

BẢO MẬT LỚP VẬT LÝ TRONG MẠNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC DẠNG NỀN VỚI THÔNG TIN KÊNH TRUYỀN RAYLEIGH KHÔNG HOÀN HẢO

Đỗ Đắc Thiềm⁽¹⁾

(1) Trường Đại học Thủ Dầu Một

Ngày nhận bài 8/3/2024; Chấp nhận đăng 15/5/2024

Liên hệ email: thiemdd@tdmu.edu.vn

<https://doi.org/10.37550/tdmu.VJS/2024.03.572>

Tóm tắt

Bài báo này khảo sát và đánh giá hiệu năng bảo mật lớp vật lý của mạng vô tuyến nhận thức dạng nền (UCRN - Underlay Cognitive Radio Network) với thông tin kênh truyền Rayleigh không hoàn hảo. Đầu tiên, tác giả khảo sát ảnh hưởng của các thông số hoạt động quan trọng như công suất phát cực đại, công suất can nhiễu ngưỡng, dung lượng bảo mật cho trước đến xác suất dừng bảo mật (SOP - Secrecy Outage Probability) của hệ thống. Tiếp theo, tác giả khảo sát ảnh hưởng của khoảng cách giữa các nút trong mạng đến SOP của hệ thống. Sau cùng, tác giả dựa vào các kết quả khảo sát để đánh giá bảo mật lớp vật lý (PLS - Physical Layer Security) của hệ thống. Các kết quả cho thấy công suất phát cực đại hoặc công suất can nhiễu ngưỡng tăng sẽ cải thiện khả năng bảo mật lớp vật lý; thông tin kênh truyền không hoàn hảo tăng có ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu năng PLS; dung lượng bảo mật cho trước tăng làm giảm khả năng bảo mật lớp. Ngoài ra, các kết quả khảo sát còn cho thấy khoảng cách giữa máy thu thứ cấp và máy phát thứ cấp có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng PLS, khoảng cách này càng lớn thì hiệu năng PLS càng thấp. Hơn nữa, các kết quả còn cho thấy UCRN khó đạt được hiệu năng PLS tốt vì SOP có các giá trị khá cao, đặc biệt khi khoảng cách giữa máy thu thứ cấp và máy phát sơ cấp nhỏ hoặc khi khoảng cách giữa máy thu và máy phát thứ cấp lớn hệ thống hầu như không thể đạt được bảo mật.

Từ khóa: lớp vật lý, mạng vô tuyến, nhận thức dạng nền, kênh truyền Rayleigh, xác suất dừng

Abstract

PHYSICAL LAYER SECURITY IN UNDERLAY COGNITIVE RADIO NETWORK WITH IMPERFECT RAYLEIGH CHANNEL INFORMATION

This article investigates and evaluates the physical layer security (PLS) performance of an Underlay Cognitive Radio Network (UCRN) with imperfect Rayleigh fading channel information. First, the author examines the impact of important operational parameters such as maximum transmit power, interference power threshold, and predetermined security capacity on the system's secrecy outage probability (SOP). Next, the author studies the influence of the distance between network nodes on the SOP. Finally, the author utilizes the survey results to assess the PLS of the system. The findings indicate that increasing the maximum transmit power or the interference power threshold improves the physical layer security capability. However, imperfect channel information negatively affects the PLS performance. Moreover, increasing the predetermined security capacity reduces the PLS capability. Additionally, the survey results reveal that the distance between the secondary receiver and the primary transmitter significantly impacts the PLS performance, with a larger distance leading to lower PLS performance. Furthermore, the results demonstrate that achieving good PLS performance in UCRN is challenging due to relatively high SOP values, especially when the distance between the secondary receiver and the primary transmitter is small or when the distance between the secondary transmitter and the primary receiver is large, making it nearly impossible to achieve security.

1. Giới thiệu

Kênh truyền fading Rayleigh được sử dụng rất phổ biến để tính toán thiết kế các hệ thống thông tin vô tuyến (Karimi-Bidhendi và cs., 2024; Bhattacharjee và cs., 2023; Yu và cs., 2024). Hơn nữa, kênh truyền này mô tả được trường hợp fading tương đối xấu của tín hiệu nhận được tại máy thu. Mặt khác, do các bộ ước lượng kênh truyền không thể nào đạt được độ chính xác tuyệt đối nên lỗi ước lượng kênh truyền luôn tồn tại trong thực tế (Nassirpour và cs., 2024; Zhang và cs., 2024; Hamza và cs., 2023). Do đó, thông tin kênh truyền không hoàn hảo cần phải được xét đến khi phân tích SOP của mạng vô tuyến nhận thức. Ngoài ra, khảo sát các công trình nghiên cứu liên quan (Bin Azaman và cs., 2017; Yang và cs., 2016; Zhang và cs., 2017; Nguyen và cs., 2017; Zhao và cs., 2015, 2017; Shim và cs., 2016) cho thấy rằng không có công trình nào phân tích xác suất dừng bảo mật của UCRN với thông tin kênh truyền không hoàn hảo dưới các điều kiện vận hành nghiêm ngặt và gần với thực tế, cụ thể được liệt kê như bảng 1. Bài báo này sẽ phân tích và đánh giá PLS trong UCRN với thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo khi có xem xét đầy đủ các thông số như công suất phát cực đại, công suất can nhiễu ngưỡng, can nhiễu từ mạng sơ cấp và nhiễu AWGN (Additive White Gaussian Noise).

