

PATHLOSS MODEL FOR WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM THROUGH INTELLIGENT REFLECTING SURFACE

Nguyen Xuan Kien*, Nguyen Thanh Tung, Bui Phuong Thao

TNU - University of Information and Communication Technology

ARTICLE INFO		ABSTRACT
Received:	20/9/2022	Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS) is a new technology being researched and deployed to develop wireless communication systems, as well as 5G, beyond 5G (B5G), and future 6G mobile networks. The surface contains reconfigurable electromagnetic metamaterial to direct the beam from the source to the desired receivers with maximum signal strength, making random wave propagation a smart radio environment that can be controlled by the user. The article provides some lossy models of transmission lines and channels in communication systems with the support of smart surfaces built based on physical optical techniques and the light reflection theorem of Snell and the physical and electromagnetic nature of RIS. With mathematical expressions, it will provide researchers with a way to calculate, simulate, analyze, evaluate and calibrate communication channels to achieve optimal efficiency before deploying experimental fabrication or for comparison with other transmission enhancement technologies such as AF relay and amplifier, MIMO beamforming, and BackCom backscatter communication.
Revised:	19/10/2022	
Published:	20/10/2022	
KEYWORDS		
Reconfigurable intelligent surface		
Intelligent reflecting surfaces		
Beyond 5G		
Pathloss model		
Smart radio environment		

MÔ HÌNH SUY HAO ĐƯỜNG TRUYỀN CHO HỆ THỐNG TRUYỀN THÔNG KHÔNG DÂY QUA BỀ MẶT PHẢN XẠ THÔNG MINH

Nguyễn Xuân Kiên*, Nguyễn Thanh Tùng, Bùi Phương Thảo

Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông - ĐH Thái Nguyên

THÔNG TIN BÀI BÁO		TÓM TẮT
Ngày nhận bài:	20/9/2022	Bề mặt phản xạ thông minh RIS là một công nghệ mới đang được nghiên cứu, triển khai để phát triển các hệ thống truyền thông không dây, cũng như các mạng di động 5G, sau 5G (B5G) và mạng tương lai 6G. Bề mặt chứa siêu vật liệu điện từ có thể tái cấu hình để hướng chùm sóng từ nguồn phát tới các bộ thu mong muốn với cường độ tín hiệu tối đa, khiến cho quá trình truyền sóng ngẫu nhiên thành một môi trường vô tuyến thông minh mà người dùng có thể điều khiển được. Bài báo cung cấp một số mô hình suy hao đường truyền và kênh dẫn trong hệ thống thông tin liên lạc có sự hỗ trợ của bề mặt thông minh được xây dựng dựa trên các kỹ thuật quang học vật lý, định luật phản xạ ánh sáng của Snell và bản chất vật lý, điện từ của RIS. Với các biểu thức toán học sẽ cung cấp cho các nhà nghiên cứu một phương án tính toán, mô phỏng, phân tích, đánh giá và hiệu chỉnh các kênh truyền thông nhằm đạt được hiệu quả tối ưu trước khi triển khai chế tạo thực nghiệm hoặc để so sánh với các công nghệ tăng cường truyền tải thông tin khác như bộ khuếch đại và chuyển tiếp AF, định dạng chùm MIMO và truyền thông tán xạ ngược BackCom.
Ngày hoàn thiện:	19/10/2022	
Ngày đăng:	20/10/2022	
TỪ KHÓA		
Bề mặt thông minh có thể cấu hình lại		
Bề mặt phản xạ thông minh		
Sau 5G		
Mô hình pathloss		
Môi trường vô tuyến thông minh		

