

ĐẠI HỌC QUỐC GIA TP. HỒ CHÍ MINH
TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA

ĐỒ ĐẶC THIÊM

**BẢO MẬT THÔNG TIN LỚP VẬT LÝ TRONG MẠNG VÔ TUYẾN
NHẬN THỨC DẠNG NỀN**

Ngành: Kỹ Thuật Viễn Thông
Mã số ngành: 62520208

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ

TP. HỒ CHÍ MINH - NĂM 2023

Công trình được hoàn thành tại **Trường Đại học Bách Khoa - ĐHQG-HCM**

Người hướng dẫn 1: PGS. TS. HỒ VĂN KHƯƠNG

Người hướng dẫn 2:

Phản biện độc lập 1:

Phản biện độc lập 2:

Phản biện 1:

Phản biện 2:

Phản biện 3:

Luận án sẽ được bảo vệ trước Hội đồng đánh giá luận án họp tại

.....
.....

vào lúc giờ ngày tháng năm

Có thể tìm hiểu luận án tại thư viện:

- Thư viện Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM
- Thư viện Đại học Quốc gia Tp.HCM
- Thư viện Khoa học Tổng hợp Tp.HCM

DANH MỤC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Tạp chí quốc tế

- [A-1] **Thiem Do-Dac** and Khuong Ho-Van, “Energy harvesting cognitive radio networks: security analysis for Nakagami- m fading,” *Wireless Networks*, vol. 27, no. 3, pp. 1561–1572, Apr. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11276-019-02132-1>. (SCIE Q2).
- [A-2] **Thiem Do-Dac** and Khuong Ho-Van, “Spectrum Sharing Paradigm Under Primary Interference and Nakagami- m Fading: Security Analysis,” *Wireless Personal Communications*, vol. 111, no. 3, pp. 1607–1623, Apr. 2020. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06943-5>. (SCIE Q2).
- [A-3] Khuong Ho-Van and **Thiem Do-Dac***, “Security Analysis for Underlay Cognitive Network with Energy Scavenging Capable Relay over Nakagami- m Fading Channels,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2019, pp. 1-16, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5080952>. (SCIE Q2).
- [A-4] Khuong Ho-Van and **Thiem Do-Dac**, “Relaying Communications in Energy Scavenging Cognitive Networks: Secrecy Outage Probability Analysis,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2019, pp. 1-13, May 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/2109837>. (SCIE Q3).
- [A-5] Khuong Ho-Van and **Thiem Do-Dac**, “Security Performance Analysis of Underlay Cognitive Networks with Helpful Jammer under Interference from Primary Transmitter,” *Mobile Networks and Applications*, vol. 25, pp. 4–15, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11036-018-1185-x>. (SCIE Q2)
- [A-6] Khuong Ho-Van and **Thiem Do-Dac**, “Performance Analysis of Jamming Technique in Energy Harvesting Cognitive Radio Networks,” *Telecommunication Systems*, vol. 70, no. 3, pp. 321–336, Jun. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11235-018-0477-6>. (SCIE Q3).

2. Tạp chí trong nước

- [B-1] **Thiem Do-Dac** and Khuong Ho-Van, “Impacts of Licensed Interference and Inaccurate Channel Information on Information Security in Spectrum

Sharing Environment”, *VNU Journal of Science: Computer Science and Communication Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 52-61, ISSN 2588-1086, Sep. 2018. <https://doi.org/10.25073/2588-1086/vnucsce.199>. (VNU Journal of Science: Comp. Science & Com. Eng).

3. Hướng nghiên cứu tiếp theo (Tạp chí quốc tế)

[C-1] Khuong Ho-Van and **Thiem Do-Dac***, “Impact of Artificial Noise on Security Capability of Energy Harvesting Overlay Networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, pp. 1-12, Jun. 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/9976837>. (SCIE Q3).

CHƯƠNG 1 MỞ ĐẦU

1.1 Đặt vấn đề

Hiện nay, thông tin vô tuyến thế hệ thứ 5 (5G) đang được nghiên cứu và triển khai trên phạm vi toàn cầu. 5G cho phép kết nối nhiều thiết bị hơn bao giờ hết trong Internet vạn vật. Cuối năm 2018, ước tính có khoảng 22 tỷ thiết bị đang được sử dụng, con số này được dự báo sẽ tăng lên khoảng 50 tỷ vào năm 2030 [1]. 5G cùng với sự bùng nổ các dịch vụ vô tuyến thế hệ mới như hội thoại hình, xem video trực tuyến chất lượng cao, truy cập internet tốc độ cao qua các thiết bị di động, ... dẫn đến sự thiếu hụt về phổ tần [2].

Các băng tần mmW không được sử dụng rộng rãi trong thông tin vô tuyến truyền thống nên việc sử dụng các băng tần này có thể giải quyết tình trạng thiếu hụt về phổ tần. Tuy nhiên, các băng tần mmW có một số nhược điểm như tầm phủ sóng bị hạn chế và công suất phát lớn, ... Điều này có thể làm tăng chi phí khi triển khai hệ thống truyền thông trên các băng tần này. Ngoài ra, các kỹ thuật tái sử dụng tần số truyền thống có thể cải thiện đáng kể hiệu suất sử dụng phổ tần vô tuyến. Tuy nhiên, các kỹ thuật này cũng có gặp phải nhiều vấn đề như thiếu linh hoạt, hiệu suất sử dụng tài nguyên hạn chế và quản lý tài nguyên phức tạp, ... Với lợi thế về hiệu suất sử dụng phổ cao, mạng vô tuyến nhận thức có thể cung cấp băng thông truyền dữ liệu tốc độ cao cho các dịch vụ vô tuyến mới nổi. Ngoài ra, nhiều nghiên cứu [3], [4] cho thấy mạng vô tuyến nhận thức ra đời đã giải quyết được vấn đề về hiệu suất sử dụng phổ thấp và tình trạng khan hiếm phổ tần số vô tuyến. Lưu ý rằng mạng vô tuyến nhận thức có ba cơ chế hoạt động là dạng nền, phủ và đan xen. Trong đó, cơ chế dạng nền có thể được hiện thực đơn giản [5] nên có tiềm năng được triển khai trong thực tế.

Hơn nữa, bảo mật thông tin đóng một vai trò hết sức quan trọng trong các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới [6]. Thông thường, bảo mật thông tin được thực hiện ở các lớp trên của mô hình hệ thống mở OSI thông qua việc thiết kế

các giao thức mật mã. Tuy nhiên, với những tiến bộ về công nghệ phần cứng, việc đạt được bảo mật thông tin chỉ dựa trên các giao thức mật mã vẫn chưa đủ. Chính vì điều này, mô hình mới về bảo mật thông tin chuyển hướng sang thực hiện ở lớp vật lý [7]. Bằng cách khai thác các đặc tính không gian và thời gian của các kênh truyền không dây, bảo mật thông tin lớp vật lý có thể áp dụng tốt cho mạng vô tuyến nhận thức [8]. Lưu ý rằng kết hợp các kỹ thuật mật mã hiện hữu với bảo mật lớp vật lý sẽ mang lại khả năng bảo mật thông tin cao. Tuy nhiên, do thời gian nghiên cứu có hạn nên luận án này chỉ tập trung vào nghiên cứu bảo mật lớp vật lý.

Vì vậy, nghiên cứu bảo mật lớp vật lý trong mạng vô tuyến nhận thức dạng nền là rất cần thiết và cấp bách. Đây cũng chính là lý do thực hiện luận án này.