1.1. Phương pháp nghiên cứu

Đầu tiên, bài báo sử dụng phương pháp tổng hợp để hệ thống các công trình nghiên cứu liên quan. Tiếp theo, tác giả đề xuất mô hình hệ thống và sử dụng phương pháp mô phỏng Monte-Carlo để có được các kết quả SOP của hệ thống. Cuối cùng, bài báo phân tích và đánh giá hiệu năng PLS của mô hình hệ thống đề xuất dựa vào các kết quả minh họa.

Bảng 1. Các đặc điểm điển hình trong (Bin Azaman và cs., 2017; Yang và cs., 2016; Zhang và cs., 2017; Nguyen và cs., 2017; Zhao và cs., 2015, 2017; Shim và cs., 2016)

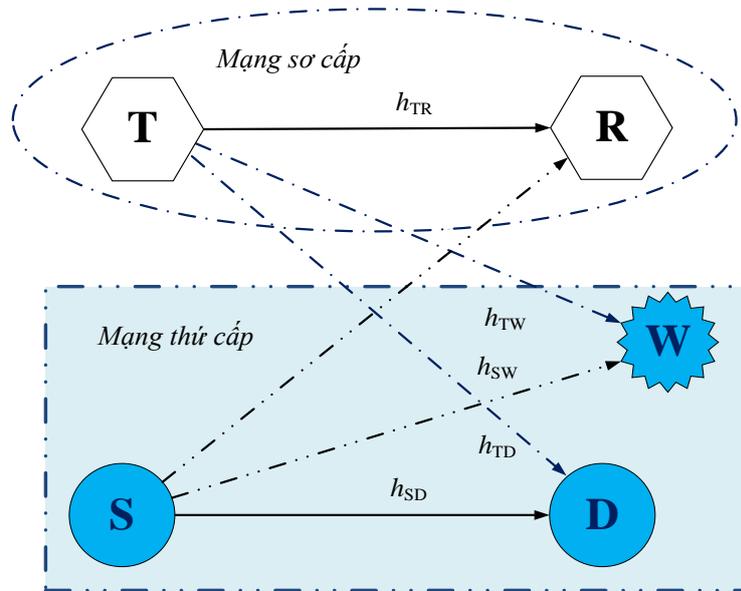
Tài liệu tham khảo	Công suất phát cực đại	Nhiều từ PN	Nhiều nhiệt	Thông tin kênh truyền không hoàn hảo
(Bin Azaman và cs., 2017)	x		x	
Yang và cs., 2016	x		x	
Zhang và cs., 2017	x		x	
Nguyen và cs., 2017	x		x	
Zhao và cs., 2015	x		x	
Zhao và cs., 2017	x	x		x
Shim và cs., 2016	x		x	x

1.2. Những đóng góp chính

Bài báo phân tích và đánh giá hiệu năng PLS của mạng vô tuyến nhận thức dạng nền dưới các điều kiện vận hành nghiêm ngặt và gần với thực tế. Điểm mới của bài báo đó là có xem xét tác động của nhiễu thông số như: công suất phát cực đại của máy phát thứ cấp, công suất can nhiễu ngưỡng và thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo.

2. Mô hình hệ thống

Được minh họa như hình 1, mô hình UCRN gồm mạng sơ cấp (PN) có máy phát sơ cấp (T) và máy thu sơ cấp (R) cùng tồn tại với mạng thứ cấp (SN) có máy phát thứ cấp (S) máy thu thứ cấp (D) và máy nghe lén (W).



Hình 1. Mô hình UCRN

Quá trình truyền tin giữa S và D diễn ra đồng thời với quá trình truyền tin giữa T và R. Do đó, SN và PN tạo ra can nhiễu lẫn nhau qua các kênh truyền $S \rightarrow R$, $T \rightarrow D$, $T \rightarrow W$. Giả sử xét các kênh truyền fading Rayleigh phẳng. Hệ số kênh truyền thực h_r và hệ số kênh truyền ước lượng \hat{h}_r giữa máy phát $t \in \{T, S\}$ và máy thu $r \in \{R, D, W\}$ có liên hệ với nhau (Zhang và cs., 2013) như sau:

$$\hat{h}_r = \kappa_r h_r + \sqrt{1 - \kappa_r^2} \varepsilon_r \quad (1)$$

Trong đó, κ_r là hệ số tương quan giữa h_r và \hat{h}_r , ε_r là lỗi ước lượng kênh truyền, κ_r biểu diễn độ chính xác ước lượng kênh truyền.

