

NÂNG CAO DUNG LƯỢNG BẢO MẬT HỆ THỐNG VÔ TUYẾN BẰNG VIỆC SỬ DỤNG MẬT PHẢN XẠ THÔNG MINH GẮN TRÊN MÁY BAY KHÔNG NGƯỜI LÁI

Nguyễn Nhật Duy¹, Nguyễn Bá Cao^{2*}

¹Trường Đại học Công nghệ Đồng Nai

²Trường Đại học Thông tin Liên lạc

*Tác giả liên hệ: Nguyễn Bá Cao, nguyenbacao@tcu.edu.vn

THÔNG TIN CHUNG

Ngày nhận bài: 26/10/2023

Ngày nhận bài sửa: 16/11/2023

Ngày duyệt đăng: 08/12/2023

TỪ KHOÁ

Máy bay không người lái;

Mật phản xạ thông minh;

Phản cứng không hoàn hảo;

Dung lượng bảo mật.

TÓM TẮT

Trong thực tế phần cứng máy thu hợp pháp thường không hoàn hảo trong khi phần cứng thiết bị nghe lén thường là hoàn hảo. Do vậy, dung lượng bảo mật hệ thống vô tuyến bị suy giảm đáng kể. Để nâng cao dung lượng bảo mật hệ thống vô tuyến, bài báo này đề xuất sử dụng mật phản xạ thông minh (IRS) gắn trên máy bay không người lái (UAV). Chúng tôi tìm ra biểu thức dung lượng bảo mật hệ thống đề xuất qua kênh Nakagami-m, sử dụng mô hình kênh xây dựng cho hệ thống vô tuyến thể hệ thứ 5 và tiếp theo. Biểu thức tính toán lý thuyết được kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo. Kết quả tính toán số cho thấy hệ thống đề xuất (sử dụng UAV/IRS) nâng cao đáng kể dung lượng bảo mật so với hệ thống truyền thống (không sử dụng UAV/IRS). Đồng thời, ảnh hưởng của phần cứng không hoàn hảo và các tham số khác lên dung lượng bảo mật hệ thống được phân tích chi tiết.

1. GIỚI THIỆU

Bảo mật lớp vật lý (PLS: Physical Layer Security) đóng vai trò vô cùng quan trọng trong việc đảm bảo an toàn và bảo vệ thông tin trong mạng thông tin vô tuyến thể hệ thứ 5 và tiếp theo (5G và B5G) (X. Li, Zheng, Zeng, Liu, & Dobre, 2022). Trong thời đại số hóa mạnh mẽ, thông tin vô tuyến đã trở thành một phần không thể thiếu trong cuộc sống hàng ngày của chúng ta, từ việc truyền dữ liệu cá nhân cho đến việc kết nối các thiết bị trong các hệ thống kết nối vạn vật (IoT: Internet of Things). Với tốc độ truyền dữ liệu ngày càng nhanh và sự phức tạp ngày càng cao của hệ thống vô tuyến, nguy cơ về an ninh thông tin cũng tăng lên (D.-T. Do, Le, Ha, & Dao, 2022). Trong bối cảnh đó PLS đảm bảo tính

riêng tư và toàn vẹn của thông tin trong quá trình truyền tải từ nguồn đến đích. Thay vì chỉ dựa vào các biện pháp mã hóa và chứng thực ở lớp ứng dụng, bảo mật lớp vật lý tập trung vào việc bảo vệ trực tiếp dữ liệu ở mức tín hiệu và sóng vô tuyến. Điều này giúp tránh được các kiểu tấn công phức tạp như tấn công trung gian và phá vỡ mã hóa (Graveto, Cruz, & Simões, 2022). Với ứng dụng ngày càng phổ biến của hệ thống 5G và B5G trong các lĩnh vực như y tế, ô tô tự hành, và đặc biệt là trong giai đoạn cách mạng công nghiệp 4.0, PLS sẽ đóng vai trò quyết định để đảm bảo sự tin cậy của các ứng dụng này (X. Jiang, Li, Li, Zou, & Wang, 2022). Hệ thống 5G và B5G đã và đang phát triển các kỹ thuật và giao thức mới để nâng cao bảo mật lớp vật lý. Do đó,

nghiên cứu và triển khai các giải pháp này là vô cùng quan trọng để bảo vệ thông tin và đảm bảo tính ổn định của hạ tầng mạng vô tuyến trong tương lai.

Ngày nay, việc sử dụng máy bay không người lái (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) và mặt phản xạ thông minh (IRS: Intelligent Reflecting Surface) giúp nâng cao khả năng giám sát môi trường vô tuyến, kịp thời phát hiện và định vị các hoạt động xâm nhập không mong muốn (Gong et al., 2021; Mahmoud et al., 2021). Mặt khác, UAV và IRS là hai kỹ thuật hiện đại, có nhiều ưu điểm nổi trội, được nghiên cứu và dự kiến áp dụng rộng rãi trong hệ thống 5G và B5G. Sử dụng UAV và IRS không chỉ giúp nâng cao khả năng giám sát và bảo vệ của hệ thống vô tuyến, mà còn giúp tăng cường khả năng ứng phó và phục hồi sau các sự cố bảo mật. Điều này đóng góp đáng kể vào việc bảo vệ thông tin và duy trì tính ổn định của hệ thống vô tuyến trong một thời đại đầy thách thức về an ninh mạng (Singh, Agrawal, Singh, Li, & Ding, 2022). Cụ thể, UAV có thể đóng vai trò là các nút trong mạng vô tuyến, cung cấp kết nối an toàn và bảo mật trong các khu vực cấm hoặc khó tiếp cận, đặc biệt trong chiến tranh, thiên tai và thảm họa. Trong khi đó, IRS có khả năng thu thập dữ liệu về các tín hiệu phát xạ ở tất cả các dải tần số. Từ đó phân tích chúng để xác định các nguồn gốc và tính bảo mật của chúng. Nói cách khác sự kết hợp của UAV và IRS có thể cung cấp cái nhìn toàn diện và cải thiện khả năng bảo mật của hệ thống thông tin vô tuyến (Mahmoud Mohamed, Alnakhlhi, Hashima, & Abdel-Nasser, 2023; Wei, Wang, Pan, & Elakashlan, 2022).

Gần đây, phẩm chất bảo mật hệ thống vô tuyến sử dụng IRS hoặc UAV đã được nghiên cứu (Ai et al., 2021; Gong et al., 2021; T. Li et al., 2021; X. Li et al., 2022; Sun, Yang, & Cai, 2019). Trong những nghiên cứu này, xác suất và dung lượng bảo mật thường được tính toán và mô phỏng để đánh giá phẩm chất bảo mật hệ thống. Trong đó, dung lượng bảo mật (SC: Secrecy Capacity) là tham số quan trọng trong phân tích và đánh giá phẩm chất bảo mật. Mặt khác, sự kết hợp giữa UAV và IRS cũng đã được nghiên cứu (C. Jiang, Zhang, Mu, Zhang, & Ge, 2023; Niu, Chu, Zhu, & Zhou, 2022). Cụ thể, cả thiết bị hợp pháp và nghe lén đều nhận tín hiệu qua

IRS mang bởi UAV (viết tắt là UAV/IRS) (Niu et al., 2022) hoặc UAV/IRS đóng vai trò như thiết bị gây nhiễu đến thiết bị nghe lén (C. Jiang et al., 2023). Tuy nhiên, một kịch bản quan trọng khác là thiết bị hợp pháp nhận tín hiệu cả trực tiếp từ máy phát và phản xạ qua UAV/IRS chưa được xem xét. Trong khi đó, đây là kịch bản quan trọng vì năng lượng thu của thiết bị hợp pháp sẽ cao hơn nhiều khi có sự kết hợp những tín hiệu này. Mặt khác, phần cứng thiết bị là hoàn hảo thường không sát với điều kiện thực tế. Để thấy rõ các kết quả nghiên cứu trước đây, Bảng 1 tổng hợp các nội dung liên quan.

Bảng 1. Tổng hợp và so sánh kết quả nghiên cứu.