1.2 Mục tiêu và nhiệm vụ nghiên cứu

- Nghiên cứu bảo mật lớp vật lý của UCRN dưới các điều kiện vận hành nghiêm ngặt và gần với thực tế. Cụ thể, bài toán phân tích có xét đến các thông số hoạt động của hệ thống và các đặc trưng của kênh truyền vô tuyến như công suất phát cực đại, ngưỡng công suất can nhiễu, dung lượng bảo mật cho trước, can nhiễu từ mạng sơ cấp, thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo cũng như mức độ trầm trọng fading Nakagami-m.
- Nghiên cứu bảo mật lớp vật lý của UCRN có thu thập năng lượng sóng vô tuyến qua các kênh truyền fading tương đối tổng quát Nakagami-m.
- Đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu năng PLS cho UCRN. Sau đó, phân tích và chứng minh hiệu quả của các giải pháp đã đề xuất.

1.3 Phương pháp nghiên cứu

Đầu tiên, luận án sử dụng phương pháp tổng hợp để hệ thống hóa các khái niệm và các công trình nghiên cứu liên quan cũng như đề xuất các công thức tính các tiêu chí đánh giá hiệu năng PLS. Tiếp theo, luận án đề xuất các mô hình hệ thống và triển khai tính toán khoa học để xác định công thức xác suất dừng bảo mật (SOP) của các mô hình hệ thống. Sau đó, luận án thực hiện so sánh các kết quả tính toán qua công thức SOP và mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng

tính chính xác của các công thức SOP. Cuối cùng, luận án phân tích và đánh giá hiệu năng PLS của các mô hình hệ thống đề xuất dựa vào các kết quả minh họa.

1.4 Ý nghĩa khoa học và ứng dụng thực tiễn

Hiện nay, các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới như 5G, ... đang được nghiên cứu trên phạm vi toàn cầu. Các hệ thống này đòi hỏi khả năng bảo mật cao và băng tần rộng. Do đó, nghiên cứu bảo mật thông tin lớp vật lý trong mạng vô tuyến nhận thức không những góp phần đảm bảo an toàn thông tin mà còn giúp nâng cao hiệu suất sử dụng phổ tần số vô tuyến. Ngoài ra, thu thập năng lượng sóng vô tuyến là một kỹ thuật cung cấp năng lượng tiết kiệm và đầy tiềm năng cho các hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới. Vì vậy, các chủ đề nghiên cứu trong luận án này như bảo mật thông tin lớp vật lý, mạng vô tuyến nhận thức, thu thập năng lượng sóng vô tuyến và các giải pháp nâng cao hiệu năng PLS có tính khoa học và rất cấp thiết, đáp ứng tốt yêu cầu thực tiễn và theo kịp xu hướng nghiên cứu của thế giới.

Như đã biết, một hệ thống viễn thông trong thực tế cần trải qua quá trình thiết kế và kiểm chứng về mặt lý thuyết trước khi hiện thực. Để kiểm chứng nhanh mà không cần mô phỏng tốn nhiều thời gian thì các phân tích đánh giá hiệu năng PLS của các hệ thống cần phải có sẵn. Vì vậy, việc phân tích đánh giá hiệu năng PLS của các hệ thống trong luận án sẽ đóng góp đáng kể về mặt thực tiễn. Cụ thể là các chương trình mô phỏng và tính toán là các công cụ đắc lực cho việc kiểm chứng các giải pháp thiết kế trước khi được hiện thực hóa.

1.5 Bố cục luận án

Luận án gồm sáu chương:

- Chương 1 (mở đầu) trình bày đặt vấn đề, mục tiêu nghiên cứu, nhiệm vụ nghiên cứu, ý nghĩa khoa học, ứng dụng thực tiễn.

- Chương 2 (tổng quan) trình bày các khái niệm có liên quan như kênh truyền vô tuyến, mạng vô tuyến nhận thức, kỹ thuật thu thập năng lượng sóng vô tuyến, bảo mật thông tin lớp vật lý và các nghiên cứu liên quan.
- Chương 3 phân tích và đánh giá hiệu năng bảo mật lớp vật lý trong URCN với thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo và kênh truyền fading Nakagami- m .
- Chương 4 phân tích hiệu năng PLS của giải pháp nâng cao hiệu năng cho mạng vô tuyến nhận thức dạng nền với thiết bị gây nhiễu hữu ích (UCRNHJ).
- Chương 5 phân tích hiệu năng PLS của EHUCRN và giải pháp nâng cao hiệu năng cho mạng chuyển tiếp vô tuyến nhận thức dạng nền thu thập năng lượng (EHUCRRN).
- Chương 6 (kết luận - kiến nghị) trình bày các kết quả đạt được của luận án và hướng nghiên cứu tiếp theo.

CHƯƠNG 2 TỔNG QUAN

2.1 Các kênh truyền vô tuyến

Chất lượng của các hệ thống thông tin phụ thuộc nhiều vào kênh truyền, nơi mà các tín hiệu được truyền từ máy phát đến máy thu. Không giống như các kênh truyền hữu tuyến có chất lượng ổn định và có thể dự đoán được, kênh truyền vô tuyến là ngẫu nhiên và không dễ dàng trong việc phân tích.

Kênh truyền AWGN (Additive White Gaussian Noise) là mô hình kênh truyền lý tưởng. Tín hiệu đi qua kênh truyền sẽ bị tác động bởi nhiễu Gaussian trắng cộng, làm giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu, giảm hiệu năng của hệ thống. Nhiễu này có phổ công suất phân bố đồng đều trong cả băng thông và biên độ tuân theo phân bố Gaussian.

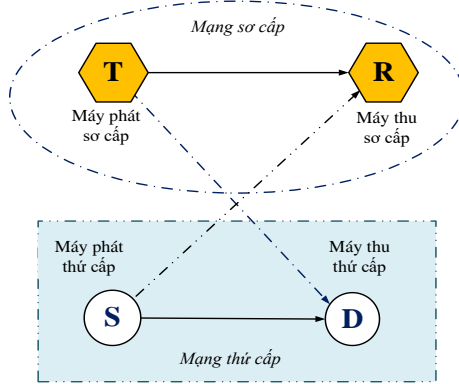
Kênh truyền fading Rayleigh là một trong những kênh truyền phổ biến, được sử dụng nhiều trong tính toán thiết kế truyền thông vô tuyến vì mô tả được trường hợp fading tương đối xấu của tín hiệu nhận được tại máy thu. Phản xạ từ các vật cản như đồi, núi, nhà cửa, xe cộ, ... tạo ra hiệu ứng đa đường, dẫn đến lệch pha giữa các tín hiệu đa đường, làm cho biên độ tín hiệu thu bị suy giảm, từ đó gây ra fading Rayleigh. Kênh truyền fading Rayleigh có thể được dùng để mô hình hóa kênh truyền trong khu vực đô thị.

Kênh truyền fading Nakagami- m là kênh truyền fading tương đối tổng quát, được sử dụng để mô hình hóa các kênh truyền trong khu vực đô thị và nhiều kênh truyền vô tuyến trong thực tế như các kênh truyền trong vùng đồi núi, nơi tín hiệu truyền qua phải đối mặt với hiện tượng đa đường.

2.2 Mạng vô tuyến nhận thức

Mạng vô tuyến nhận thức (CRN) là một loại mạng không dây thông minh có khả năng tự động cấu hình và tối ưu hóa các thông số mạng để đáp ứng các yêu cầu của ứng dụng và môi trường. Kiến trúc CRN gồm hai mạng con là mạng sơ cấp (PN) và mạng thứ cấp (SN), như Hình 2.2. PN gồm máy phát sơ cấp (T) và máy thu sơ cấp (R), được cấp phát phổ tần để truyền thông. Trong khi đó, SN

có máy phát thứ cấp (S) và máy thu thứ cấp (D), không được cấp phổ tần. SN phải truy cập băng tần của PN một cách cơ hội để truyền tin sao cho vẫn đảm bảo được chất lượng dịch vụ của PN ở mức có thể chấp nhận được.