Hệ thống được giả sử hoạt động ở cơ chế nền. Do đó, S truyền tín hiệu x_s cùng lúc T truyền tín hiệu x_T với các công suất phát của S và T lần lượt là P_s và P_T . Công suất phát của S phụ thuộc vào công suất can nhiễu ngưỡng I_t mà R có thể chịu đựng, công suất phát cực đại P_{sm} của S và thông tin kênh truyền không hoàn hảo [14] như sau:

$$P_s = \min \left(P_{sm}, I_t / \left| \hat{h}_{SR} \right|^2 \right) \quad (2)$$

Tín hiệu nhận được tại D :

$$y_D = h_{SD} x_s + h_{TD} x_T + n_D \quad (3)$$

Tín hiệu nhận được W:

$$y_W = h_{SW} x_s + h_{TW} x_T + n_W \quad (4)$$

trong đó n_D và n_W là các nhiễu trắng Gaussian cộng tại D và W, là các biến ngẫu nhiên $n_D \sim \text{CN} (0, \sigma_D^2)$ và $n_W \sim \text{CN} (0, \sigma_W^2)$ với $\sigma_D^2 = \sigma_W^2 = \sigma^2$.

Thay (1) vào (3), ta được:

$$y_D = \frac{\hat{h}_{SD}}{\kappa_{SD}} x_s - \frac{\sqrt{1 - \kappa_{SD}^2}}{\kappa_{SD}} \varepsilon_{SD} x_s + h_{TD} x_T + n_D \quad (5)$$

Thay (1) vào (4), ta được:

$$y_w = \frac{\hat{h}_{sw}}{\kappa_{sw}} x_s - \frac{\sqrt{1 - \kappa_{sw}^2}}{\kappa_{sw}} \varepsilon_{sw} x_s + h_{tw} x_t + n_w \tag{6}$$

Từ (5), tỷ số tín hiệu trên can nhiễu cộng nhiễu (SINR) tại D được tính như sau:

$$\begin{aligned} \Phi_D &= \frac{\Xi_{x_s} \left\{ \left| \frac{\hat{h}_{SD}}{\kappa_{SD}} x_s \right|^2 \right\}}{\Xi_{\varepsilon_{SD}, x_s, x_t, n_D} \left\{ \left| h_{TD} x_t + n_D - \frac{\sqrt{1 - \kappa_{SD}^2}}{\kappa_{SD}} \varepsilon_{SD} x_s \right|^2 \right\}} \\ &= \frac{|\hat{h}_{SD}|^2 P_s}{(1 - \kappa_{SD}^2) \rho_{SD} P_s + |h_{TD}|^2 \kappa_{SD}^2 P_t + \kappa_{SD}^2 \sigma_D^2} \end{aligned} \tag{7}$$

trong đó $\Xi_{X,Y...} \{ \cdot \}$ biểu diễn toán tử kỳ vọng trên các biến ngẫu nhiên X, Y, \dots . Cả \hat{h}_{tr} và ε_{tr} được mô hình hóa là CN $(0, \rho_{tr})$.

Tương tự, từ (6), SINR tại W được tính như sau:

$$\begin{aligned} \Phi_W &= \frac{\Xi_{x_s} \left\{ \left| \frac{\hat{h}_{sw}}{\kappa_{sw}} x_s \right|^2 \right\}}{\Xi_{\varepsilon_{sw}, x_s, x_t, n_w} \left\{ \left| h_{TW} x_t + n_w - \frac{\sqrt{1 - \kappa_{sw}^2}}{\kappa_{sw}} \varepsilon_{sw} x_s \right|^2 \right\}} \\ &= \frac{|\hat{h}_{sw}|^2 P_s}{(1 - \kappa_{sw}^2) \rho_{sw} P_s + |h_{TW}|^2 \kappa_{sw}^2 P_t + \kappa_{sw}^2 \sigma_w^2} \end{aligned} \tag{8}$$

Dung lượng kênh truyền $S \rightarrow D$ được xác định bởi:

$$C_{SD} = \log_2 (1 + \Phi_D) \tag{9}$$

Dung lượng kênh truyền $S \rightarrow W$ được xác định bởi:

$$C_{SW} = \log_2 (1 + \Phi_w) \tag{10}$$

Khi đó, dung lượng bảo mật C_{Sec} được xác định bởi công thức:

$$C_{Sec} = \max (C_{SD} - C_{SW}, 0) = \max \left[\log_2 \left(\frac{1 + \Phi_D}{1 + \Phi_w} \right), 0 \right] \tag{11}$$