Bài báo	Kênh truyền	Thiết bị	Kết quả
(X. Li et al., 2022)	Nakagami; không có đường trực tiếp	IRS và phần cứng hoàn hảo	Xác suất bảo mật
(Gong et al., 2021)	Rayleigh; không có đường trực tiếp	IRS và phần cứng hoàn hảo	Xác suất bảo mật
(Sun et al., 2019)	Rayleigh; không có IRS	UAV và phần cứng hoàn hảo	Xác suất bảo mật
(T. Li et al., 2021)	Rayleigh; không có IRS	UAV và phần cứng hoàn hảo	Xác suất bảo mật
(Ai et al., 2021)	Rayleigh; không có đường trực tiếp	IRS và phần cứng hoàn hảo	Xác suất bảo mật
(C. Jiang et al., 2023)	Rayleigh; không có đường trực tiếp	UAV/IRS và phần cứng hoàn hảo	Tốc độ dữ liệu
(Niu et al., 2022)	Rayleigh; không có đường trực tiếp	UAV/IRS và phần cứng hoàn hảo	Dung lượng bảo mật
Bài báo này	Nakagami, 5G và B5G; có đường trực tiếp	UAV/IRS và phần cứng không hoàn hảo	Dung lượng bảo mật

Cần nhấn mạnh thêm rằng IRS được gắn trên UAV sẽ phát huy ưu điểm kết hợp của cả hai kỹ thuật này. Cụ thể, UAV/IRS vừa có tính di chuyển linh hoạt, vừa có tính điều chỉnh tín hiệu thông minh như IRS cố định (C. Jiang et al., 2023). Từ đó giúp tăng cường hiệu suất kết nối vô tuyến và tối ưu hóa tín hiệu theo điều kiện môi trường cũng như yêu cầu của hệ thống truyền thông. Cụ thể, UAV/IRS bay ở vị trí thuận lợi để điều chỉnh góc và hướng sóng vô tuyến, từ đó, giúp tối ưu hóa hướng sóng và định hình tín hiệu, cải thiện chất lượng hệ thống (Niu et al., 2022). Mặt khác, sự điều chỉnh linh hoạt của UAV/IRS cho phép nó tương tác với tín hiệu và điều hướng chúng theo cách tối ưu nhất. Đồng thời, UAV/IRS thường được tự động hóa để phản xạ tín hiệu dựa trên điều kiện môi trường và yêu cầu của hệ thống truyền thông vô tuyến. Điều này giúp duy trì kết nối ổn định khi UAV/IRS di chuyển trong môi trường biến động (Wang, Ni, Tian, Eldar, & Niyato, 2023). Ngoài ra, sự linh hoạt của UAV/IRS có thể tăng cường tín hiệu trong các khu vực có tín hiệu yếu, nơi khó triển khai các thiết bị mặt đất như khu vực rừng núi hoặc trong thiên tai, thảm họa. Như vậy, bên cạnh nguyên lý của IRS cố định, IRS được gắn trên UAV giúp cho việc triển khai được linh hoạt, vị trí hợp lý, từ đó, phản xạ tín hiệu tốt để đạt được hiệu suất tối ưu cho hệ thống truyền thông vô tuyến.

Để nâng cao phẩm chất bảo mật hệ thống vô tuyến, chúng tôi đề xuất sử dụng UAV/IRS để hỗ trợ truyền tin từ máy phát đến máy thu hợp pháp. Khác với những công bố trước (C. Jiang et al., 2023; Niu et al., 2022), trong hệ thống chúng tôi đề xuất, máy thu kết hợp cả hai đường tín hiệu, một trực tiếp từ máy phát, một phản xạ qua UAV/IRS để nâng cao chất lượng. Đồng thời, để đánh giá phẩm chất hệ thống trong điều kiện thực tế, chúng tôi xem xét phần cứng máy thu hợp pháp là không hoàn hảo (HI: Hardware Impairments) trong khi phần cứng thiết bị nghe lén là hoàn hảo (ID: Ideal Hardware). Nói cách khác, kịch bản xấu trong bảo mật hệ thống được đề xuất và khảo sát. Bằng cách đạt được biểu thức lý thuyết thông qua chứng minh chặt chẽ, người nghiên cứu có thể dễ dàng đánh giá phẩm chất cũng như

ảnh hưởng của các tham số khác đến phẩm chất hệ thống. Tức là, kết quả lý thuyết giúp rút ngắn thời gian trong đánh giá phẩm chất và hoạt động hệ thống. Chú ý rằng, khi không thể tìm ra biểu thức lý thuyết, sử dụng mô phỏng, đo đạc và thử nghiệm sẽ tốn nhiều thời gian và công sức để đạt được kết quả. Đồng thời, sự đúng đắn của kết quả phụ thuộc vào sự chính xác của trang bị cũng như phương pháp mô phỏng, đo đạc, thử nghiệm. Mặt khác, phương pháp phân tích giải tích bao gồm các bước/quy trình sau: khảo sát các nghiên cứu liên quan; đề xuất hệ thống; mô tả hệ thống; xác định biểu thức tín hiệu thu; xác định biểu thức năng lượng thu được; tính toán và tìm ra tham số hiệu suất; sử dụng biểu thức tham số hiệu suất để đánh giá hệ thống; kết luận. Những đóng góp mới của bài báo được tóm tắt như sau:

- Đề xuất mô hình mới sử dụng UAV/IRS để nâng cao dung lượng bảo mật hệ thống vô tuyến, trong đó máy thu hợp pháp kết hợp cả tín hiệu trực tiếp và tín hiệu phản xạ từ UAV/IRS để nâng cao chất lượng tín hiệu thu. Mặt khác, HI của máy thu hợp pháp được xem xét để hệ thống đề xuất sát với thực tế ứng dụng.
- Tìm ra biểu thức dung lượng bảo mật hệ thống qua kênh truyền thực tế, trong đó mô hình kênh sử dụng là mô hình được đề xuất áp dụng cho hệ thống 5G và B5G. Biểu thức lý thuyết được kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo sử dụng phần mềm Matlab.
- Kết quả tính toán số và mô phỏng cho thấy hệ thống đề xuất cải thiện đáng kể SC. Đặc biệt, so với hệ thống truyền thông (không sử dụng UAV/IRS), SC hệ thống đề xuất cao hơn nhiều. Mặt khác, ảnh hưởng của HI được chỉ rõ khi so sánh hệ thống HI và ID. Đồng thời, ảnh hưởng của các tham số quan trọng khác được khảo sát nhằm tìm ra các giải pháp nâng cao dung lượng bảo mật hệ thống.

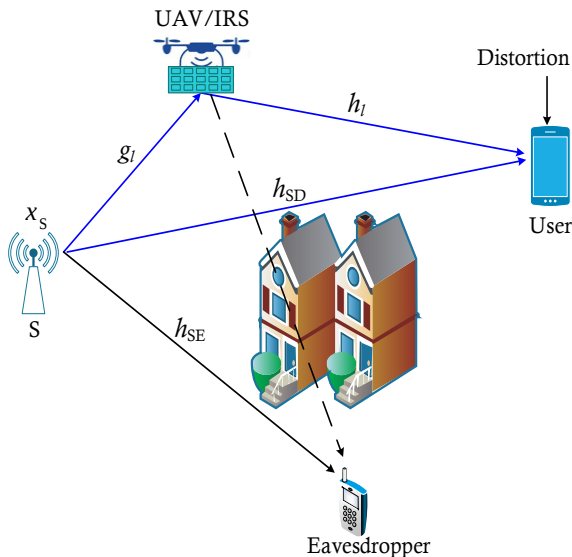
Phần còn lại của bài báo được bố cục như sau: Phần II mô tả hệ thống đề xuất, biểu thức tín hiệu thu tại máy thu hợp pháp và thiết bị nghe lén. Phần III đánh giá phẩm chất hệ thống bằng cách đưa ra biểu thức SC trong điều kiện HI ở máy thu hợp pháp. Phần IV trình bày kết quả tính toán số, mô

phỏng và các thảo luận. Phần V kết luận nội dung bài báo và hướng nghiên cứu tiếp theo.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Hình 1 minh họa sơ đồ khối hệ thống UAV/IRS với HI. Cụ thể, máy phát (S) truyền tin đến máy thu hợp pháp (D) trong khi thiết bị nghe lén (E) cố gắng nhận và giải mã các tin nhắn này.