Hình 2.2: Kiến trúc mạng vô tuyến nhận thức

Mạng vô tuyến nhận thức có ba cơ chế hoạt động là nền (Underlay), phủ (Overlay) và đan xen (Interweave), trong đó mạng vô tuyến nhận thức dạng nền (UCRN) được chọn để nghiên cứu trong luận án này do độ phức tạp khi hiện thực thấp [11].

2.3 Kỹ thuật thu thập năng lượng sóng vô tuyến

Thu thập năng lượng vô tuyến là một trong những kỹ thuật thu thập năng lượng đầy hứa hẹn, trong đó các sóng vô tuyến dành riêng hoặc tồn tại trong môi trường xung quanh được thu thập để cung cấp năng lượng cho các thiết bị vô tuyến [13], [14]. Kỹ thuật này mang lại nhiều tiện ích như tiết kiệm năng lượng, tiện lợi và bền vững do không phải thay pin, giảm phát thải carbon, triển khai dễ dàng trong môi trường độc hại hoặc khó tiếp cận, ... Có ba phương pháp thu thập năng lượng vô tuyến phổ biến: cảm ứng từ [15], cộng hưởng từ [16] và thu thập năng lượng sóng vô tuyến [17]. Hai phương pháp đầu dựa trên liên kết từ tính giữa hai cuộn dây hoặc hai vật kích, thông qua đó năng lượng được truyền đi. Do đó, các phương pháp cảm ứng từ và cộng hưởng từ truyền năng lượng vô tuyến gần vì suy giảm công suất rất lớn theo khoảng cách. Ngược lại, thu thập

năng lượng sóng vô tuyến (RFEH) là một loại truyền năng lượng vô tuyến xa và do đó, phù hợp để áp dụng trong các tình huống di động và khoảng cách xa. Vì vậy, luận án này tập trung vào thu thập năng lượng sóng vô tuyến.

Bên cạnh đó, thông tin cũng được truyền bởi các sóng vô tuyến. Do đó, năng lượng và thông tin trong các sóng vô tuyến có thể được thu đồng thời tại các máy thu. Điều này được gọi là truyền thông tin và năng lượng vô tuyến đồng thời (SWIPT). Công trình nghiên cứu ban đầu về SWIPT đã được thực hiện [18] và sau đó, đã được nghiên cứu và phổ biến rộng rãi [19]. Để đạt được truyền thông tin và năng lượng vô tuyến đồng thời, tín hiệu nhận tại máy thu phải được sử dụng cho cả thu thập năng lượng và xử lý thông tin. Có hai kiến trúc hoạt động phổ biến là chuyển mạch thời gian và phân chia công suất.

2.4 Bảo mật thông tin lớp vật lý

Nguyên tắc chính của PLS là khai thác các đặc trưng không gian - thời gian của kênh truyền vô tuyến để đảm bảo truyền dữ liệu an toàn mà không cần đến các giao thức mật mã. Mặt khác, bằng cách khai thác các đặc tính không gian - thời gian của các kênh truyền vô tuyến thì bảo mật lớp vật lý có thể bảo mật thông tin cho CRN.

2.4.1 Dung lượng bảo mật

Dung lượng bảo mật (C_{Sec}) là tiêu chí đánh giá chỉ sự khác biệt về dung lượng giữa kênh truyền chính (C_D) và kênh truyền nghe lén (C_W). Dung lượng bảo mật được xác định bởi:

$$C_{\text{Sec}} = \max \{C_D - C_W, 0\} \quad (2.6)$$

2.4.2 Xác suất dừng bảo mật

Theo lý thuyết thông tin, xác suất dừng bảo mật (SOP - Secrecy Outage Probability) là tiêu chí đánh giá hiệu năng bảo mật quan trọng. SOP được định nghĩa là xác suất mà dung lượng bảo mật nhỏ hơn mức dung lượng bảo mật cho trước (C_0):

$$SOP(C_0) = \Pr \{C_{\text{Sec}} < C_0\} \quad (2.7)$$

trong đó $\Pr(\mathcal{A})$ là xác suất của sự kiện \mathcal{A} .

2.5 Các nghiên cứu liên quan

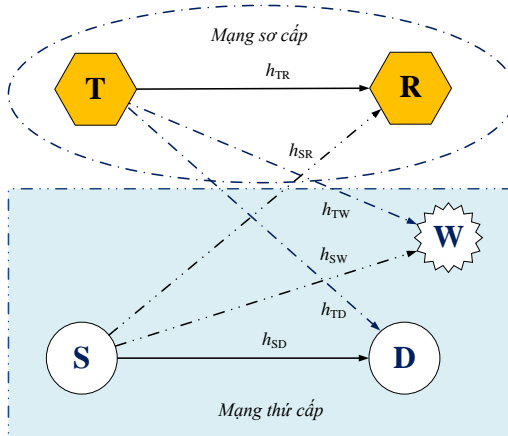
Trong phần này, luận án khảo sát các công trình nghiên cứu liên quan về UCRN để tìm ra những vấn đề mở chưa được nghiên cứu và đề xuất hướng giải quyết. Đầu tiên, khảo sát các công trình liên quan về PLS trong UCRN với các điều kiện hoạt động nghiêm ngặt gần với thực tế [33] - [39]. Kết quả cho thấy rằng không có nghiên cứu nào phân tích SOP của UCRN với thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo có xem xét đầy đủ các thông số quan trọng như công suất phát cực đại, ngưỡng công suất can nhiễu, can nhiễu từ mạng sơ cấp và nhiễu AWGN. Tiếp theo, khảo sát các công trình liên quan về UCRN với kênh truyền fading Nakagami- m tổng quát [40] - [48]. Kết quả cho thấy rằng chưa có công trình nào thực hiện phân tích SOP của UCRN qua kênh truyền fading Nakagami- m có xét đến đầy đủ các thông số hoạt động quan trọng như công suất phát cực đại, can nhiễu ngưỡng và can nhiễu từ mạng sơ cấp. Sau đó, xem xét các nghiên cứu trong [54] - [60] cho thấy rằng không có công trình nào phân tích SOP của UCRN sử dụng thiết bị gây nhiễu hữu ích để nâng cao hiệu năng PLS mà có xem xét đầy đủ các yếu tố như can nhiễu từ PN, công suất phát cực đại, ngưỡng công suất can nhiễu và nhiễu AWGN. Tiếp theo, tóm tắt các đặc điểm điển hình của [61] - [66] khi nghiên cứu SOP của EHUCRN. Kết quả cho thấy rằng không có công trình nào trong số đó thực hiện phân tích SOP của EHUCRN với kênh truyền fading Nakagami- m có xét đầy đủ các thông số đặc trưng của UCRN [67] - [73]. Sau đó, khảo sát các công trình có liên quan đến mạng vô tuyến chuyển tiếp thu thập năng lượng. Kết quả cho thấy rằng chưa có công trình nào phân tích SOP của mạng vô tuyến nhận thức với nút chuyển tiếp thu thập năng lượng qua kênh truyền fading Nakagami- m có xét đủ các thông số như công suất phát cực đại và công suất can nhiễu ngưỡng.

CHƯƠNG 3 PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG PLS TRONG MẠNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC DẠNG NỀN

3.1 UCRN với thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo

Một phần kết quả của công trình nghiên cứu này đã được công bố trong bài báo [B-1] trong danh mục các công trình đã công bố “Impacts of Licensed Interference and Inaccurate Channel Information on Information Security in Spectrum Sharing Environment”, tạp chí *VNU Journal of Science* (tạp chí chuyên ngành trong nước).

Mô hình UCRN cơ bản được minh họa như Hình 3.1, 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). 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 $S \rightarrow R$, $T \rightarrow D$, $T \rightarrow W$.