Xác suất dùng bảo mật là tiêu chí đánh giá hiệu năng PLS quan trọng theo lý thuyết thông tin. Theo đó, SOP là xác suất mà dung lượng bảo mật (C_{Sec}) nhỏ hơn dung lượng bảo mật cho trước (C_0). Do đó, SOP được xác định như sau:

$$S (C_0) = \Pr \{ C_{Sec} < C_0 \} \tag{12}$$

3. Các kết quả và thảo luận

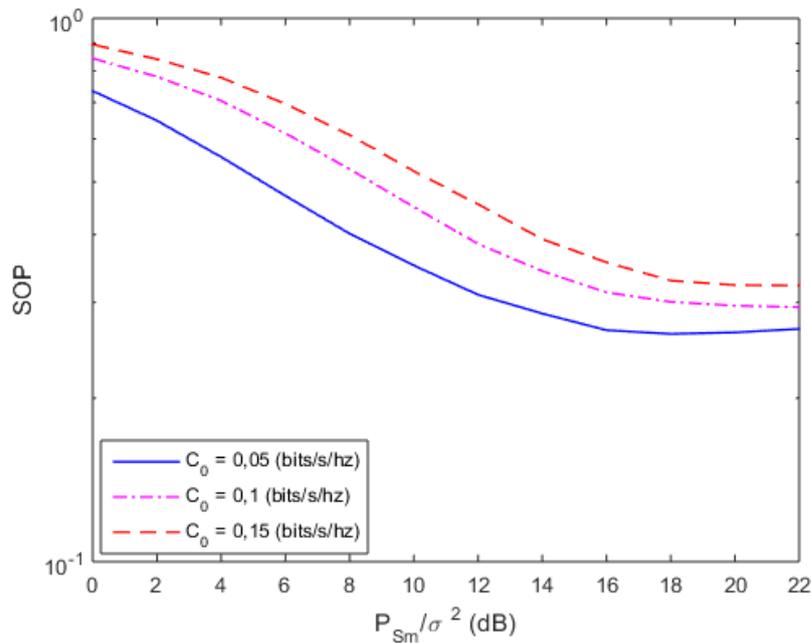
Sử dụng phần mềm Matlab để viết chương trình mô phỏng Monte-Carlo với số lần hiện thực kênh truyền trong mô phỏng 10^6 và số mũ suy hao đường truyền $\tau = 4$.

Khoảng cách giữa các nút trong hệ thống, ...

Để có được cái nhìn thấu đáo về hiệu năng bảo mật lớp vật lý của hệ thống dưới tác động các thông số hoạt động đến SOP của hệ thống, trong phần này giả sử cho ngẫu nhiên tọa độ các nút T, R, S, D và W lần lượt tại (0.3, 0.8), (0.8, 0.7), (0.0, 0.0), (1.0, 0.0) và (0.9, 0.5).

Bảng 2. Các thông số hoạt động khi minh họa SOP theo P_{Sm} / σ^2

Thông số (đơn vị)	P_T / σ^2 (dB)	I_t / σ^2 (dB)	C_0 (bits/s/Hz)	$\kappa_{uv} = 0.9$
Giá trị	18	16	0.05, 0.1 và 0.15	0.9

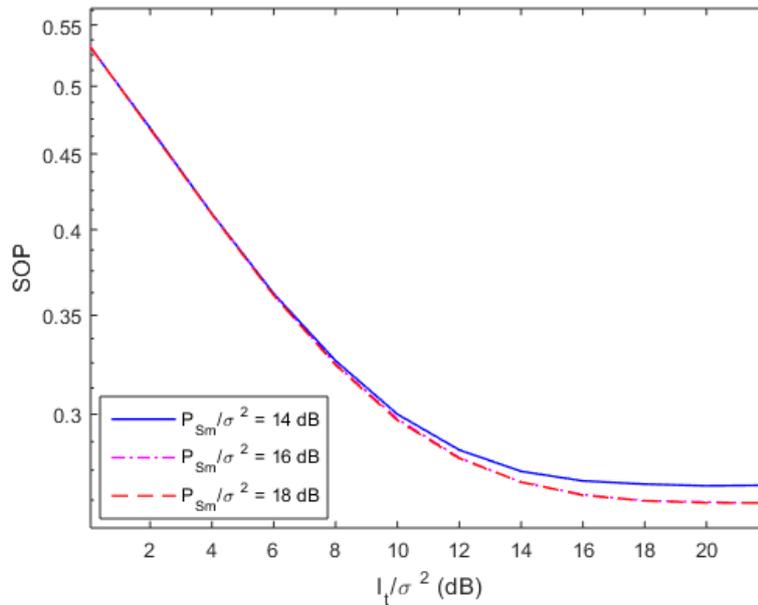


Hình 2. SOP của UCRN theo P_{Sm} / σ^2

Hình 2 cho thấy tác động của tỷ số công suất phát cực đại trên phương sai nhiễu (P_{Sm} / σ^2) đến xác suất dừng bảo mật của UCRN khi cho các thông số hoạt động của hệ thống như bảng 3. Kết quả minh họa cho thấy khoảng P_{Sm} / σ^2 có giá trị nhỏ (ví dụ: $P_{Sm} / \sigma^2 < 20$ dB với $C_0 = 0.1$ bits/s/Hz) thì tăng P_{Sm} / σ^2 làm SOP giảm đáng kể. Tuy nhiên, ở các giá trị lớn của P_{Sm} / σ^2 (ví dụ: $P_{Sm} / \sigma^2 \geq 20$ dB với $C_0 = 0.1$ bits/s/Hz) thì giá trị của SOP sẽ không đổi. Do công thức phân bố công suất của S là