Để nâng cao công suất nhận được tại D, một UAV/IRS gồm L phần tử phản xạ (REs: Reflecting Elements) được triển khai giữa S và D. Mặt khác, D nhận được tin nhắn qua cả đường truyền S-D và S-UAV/IRS-D. Nói cách khác, UAV/IRS bay ở vị trí thuận tiện để thành phần nhìn thẳng (LoS: Line-of-Sight) giữa S và UAV/IRS, UAV/IRS và D tồn tại. Như vậy, sự kết hợp của tín hiệu phản xạ và tín hiệu trực tiếp giúp hiệu suất hệ thống được nâng lên đáng kể so với các nghiên cứu trước đây. Vì UAV/IRS được triển khai để phục vụ kênh S-D nên E không nhận được tín hiệu phản xạ qua UAV/IRS (do bị che khuất bởi tòa nhà, cây cối) (Ai et al., 2021). Mặt khác, trường hợp bảo mật xấu nhất được xem xét khi D bị ảnh hưởng bởi HI. Chú ý rằng, do đặc điểm của UAV/IRS, S, D và E nên các kênh S-UAV/IRS và UAV/IRS-D được đặc trưng bởi thành phần LoS trong khi các kênh S-D và S-E được đặc trưng bởi các thành phần không có tầm nhìn thẳng (NLoS: Non-Line-of-Sight) (Zhou, Pan, Ren, Popovski, & Swindlehurst, 2022).



Hình 1. Mô hình hệ thống UAV/IRS với HI.

Với HI, tín hiệu thu tại D có dạng:

$$y_D = (h_{SD} + \sum_{l=1}^L g_l e^{j\varphi_l} h_l) x_S + \eta_D + z_D, \quad (1)$$

trong đó h_{SD} , g_l và h_l lần lượt là là kênh truyền từ S đến D, từ S đến phần tử phản xạ thứ l (l^{th} RE) và từ l^{th} RE tới D; φ_l là góc pha của l^{th} RE của UAV/IRS; x_S là tín hiệu phát của S với công suất P_S ; η_D là méo dạng gây bởi HI tại D; z_D là tạp âm máy thu tại D. Chú ý rằng, biểu thức (1) đã ngầm định biên độ của l^{th} RE của UAV/IRS bằng 1. Nói cách khác, tín hiệu không bị hấp thụ tại UAV/IRS (D.-T. Do et al., 2022; Tran, Nguyen, Hoang, Le, & Nguyen, 2022).

Do kênh truyền h_{SD} , g_l và h_l là các số phức, ta có: $h_{SD} = |h_{SD}| e^{-j\phi_{SD}}$, $g_l = |g_l| e^{-j\delta_l}$ và $h_l = |h_l| e^{-j\psi_l}$, với $(|h_{SD}|, \phi_{SD})$, $(|g_l|, \delta_l)$ và $(|h_l|, \psi_l)$ tương ứng là cặp biểu diễn biên độ và pha của h_{SD} , g_l và h_l .

Sử dụng biên độ và pha, biểu thức (1) trở thành:

$$\begin{aligned} y_D &= (|h_{SD}| e^{-j\phi_{SD}} + \sum_{l=1}^L |g_l| e^{-j\delta_l} e^{j\varphi_l} |h_l| e^{-j\psi_l}) x_S \\ &\quad + \eta_D + z_D \\ &= e^{-j\phi_{SD}} (|h_{SD}| + \sum_{l=1}^L |g_l| |h_l| e^{j(\varphi_l - \delta_l - \psi_l + \phi_{SD})}) x_S \\ &\quad + \eta_D + z_D. \end{aligned} \quad (2)$$

Như đã chứng minh trong các nghiên cứu gần đây, UAV/IRS có thể điều chỉnh thông minh góc pha để tối ưu hóa cường độ và hướng tín hiệu (Nguyen et al., 2023). Nói cách khác, pha của UAV/IRS được điều chỉnh tùy theo pha của tín hiệu đến và đi nhằm đạt được $\varphi_l - \delta_l - \psi_l + \phi_{SD} = 0$ (X. Li et al., 2022; Nguyen et al., 2023). Từ đó giá trị pha tối ưu (lý tưởng) của UAV/IRS được xác định là:

$$\varphi_l^* = \delta_l + \psi_l - \phi_{SD}. \quad (3)$$

Áp dụng (3), biểu thức (2) trở thành:

$$y_D = e^{-j\phi_{SD}} (|h_{SD}| + \sum_{l=1}^L |g_l| |h_l|) x_S + \eta_D + z_D. \quad (4)$$

Ta thấy rằng (4) gồm 3 thành phần: tín hiệu cần thu, HI và tạp âm. Mặt khác, HI tại máy thu được xác định bởi:

$$\eta_D : \text{CN}(0, |e^{-j\phi_{SD}}| (|h_{SD}| + \sum_{l=1}^L |g_l| |h_l|)^2 k^2 P_S) \quad (5)$$

với k^2 thể hiện mức độ HI tại máy thu (Tran et al., 2022).

Từ biểu thức (4) và định nghĩa HI, biểu thức tỉ số tín hiệu trên méo dạng cộng tạp âm (SNDR: Signal-to-Distortion-plus-Noise Ratio) tại máy thu được xác định như sau:

$$\rho_D = \frac{|e^{-j\phi_{SD}}|^2 (|h_{SD}| + \sum_{l=1}^L |g_l| |h_l|)^2 P_S}{|e^{-j\phi_{SD}}|^2 (|h_{SD}| + \sum_{l=1}^L |g_l| |h_l|)^2 k^2 P_S + \sigma_D^2} \quad (6)$$

Mặt khác, do $|e^{-j\phi_{SD}}|^2 = 1$ nên ta có:

$$\rho_D = \frac{(|h_{SD}| + \sum_{l=1}^L |g_l| |h_l|)^2 P_S}{(|h_{SD}| + \sum_{l=1}^L |g_l| |h_l|)^2 k^2 P_S + \sigma_D^2} \quad (7)$$

Để thuận tiện trong tính toán, đặt $X_l = |g_l| |h_l|$, $Y = \sum_{l=1}^L X_l$ và $Z = |h_{SD}| + Y$, biểu thức (7) trở thành

$$\rho_D = \frac{Z^2 P_S}{Z^2 k^2 P_S + \sigma_D^2} \quad (8)$$

Mặt khác, song song với D, E thu tín hiệu truyền từ S. Biểu thức tín hiệu thu tại E được cho bởi:

$$y_E = h_{SE} x_S + z_E, \quad (9)$$

trong đó, h_{SE} là kênh truyền từ S đến E;

$z_E : \text{CN}(0, \sigma_E^2)$ tạp âm máy thu tại E. Chú ý rằng, khác với tín hiệu thu tại D, tín hiệu thu tại E được xác định với phần cứng lý tưởng. Từ (9), biểu thức tỉ số tín hiệu trên tạp âm (SNR: Signal-to-Noise Ratio) tại E được tính như sau:

$$\rho_E = \frac{|h_{SE}|^2 P_S}{\sigma_E^2} \quad (10)$$

3. PHÂN TÍCH PHẨM CHẤT BẢO MẬT

Trước khi tính toán phẩm chất bảo mật hệ thống, chúng tôi làm rõ đặc tính kênh truyền Nakagami- m

sử dụng cho mô hình đề xuất. Cụ thể, hàm phân phối tích lũy (CDF: Cumulative Distribution Function) và hàm mật độ xác suất (PDF: Probability Density Function) của biên độ kênh χ với $\chi \in \{|h_{SD}|, |g_l|, |h_l|, |h_{SE}|\}$ được biểu diễn thông qua bậc pha-đỉnh (m_χ) và độ lợi trung bình (Δ_χ). Về mặt toán học, chúng được biểu diễn như sau (Tran et al., 2022):

$$F_\chi(y) = \frac{1}{\Gamma(m_\chi)} \gamma(m_\chi, \frac{m_\chi}{\Delta_\chi} y^2) \quad (11)$$

$$= 1 - \frac{1}{\Gamma(m_\chi)} \Gamma(m_\chi, \frac{m_\chi}{\Delta_\chi} y^2),$$

$$f_\chi(y) = \frac{2m_\chi^{\frac{m_\chi}{2}}}{\Gamma(m_\chi)\Delta_\chi^{\frac{m_\chi}{2}}} y^{2m_\chi-1} \exp(-\frac{m_\chi}{\Delta_\chi} y^2). \quad (12)$$

Do UAV/IRS được triển khai để hỗ trợ truyền thông S-D, kênh truyền S-UAV/IRS và UAV/IRS-D được đặc trưng bởi LoS (C. Jiang et al., 2023). Trong khi đó, kênh truyền S-D và S-E được đặc trưng bởi NLoS (Tran et al., 2022). Chú ý rằng, với mô hình kênh đề xuất để sử dụng trong hệ thống 5G và B5G, độ lợi trung bình với LoS (Δ_χ^{LoS}) và NLoS ($\Delta_\chi^{\text{NLoS}}$) được cho bởi (Tran et al., 2022):

$$\Delta_\chi^{\text{LoS}} = G_r + G_t - 28 - 20\log(f_c) - 22\log(d), \quad (13)$$

$$\Delta_\chi^{\text{NLoS}} = G_r + G_t - 22.7 - 26\log(f_c) - 36.7\log(d), \quad (14)$$

trong đó G_r và G_t lần lượt là độ lợi ăng-ten thu và phát; f_c là tần số sóng mang; d là khoảng cách giữa máy phát và máy thu.