DOI: <https://doi.org/10.34238/tnu-jst.6535>

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

1. Giới thiệu

Hệ thống truyền thông không dây cơ bản gồm máy phát mang thông tin đến bộ thu qua môi trường lan truyền sóng điện từ không kiểm soát được. Mạng 5G, sau 5G (B5G) tiến đến mạng tương lai 6G đặt ra yêu cầu các môi trường truyền tải có thể cấu hình lại theo thời gian thực [1] - [7], bằng cách triển khai các bề mặt phản xạ thông minh, còn có tên gọi khác như siêu bề mặt được điều khiển bằng phần mềm, bề mặt thông minh có thể cấu hình lại, siêu bề mặt thông minh, mảng phản xạ thông minh [6], v.v. Để thống nhất tên gọi, nhóm tác giả sẽ sử dụng từ khóa RIS (Reconfigurable Intelligent Surfaces) cho công nghệ hỗ trợ này xuyên suốt bài báo. Trong môi trường vô tuyến thông minh, sóng tới có thể điều khiển được để phản xạ, khuếch tán, tán xạ, khúc xạ theo hướng mong muốn.

RIS là các tấm vật liệu điện từ EM (Electromagnetic) có thể định cấu hình lại để kiểm soát sự lan truyền của sóng trong môi trường không dây nhằm nâng cao chất lượng tín hiệu tại máy thu. RIS được tạo ra từ một số lượng lớn các phần tử thụ động, chi phí thấp có khả năng điều chỉnh sóng vô tuyến tác động vào chúng mà các vật liệu tự nhiên không làm được. RIS được tạo ra từ các siêu bề mặt hoạt động như bộ phản xạ có các pha có thể được điều chỉnh độc lập và các tia sóng được hướng về cùng một góc phản xạ. Không giống như các công nghệ tương tự khác, như realy và chùm tia MIMO, RIS không yêu cầu bất kỳ nguồn năng lượng nào, cũng như quá trình xử lý, mã hóa và giải mã phức tạp các thuật toán [4].

Có nhiều công nghệ chuyển mạch khác nhau để kiểm soát sự phản xạ EM từ bề mặt thông minh, như CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor – một công nghệ chế tạo mạch tích hợp) switches hoặc công nghệ vi cơ điện tử MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) switches, diode nội PIN tích cực – thụ động (Positive Intrinsic Negative), bộ cộng hưởng điều chỉnh varactor, tinh thể lỏng, v.v. Trong siêu bề mặt, các phần tử chuyển mạch (switches) điều khiển các siêu nguyên tử hoạt động như các antenna vào ra, khi sóng EM đến, chúng được định tuyến dựa trên trạng thái của switches, giúp RIS đạt được phản xạ mong muốn [2], [3]. Một phương pháp kiểm soát hiệu ứng phản chiếu trong siêu bề mặt sử dụng các PIN diode làm phần tử chuyển mạch, tạo ra hai trạng thái khác nhau cho bề mặt thông minh để chọn lọc tần số phù hợp. Các bộ cộng hưởng tần số dùng varactor (biến dung) cũng được sử dụng để kiểm soát sự lan truyền của tín hiệu. Khi điện áp phân cực được đặt vào varactor, sẽ đạt được sự dịch pha mong muốn [2], [3].

Xem xét mô hình kênh hai tia thông thường cho môi trường không gian tự do và bề mặt phản xạ được triển khai trên mặt phẳng [3], [4]. Truyền không dây có thể điều khiển được bằng cách tạo ra một bề mặt thông minh: Dữ liệu nhận được bao gồm tín hiệu đường ngắm LoS (Line Of Sight) và tia phản xạ. Sóng vô tuyến truyền theo đường thẳng trong trường hợp môi trường đồng nhất, tuân theo nguyên tắc Fermat và tia phản xạ tuân theo định luật Snell.

Theo nguyên lý hoạt động của RIS, có thể phân ra 2 phương pháp khi thiết kế và chế tạo các bề mặt thông minh này đó là: RIS dựa trên mảng phản xạ thụ động và RIS được thiết kế dựa trên các siêu bề mặt [5].

RIS có thể hỗ trợ một loạt các chức năng có thể điều chỉnh, chẳng hạn như hấp thụ hoàn hảo, phản xạ dị thường, định hình chùm tia và điều hướng. Hơn nữa, nó có khả năng cảm nhận và giao tiếp với các thiết bị ngoại vi, cho phép tích hợp với các hệ thống truyền thông không dây để phục vụ cho nhiều ứng dụng khác nhau [6].