$$P_S = \min \left(P_{Sm}, I_t / \left| \hat{h}_{SR} \right|^2 \right)$$

nên khi P_{Sm} lớn hơn một giá trị nhất định (ví dụ: 20 dB theo hình 2) thì $P_S = I_t / \left| \hat{h}_{SR} \right|^2$ độc lập với P_{Sm} , làm cho SOP không đổi khi tăng P_{Sm} . Hơn nữa, kết quả này còn cho thấy SOP tỷ lệ thuận với dung lượng bảo mật cho trước C_0 . Điều này là hoàn toàn hợp lý bởi vì với cùng một tập các thông số hệ thống, nghĩa là khi điều kiện hoạt động không đổi nếu C_0 lớn hơn sẽ làm SOP tăng nhiều hơn.

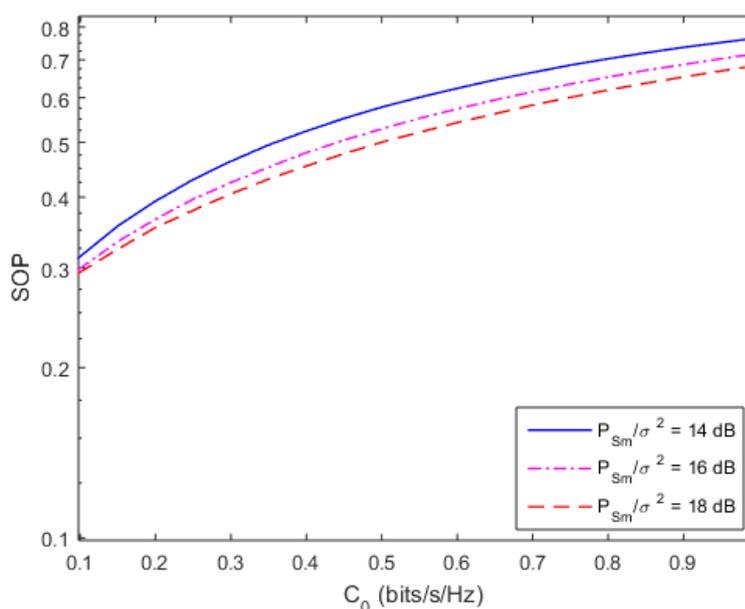


Hình 3. SOP của UCRN theo I_t / σ^2

Bảng 3. Các thông số hoạt động khi minh họa SOP theo I_t / σ^2

Thông số (đơn vị)	P_T / σ^2 (dB)	P_{Sm} / σ^2 (dB)	C_0 (bits/s/Hz)	$\kappa_{uv} = 0.9$
Giá trị	18	14, 16, 18	0.05	0.9

Hình 3 minh họa ảnh hưởng của tỷ số công suất can nhiễu ngưỡng trên phương sai nhiễu (I_t / σ^2) đến xác suất dừng bảo mật của UCRN khi cho các thông số như ở bảng 3. Kết quả cho thấy khi I_t / σ^2 tăng thì SOP giảm và SOP sẽ đạt giá trị không đổi ở các giá trị lớn của I_t / σ^2 . Điều này có thể được giải thích do $P_s = \min(P_{Sm}, I_t / |h_{SR}|^2)$ nên khi I_t / σ^2 lớn hơn P_{Sm} thì $P_s = P_{Sm}$ độc lập với I_t / σ^2 , làm cho SOP không đổi khi tăng I_t / σ^2 .