Bên cạnh độ lợi kênh, chúng tôi muốn xác định hiệu suất hệ thống trong trường hợp thực tế. Vì vậy, tạp âm máy thu σ^2 (σ_D^2 và σ_E^2) được tính toán từ các tham số thực tế, cụ thể là từ băng thông (B_W), hệ số nhiễu (N_F) và mật độ công suất nhiễu nhiệt (σ_0^2):

$$\sigma^2 = 10\log(B_W) + N_F + \sigma_0^2. \quad (15)$$

Trên cơ sở đó, dung lượng bảo mật (SC) hệ thống đề xuất được tính toán như sau:

$$C = \left[E \{ \log_2(1 + \rho_D) - \log_2(1 + \rho_E) \} \right]^+, \quad (16)$$

với ρ_D và ρ_E lần lượt được xác định bởi (7) và (10); $[x]^+ = \max\{x, 0\}$. Chú ý rằng dung lượng thường được tính bằng số bit trên số lần sử dụng kênh (bpcu: bit per channel use).

Do đặc tính hàm kỳ vọng, (16) được biểu diễn lại như sau:

$$C = [E\{\log_2(1 + \rho_D)\} - E\{\log_2(1 + \rho_E)\}]^+. \quad (17)$$

$$\text{Đặt } C_D = E\{\log_2(1 + \rho_D)\} \quad \text{và}$$

$$C_E = E\{\log_2(1 + \rho_E)\}, \quad (17) \text{ trở thành:}$$

$$C = [C_D - C_E]^+. \quad (18)$$

Mặt khác ta có:

$$C_D = E\{\log_2(1 + \rho_D)\} = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_{\rho_D}(y)}{1 + y} dy, \quad (19)$$

$$C_E = E\{\log_2(1 + \rho_E)\} = \frac{1}{\ln 2} \int_0^\infty \frac{1 - F_{\rho_E}(y)}{1 + y} dy. \quad (20)$$

Do đó, để tính toán dung lượng kênh hợp pháp và kênh nghe lén ở (19) và (20), ta cần tìm ra CDF của ρ_D và ρ_E . Cụ thể, chúng được tính toán như sau:

$$\begin{aligned} F_{\rho_D}(y) &= \Pr\{\rho_D < y\} \\ &= \Pr\left\{\frac{Z^2 P_S}{Z^2 k^2 P_S + \sigma_D^2} < y\right\} \\ &= \Pr\{Z^2 P_S(1 - k^2 y) < \sigma_D^2 y\}, \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} F_{\rho_E}(y) &= \Pr\{\rho_E < y\} = \Pr\left\{\frac{|h_{SE}|^2 P_S}{\sigma_E^2} < y\right\} \\ &= \Pr\left\{|h_{SE}|^2 < \frac{\sigma_E^2 y}{P_S}\right\}. \end{aligned} \quad (22)$$

Từ (21) ta thấy khi $1 - k^2 y \leq 0$, tức là $y \geq 1/k^2$, (21) luôn thỏa mãn vì $Z^2 P_S(1 - k^2 y) \leq 0$ trong khi đó $\sigma_D^2 y > 0$. Nói cách khác khi $y \geq 1/k^2$ ta được $F_{\rho_D}(y) = \Pr\{Z^2 P_S(1 - k^2 y) < \sigma_D^2 y\} = 1$. Ngược lại, khi $1 - k^2 y > 0$, tức là $y < 1/k^2$, (21) tương đương với:

$$\begin{aligned} F_{\rho_D}(y) &= \Pr\left\{Z^2 < \frac{\sigma_D^2 y}{P_S(1 - k^2 y)}\right\} \\ &= \Pr\left\{Z < \sqrt{\frac{\sigma_D^2 y}{P_S(1 - k^2 y)}}\right\}. \end{aligned} \quad (23)$$

Từ (23) ta tính được

$$F_{\rho_D}(y) = 1 - \frac{1}{\Gamma(A)} \Gamma\left(A, B \sqrt{\frac{\sigma_D^2 y}{P_S(1 - k^2 y)}}\right), \quad (24)$$

với

$$A = \frac{[\mu_Z(1)]^2}{\mu_Z(2) - [\mu_Z(1)]^2}, B = \frac{\mu_Z(1)}{\mu_Z(2) - [\mu_Z(1)]^2}, \quad (25)$$

trong đó $\Gamma(\cdot)$ và $\Gamma(\cdot, \cdot)$ làm hàm Gamma và hàm Gamma không hoàn chỉnh; $\mu_Z(1)$ và $\mu_Z(2)$ lần lượt là hàm mô-men bậc 1 và 2 của Z , được cho bởi:

$$\mu_Z(1) = \mu_{|h_{SD}|}(1) + \mu_Y(1), \quad (26)$$

$$\mu_Z(2) = \mu_{|h_{SD}|}(2) + \mu_Y(2) + 2\mu_{|h_{SD}|}(1)\mu_Y(1), \quad (27)$$

với

$$\mu_{|h_{SD}|}(1) = \frac{\Gamma(m_{SD} + 1/2)}{\Gamma(m_{SD})} \times \sqrt{\frac{\Delta_{SD}}{m_{SD}}}, \quad (28)$$

$$\mu_{|h_{SD}|}(2) = \frac{\Gamma(m_{SD} + 1)}{\Gamma(m_{SD})} \times \frac{\Delta_{SD}}{m_{SD}} = \Delta_{SD}, \quad (29)$$

$$\mu_Y(1) = \sum_{l=1}^L \mu_{X_l}(1), \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \mu_Y(2) &= \sum_{l=1}^L \mu_{X_l}(2) + 2 \sum_{l=1}^L \mu_{X_l}(1) \sum_{l'=l+1}^L \mu_{X_{l'}}(1) \\ &\quad + 2 \sum_{l=1}^L \mu_{X_l}(1) \sum_{l'=1}^L \mu_{X_{l'}}(1), \end{aligned} \quad (31)$$

$\mu_{X_l}(1)$ và $\mu_{X_l}(2)$ được tính toán và trình bày chi tiết trong phụ lục.

Kết hợp hai trường hợp $y < 1/k^2$ và $y \geq 1/k^2$, ta được biểu thức sau:

$$F_{\rho_D}(y) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{\Gamma(A)} \Gamma\left(A, B \sqrt{\frac{\sigma_D^2 y}{P_S(1 - k^2 y)}}\right), & y < 1/k^2, \\ 1, & y \geq 1/k^2. \end{cases} \quad (32)$$

Trong khi đó $F_{\rho_E}(y)$ có thể trực tiếp đưa ra từ CDF của $|h_{SE}|^2$ (Nguyen et al., 2023), ta có:

$$\begin{aligned} F_{\rho_E}(y) &= \Pr\left\{|h_{SE}|^2 < \frac{\sigma_E^2 y}{P_S}\right\} \\ &= 1 - \frac{1}{\Gamma(m_{SE})} \Gamma\left(m_{SE}, \frac{m_{SE} \sigma_E^2 y}{\Delta_{SE} P_S}\right). \end{aligned} \quad (33)$$

Sử dụng (32) và (33), biểu thức (19) và (20) được tính như sau:

$$C_D = \frac{1}{\Gamma(A) \ln 2} \int_0^{1/k^2} \frac{1}{1+y} \Gamma\left(A, B \sqrt{\frac{\sigma_D^2 y}{P_S(1-k^2 y)}}\right) dy, \quad (34)$$

$$C_E = \frac{1}{\Gamma(m_{SE}) \ln 2} \int_0^\infty \frac{1}{1+y} \Gamma\left(m_{SE}, \frac{m_{SE} \sigma_E^2 y}{\Delta_{SE} P_S}\right) dy. \quad (35)$$

Từ (34) và (35), SC của hệ thống đề xuất được xác định theo định lý sau.