Các bề mặt có thể tái cấu hình mới được thiết kế ở dạng sơ khai cơ bản, chưa có sự thống nhất về mô hình lan truyền. Mô hình suy hao đường truyền (mất đường dẫn - Pathloss) được đề xuất [5] chủ yếu dựa trên 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 và được thiết kế dựa trên các siêu bề mặt có dạng phẳng hai chiều sử dụng các vật liệu điện từ nhân tạo.

Một vấn đề nghiên cứu quan trọng đặt ra cho RIS mô hình hóa quá trình suy hao đường truyền từ máy phát đến máy thu thông qua RIS. Mục đích của công việc này là để các nhà nghiên cứu có

các công thức tham khảo, phạm vi tiếp cận đối tượng, giải pháp tính toán, phân tích và mô phỏng thông tin, giúp đánh giá hiệu năng của công nghệ RIS, cũng như so sánh với các phương pháp kỹ thuật hỗ trợ khác.

Bài báo đưa ra một số mô hình mất đường dẫn cho các bề mặt phản xạ thông minh. Một mô hình được xây dựng dựa trên kỹ thuật quang học vật lý và 3 mô hình pathloss khác được thiết kế từ bản chất vật lý và điện từ của RIS.

2. Phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình mất đường dẫn xây dựng bằng kỹ thuật quang học vật lý

Mô hình suy hao đường truyền – pathloss trong hệ thống thông tin liên lạc có sự hỗ trợ của RIS được xây dựng dựa trên kỹ thuật quang học vật lý và định luật phản xạ ánh sáng của Snell [8]. Chúng được đề xuất dựa trên 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 và được thiết kế dựa trên các siêu bề mặt có dạng phẳng hai chiều sử dụng các vật liệu điện từ nhân tạo.

Xét chùm tia sóng tới RIS gồm nhiều phần tử bề mặt có kích thước nhỏ hơn bước sóng λ . Giả sử bề mặt thông minh gồm các phần tử $pt_d \times pt_r$, mỗi phần tử có kích thước:

$$\frac{d}{pt_d} \times \frac{r}{pt_r}; \quad \left(\frac{d}{pt_d}, \frac{r}{pt_r} \right) \leq \lambda \quad (1)$$

Mỗi mảng phản xạ thụ động có kích thước hữu hạn $d \times r$, độ dày không đáng kể, nằm trong mặt phẳng (x, y) . Một nguồn phát sóng cách bề mặt 1 khoảng l_i đủ lớn so với d và r , sao cho:

$$l_i \geq \frac{2\max(d^2, r^2)}{\lambda} \quad (2)$$

Được truyền đến với số sóng $n = 2\pi/\lambda$ (bước sóng λ), và góc tới $\Phi_i \in [0; \pi/2]$. Mô hình pathloss giữa máy phát và máy thu qua phần tử bề mặt thứ i ở một góc quan sát tùy ý $\Phi_s \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ là [9]:

$$PL_i = \frac{Gn_p Gn_t}{(4\pi)^2} \left(\frac{dr}{pt_d pt_r l_i s} \right)^2 \cos^2(\Phi_i) \quad (3)$$

Trong đó: Gn_p , Gn_t lần lượt là độ lợi kênh của antenna phát và thu, s là khoảng cách từ phần tử phản xạ đến bộ thu.

Như vậy bề mặt thông minh gồm 1 mảng các bộ tán xạ khuếch tán (mỗi bộ có kích thước λ) sắp xếp theo pha các tín hiệu phản xạ của chúng tại máy thu và do đó đạt được mục tiêu mong muốn.

Bằng kỹ thuật quang học vật lý thu được công thức (3) xác định suy hao đường dẫn pathloss cho một bề mặt phản xạ thông minh tái cấu hình. Một mảng phản xạ thông minh gồm nhiều phần tử có kích thước bước sóng phụ phân tán tín hiệu đến với sự dịch chuyển pha duy nhất để đạt được dạng chùm nhất quán theo hướng mục tiêu. Sự dịch chuyển pha lý tưởng tạo ra một chùm tia đơn lẻ được đưa ra bởi định luật Snell tổng quát, nhưng nếu tạo ra sự cộng hưởng của nhiều chùm tia, thì sự dịch chuyển pha phải được tối ưu hóa một cách rõ ràng.