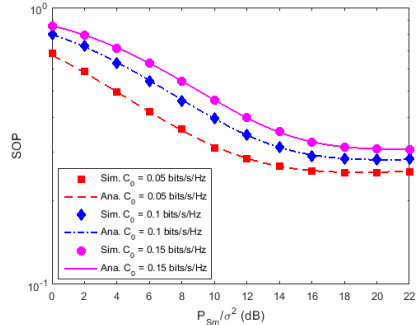
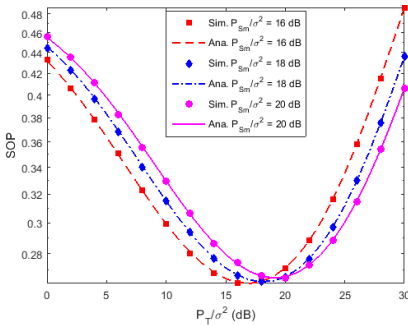


Hình 3.1: Mô hình hệ thống

Luận án kiểm chứng công thức (3.30) bằng mô phỏng Monte-Carlo với giả sử số lần hiện thực kênh truyền 10^6 và số mũ suy hao đường truyền $\tau = 4$. Các kết

quả tính toán (Ana.) và mô phỏng (Sim.) là hoàn toàn trùng khớp. Điều này xác minh tính chính xác của (3.30).

- Hình 3.2 minh họa ảnh hưởng của tỷ số công suất máy phát sơ cấp trên phương sai nhiễu (P_T / σ^2) lên SOP của UCRN khi cho ngẫu nhiên tọa độ các nút như sau: T(0.3,0.8), R(0.8, 0.7), S(0.0, 0.0), D(1.0, 0.0), W(0.9,0.5) và các thông số hệ thống $I_t / \sigma^2 = 16$ dB, $C_0 = 0.05$ bits/s/Hz, $\kappa_{uv} = 0.9$ và ba giá trị $P_{Sm} / \sigma^2 = 16, 18, 20$ dB. Kết quả cho thấy rằng trong khoảng P_T / σ^2 có giá trị nhỏ (ví dụ: $P_T / \sigma^2 < 17$ dB với $P_{Sm} / \sigma^2 = 16$ dB) thì tăng P_T / σ^2 sẽ làm giảm SOP (nghĩa là khả năng PLS tăng). Tuy nhiên, trong khoảng P_T / σ^2 có giá trị lớn ($P_T / \sigma^2 > 17$ dB) thì tăng P_T / σ^2 sẽ làm SOP (nghĩa là khả năng PLS giảm).



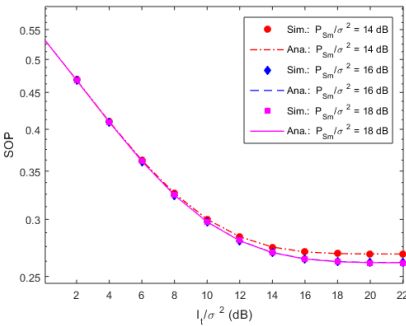
Hình 3.2: SOP của UCRN theo P_T / σ^2 Hình 3.3: SOP của UCRN theo P_{Sm} / σ^2

- Hình 3.3 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 tọa độ các nút và các thông số hoạt động như ở phần Hình 3.2, ngoại trừ $P_T / \sigma^2 = 18$ dB và ba giá trị $C_0 = 0.05, 0.1, 0.15$ bits/s/Hz. 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: $P_{Sm} / \sigma^2 \geq 18$ dB với $C_0 = 0.1$ bits/s/Hz) thì giá trị của SOP sẽ không đổi.

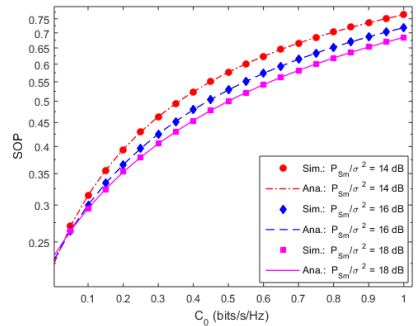
- Hình 3.4 minh họa ảnh hưởng của tỷ số công suất can nhiễu ngưỡng trên phương sai nhiễu (I_t / σ^2) đến xác suất dừng bảo mật của UCRN khi cho tọa độ các nút và các thông số hoạt động như ở phần Hình 3.2, ngoại trừ $P_T / \sigma^2 = 18$

dB và ba giá trị $P_{\text{Sm}} / \sigma^2 = 14, 16, 18$ dB. 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 .

- Hình 3.5 minh họa tác động của dung lượng bảo mật cho trước (C_0) đến xác suất dừng bảo mật của UCRN khi cho tọa độ các nút và các thông số hoạt động như Hình 3.4. Kết quả cho thấy khi tăng giá trị của C_0 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 đã được giải thích tương tự ở Hình 3.4.



Hình 3.4: SOP của UCRN theo I_t / σ^2

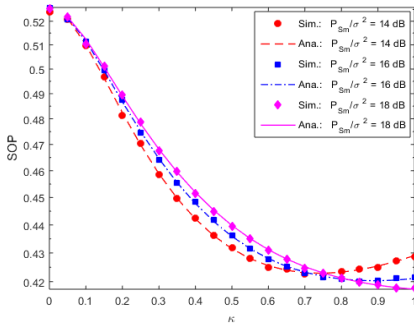


Hình 3.5: SOP của UCRN theo C_0

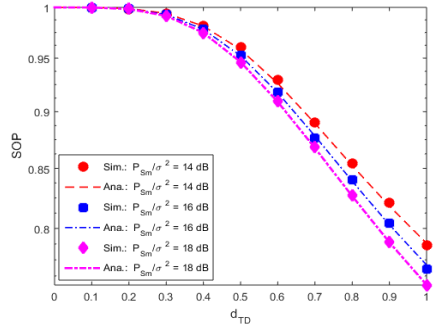
- Hình 3.6 cho thấy ảnh hưởng của độ chính xác ước lượng kênh truyền đến xác suất dừng bảo mật của UCRN khi cho tọa độ các nút và các thông số hoạt động như Hình 3.4. Kết quả này cho thấy SOP giảm mạnh trong khoảng κ nhỏ (ví dụ: $\kappa \leq 0.85$ với $P_{\text{Sm}} / \sigma^2 = 16$ dB) và SOP tăng không 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.

- Hình 3.7 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), W(0.9, 0.5) và các thông số hệ thống như Hình 3.4. Kết quả cho thấy rằng khi khoảng cách d_{TD} tăng thì SOP giảm mạnh.

Các kết quả trên chính xác và gần với thực tiễn hơn so với các kết quả của các công trình nghiên cứu liên quan. Điều này 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, [33] - [37] không tính đến can nhiễu từ mạng sơ cấp và thông tin kênh truyền không hoàn hảo, [38] bỏ qua nhiễu AWGN, [39] bỏ qua can nhiễu từ mạng sơ cấp và công suất phát cực đại.



Hình 3.6: SOP của UCRN theo κ



Hình 3.7: SOP của UCRN theo d_{TD}

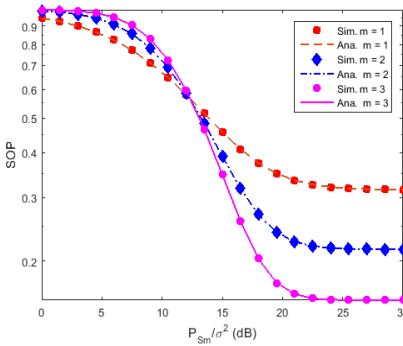
3.2 UCRN với kênh truyền fading Nakagami- m

Các kết quả trong phần này đã được công bố trong bài báo [A-1] trong danh mục các công trình đã công bố: “Spectrum Sharing Paradigm Under Primary Interference and Nakagami- m Fading: Security Analysis”, trên tạp chí *Wireless Personal Communications* (thuộc danh mục SCIE xếp hạng Q2).