Định lý: Dưới tác động của HI tại máy thu hợp pháp, SC hệ thống UAV/IRS qua kênh Nakagami- m được xác định bởi:

$$\begin{aligned} C &= \frac{\pi}{N \Gamma(A) \ln 2} \sum_{n=1}^N \sqrt{1 - \xi_n^2} \frac{1}{2k^2 + 1 + \xi_n} \\ &\times \Gamma\left(A, B \sqrt{\frac{\sigma_D^2 (1 + \xi_n)}{P_S k^2 (1 - \xi_n)}}\right) \\ &- \frac{1}{\Gamma(m_{SE}) \ln 2} G_{2,3}^{3,1} \left(\frac{m_{SE} \sigma_E^2}{\Delta_{SE} P_S} \middle| \begin{matrix} 0,1 \\ 0, m_{SE}, 0 \end{matrix} \right), \end{aligned} \quad (36)$$

trong đó N là tham số trả giá về độ phức tạp tính toán; $\xi_n = \cos((2n-1)\pi/2N)$; $G_{2,3}^{3,1}(\cdot)$ là hàm Meijer (Jeffrey & Zwillinger, 2007).

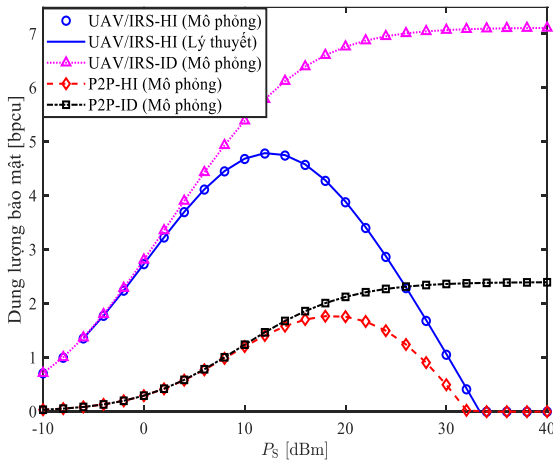
Chứng minh: Phần chứng minh chi tiết được trình bày trong phụ lục. Chú ý rằng, từ biểu thức (36), ta dễ dàng đánh giá ảnh hưởng của các tham số hệ thống lên SC. Nói cách khác, (36) giúp giảm thời gian mô phỏng, thử nghiệm. Đó là ưu điểm nổi trội của phương pháp phân tích giải tích. Tuy nhiên, nhược điểm của phương pháp này là khó khăn cho người thực hiện. Đặc biệt khi hệ thống phức tạp, việc tính toán để tìm ra biểu thức cuối cùng là rất khó khăn, thậm chí là không thực hiện được.

4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN SỐ VÀ THẢO LUẬN

Trong phần này, kết quả tính toán lý thuyết được sử dụng để đánh giá SC hệ thống trong các điều kiện hoạt động khác nhau. Mô phỏng Monte-Carlo được cung cấp kèm theo để chứng minh sự đúng đắn của biểu thức lý thuyết. Lưu ý rằng mô phỏng Monte-Carlo là một phương pháp thống kê và toán học dựa trên việc sử dụng số ngẫu nhiên để giải quyết vấn đề. Nó được sử dụng rộng rãi trong nghiên cứu, đánh giá và nâng cao phẩm chất hệ thống vô tuyến. Độ chính xác của mô phỏng Monte Carlo phụ thuộc vào nhiều yếu tố, bao gồm kích thước mẫu, cách thức tạo số ngẫu nhiên, và cách mô tả của mô hình. Trong nhiều trường hợp, mô phỏng Monte-Carlo có thể tạo ra kết quả gần đúng với thực tế khi số lần lặp lại đủ lớn. Bài báo này sử dụng 10^6 thực thể kênh để tạo số lần lặp đủ lớn, đạt được kết quả chính xác. Từ đó, kết quả nghiên cứu sẽ sát với hệ thống thực tế. Trong các hình vẽ dưới đây, ký hiệu “UAV/IRS-HI” thể hiện cho hệ thống đề xuất (sử dụng UAV/IRS và bị ảnh hưởng bởi HI); “UAV/IRS-ID” thể hiện cho hệ thống sử dụng UAV/IRS với phản cứng lý tưởng; “P2P-HI” và “P2P-ID” thể hiện cho hệ thống không sử dụng UAV/IRS (các hệ thống điểm-điểm (P2P: Point-to-Point) trước đây) với phản cứng không lý tưởng và lý tưởng. Các tham số sử dụng cho mô phỏng được cài đặt như sau: $\sigma_D^2 = \sigma_E^2 = \sigma^2$, $B_w = 10$ MHz, $N_F = 10$ dBm, $\sigma_0^2 = -174$ dBm/Hz (Tran et al., 2022) (để tính ra σ^2 trong (15)), $G_r = G_t = 5$ dB và $m_{SD} = m_{SE} = m_g = m_h = m = 2$ (T. N. Do, Kaddoum, Nguyen, da Costa, & Haas, 2021). Để tìm ra giá trị trung bình trong (13) và (14), chúng tôi sử dụng tọa độ 3D để biểu thị vị trí S, UAV/IRS, D và E (Singh et al., 2022). Trong đó, vị trí của S, D và E được đặt cố định với $(x_S, y_S, z_S) = (0, 0, 15)$, $(x_D, y_D, z_D) = (100, 20, 2)$ và $(x_E, y_E, z_E) = (150, 60, 2)$. Tọa độ x và y của UAV/IRS được đặt cố định với $(x_U, y_U) = (40, 20)$ trong khi độ cao của UAV/IRS (z_U) thay đổi tùy theo kịch bản khảo sát. Chú ý rằng khoảng cách giữa 2 điểm A và B được tính như sau:

$$d_{AB} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2}. \quad \text{Các}$$

tham số còn lại thay đổi tùy theo tình huống cụ thể để đánh giá toàn diện SC hệ thống. Cần nhấn mạnh thêm rằng trong trường hợp pha của UAV/IRS không được điều chỉnh tối ưu như thể hiện ở (3), phẩm chất hệ thống sẽ bị suy giảm đáng kể. Cụ thể, khi pha của UAV/IRS không bắt kịp sự thay đổi pha của tín hiệu đến và tín hiệu phản xạ, lỗi pha sẽ xảy ra. Do đó năng lượng tín hiệu thu bị giảm dẫn đến giảm phẩm chất. Nội dung này đã được nghiên cứu và chứng minh trong các kết quả trước đây (Al-Jarrah, Al-Dweik, Alsusa, Iraqi, & Alouini, 2021; Zhang, Di, Song, & Han, 2020). Để tránh trùng lặp kết quả với những nghiên cứu trước, bài báo không xem xét lỗi pha trong cấu hình mô phỏng.



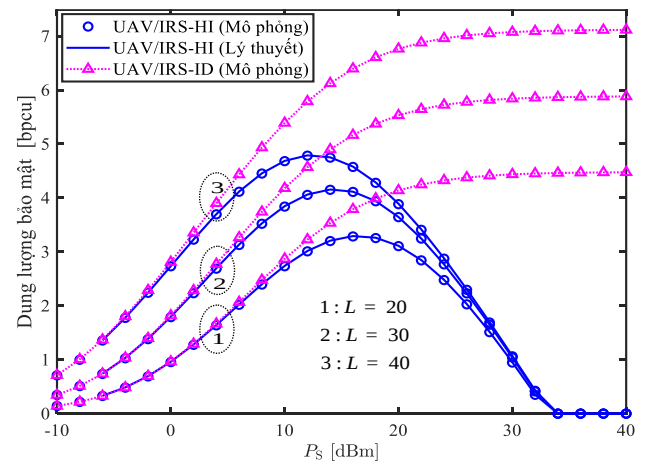
Hình 2. SC hệ thống đề xuất trong sự so sánh với SC các hệ thống khác sử dụng $L = 40$ RE, $f_c = 3$

GHz, $z_U = 150$ và $k^2 = 0.01$.