2.2. Mô hình mất đường dẫn xây dựng dựa trên bản chất vật lý và điện từ của RIS

Mô hình pathloss cho truyền thông không dây có RIS hỗ trợ trong các tình huống khác nhau dựa trên bản chất vật lý và điện từ được nghiên cứu [10]. Chúng được xây dựng qua mô phỏng và xác minh bởi thực nghiệm. Gồm ba mô hình (4), (5) và (6) nêu lên mối quan hệ giữa suy hao đường dẫn trong môi trường lan truyền không dây, khoảng cách từ trạm phát, bộ thu tới RIS, kích thước của RIS, hiệu ứng trường gần/trường xa của RIS, bức xạ của các phần tử cấu thành RIS, công suất tiêu thụ của RIS và ảnh hưởng của góc tới.

Khi trạm phát ở khoảng cách đủ xa so với dải antenna, sóng hình cầu phát ra có thể được coi là sóng phẳng. Cụ thể, khi độ lệch pha lớn nhất của tín hiệu thu được trên mảng antenna không vượt quá $\pi/8$, quy ước máy phát nằm trong trường xa của mảng antenna [11]. Khi đó, ranh giới của trường xa và trường gần của mảng antenna được xác định là $R = 2S^2/\lambda$, trong đó R , S và λ lần lượt là khoảng cách giữa máy phát và tâm của mảng antenna, kích thước lớn nhất của dải antenna và bước sóng của tín hiệu. Khi khoảng cách giữa trạm phát/bộ thu tới tâm RIS nhỏ hơn R , trạm phát/bộ thu được coi là đang ở trong trường gần của RIS, ngược lại, sẽ là trường xa.

Trong kịch bản tạo chùm tia được hỗ trợ bởi RIS, công suất nhận được là tối đa cho một người dùng. Mặt khác, khi phát sóng có RIS hỗ trợ, tín hiệu bao phủ đồng đều đến tất cả người dùng trong một khu vực cụ thể.

Trường hợp phát chùm tia ở trường xa: Các tín hiệu được phản xạ bởi tất cả các phần tử trên RIS tới bộ thu có thể được điều khiển theo pha để tăng cường công suất nhận được. Giả sử rằng các hướng của bức xạ đỉnh của cả antenna phát và thu đều hướng về trung tâm của RIS, và tất cả các đơn vị của RIS có cùng hệ số phản xạ $RC = Ae^{j\varphi}$, biên độ A . Mô hình pathloss được xác định [10]:

$$PL_2 = \frac{64\pi^3 (l_1 l_2)^2}{G_{n_p} G_{n_t} G h^2 c^2 d_x d_y \lambda^2 P(\theta_t, \Phi_t) P(\theta_r, \Phi_r) A^2} \quad (4)$$

Trong đó: l_1, l_2 là khoảng cách giữa máy phát, máy thu tới tâm RIS; G_{n_p}, G_{n_t}, G lần lượt là độ lợi kênh (khuếch đại) của antenna phát, antenna thu và của mỗi ô đơn vị (phần tử cấu thành RIS); h, c là số hàng và số cột của các ô đơn vị được sắp xếp đều đặn trên bề mặt RIS; Kích thước của mỗi ô đơn vị dọc theo trục x là d_x , dọc theo trục y là d_y , nằm trong phạm vi $\lambda/10 \div \lambda/2$. Φ_t, θ_t là góc nâng và góc phương vị từ tâm RIS tới máy phát; θ_r, Φ_r là góc nâng và góc phương vị từ tâm RIS đến máy thu; $P(\theta, \Phi)$ là dạng bức xạ công suất chuẩn hóa của ô đơn vị, biểu thị sự phụ thuộc của mật độ công suất tới/phản xạ của ô đơn vị vào góc tới/phản xạ.

