thêm những thách thức cho kỹ thuật tập trung hướng chùm tín hiệu đến thiết bị nhận BF (BeamForming). Đặc biệt, tác động của nhiều antenna tại máy thu đối với nhu cầu của người dùng NOMA cũng như vấn đề hình thành cụm, tác động của giao thoa liên cụm giữa các nhóm NOMA của các phân tử RIS khác nhau gây ra bởi các bộ phản xạ thụ động thông thường mang lại những thách thức về thiết kế cần khám phá.

Hướng nghiên cứu 25: Tích hợp RIS với mạng di động 5G, B5G, 6G. RIS là một trong những công nghệ lớp vật lý mang tính cách mạng và tiềm năng tạo ra mô hình truyền thông mới đáp ứng các yêu cầu của mạng 5G và B5G, 6G trong tương lai. Hệ thống lai này nâng cao hiệu quả quang phổ, cung cấp dịch vụ truyền thông không dây tin cậy, loại bỏ các thành phần nhiễu, cải thiện dung lượng mạng và hiệu suất của người dùng, đặc biệt đối với các môi trường mật độ người dùng cao như sân bay hay sân vận động. Do đó, đây là một hướng nghiên cứu thú vị, thông qua việc tính toán các ràng buộc và mục tiêu thích hợp khi thiết kế các hệ thống.

Hướng nghiên cứu 26: Tích hợp RIS với các công nghệ mới. Sự kết hợp (hệ thống lai) của RIS với các công nghệ hiện đại và mới nổi, như tế bào nhỏ, MIMO lớn, truyền thông sóng milimet, truyền thông ánh sáng khả kiến VLC, giao tiếp terahertz, quang học không gian trống, truyền thông hỗ trợ máy bay không người lái (UAV), thu hoạch năng lượng EH, điện toán edge di động (MEC) và edge caching, truyền thông dưới nước, mạng mặt đất - vệ tinh v.v, là một hướng nghiên cứu đầy hứa hẹn và chưa được khám phá đầy đủ.

5. Kết luận

Bài báo đã trình bày một cuộc khảo sát về vai trò của bề mặt phản xạ thông minh có thể cấu hình lại được RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces) đối với các mạng truyền thông không dây, giúp khắc phục các tác động tiêu cực của hệ thống thông tin liên lạc truyền thống, giảm nhiễu, đảm bảo độ tin cậy, tăng sự bảo mật, tối ưu hóa kênh truyền, nâng cao hiệu phổ, tiết kiệm năng lượng, mở rộng phạm vi phủ sóng, đáp ứng các yêu cầu về tốc độ dữ liệu của người dùng và chất lượng dịch vụ, góp phần nâng cao hiệu năng chung của toàn bộ hệ thống truyền thông. Đầu tiên, chúng tôi đã đưa ra một số tên gọi khác nhau của RIS về các bề mặt thụ động có thể điều khiển sóng điện từ tới và thay đổi điều kiện kênh, nêu lên các tính năng giúp phân biệt với các công nghệ tương đồng khác là bộ khuếch đại, chuyển tiếp AF (Amplify and Forward), định dạng chùm MIMO (massive MIMO) và truyền thông tán xạ ngược BackCom (Backscatter Communications). Tiếp đến, nhóm tác giả giới thiệu các kịch bản ứng dụng có thể được hưởng lợi từ khả năng cấu hình lại của nó trong các mạng không dây, các công nghệ mới nổi như: MIMO lớn, truyền thông sóng milimet, truyền thông ánh sáng khả kiến VLC, giao tiếp terahertz, truyền thông hỗ trợ máy bay không người lái (UAV), mạng 5G, B5G, 6G, v.v. Sau đó, bài viết cung cấp thông tin về hoạt động và cấu tạo cơ bản của RIS trong hai cách triển khai cơ bản đó là: RIS dựa trên phản xạ truyền thông và RIS thiết kế từ các siêu bề mặt. Ước lượng kênh không dây được RIS hỗ trợ trong bài báo giúp các nhà nghiên cứu, thiết kế phân tích mô phỏng thông tin và đánh giá hiệu năng của RIS. Cuối cùng, dựa trên các công trình, các ứng dụng có hiệu quả tích cực, các thách thức hiện tại, nhóm tác giả đề xuất các hướng nghiên cứu, phát triển tiềm năng trong tương lai, giúp cách mạng hóa công nghệ truyền thông không dây nói riêng và hệ thống thông tin liên lạc nói chung.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] "Cisco visual networking index: Global mobile data traffic forecast update, 2017–2022," Feb. 2019. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf>. [Accessed Feb. 14, 2021].
- [2] M. Patzold, "It's time to go big with 5G mobile radio," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 4-10, 2018.
- [3] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems," *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134 - 142, Oct. 2019.
- [4] X. Cao, L. Liu, Y. Cheng, and X. S. Shen, "Towards energy-efficient wireless networking in the big data era: A survey," *IEEE Commun. Surv. Tut.*, vol. 20, no. 1, pp. 303-332, Firstquarter 2018.
- [5] M. R. Akdeniz *et al.*, "Millimeter wave channel modeling and cellular capacity evaluation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, no. 6, pp. 1164-1179, Jun. 2014.
- [6] Q. Wu and R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 106-112, Jan. 2020.
- [7] M. D. Renzo *et al.*, "Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: An idea whose time has come," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2019, May 2019, Art. no. 129.
- [8] E. Basar, M. Di Renzo, J. de Rosny, M. Debbah, M.-S. Alouini, and R. Zhang, "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753- 116773, Aug. 2019.
- [9] E. Basar, "Transmission through large intelligent surfaces: A new frontier in wireless communications," *European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 2019.
- [10] Z.-Q. He and X. Yuan, "Cascaded channel estimation for large intelligent metasurface assisted massive MIMO," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, pp. 210 - 214, Oct. 2019.
- [11] X. Tan, Z. Sun, D. Koutsonikolas, and J. M. Jornet, "Enabling indoor mobile millimeter-wave networks based on smart reflect-arrays," *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2018, pp. 270-278.
- [12] T. Ulversoy, "Software defined radio: Challenges and opportunities," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 12, no. 4, pp. 531-550, 2010.
- [13] D. Mishra and H. Johansson, "Channel estimation and low-complexity beamforming design for passive intelligent surface assisted MISO wireless energy transfer," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2019, pp. 4659-4663.