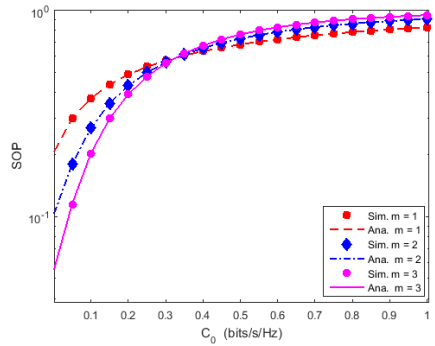
Mô hình hệ thống vẫn như Hình 3.1 nhưng với khác biệt là được khảo sát với các kênh truyền fading Nakagami- m . Sử dụng phần mềm Matlab để viết chương trình mô phỏng Monte-Carlo và chương trình tính SOP theo (3.69). Các kết quả mô phỏng (Sim.) và tính toán (Ana.) ở phần sau cho thấy kết quả mô phỏng và kết quả tính toán hoàn toàn trùng khớp với nhau. Điều này xác minh tính chính xác của (3.69).

- Hình 3.12 biểu diễn SOP của UCRN theo tỷ số công suất phát cực đại trên phương sai nhiễu (P_{Sm}/σ^2) khi $P_T/\sigma^2 = 20$ dB, $I_t/\sigma^2 = 16$ dB, $C_0 = 0.1$

bits/s/Hz và ba mức trầm trọng fading $m = m_{tr} = 1, 2, 3$. Kết quả này cho thấy SOP giảm mạnh khi tăng P_{Sm} / σ^2 nhưng SOP sẽ đạt bão hòa ở các giá trị lớn của P_{Sm} / σ^2 . Xu hướng hiệu năng như thế là do $P_S = \min(P_{Sm}, I_t / g_{SR})$ nên tăng P_{Sm} có thể làm tăng công suất phát, từ đó có thể làm giảm SOP. Tuy nhiên, nếu tiếp tục tăng P_{Sm} thì SOP sẽ bị bão hòa ở các giá trị lớn của P_{Sm} / σ^2 . Ngoài ra, kết quả này còn cho thấy mức độ trầm trọng fading lớn (m nhỏ) sẽ làm SOP giảm ít hơn so với mức độ trầm trọng fading nhỏ (m lớn). Điều này là hoàn toàn hợp lý vì mức độ trầm trọng fading lớn đồng nghĩa với độ lợi kênh truyền giảm (g nhỏ), dẫn đến tín hiệu thu bị yếu hơn, và kết quả là SOP giảm ít hơn.



Hình 3.12: SOP của UCRN theo P_{Sm}/σ^2



Hình 3.15: SOP của UCRN theo C_0

- Hình 3.15 minh họa SOP của UCRN theo C_0 khi $P_T / \sigma^2 = 30$ dB, $P_{Sm} / \sigma^2 = 18$ dB, $I_t / \sigma^2 = 16$ dB với các mức độ trầm trọng fading khác nhau $m = m_{tr} = 1, 2, 3$. Kết quả cho thấy rằng dung lượng bảo mật cho trước C_0 tăng dẫn đến SOP tăng. Điều này là hoàn toàn hợp lý vì với một bộ thông số hệ thống cụ thể thì hiệu năng PLS chỉ đạt đến một mức độ nhất định. Do đó, dung lượng bảo mật cho trước cao (nghĩa là tăng C_0) sẽ làm tăng SOP. Ngoài ra, kết quả này còn chỉ ra rằng mức độ trầm trọng fading lớn làm SOP tăng ít hơn so với mức độ trầm trọng fading nhỏ.

3.3 Kết luận

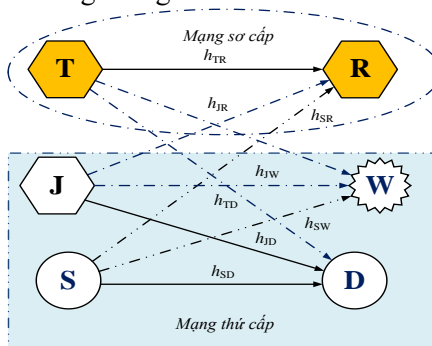
Chương 3 đã phân tích hiệu năng PLS trong UCRN với thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo và kênh truyền fading Nakagami- m . Chương

này đề xuất hai công thức SOP chính xác cho các trường hợp thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo và fading Nakagami- m . Các công thức này hoàn toàn mới và được xác minh tính chính xác. Chương này đã mang lại những kiến thức sâu về hiệu năng PLS trong UCRN. Cụ thể là: i) công suất máy phát sơ cấp và 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 PLS cải thiện ít trong trường hợp máy thu thứ cấp ở gần máy phát sơ cấp; ii) công suất phát cực đại hoặc ngưỡng công suất can nhiễu tăng sẽ cải thiện khả năng PLS. Tuy nhiên, các thông số này chỉ tăng đến một giá trị nhất định thì khả năng PLS sẽ bị bão hòa; iii) dung lượng bảo mật cho trước tăng làm giảm khả năng PLS; iv) khoảng cách nhỏ giữa máy thu thứ cấp và máy phát sơ cấp có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng PLS (khoảng cách này càng lớn thì khả năng PLS càng cao); v) 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); vi) mức độ trầm trọng fading tăng làm giảm ảnh hưởng của các thông số công suất phát đến hiệu năng PLS. Ngoài ra, chương này còn cho thấy rằng khả năng PLS trong UCRN bị hạn chế khi khoảng cách nhỏ giữa máy thu thứ cấp và máy phát sơ cấp cũng như khi khoảng cách lớn giữa máy thu thứ cấp và máy phát thứ cấp. Đây là các vị trí cần tránh để đảm bảo bảo mật PLS trong UCRN.

CHƯƠNG 4 GIẢI PHÁP NÂNG CAO HIỆU NĂNG PLS - MẠNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC CÓ THIẾT BỊ GÂY NHIỀU HỮU ÍCH

Công trình nghiên cứu này đã được công bố trong bài báo [A-4] trong danh mục các công trình đã công bố, với tựa đề “Security Performance Analysis of Underlay Cognitive Networks with Helpful Jammer Under Interference from Primary Transmitter”, trên tạp chí *Mobile Networks and Applications* (thuộc danh mục ISI - xếp hạng Q2)

Mô hình mạng vô tuyến nhận thức có thiết bị gây nhiễu hữu ích (UCRNHJ) được minh họa như Hình 4.1 với khác biệt so với mô hình UCRN cơ bản là mô hình này có thêm thiết bị gây nhiễu (J) trong SN. J đóng vai trò là thiết bị độc lập và thân thiện với máy thu thứ cấp (D) nhưng gây nhiễu để ngăn cản thiết bị nghe lén (W) giải mã thông tin nguồn.