Hình 4. SOP của UCRN theo C_0

Bảng 4. Các thông số hoạt động khi minh họa SOP theo C_0

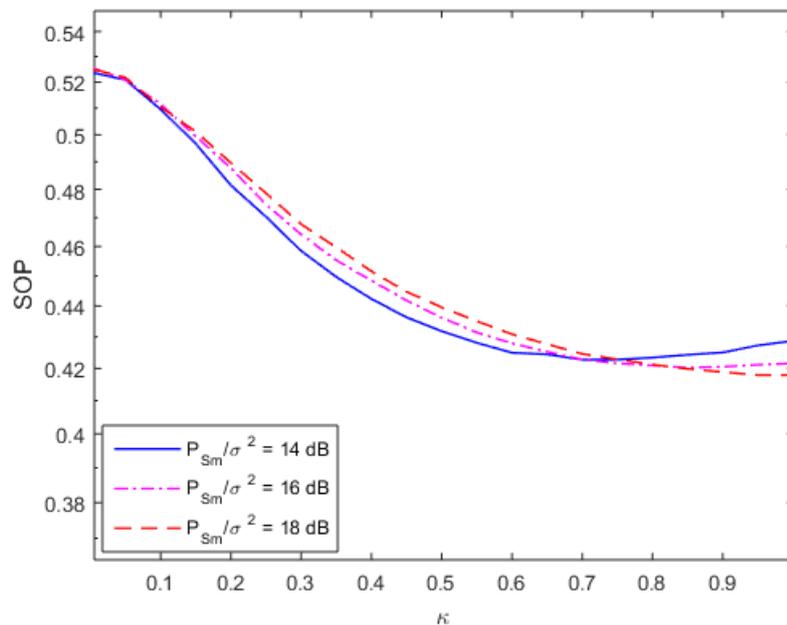
Thông số (đơn vị)	P_T / σ^2 (dB)	P_{Sm} / σ^2 (dB)	I_t / σ^2 (dB)	$\kappa_w = 0.9$
Giá trị	18	14, 16, 18	16	0.9

Hình 4 minh họa tác động của dung lượng bảo mật cho trước (C_0) đến xác suất dừng bảo mật của UCRN khi cho các thông số hoạt động như ở phần bảng 4. Kết quả cho thấy khi C_0 tăng thì SOP sẽ tăng. Điều này là hoàn toàn hợp lý vì với cùng một hệ thống và một tập các thông số như nhau thì nếu mức độ bảo mật yêu cầu cao hơn sẽ dẫn tới SOP lớn hơn. Ngoài ra, các kết quả còn cho thấy SOP có xu hướng giảm với các giá trị P_{Sm} / σ^2 lớn hơn. Điều này là hiển nhiên bởi vì trong giới hạn phân bố của P_s khi P_{Sm} / σ^2 tăng làm cho tín hiệu nhận được ở máy thu thứ cấp tăng dẫn tới SOP của hệ thống giảm.

Hình 5 cho thấy ảnh hưởng của độ chính xác ước lượng kênh truyền (κ) đến xác suất dừng bảo mật của UCRN khi cho các thông số hoạt động như bảng 5. Kết quả này cho thấy SOP giảm mạnh trong khoảng κ nhỏ (ví dụ: $\kappa \leq 0.85$ với $P_{Sm} / \sigma^2 = 16$ dB) và SOP tăng không đáng kể trong khoảng κ lớn (ví dụ: $\kappa \geq 0.85$). Như vậy, thông tin kênh truyền không hoàn hảo làm tăng SOP một cách đáng kể.

Bảng 5. Các thông số hoạt động khi minh họa SOP theo κ

Thông số (đơn vị)	P_T / σ^2 (dB)	P_{Sm} / σ^2 (dB)	I_t / σ^2 (dB)	C_0 (bits/s/Hz)
Giá trị	18	14, 16, 18	16	0.05

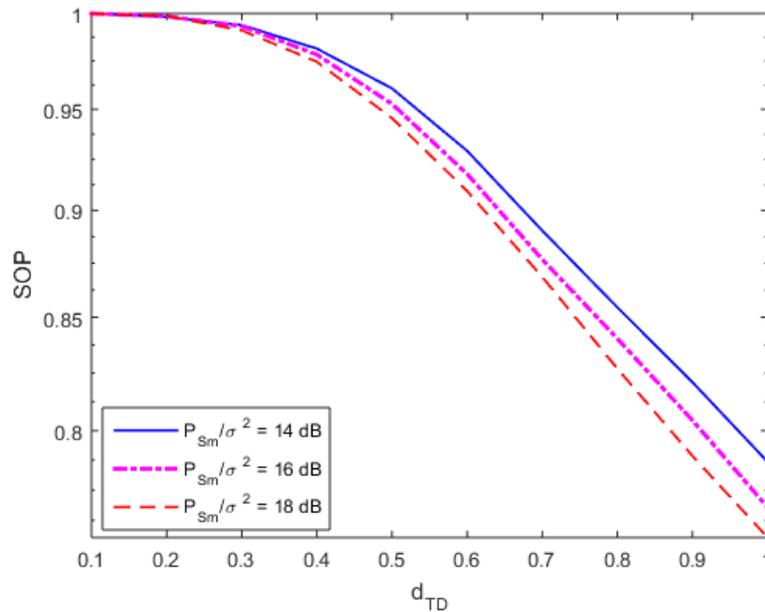


Hình 5. SOP của UCRN theo κ

Trong phần tiếp theo, để có các số liệu khảo sát ảnh hưởng của khoảng cách giữa các nút đến SOP của hệ thống cho các thông số như bảng 6.