Trường hợp phát chùm tia ở trường gần: Cho phép RIS tập trung tín hiệu phản xạ tới bộ thu bằng cách thiết kế đúng các hệ số phản xạ RC . Mô hình pathloss được xác định [10]:

$$PL_3 = \frac{64\pi^3}{G_{n_p} G_{n_t} G d_x d_y \lambda^2 A^2 \left| \sum_{1-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sum_{1-\frac{c}{2}}^{\frac{c}{2}} \frac{\sqrt{P_r}}{l_t l_r} \right|^2} \quad (5)$$

Trong đó: P_r là ảnh hưởng của các mẫu bức xạ công suất chuẩn hóa trên nguồn tín hiệu nhận được; l_t, l_r là khoảng cách giữa máy phát, máy thu tới tâm của phần tử thứ i trong RIS.

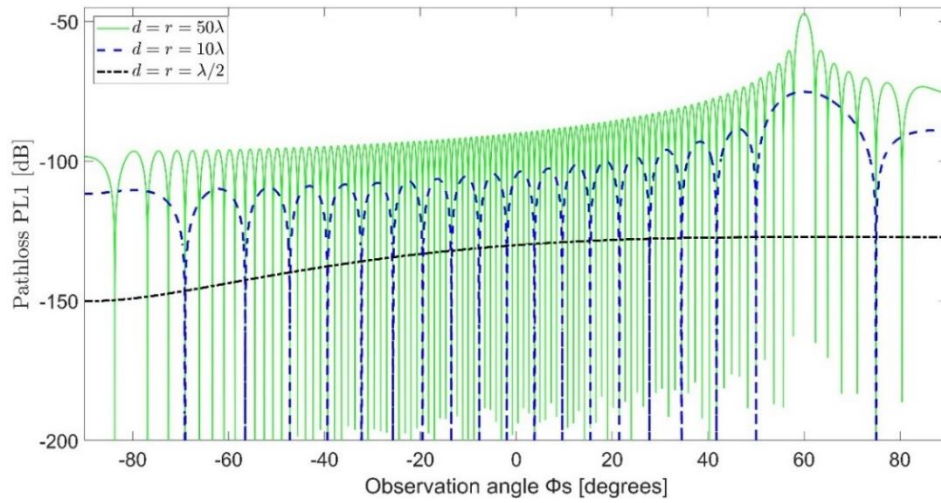
Trường hợp phát sóng ở trường gần: Sóng điện từ truyền tới RIS có thể được coi là sóng hình cầu. Nếu RIS có diện tích lớn (tức là cả chiều dài và chiều rộng đều $\geq 10\lambda$), thì sóng hình cầu tới sẽ tạo thành một gradien pha tròn và phân kỳ trên bề mặt RIS, do khoảng cách truyền khác nhau từ máy phát đến từng ô đơn vị của RIS. Giả sử rằng tất cả các ô đơn vị có cùng hệ số phản xạ. Mô hình pathloss được xác định [9]:

$$PL_4 \approx \frac{16\pi^2 (l_1 + l_2)^2}{G_{n_p} G_{n_t} G \lambda^2 A^2} \quad (6)$$