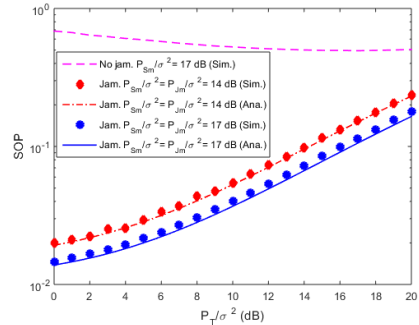
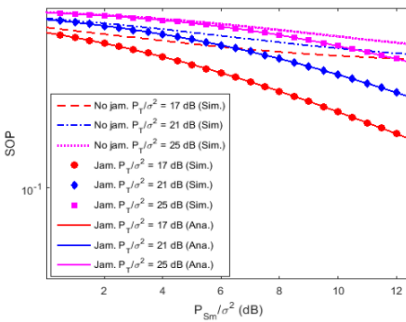


Hình 4.1: Mô hình UCRNHJ

L luận án kiểm chứng các kết quả tính toán SOP theo (4.40) bằng cách so sánh với kết quả mô phỏng Monte-Carlo. Ký hiệu “Ana.” biểu diễn cho kết quả tính toán bằng công thức trong khi “Sim.” biểu diễn cho kết quả mô phỏng. Ngoài ra, “No jam.” biểu diễn cho trường hợp không có J (tương đương $P_{jm} = 0$) trong khi “Jam.” biểu diễn trường hợp có mặt J (giả sử $P_j = P_s$). Các hình minh họa ở phần sau cho thấy rằng các kết quả mô phỏng và phân tích hoàn toàn trùng khớp. Điều này xác nhận tính chính xác của (4.40). Hơn nữa, khi so sánh hiệu năng

PLS giữa “No jam.” và “Jam.,” ta thấy rằng hiệu năng PLS được cải thiện đáng kể khi phát tín hiệu gây nhiễu. Điều này chứng minh hiệu quả của giải pháp gây can nhiễu được đề xuất.

- Hình 4.2 minh họa hiệu năng PLS theo tỷ số công suất phát cực đại của S trên phương sai nhiễu (P_{S_m} / σ^2) khi tỷ số công suất phát của T trên phương sai nhiễu bằng 17, 21, 25 dB (nghĩa là $P_T / \sigma^2 = 17, 21, 25$ dB), mức độ bảo mật được yêu cầu là $C_0 = 0.1$ bits/s/Hz, tỷ số ngưỡng công suất can nhiễu trên phương sai nhiễu $I_t / \sigma^2 = 16$ dB. Hiệu năng PLS được cải thiện đáng kể khi tăng P_{S_m} / σ^2 . Hình này cho thấy can nhiễu từ mạng sơ cấp làm giảm đáng kể hiệu năng PLS cho cả hai mô hình có và không có tín hiệu gây nhiễu.



Hình 4.2: SOP của UCRNHJ theo P_{S_m} / σ^2 Hình 4.3: SOP của UCRNHJ theo P_T / σ^2

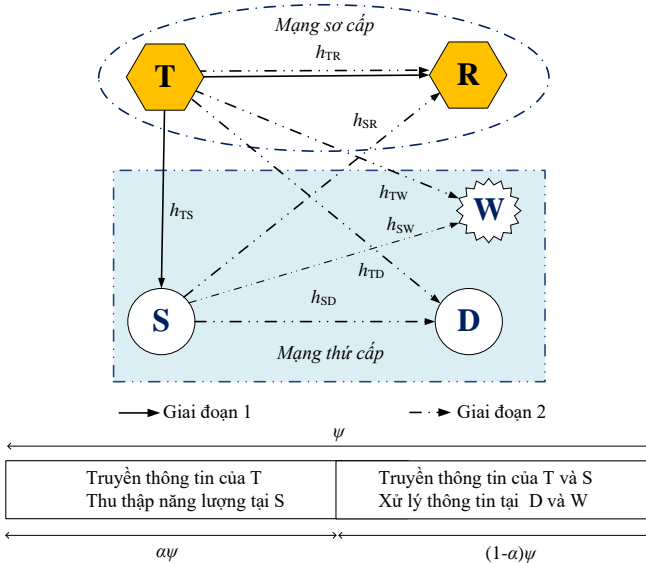
- Hình 4.3 cho thấy hiệu năng PLS trong UCRNHJ theo P_T / σ^2 khi $I_t / \sigma^2 = 16$ dB, $C_0 = 0.1$ bits/s/Hz. Hình 4.3 cũng xét hai trường hợp ($P_{S_m} / \sigma^2 = P_{J_m} / \sigma^2 = 14$ dB và $P_{S_m} / \sigma^2 = P_{J_m} / \sigma^2 = 17$ dB) khi có J và $P_{S_m} / \sigma^2 = 17$ dB khi không có J. Kết quả cho thấy rằng can nhiễu từ mạng sơ cấp có tác động xấu đến hiệu năng PLS. Ngoài ra, kết quả còn cho thấy khi tăng các công suất phát của máy phát sơ cấp thì hiệu năng PLS có J tăng mạnh hơn so với không có J. Hơn nữa, kết quả còn cho thấy hiệu năng PLS khi có J tốt hơn hẳn so với khi không có J. Điều này đúng cho cả trường hợp có xét đến tính công bằng về mặt sử dụng công suất: $P_{S_m} / \sigma^2 = P_{J_m} / \sigma^2 = 14$ dB khi có J và $P_{S_m} / \sigma^2 = 17$ dB khi không có J.

CHƯƠNG 5 MẠNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC THU THẬP NĂNG LƯỢNG VÀ GIẢI PHÁP NÂNG CAO HIỆU NĂNG EHUCRN

5.1 Phân tích và đánh giá hiệu năng PLS trong EHUCRN

Các kết quả nghiên cứu này đã được công bố trong bài báo [A-2] trong danh mục các công trình đã công bố, với tựa đề “Energy Harvesting Cognitive Radio Networks: Security Analysis for Nakagami- m Fading”, tạp chí *Wireless Networks* (thuộc danh mục SCIE xếp hạng Q2).

Mô hình mạng vô tuyến nhận thức dạng nền thu thập năng lượng (EHUCRN) được biểu diễn như Hình 5.1. Mô hình này gần giống với UCRN cơ bản ở Hình 3.1. Điểm khác biệt ở đây là máy phát thứ cấp (S) được giả sử có khả năng thu thập năng lượng sóng vô tuyến từ máy phát của mạng sơ cấp (T) để hoạt động.



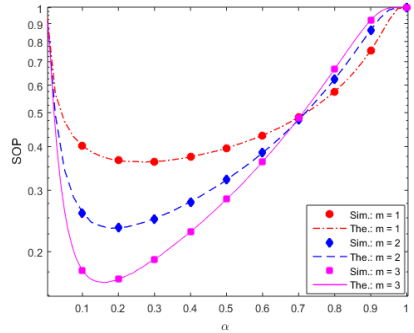
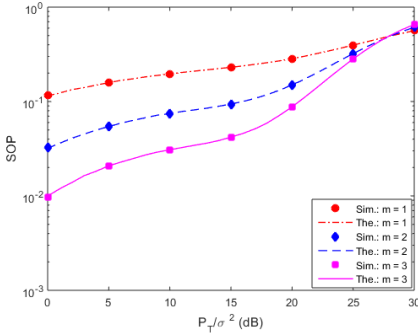
Hình 5.1: Mô hình EHUCRN

Thời lượng toàn chu kỳ ψ được chia làm hai giai đoạn. Giai đoạn 1 có thời lượng là $\alpha\psi$ (với α là phần trăm thời gian thu thập năng lượng $0 < \alpha < 1$).

Trong giai đoạn 1, S thu thập năng lượng từ tín hiệu tần số vô tuyến của T. Giai đoạn 2 có thời lượng $(1-\alpha)\psi$. Trong giai đoạn 2, S sử dụng năng lượng thu thập được ở giai đoạn 1 để phát thông tin hợp pháp tới D và thông tin này bị nghe lén bởi W.

Luận án tạo ra các kết quả mô phỏng Monte-Carlo và các kết quả tính toán theo (5.15) bằng phần mềm Matlab. Các hình minh họa ở phần sau cho thấy kết quả mô phỏng (Sim.) và kết quả tính toán (Ana.) hoàn toàn trùng khớp, từ đó xác minh tính chính xác của (5.15).