- [14] L. Subrt and P. Pechac, "Controlling propagation environments using intelligent walls," *proc. European Conf. Antennas Propag. (EUCAP)*, Mar. 2012, pp. 26-30.
- [15] M. Najafi and R. Schober, "Intelligent reflecting surfaces for free space optical communications," *proc. IEEE GLOBECOM*, Dec. 2019, pp. 1-7.
- [16] Z. Li et al., "Towards programming the radio environment with large arrays of inexpensive antennas," *Proc. USENIX Symp. Netw. Syst. Design Implement.*, Feb. 2019, pp. 285-299.
- [17] L. Sanguinetti, E. Björnson, and J. Hoydis, "Towards massive MIMO 2.0: Understanding spatial correlation, interference suppression, and pilot contamination," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 1, pp. 232 - 257, 2019.
- [18] S. Y. Park and D. I. Kim, "Intelligent reflecting surface-aided phaseshift backscatter communication," *proc. Int. Conf. Ubiquit. Inf. Manag. Commun. (IMCOM)*, Jan. 2020, pp. 1-5.
- [19] S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors, "The potential of using large antenna arrays on intelligent surfaces," *IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2017, pp. 1-6.
- [20] H. Zheng, Z. Yang, G. Wang, R. He, and B. Ai, "Channel estimation for ambient backscatter communications with large intelligent surface," *Proc. IEEE Int. Conf. Wireless Commun. Signal Process. (WCSP)*, Oct. 2019, pp. 1-5.
- [21] S. Gong et al., "Towards Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Contemporary Survey," *IEEE Commun. Tuts. & Tuts.*, vol. 22, no. 4, pp. 2283-2314, June 2020.
- [22] C. Huang et al., "Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 8, pp. 4157-4170, 2019.
- [23] E. Basar, "Transmission through large intelligent surfaces: A new frontier in wireless communications," *EuCNC 2019*, June 2019, pp. 18-21.
- [24] W. Tang et al., "Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter," *Electron. Lett.*, vol. 55, no. 7, pp. 417-420, Apr. 2019.
- [25] E. Basar, "Reconfigurable Intelligent Surface-Based Index Modulation: A New Beyond MIMO Paradigm for 6G," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 5, pp. 3187-3196, 2020.
- [26] A. Canbilen, E. Basar, and S. Ikki, "Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Space Shift Keying," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 9, pp. 1495-1499, 2020.
- [27] A. Khaleel and E. Basar, "Reconfigurable Intelligent Surface-Empowered MIMO Systems," *IEEE Systems J. (to appear)*, July 2020.
- [28] W. Tang et al., "MIMO Transmission through Reconfigurable Intelligent Surface: System Design, Analysis, and Implementation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 11, pp. 2683-2699, 2020.
- [29] R. Zhang et al., "Secure Wireless Communication via Intelligent Reflecting Surface," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 1410-1414, 2019.
- [30] R. Schober et al., "Enabling Secure Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces," *GLOBECOM*, 2019.
- [31] R. Schober et al., "Physical Layer Security in Vehicular Networks with Reconfigurable Intelligent Surfaces," *IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Dec. 2019, pp. 25-28.
- [32] B. Massini et al., "The Use of Meta-Surfaces in Vehicular Networks," *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 9, Mar. 2019, doi: 10.3390/jsan9010015.
- [33] M. Fu et al., "Intelligent Reflecting Surface for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Networks," *GLOBECOM 2019*, Dec. 2019.
- [34] Z. Ding and H. V. Poor, "Simple Design of IRS-NOMA Transmission," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 5, pp. 1119-1123, May 2020.
- [35] J. Zuo, Y. Liu, E. Basar, and O. A. Dobre, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Millimeter-Wave NOMA Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 11, pp. 2632-2636, June 2020.
- [36] Z. Yigit, E. Basar, and I. Altunbas, "Low Complexity Adaptation for Reconfigurable Intelligent Surface-Based MIMO Systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 12, pp. 2946-2950, 2020.
- [37] L. Hanzo et al., "MIMO Assisted Networks Relying on Large Intelligent Surfaces: A Stochastic Geometry Model," Oct. 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1910.00959>. [Accessed Feb. 20, 2021].
- [38] M. Bennis et al., "Reflections in the Sky: Millimeter Wave Communication with UAV-Carried Intelligent Reflectors," *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Feb. 2020, pp. 9-13.
- [39] S. Alfattani et al., "Aerial Platforms with Reconfigurable Smart Surfaces for 5G and Beyond," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 1, pp. 96-102, 2021.