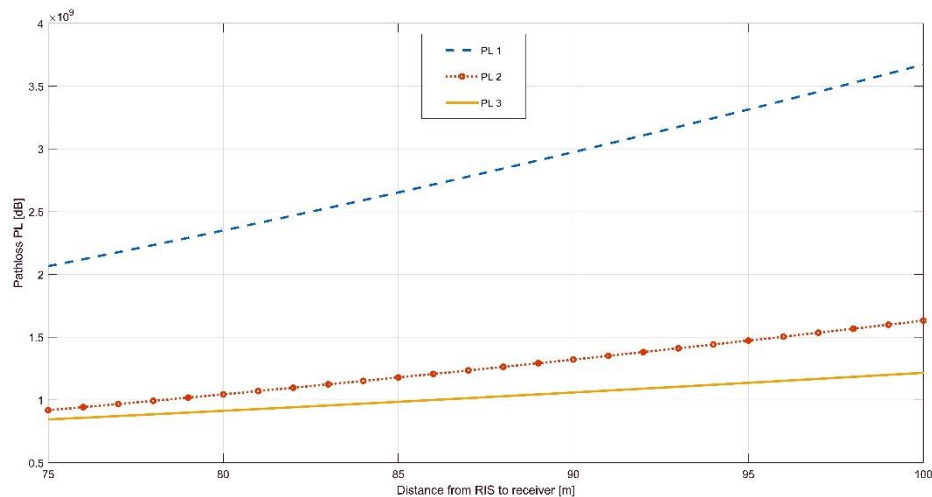
3. Kết quả mô phỏng

Hình 1 là kết quả mô phỏng trên Matlab về pathloss của sóng phản xạ với các thông số: $\Phi_t = 30^\circ$ và $\Phi_s = 60^\circ$, $G_{n_p} = G_{n_t} = 5 \text{ dB}$, $l_i = 50(m)$ và $s = 25(m)$.

Kết quả mô phỏng cho thấy Mô hình Pathloss là một hàm của Φ_s đối với các kích thước khác nhau của RIS. Mức tối đa đạt được ở $\Phi_s = \Phi_r$ (Góc phản xạ mong muốn) và độ rộng chùm tia chính thu hẹp hơn khi diện tích bề mặt của RIS tăng lên. Khi thứ nguyên là bước sóng phụ ($\leq \lambda/2$), RIS hoạt động như một bộ tán xạ khuếch tán.



Hình 1. Pathloss của sóng phản xạ



Hình 2. Pathloss của sóng phản xạ

Hình 2 là kết quả mô phỏng trên Matlab về ảnh hưởng của khoảng cách giữa RIS và bộ thu (Distance from RIS to receiver) đến sự suy hao đường truyền pathloss, trong 3 trường hợp: Phát chùm tia ở trường xa (PL2), Phát chùm tia ở trường gần (PL3) và Phát sóng ở trường gần (PL4), sử dụng Large RIS1, X-band horn antenna [9] với các thông số: $Gn_p = Gn_t = 21 \text{ dB}$, $G = 1 \text{ dB}$, $h = 102$, $c = 100$, $d_x = d_y = 0,01 \text{ m}$, $A = 0,9$, $\lambda = 0,0286 \text{ m}$, $R = 2S^2/\lambda = 71,4 \text{ m}$, $P(\theta_b, \Phi_t) = P(\theta_r, \Phi_r) = P_r = 1$.

- Khoảng cách từ trạm phát đến RIS trong trường hợp: Phát chùm tia ở trường xa, Phát chùm tia ở trường gần, Phát sóng ở trường gần lần lượt bằng 75 m, 50 m và 50 m.

- Tham số khoảng cách giữa RIS và bộ thu trong cả 3 trường hợp Phát chùm tia ở trường xa, Phát chùm tia ở trường gần, Phát sóng ở trường gần thay đổi từ 75 m ÷ 100 m.

Từ kết quả mô phỏng ta thấy rằng: Nếu giữ không đổi các giá trị (đều ảnh hưởng đến sự suy hao kênh dẫn): khoảng cách từ trạm phát tới RIS, kích thước của RIS, hiệu ứng trường gần/trường xa của RIS, bức xạ của các phần tử cấu thành RIS, công suất tiêu thụ của RIS và ảnh hưởng của góc tới, thì:

- Khoảng cách từ RIS tới bộ thu tăng lên thì cả 3: PL2, PL3, PL4 cũng tăng theo (Suy hao lớn).
- Tồn thất kênh dẫn trong trường hợp Phát chùm tia ở trường xa lớn nhất, tiếp đến là Phát chùm tia ở trường gần và Phát sóng ở trường gần có độ suy hao nhỏ nhất.