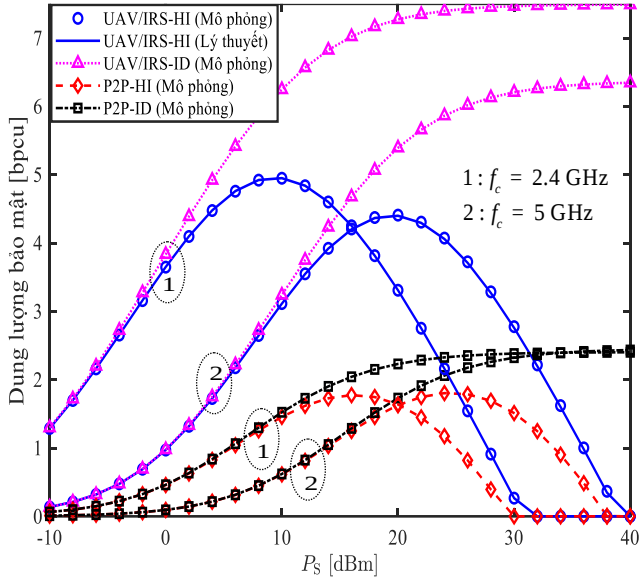
Hình 2 thể hiện SC hệ thống đề xuất trong sự so sánh với SC các hệ thống khác sử dụng $L = 40$ RE, $f_c = 3$ GHz, $z_U = 150$ và $k^2 = 0.01$. Chú ý rằng giá trị các tham số hệ thống được chọn trên cơ sở đo lường và thử nghiệm trong thực tế (T. N. Do et al., 2021; Tran et al., 2022). Các tham số khác như đã đề cập ở trên. Trên Hình 2, đường biểu diễn kết quả lý thuyết sử dụng biểu thức (36). Sự trùng khớp của kết quả lý thuyết và mô phỏng chứng minh sự đúng đắn của biểu thức đạt được. Hình 2 cho thấy phẩm chất bảo mật của hệ thống đề xuất được cải thiện đáng kể so với các hệ thống truyền thống (hệ thống P2P-HI và P2P-ID). Tức là sự kết hợp của tín hiệu phản xạ

qua UAV/IRS và tín hiệu trực tiếp đã làm tăng đáng kể hiệu suất hệ thống. Nói cách khác, tín hiệu sử dụng trong mạng 5G và B5G được kết hợp để nâng cao phẩm chất bảo mật hệ thống đề xuất. Cụ thể, SC lớn nhất của hệ thống đề xuất có thể đạt đến 5 bpcu trong khi hệ thống truyền thống chỉ đạt được hơn 2 bpcu. Mặt khác, ảnh hưởng của HI tại máy thu hợp pháp là rất lớn, bởi SC hệ thống UAV/IRS-ID tăng khi công suất phát tăng và đạt tới hơn 7 bpcu. Trong khi đó, SC hệ thống đề xuất chỉ tăng khi công suất phát nhỏ hơn 12 dBm, sau đó giảm và chuyển tới giá trị 0. Những đặc tính này cho thấy rằng bỏ qua ảnh hưởng của HI khi khảo sát phẩm chất bảo mật hệ thống vô tuyến sẽ dẫn đến những nhận định không chính xác.

Hình 3 khảo sát SC hệ thống đề xuất khi L thay đổi với $L = 20, 30, 40$ RE. Các tham số khác như sử dụng cho Hình 2. Ta thấy rằng tăng số phần tử phản xạ trên UAV/IRS sẽ tăng đáng kể SC hệ thống UAV/IRS-HI và UAV/IRS-ID. Cụ thể, SC cực đại của hệ thống đề xuất UAV/IRS-HI là 3.3 bpcu tại $P_S = 16$ dBm, 4.2 bpcu tại $P_S = 14$ dBm và 4.8 bpcu tại $P_S = 12$ dBm tương ứng với số lượng phần tử phản xạ là 20, 30 và 40. Nói cách khác, khi số lượng phần tử phản xạ tăng lên, SC cực đại hệ thống đề xuất tăng lên trong khi công suất phát để đạt được giá trị này giảm xuống. Do vậy, khi điều kiện cho phép, ta có thể sử dụng UAV mang IRS với kích thước lớn để nâng cao SC hệ thống.



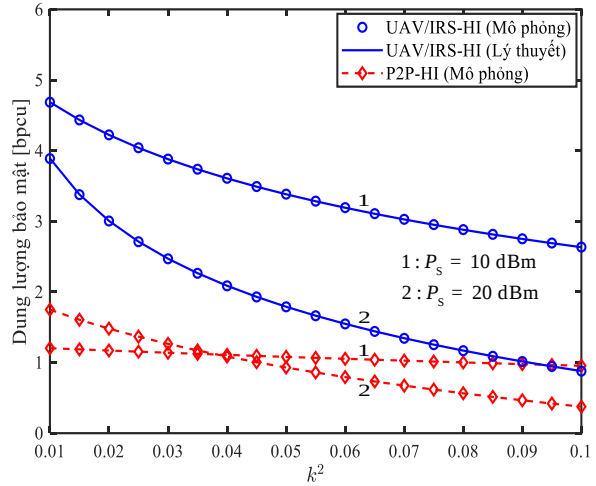
Hình 3. SC hệ thống đề xuất khi L thay đổi.



Hình 4. SC hệ thống đề xuất với tần số sóng mang của hệ thống Wi-Fi.

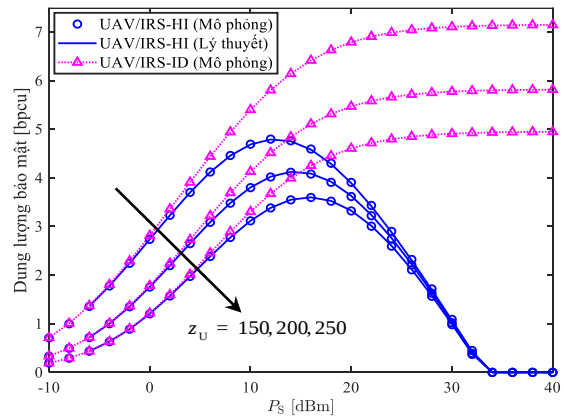
Hình 4 trình bày SC hệ thống đề xuất khi tần số sóng mang thay đổi. Cụ thể, hai tần số sóng mang được sử dụng trong hệ thống Wi-Fi là $f_c = 2.4$ GHz và $f_c = 5$ GHz được sử dụng cho Hình 4. Các tham số khác được cài đặt như cho Hình 2. Hình 4 cho thấy rõ ràng rằng tăng tần số sóng mang sẽ làm giảm đáng kể SC các hệ thống UAV/IRS-HI, UAV/IRS-ID, P2P-HI và P2P-ID. Kết quả này là hợp lý vì khi tần số sóng mang tăng lên, suy hao đường truyền sẽ mạnh hơn, như thể hiện trong biểu thức (13) và (14). Do đó, khi cấu hình mạng là cố định thì việc sử dụng tần số phù hợp là rất quan trọng. Từ đó tránh được việc suy hao dung lượng bảo mật, nâng cao phẩm chất bảo mật hệ thống vô tuyến.

Hình 5 minh họa ảnh hưởng của phản cứng không hoàn hảo HI lên SC các hệ thống UAV/IRS-HI và P2P-HI với những giá trị khác nhau của công suất phát ($P_s = 10, 20$ dBm). Chú ý rằng trong các máy thu phát thực tế, giá trị k^2 từ 0.08 đến 0.175 (Tran et al., 2022). Hình 5 cho thấy ảnh hưởng của HI lên SC là rất lớn và không thể bỏ qua.



Hình 5. Ảnh hưởng của HI lên SC của hệ thống UAV/IRS-HI và P2P-HI với $P_s = 10, 20$ dBm.

Đồng thời, công suất phát càng cao thì ảnh hưởng của HI càng lớn. Kết quả này hoàn toàn phù hợp bởi năng lượng HI phụ thuộc vào công suất phát. Do vậy, SC hệ thống đề xuất UAV/IRS-HI giảm đáng kể khi HI tăng lên. Cụ thể, khi k^2 tăng từ 0.01 đến 0.1, SC của hệ thống UAV/IRS-HI giảm từ 4.7 xuống 2.6 bpcu với $P_s = 10$ dBm và từ 3.9 xuống 0.9 bpcu với $P_s = 20$ dBm. Mặt khác với $P_s = 10$ dBm, SC hệ thống UAV/IRS-HI cao hơn rất nhiều so với SC hệ thống P2P-HI. Tuy nhiên với $P_s = 20$ dBm, SC hệ thống UAV/IRS-HI chỉ cao hơn đáng kể khi k^2 nhỏ. Do đó, để phát huy ưu điểm của UAV/IRS trong điều kiện HI, sử dụng công suất phát phù hợp là giải pháp quan trọng.



Hình 6. SC hệ thống đề xuất khi độ cao của UAV/IRS thay đổi.