- [40] E. Larsson et al., "Intelligent Reflecting Surface-Assisted Cognitive Radio System," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 1, pp. 675-687, 2021.
- [41] E. Basar, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Doppler Effect and Multipath Fading Mitigation", Nov. 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1912.04080>. [Accessed Jan. 15, 2021].
- [42] I. Yildirim, A. Uyrus, and E. Basar, "Modeling and Analysis of Reconfigurable Int Applications in Future Wireless Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 2, pp. 1290-1301, 2021.
- [43] R. Zhang et al., "Intelligent Reflecting Surface Meets OFDM: Protocol Design and Rate Maximization," June 2019. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1906.09956>. [Accessed Jan. 12, 2021].
- [44] H. V. Poor et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces based RF Sensing: Design, Optimization, and Implementation," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 38, no. 11, pp. 2700-2716, 2020.
- [45] H. Wymeersch et al., "Radio Localization and Mapping with Reconfigurable Intelligent Surfaces," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 52-61, 2020.
- [46] S. Hua and Y. Shi, "Reconfigurable intelligent surface for green edge inference in machine learning," *proc. IEEE GLOBECOM Workshops*, Dec. 2019, pp. 1-6.
- [47] Q. Wu et al., "Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications: A Tutorial," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 5, pp. 3313-3351, 2021.
- [48] S. V. Hum and J. Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable reflectarrays and array lenses for dynamic antenna beam control: A review," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 1, pp. 183-198, Jan. 2014.
- [49] V. Arun and H. Balakrishnan, "RFocus: Practical beam-forming for small devices," May 2019. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1905.05130>. [Accessed Jan. 10, 2021].
- [50] H. Chen, A. J. Taylor, and N. Yu, "A review of metasurfaces: Physics and applications," *Rep. Progr. Phys.*, vol. 79, no. 7, Jun. 2016, Art. no. 076401.
- [51] C. Huang et al., "Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends," *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 5, pp. 118-125, 2020.
- [52] Q. He, S. Sun, and L. Zhou, "Tunable/reconfigurable metasurfaces: Physics and applications," *Research*, vol. 2019, pp. 1-16, Jul. 2019.
- [53] R. W. Heath and A. Lozano, *Foundations of MIMO Communication*, 1st ed. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, Dec. 2018.
- [54] J. D. Griffin and G. D. Durgin, "Gains for RF tags using multiple antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 2, pp. 563-570, Feb. 2008.
- [55] M. ElMossallamy, Z. Han, M. Pan, R. Jantti, K. Seddik, and G. Y. Li, "Noncoherent frequency shift keying for ambient backscatter over OFDM signals," *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Shanghai, China, May 2019, pp. 1-6.
- [56] R. W. Heath, N. González-Prelcic, S. Rangan, W. Roh, and A. M. Sayeed, "An overview of signal processing techniques for millimeter wave MIMO systems," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 10, no. 3, pp. 436-453, Apr. 2016.
- [57] P. Almers et al., "Survey of channel and radio propagation models for wireless MIMO systems," *EURASIP J. Wireless Commun. Netw.*, vol. 2007, Feb. 2007, Art. no. 019070.
- [58] O. E. Ayach, S. Rajagopal, S. Abu-Surra, Z. Pi, and R. W. Heath, "Spatially sparse precoding in millimeter wave MIMO systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 1499-1513, Mar. 2014.
- [59] E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO is a reality—What is next?: Five promising research directions for antenna arrays," *Digital Signal Process.*, vol. 94, pp. 3-20, Nov. 2019.
- [60] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2001.
- [61] K. R. Schaubach, N. J. Davis, and T. S. Rappaport, "A ray tracing method for predicting path loss and delay spread in microcellular environments," *Vehicular Technology Society 42nd VTS Conference - Frontiers of Technology*, May 1992, pp. 10-13.
- [62] A. Díaz-Rubio, V. S. Asadchy, A. Elsakka, and S. A. Tretyakov, "From the generalized reflection law to the realization of perfect anomalous reflectors," *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 8, Aug. 2017, Art. no. e1602714.