4. Kết luận

Bằng kỹ thuật quang học vật lý, định luật phản xạ ánh sáng, bản chất vật lý, điện từ của RIS, trường hợp chùm tia ở trường xa, chùm tia ở trường gần, phát sóng ở trường gần, ta thu được 4 công thức xác định mô hình suy hao đường dẫn pathloss cho một bề mặt phản xạ thông minh được cấu hình để lại điều khiển sóng tới theo hướng mong muốn, biến quá trình truyền sóng vốn ngẫu nhiên thành môi trường vô tuyến thông minh.

Với mô hình pathloss và biểu thức toán học xác định đường truyền hệ thống cho truyền thông không dây được bề mặt thông minh hỗ trợ này, các nhà nghiên cứu có thể tham khảo để mô phỏng, phân tích, đánh giá và hiệu chỉnh các kênh truyền thông nhằm đạt được hiệu quả tối ưu trước khi triển khai chế tạo thực nghiệm hoặc để so sánh với các công nghệ tăng cường thông tin truyền tải khác như bộ khuếch đại và chuyển tiếp AF (Amplify and Forward), định dạng chùm MIMO (massive MIMO) và truyền thông tán xạ ngược BackCom (Backscatter Communications).

Lời cảm ơn

Kết quả nghiên cứu này là sản phẩm của đề tài nghiên cứu khoa học cấp cơ sở có mã số T2022-07-21, được tài trợ bởi kinh phí của Trường Đại học Công nghệ Thông tin và Truyền thông, Đại học Thái Nguyên.

TÀI LIỆU THAM KHẢO/ REFERENCES

- [1] W. Long, R. Chen, M. Moretti, W. Zhang, and J. Li, "A Promising Technology for 6G Wireless Networks: Intelligent Reflecting Surface," *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 6, no. 1, pp. 1-16, March 2021.
- [2] M. Pengnoo, M. T. Barros, L. Wuttisittikulij, B. Butler, A. Davy, and S. Balasubramaniam, "Digital Twin for Metasurface Reflector Management in 6G Terahertz Communications," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 114580-114596, 2020.
- [3] R. Alghamdi, R. Alhadrami, D. Alhothali, H. Almorad, A. Faisal, S. Helal, R. Shalabi, R. Asfour, N. Hammad, A. Shams, N. Saeed, H. Dahrouj, T.Y. Al-Naffouri, and M. S. Alouini, "Intelligent Surfaces for 6G Wireless Networks: A Survey of Optimization and Performance Analysis Techniques," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 202795-202818, 2020.
- [4] 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, 2019.
- [5] M. A. ElMossallamy, H. Zhang, L. Song, K. G. Seddik, Z. Han, and G. Y. Li, "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 6, no. 3, pp. 990-1002, Sept. 2020.
- [6] S. Gong, X. Lu, D. T. Hoang, D. Niyato, L. Shu, D. I. Kim, and Y. C. Liang, "Toward Smart Wireless Communications via Intelligent Reflecting Surfaces: A Contemporary Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2283-2314, 2020.
- [7] Y. -C. Liang, R. Long, Q. Zhang, J. Chen, H. V. Cheng, and H. Guo, "Large Intelligent Surface/Antennas (LISA): Making Reflective Radios Smart," *Journal of Communications and Information Networks*, vol. 4, no. 2, pp. 40-50, June 2019.
- [8] N. Yu, P. Genevet, M. A. Kats, F. Aieta, J.-P. Tetienne, F. Capasso, and Z. Gaburro, "Light propagation with phase discontinuities: Generalized laws of reflection and refraction," *Science*, vol. 334, no. 6054, pp. 333-337, 2011.
- [9] Ö. Özdogan, E. Björnson, and E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surfaces: Physics, Propagation, and Pathloss Modeling," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 9, no. 5, pp. 581-585, May 2020.
- [10] W. Tang, M. Z. Chen, X. Chen, J. D. Dai, Y. Han, M.D. Renzo, Y. Zeng, S. Jin, Q. Cheng, and T. J. Cui, "Wireless Communications With Reconfigurable Intelligent Surface: Path Loss Modeling and Experimental Measurement," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 1, pp. 421-439, Jan. 2021.
- [11] Y. Huang and K. Boyle, *Antennas: from theory to practice*. Chichester: Wiley, 2008.