- Hình 5.2 biểu diễn SOP của EHUCRN theo P_T / σ^2 khi $I_t / \sigma^2 = 16$ dB, $\alpha = 0.5$ và $C_0 = 0.2$ bits/s/Hz. Kết quả cho thấy SOP có xu hướng tăng khi P_T / σ^2 tăng. Điều này được hiểu như sau. Tăng P_T / σ^2 sẽ làm tăng năng lượng thu thập của S nhưng lại gây can nhiễu nhiều hơn cho D. Bởi vì năng lượng thu thập tăng không đủ bù cho tăng can nhiễu nên dẫn đến SOP tỷ lệ thuận với P_T / σ^2 .



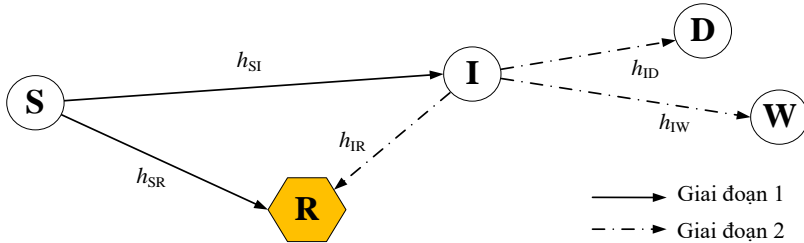
Hình 5.2: SOP của EHUCRN theo P_T / σ^2 Hình 5.5: SOP của EHUCRN theo α

- Ảnh hưởng của SOP theo α được biểu diễn như Hình 5.5 khi $P_T / \sigma^2 = 25$ dB, $I_t / \sigma^2 = 16$ dB, $C_0 = 0.2$ bits/s/Hz. Kết quả cho thấy SOP giảm khi tăng α trong khoảng giá trị nhỏ ($\alpha < 0.25$ với $m=1$) nhưng SOP tăng khi tăng α trong khoảng giá trị lớn ($\alpha > 0.25$ với $m=1$).

5.2 Giải pháp nâng cao hiệu năng PLS - Mạng chuyển tiếp vô tuyến nhận thức dạng nền thu thập năng lượng

Các kết quả nghiên cứu này đã được công bố trong bài báo [A-5] trong danh mục các công trình đã công bố, với tựa đề “Security Analysis for Underlay Cognitive Network with Energy-Scavenging Capable Relay over Nakagami- m Fading Channels”, trên tạp chí *Wireless Communications and Mobile Computing* (thuộc danh mục SCIE xếp hạng Q2).

Mô hình EHUCRRN được minh họa như Hình 5.6, với nút chuyển tiếp (I) có khả năng thu thập năng lượng từ SN. Khi hoạt động, I ở giữa S và D có khả năng tiếp nhận thông tin từ S và chuyển tiếp cho D.

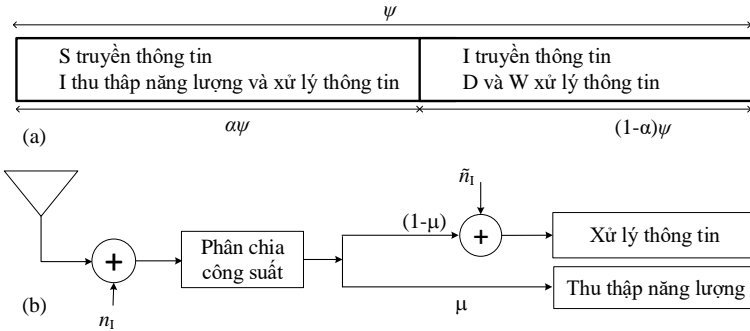


Hình 5.6: Mô hình EHUCRRN

Giả sử các kênh truyền độc lập và có phân bố Nakagami- m . Khi đó, hệ số các kênh truyền được ký hiệu là h_r với $t \in (S, I)$ và $r \in (I, R, W, D)$. Cụ thể, h_{SI} , h_{SR} , h_{IW} , h_{ID} , h_{IR} lần lượt là hệ số kênh truyền giữa các cặp nút S-I, S-R, I-W, I-D, I-R. Ngoài ra, $g_{ir} = |h_{ir}|^2$ được ký hiệu là độ lợi kênh truyền.

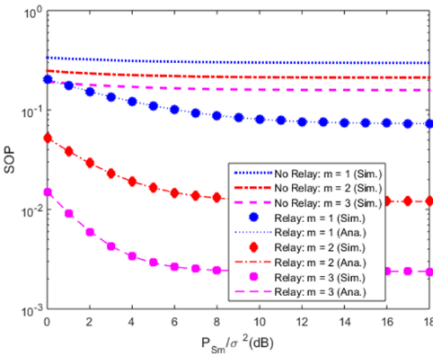
Sử dụng Matlab để viết các chương trình mô phỏng Monte-Carlo và tính toán theo (5.60) với các đường “Sim.” biểu diễn kết quả mô phỏng và “Ana.” biểu diễn kết quả tính toán. Ngoài ra, “No Relay” biểu diễn SOP của hệ thống truyền trực tiếp từ S đến D và “Relay” biểu diễn SOP cho hệ thống truyền qua nút chuyển tiếp I. Các kết quả cho thấy các đường “Sim.” và “Ana.” hoàn toàn trùng khớp với nhau, từ đó xác minh tính chính xác của (5.60). Hơn nữa, khi so sánh hiệu năng PLS giữa “No Relay” và “Relay” thì ta thấy hiệu năng PLS được cải

thiện đáng kể khi truyền chuyển tiếp qua nút I. Điều này chứng minh hiệu quả của giải pháp.

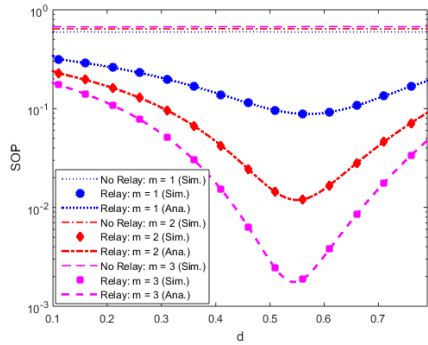


Hình 5.7: Thời gian của các giai đoạn và xử lý tín hiệu tại nút chuyển tiếp

- Hình 5.8 biểu diễn SOP trong EHUCRRN theo tỷ số công suất phát tối đa trên phương sai nhiễu P_{Sm} / σ^2 khi $\Lambda_1 = 0.4$ bit/s/Hz, $\alpha = 0.6$, $d = 0.5$, $\mu = 0.7$, $C_0 = 0.2$ bit/s/Hz và $I_t / \sigma^2 = 15$ dB. Kết quả này cho thấy hiệu năng PLS tăng khi P_{Sm} / σ^2 tăng. Điều này là hiển nhiên bởi vì việc tăng P_{Sm} / σ^2 sẽ giúp cho I có nhiều cơ hội hơn để thu được nhiều năng lượng hơn trong tín hiệu phát từ



Hình 5.8: SOP trong EHUCRRN theo P_{Sm} / σ^2

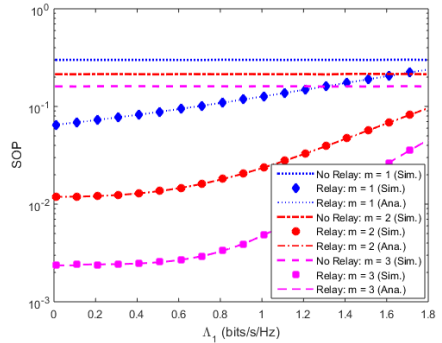
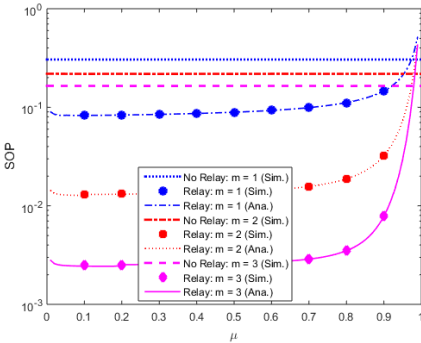


Hình 5.10: SOP của EHUCRRN theo d

S và khôi phục chính xác hơn thông điệp của S, từ đó làm giảm SOP trong giai đoạn 2. Tuy nhiên, khả năng bảo mật trở nên không đổi ở giá trị lớn của P_{Sm} / σ^2 . Khả năng bảo mật không đổi là do sự phân bổ công suất của I và S (theo (5.28))

và (5.37)), trong đó công suất phát của I và S không phụ thuộc vào P_{Sm} / σ^2 ở khoảng P_{Sm} / σ^2 có giá trị lớn, từ đó làm cho SOP không thay đổi. Ngoài ra, kết quả này còn cho thấy SOP giảm khi mức độ trầm trọng fading nhỏ (m lớn).