Bảng 6. Các thông số hoạt động khi minh họa SOP theo khoảng cách các nút

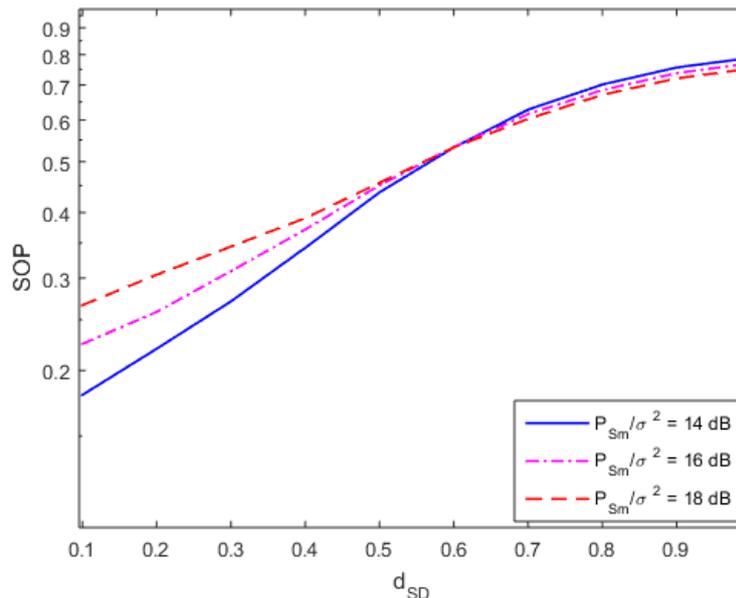
3	P_T / σ^2 (dB)	P_{Sm} / σ^2 (dB)	I_t / σ^2 (dB)	C_0 (bits/s/Hz)	$\kappa_w = 0.9$
Giá trị	18	14, 16, 18	16	0.05	0.9



Hình 6. SOP của UCRN theo d_{TD}

Hình 6 minh họa ảnh hưởng của khoảng cách giữa các nút T và D (d_{TD}) đến SOP của UCRN khi cho tọa độ các nút: T(0.0, d_{TD}), R(0.8, 0.7), S(1.0, 0.0), D(0.0, 0.0) và W(0.9, 0.5). Kết quả cho thấy rằng khi d_{TD} tăng thì SOP giảm mạnh.

Hình 7 cho thấy ảnh hưởng của khoảng cách giữa S và D (d_{SD}) đến SOP của UCRN khi cho tọa độ các nút T(0.0, 1.0), R(0.8, 0.7), S(d_{SD} , 0.0), D(0.0, 0.0) và W(0.9, 0.5). Kết quả cho thấy rằng khi khoảng cách d_{SD} tăng thì SOP tăng.



Hình 7. SOP của UCRN theo d_{SD}

Các kết quả này cho thấy giá trị các SOP trong UCRN cơ bản khá cao ($SOP > 10^{-1}$). Đặc biệt khi khoảng cách giữa máy thu thứ cấp và máy phát sơ cấp nhỏ hoặc khi khoảng cách giữa máy thu và máy phát thứ cấp lớn $SOP \rightarrow 1$, hệ thống hầu như không thể đạt được bảo mật. Đây là các vị trí cần tránh để đảm bảo bảo mật PLS trong UCRN. Ngoài ra, các kết quả này chính xác và gần với thực tiễn

hơn so với kết quả của các công trình nghiên cứu liên quan (Bin Azaman và cs., 2017; Yang và cs., 2016; Zhang và cs., 2017; Nguyen và cs., 2017; Zhao và cs., 2015, 2017; Shim và cs., 2016). Điều này được khẳng định là do công thức SOP có xét đầy đủ các thông số hoạt động dưới các điều kiện vận hành nghiêm ngặt và gần với thực tế mà không có công trình liên quan nào trước đây đã thực hiện. Cụ thể là (Bin Azaman và cs., 2017; Yang và cs., 2016; Zhang và cs., 2017; Nguyen và cs., 2017; Zhao và cs., 2015) không tính đến can nhiễu từ mạng sơ cấp và thông tin kênh truyền không hoàn hảo, Zhao và cs. (2017) bỏ qua nhiễu AWGN, Zhao và cs. (2015) bỏ qua can nhiễu từ mạng sơ cấp và công suất phát cực đại.