Hình 6 đánh giá ảnh hưởng của độ cao khi bay của UAV/IRS tới SC hệ thống đề xuất với ba mức khác nhau $z_U = 150, 200, 250$. Các tham số còn lại như cài đặt ở Hình 2. Do tăng độ cao của UAV/IRS dẫn đến tăng khoảng cách từ S đến UAV/IRS và từ UAV/IRS đến D, SC hệ thống đề xuất bị giảm đáng kể. Cụ thể, khi khoảng cách tăng lên, độ lợi kênh truyền giảm xuống (theo biểu thức (13) và (14)), do vậy, ru việ của UAV/IRS bị giảm. Cụ thể SC cực đại của hệ thống UAV/IRS-HI là 4.8 bpcu với $z_U = 150$ và 3.6 bpcu với $z_U = 250$. Do vậy, UAV/IRS cần bay ở vị trí thuận lợi để hỗ trợ tốt việc truyền tin ở S và D và nâng cao dung lượng bảo mật hệ thống.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đề xuất hệ thống vô tuyến mới trong đó UAV mang IRS được triển khai để nâng cao phẩm chất bảo mật hệ thống. Thông qua tính toán, biểu thức dung lượng bảo mật được tìm ra trong điều kiện HI ở máy thu hợp pháp. Đồng thời, kênh truyền đề xuất áp dụng cho hệ thống mới 5G và B5G được sử dụng trong quá trình tính toán, mô phỏng. Kết quả tính toán cho thấy rằng, sử dụng UAV/IRS nâng cao đáng kể SC hệ thống vô tuyến. Cụ thể, hệ thống đề xuất (UAV/IRS-HI) cho SC cao hơn đáng kể so với các hệ thống truyền thông không sử dụng UAV/IRS (P2P-HI và P2P-ID). Đồng thời, ảnh hưởng của HI được khẳng định là đáng kể và không thể bỏ qua khi so sánh SC hệ thống UAV/IRS-HI và UAV/IRS-ID. Ngoài ra, ảnh hưởng của các tham số hệ thống khác như tần số sóng mang, số lượng phần tử phản xạ, mức độ HI và độ cao UAV/IRS đã được phân tích kỹ lưỡng. Thông qua đó, một số giải pháp hữu ích nhằm nâng cao dung lượng bảo mật hệ thống được đề xuất.

PHỤ LỤC

Phần này cung cấp các bước tính toán chi tiết để đưa ra biểu thức (36) của hệ thống UAV/IRS đề xuất. Cụ thể, để tìm ra (32), ta cần tính toán các hàm mô-men của kênh truyền tương ứng.

Đầu tiên, hàm mô-men thứ t của $|h_{SD}|$ được tính như sau:

$$\mu_{|h_{SD}|}(t) @ E\{|h_{SD}|^t\} = \int_0^\infty y^t f_{|h_{SD}|}(y) dy. \quad (37)$$

Sử dụng $f_{|h_{SD}|}(y)$ cho bởi (12) và áp dụng công thức (3.461.3) trong (Jeffrey & Zwillinger, 2007), (37) trở thành:

$$\mu_{|h_{SD}|}(t) = \frac{\Gamma(m_{SD} + t/2)}{\Gamma(m_{SD})} \left(\frac{m_{SD}}{\Delta_{SD}} \right)^{-t/2}. \quad (38)$$

Từ (38), cho $t = 1$ và $t = 2$, ta thu được (28) và (29).

Vì $X_l = |g_l| |h_l|$, PDF của X_l được tính như sau:

$$f_{X_l}(y) = \int_0^\infty \frac{1}{z} f_{|g_l|}\left(\frac{y}{z}\right) f_{|h_l|}(z) dz. \quad (39)$$

Sử dụng (12), (39) có dạng:

$$f_{X_l}(y) = \frac{4}{\Gamma(m_g)\Gamma(m_h)} \left(\frac{m_g}{\Delta_g} \right)^{m_g} \left(\frac{m_h}{\Delta_h} \right)^{m_h} \times y^{2m_g-1} \int_0^\infty z^{2m_h-2m_g-1} \exp\left(-\frac{y^2 m_g}{\Delta_g z^2} - \frac{m_h z^2}{\Delta_h}\right) dz. \quad (40)$$

Áp dụng công thức (3.478.4) trong (Jeffrey & Zwillinger, 2007), PDF của X_l được xác định như sau:

$$f_{X_l}(y) = \frac{4}{\Gamma(m_g)\Gamma(m_h)} \left(\frac{m_g m_h}{\Delta_g \Delta_h} \right)^{\frac{m_g+m_h}{2}} \times y^{m_g+m_h-1} K_{m_h-m_g} \left(2y \sqrt{\frac{m_g m_h}{\Delta_g \Delta_h}} \right). \quad (41)$$

Từ PDF, ta tính được hàm mô-men của X_l :

$$\mu_{X_l}(t) @ E\{X_l^t\} = \int_0^\infty y^t f_{X_l}(y) dy. \quad (42)$$

Thế (41) vào (42) và áp dụng công thức (6.561.16) trong (Jeffrey & Zwillinger, 2007), (42) trở thành:

$$\mu_{X_l}(t) = \left(\frac{m_g m_h}{\Delta_g \Delta_h} \right)^{\frac{-t}{2}} \times \frac{\Gamma(m_g + t/2) \Gamma(m_h + t/2)}{\Gamma(m_g) \Gamma(m_h)}. \quad (43)$$

Từ (43), ta dễ dàng tính được hàm mô-men bậc 1 và 2 của X_l . Cụ thể:

$$\mu_{X_l}(1) = \sqrt{\frac{\Delta_g \Delta_h}{m_g m_h}} \times \frac{\Gamma(m_g + 1/2) \Gamma(m_h + 1/2)}{\Gamma(m_g) \Gamma(m_h)}, \quad (44)$$

$$\mu_{X_l}(2) = \Delta_g \Delta_h. \quad (45)$$

Vì $Y = \sum_{l=1}^L X_l$, hàm mô-men của Y được tính như sau:

$$\begin{aligned} \mu_Y(t) @E\{Y^t\} \\ = \sum_{t_1=0}^t \sum_{t_2=0}^{t_1} \dots \sum_{t_{L-1}=0}^{t_{L-2}} \binom{t}{t_1} \binom{t_1}{t_2} \dots \binom{t_{L-2}}{t_{L-1}} \\ \times \mu_{A_1}(t-t_1) \mu_{A_2}(t_1-t_2) \dots \mu_{A_L}(t_{L-1}), \end{aligned} \quad (46)$$

trong đó where $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$. Từ (46), mô-men bậc 1 và 2 của Y được tính như ở (30) và (31).

Do $|h_{SD}|$ và Y là hai đại lượng độc lập, hàm mô-men của $Z = |h_{SD}| + Y$ được tính như sau:

$$\begin{aligned} \mu_Z(t) @E\{|h_{SD}| + Y\}^t \\ = E\left\{\sum_{i=0}^t \binom{t}{i} |h_{SD}|^i Y^{t-i}\right\} \\ = \sum_{i=0}^t \binom{t}{i} \mu_{|h_{SD}|}(i) \mu_Y(t-i). \end{aligned} \quad (47)$$

Từ (47) ta dễ dàng tính được mô-men bậc 1 và 2 của Z như ở (26) và (27). Do đó, CDF của Z được xác định như sau:

$$\begin{aligned} F_Z(y) &= \frac{1}{G(A) \frac{[m_Z(1)]^2}{m_Z(2) - [m_Z(1)]^2} \frac{\ddot{}}{\delta}} \\ &\cdot g\left(\frac{[m_Z(1)]^2}{m_Z(2) - [m_Z(1)]^2}, \frac{m_Z(1)y}{m_Z(2) - [m_Z(1)]^2} \frac{\ddot{}}{\delta}\right) \\ &= \frac{1}{G(A)} g(A, By). \end{aligned} \quad (48)$$

Do $G(n, x) + g(n, x) = G(n)$, (48) được biểu diễn lại thành:

$$F_Z(y) = 1 - \frac{1}{G(A)} G(A, By). \quad (49)$$

Trên cơ sở (49), CDF ở (23) được tính như sau:

$$\begin{aligned} F_{\rho_D}(y) &= \Pr\left\{Z < \sqrt{\frac{\sigma_D^2 y}{P_S(1-k^2 y)}}\right\} \\ &= F_Z\left(\sqrt{\frac{\sigma_D^2 y}{P_S(1-k^2 y)}}\right). \end{aligned} \quad (50)$$

Áp dụng (49), (50) trở thành (24). Từ đó, ta tính được biểu thức dung lượng ở (34) và (35). Cụ thể, trên cơ sở (Tran et al., 2022), (34) được tính bởi:

$$\begin{aligned} C_D &= \frac{\pi}{2Nk^2 \Gamma(A) \ln 2} \sum_{n=1}^N \sqrt{1-\xi_n^2} \frac{1}{1+(1+\xi_n)/2k^2} \\ &\times \Gamma\left(A, B \sqrt{\frac{\sigma_D^2(1+\xi_n)/2k^2}{P_S[1-k^2(1+\xi_n)/2k^2]}}\right). \end{aligned} \quad (51)$$

Trong khi đó, áp dụng tài liệu (Prudnikov, Brychkov, & Marichev, 1986) ta có:

$$\Gamma\left(m_{SE}, \frac{m_{SE} \sigma_E^2 y}{\Delta_{SE} P_S}\right) = G_{1,2}^{2,0}\left(\frac{m_{SE} \sigma_E^2 y}{\Delta_{SE} P_S} \Big|_{m_{SE},0}\right). \quad (52)$$

Sử dụng (52), (35) được tính bởi:

$$C_E = \frac{1}{\Gamma(m_{SE}) \ln 2} \int_0^\infty \frac{1}{1+y} G_{1,2}^{2,0}\left(\frac{m_{SE} \sigma_E^2 y}{\Delta_{SE} P_S} \Big|_{m_{SE},0}\right) dy. \quad (53)$$

Áp dụng công thức (7.811.5) trong (Jeffrey & Zwillinger, 2007), tích phân trong (53) được giải quyết. Ta được:

$$C_E = \frac{1}{\Gamma(m_{SE}) \ln 2} G_{2,3}^{3,1}\left(\frac{m_{SE} \sigma_E^2}{\Delta_{SE} P_S} \Big|_{0,m_{SE},0}^{0,1}\right). \quad (54)$$

Thế biểu thức (51) và (54) vào (18), ta thu được (36)

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Ai, Y., de Figueiredo, F. A. P., Kong, L., Cheffena, M., Chatzinotas, S., & Ottersten, B. (2021). Secure vehicular communications through reconfigurable intelligent surfaces. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 70(7), 7272-7276.
- Al-Jarrah, M., Al-Dweik, A., Alsusa, E., Iraqi, Y., & Alouini, M. S. (2021). On the Performance of IRS-Assisted Multi-Layer UAV Communications With Imperfect Phase Compensation. *IEEE Transactions on Communications*, 69(12), 8551-8568. doi:10.1109/TCOMM.2021.3113008
- Do, D.-T., Le, A.-T., Ha, N.-D. X., & Dao, N.-N. (2022). Physical layer security for Internet of Things via reconfigurable intelligent surface. *Future Generation Computer Systems*, 126, 330-339.
- Do, T. N., Kaddoum, G., Nguyen, T. L., da Costa, D. B., & Haas, Z. J. (2021). Multi-RIS-aided Wireless Systems: Statistical

- Characterization and Performance Analysis. *IEEE Transactions on Communications*, 69(12), 8641--8658.
- Gong, C., Yue, X., Wang, X., Dai, X., Zou, R., & Essaaidi, M. (2021). Intelligent reflecting surface aided secure communications for NOMA networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(3), 2761-2773.
- Graveto, V., Cruz, T., & Simões, P. (2022). Security of Building Automation and Control Systems: Survey and future research directions. *Computers & Security*, 112, 102527.
- Jeffrey, A., & Zwillinger, D. (2007). *Table of integrals, series, and products*: Academic Press.
- Jiang, C., Zhang, C., Mu, L., Zhang, Z., & Ge, J. (2023). Aerial RIS-aided physical layer security design for satellite communication among similar channels. *Journal of Information and Intelligence*, 1(1), 54-67.
- Jiang, X., Li, P., Li, B., Zou, Y., & Wang, R. (2022). Intelligent Jamming Strategies for Secure Spectrum Sharing Systems. *IEEE Transactions on Communications*, 70(2), 1153-1167. doi:10.1109/TCOMM.2021.3140082
- Li, T., Ye, J., Dai, J., Lei, H., Yang, W., Pan, G., & Chen, Y. (2021). Secure UAV-to-vehicle communications. *IEEE Transactions on Communications*, 69(8), 5381-5393.
- Li, X., Zheng, Y., Zeng, M., Liu, Y., & Dobre, O. A. (2022). Enhancing secrecy performance for STAR-RIS NOMA networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(2), 2684-2688.
- Mahmoud, A., Muhaidat, S., Sofotasios, P. C., Abualhaol, I., Dobre, O. A., & Yanikomeroglu, H. (2021). Intelligent Reflecting Surfaces Assisted UAV Communications for IoT Networks: Performance Analysis. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 5(3), 1029-1040. doi:10.1109/TGCN.2021.3068739
- Mahmoud Mohamed, E., Alnakhli, M., Hashima, S., & Abdel-Nasser, M. (2023). Distribution of Multi MmWave UAV Mounted RIS Using Budget Constraint Multi-Player MAB. *Electronics*, 12(1), 12.
- Nguyen, B. C., Van, Q.-N., Dung, L. T., Hoang, T. M., Vinh, N. V., & Luu, G. T. (2023). Secrecy Performance of Multi-RIS-Assisted Wireless Systems. *Mobile Networks and Applications*, 1-14. doi:10.1007/s11036-023-02125-7
- Niu, H., Chu, Z., Zhu, Z., & Zhou, F. (2022). Aerial intelligent reflecting surface for secure wireless networks: Secrecy capacity and optimal trajectory strategy. *Intelligent and Converged Networks*, 3(1), 119-133.
- Prudnikov, A. P., Brychkov, I. U. A., & Marichev, O. I. (1986). *Integrals and series: special functions* (Vol. 2): CRC press.
- Singh, S. K., Agrawal, K., Singh, K., Li, C.-P., & Ding, Z. (2022). NOMA enhanced hybrid RIS-UAV-assisted full-duplex communication system with imperfect SIC and CSI. *IEEE Transactions on Communications*, 70(11), 7609-7627.
- Sun, X., Yang, W., & Cai, Y. (2019). Secure Communication in NOMA Assisted Millimeter Wave SWIPT UAV Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(3), 1884-1897.
- Tran, P. T., Nguyen, B. C., Hoang, T. M., Le, X. H., & Nguyen, V. D. (2022). Exploiting Multiple RISs and Direct Link for Performance Enhancement of Wireless Systems with Hardware Impairments. *IEEE Transactions on Communications*, 70(8), 5599-5611. doi:10.1109/TCOMM.2022.3185646
- Wang, W., Ni, W., Tian, H., Eldar, Y. C., & Niyato, D. (2023). UAV-Mounted Multi-Functional RIS for Combating Eavesdropping in Wireless Networks. *IEEE Wireless Communications Letters*, 12(10), 1667-1671. doi:10.1109/LWC.2023.3283981
- Wei, L., Wang, K., Pan, C., & Elkhshlan, M. (2022). Secrecy performance analysis of RIS-aided communication system with randomly flying eavesdroppers. *IEEE Wireless Communications Letters*, 11(10), 2240-2244.

- Zhang, H., Di, B., Song, L., & Han, Z. (2020). Reconfigurable Intelligent Surfaces Assisted Communications With Limited Phase Shifts: How Many Phase Shifts Are Enough? *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(4), 4498-4502. doi:10.1109/TVT.2020.2973073
- Zhou, G., Pan, C., Ren, H., Popovski, P., & Swindlehurst, A. L. (2022). Channel Estimation for RIS-Aided Multiuser Millimeter-Wave Systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 70, 1478-1492. doi:10.1109/TSP.2022.3158024

IMPROVE RADIO SYSTEM SECURITY CAPACITY BY USING SMART REFLECTORS MOUNTED ON DRONE

Nguyen Nhat Duy¹, Nguyen Ba Cao^{2*}

¹*Dong Nai Technology University*

²*Telecommunications University*

* Corresponding author: *Nguyen Ba Cao, nguyennbacao@tcu.edu.vn*

GENERAL INFORMATION

Received date: 26/10/2023

Revised date: 16/11/2023

Published date: 08/12/2023

KEYWORD

Unmanned aircraft;

Smart reflective surface;

The hardware isn't perfect;

Security capacity.

ABSTRACT

In practice, legitimate receiver hardware is often imperfect, while eavesdropper hardware tends to be more reliable. As a result, the secrecy capacity of wireless systems is significantly reduced. To enhance the secrecy capacity of wireless systems, this article proposes the use of an intelligent reflecting surface (IRS) mounted on an unmanned aerial vehicle (UAV). We have successfully derived the secrecy capacity (SC) expression for the proposed system over the Nakagami-m channel using the channel model designed for the fifth and beyond generations (5G and B5G) of wireless systems. The theoretical calculation expression has been validated through Monte-Carlo simulations. Numerical results demonstrated a substantial improvement in the secrecy capacity of the proposed system when utilizing UAV/IRS, compared to the traditional system without UAV/IRS. Furthermore, we conducted a detailed analysis of the effects of imperfect transceiver hardware and other parameters on the secrecy capacity.