4. Kết luận

Bài báo đã khảo sát đánh giá hiệu năng bảo mật lớp vật lý trong mạng vô tuyến nhận thức dạng nền với thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo. Các kết quả đã mang lại những kiến thức sâu về hiệu năng PLS trong UCRN. Cụ thể là: i) công suất phát cực đại hoặc công suất can nhiễu ngưỡng tăng sẽ cải thiện khả năng bảo mật lớp vật lý. Tuy nhiên, các thông số này chỉ tăng đến một giá trị nhất định thì khả năng bảo mật lớp vật lý bảo hòa; ii) thông tin kênh truyền không hoàn hảo tăng có ảnh hưởng tiêu cực đến hiệu năng PLS. Tuy nhiên, các thông số này tăng cũng tác động lên máy nghe lén nên khả năng bảo mật lớp vật lý cải thiện ít trong trường hợp máy thu thứ cấp ở gần máy phát sơ cấp; iii) dung lượng bảo mật cho trước tăng làm giảm khả năng bảo mật lớp; iv) khoảng cách giữa máy thu thứ cấp và máy phát thứ cấp có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng PLS, khoảng cách này càng lớn thì hiệu năng PLS càng thấp. Ngoài ra, bài báo này còn cho thấy UCRN cơ bản này khó đạt được hiệu năng PLS tốt vì giá trị các SOP khá cao nhất là khi khoảng cách giữa máy thu thứ cấp và máy phát sơ cấp nhỏ hoặc khi khoảng cách giữa máy thu và máy phát thứ cấp lớn hệ thống hầu như không thể đạt được bảo mật.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Karimi-Bidhendi S., and Jafarkhani H. (2024). Outage-Aware Deployment in Heterogeneous Rayleigh Fading Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Communications*, 72(2), pp. 1146-1161. doi: 10.1109/TCOMM.2023.3327443.
- [2] Bhattacharjee D., Kumar and A. Kumari S. (2023). Implementation of Polar Codes Over Multipath Rayleigh Fading Channel Using Channel Transformation. *2023 14th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, Delhi, India, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICCCNT56998.2023.10308183.
- [3] Yu K., Yu J., Feng Z. and Chen H. (2024). A Reassessment on Applying Protocol Interference Model Under Rayleigh Fading: From Perspective of Link Scheduling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 32(1), pp. 238-252. doi: 10.1109/TNET.2023.3284433.
- [4] Nassirpour S., Vahid A., Do D.-T. and Bharadia D. (2024). Beamforming Design in Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted IoT Networks Based on Discrete Phase Shifters and Imperfect CSI. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(3), pp. 5301-5315. doi: 10.1109/JIOT.2023.3305914.
- [5] Zhang X. and Vaezi M. (2024). Deep Autoencoder-Based Z-Interference Channels With Perfect and Imperfect CSI. *IEEE Transactions on Communications*, 72(2), 861-873. doi: 10.1109/TCOMM.2023.3328026.
- [6] Hamza K. M., Basharat S., Hassan S. A. and Jung H. (2023). On the Secrecy Performance of RIS-Enhanced Aerial Communication Under Imperfect CSI. *IEEE INFOCOM 2023 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Hoboken, NJ, USA, pp. 1-6. doi:10.1109/INFOCOMWKSHPS57453.2023.10226064.
- [7] Bin Azaman A., Nguyen N. P., and Ha D. B. (2017). Secrecy outage probability of full-duplex networks with cognitive radio environment and partial relay selection. *Proc. 2017 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*. Da Nang, Vietnam, pp. 119-123, 2017. <https://doi.org/10.1109/SIGTELCOM.2017.7849807>.

- [8] Yang Q., J. Ding, and Yang J. (2016). Secrecy outage probability of dual-hop DF cognitive relay networks under interference constraints. *Proc. 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, Yogyakarta, Indonesia, pp. 76-80, 2016. <https://doi.org/10.1109/APCC.2016.7581500>.
- [9] Zhang T., Huang Y., and Cai Y. (2017). Secure Multiantenna Cognitive Wiretap Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(5), pp. 4059-4072. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2609396>.
- [10] Nguyen M. N., Nguyen N. P., and Da Costa D. B. (2017). Secure Cooperative Half-Duplex Cognitive Radio Networks With K-th Best Relay Selection. *IEEE Access*, vol. 5, 6678-6687. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2686984>.
- [11] Zhao H., Tan Y., and Pan G. (2015). Secrecy outage on transmit antenna selection/maximal ratio combining in MIMO cognitive radio networks. *Proc. 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*. Nanjing, China, 1-6. <https://doi.org/10.1109/WCSP.2015.7341036>.
- [12] Zhao R., Yuan Y., and Fan L. (2017). Secrecy Performance Analysis of Cognitive Decode-and-Forward Relay Networks in Nakagami-m Fading Channels. *IEEE Transactions on Communications*, 65(2), 549-563. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2016.26>.
- [13] Shim K., Do T. N., and An B. (2016). Outage performance of physical layer security for multi-hop underlay CRN with imperfect channel state information. *Proc. 2016 International Conference on Electronics, Information, and Communications (ICEIC)*, Danang, Vietnam, pp.1-4. <https://doi.org/10.1109/ELINFO COM.2016.7562946>.
- [14] Zhang X., Xing J., and Yan Z. (2013). Outage Performance Study of Cognitive Relay Networks with Imperfect Channel Knowledge. *IEEE Communications Letters*, 17(1), pp. 27-30. <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2012.112812.121371>.