- Hình 5.10 minh họa SOP của EHUCRRN theo khoảng cách S-I (d) khi $C_0 = 0.2$ bits/s/Hz, $I_t / \sigma^2 = 9$ dB, $P_{\text{Sm}} / \sigma^2 = 13$ dB, $\alpha = 0.6$, $\mu = 0.7$ và $\Lambda_1 = 0.4$ bits/s/ Hz. Lưu ý rằng khi I không giải mã chính xác thông tin của S (nghĩa là khoảng cách S-I lớn) hoặc I chuyển tiếp tin đã được giải mã đến D không đáng tin cậy (nghĩa là khoảng cách I-D lớn) thì sự kiện dừng bảo mật xảy ra. Khi đó, một vị trí tối ưu của nút chuyển tiếp sẽ giúp cân bằng tốt giữa khả năng I có thể giải mã chính xác thông điệp của S và khả năng I có thể chuyển tiếp thông tin đã giải mã của S đến D để giảm thiểu tối đa SOP.



Hình 5.12: SOP của EHUCRRN theo μ Hình 5.13: SOP của EHUCRRN theo Λ_1

- Hình 5.12 minh họa SOP của EHUCRRN theo tỷ lệ phần trăm công suất μ khi $\alpha = 0.6$, $d = 0.5$, $C_0 = 0.2$ bits/s/Hz, $I_t / \sigma^2 = 9$ dB, $P_{\text{Sm}} / \sigma^2 = 13$ dB và $\Lambda_1 = 0.4$ bits/s/Hz. Kết quả này cho thấy tồn tại giá trị μ tối ưu (ví dụ, $\mu_{\text{opt}} = 0.08, 0.1, 0.12$ tương ứng $m = 1, 2, 3$ như minh họa trong Hình 6.6) mà làm cho hiệu năng PLS tốt nhất. Sự tồn tại của μ_{opt} được giải thích như sau. Tăng μ tạo ra nhiều cơ hội hơn cho I để thu thập năng lượng nhiều hơn, từ đó làm I tăng chất lượng thu tín hiệu trong giai đoạn 2, và cuối cùng làm cải thiện hiệu năng PLS. Tuy nhiên, việc tăng μ cũng làm giảm năng lượng cho bộ giải mã thông tin, từ đó làm giảm khả năng mà I giải mã chính xác thông tin của S

và dẫn đến SOP tăng ở giai đoạn 2. Vì vậy, để có được μ_{opt} thì cần phải đánh đổi độ tin cậy truyền tin của I và S trong hai giai đoạn.

- Hình 5.13 minh họa SOP của EHUCRRN theo hiệu suất phổ cho trước Λ_1 khi $\alpha = 0.6$, $\mu = 0.7$, $I_t / \sigma^2 = 12$ dB, $P_{\text{Sm}} / \sigma^2 = 15$ dB, $d = 0.5$ và $C_0 = 0.2$ bits/s/Hz. Hình này cho thấy SOP tăng theo Λ_1 , nghĩa là hiệu năng PLS giảm. Điều này được giải thích là vì Λ_1 càng cao thì khả năng I giải mã thành công thông điệp của S càng thấp, từ đó dẫn đến hiệu năng PLS giảm.

Tóm lại, các kết quả phân tích hiệu năng PLS trong EHUCRRN qua kênh truyền fading Nakagami- m ở trên tổng quát hơn so với các kết quả của [71] mà được phân tích hiệu năng PLS qua kênh truyền fading Rayleigh. Các kết quả này có thể áp dụng linh hoạt hơn với kênh truyền có các mức độ nghiêm trọng fading khác nhau. Hơn nữa, Hình 5.8 còn cho thấy rằng hiệu năng PLS của EHUCRRN cải thiện đáng kể so với hiệu năng của UCRN không có I. Cụ thể hơn, khi $m = 1$ với công suất phát thứ cấp trên phương sai nhiễu ở mức nhỏ nhất ($P_{\text{Sm}} / \sigma^2 \approx 0$ dB) thì SOP của EHUCRRN có giá trị vẫn thấp hơn SOP của UCRN không có I với công suất phát thứ cấp trên phương sai nhiễu ở mức lớn nhất ($P_{\text{Sm}} / \sigma^2 = 18$ dB), nghĩa là mức cải thiện hiệu năng trên 18 dB. Như vậy, so với kết quả của các công trình nghiên cứu khác thì kết quả phân tích SOP của EHUCRRN tổng quát hơn và chứng minh được khả năng cải thiện tốt hơn hiệu năng bảo mật.

CHƯƠNG 6 KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

6.1 Kết luận

Luận án đã hoàn thành tất cả các mục tiêu ban đầu đã đề ra với những đóng góp chính sau:

- Luận án đề xuất các mô hình mới của mạng vô tuyến nhận thức dạng nền và phân tích PLS của các mô hình này trong các điều kiện vận hành nghiêm ngặt và gần với thực tế. Những điểm mới trong các mô hình này là có xem xét đến các thông số như công suất phát cực đại của máy phát thứ cấp, ngưỡng công suất can nhiễu mà máy thu sơ cấp có thể chịu đựng, thông tin kênh truyền fading Rayleigh không hoàn hảo, kênh truyền fading Nakagami-m, kỹ thuật thu thập năng lượng sóng vô tuyến, Ngoài ra, hiệu năng PLS của các mô hình này cũng được phân tích và đánh giá.
- Luận án đề xuất hai giải pháp nâng cao hiệu năng PLS cho UCRN với thiết bị gây nhiễu hữu ích và mạng chuyển tiếp vô tuyến nhận thức dạng nền thu thập năng lượng. Các kết quả phân tích đã chứng minh hai giải pháp này đã cải thiện đáng kể hiệu năng bảo mật. Ngoài ra, các kết quả phân tích có thể sử dụng để tối ưu hiệu năng bảo mật và thiết kế mạng.
- Luận án đề xuất các biểu thức toán học mới để tính xác suất dừng bảo mật của các mô hình và các giải pháp. Tất cả các biểu thức này đều được kiểm chứng tính chính xác bằng mô phỏng Monte-Carlo. Các biểu thức này có ý nghĩa rất quan trọng trong việc đánh giá khả năng bảo mật, tối ưu hiệu năng và thiết kế mạng.

Những đóng góp trên là cơ sở khoa học vững chắc cho các công trình nghiên cứu sau này về bảo mật lớp vật lý, mạng vô tuyến nhận thức và thu thập năng

lượng sóng vô tuyến. Những đóng góp này rất cần thiết trong thực tế. Luận án là công trình nghiên cứu hoàn toàn mới, đáp ứng yêu cầu của triển khai thực tế các hệ thống thông tin vô tuyến hiện nay và theo kịp xu hướng nghiên cứu của thế giới.

6.2 Hướng nghiên cứu tiếp theo

- Kênh truyền vô tuyến có nhiều loại như Rayleigh, Nakagami- m , Weibull, v.v. Mỗi loại kênh truyền sẽ phù hợp để mô hình hóa kênh truyền cho một môi trường riêng. luận án này đã thực hiện phân tích hiệu năng PLS với các kênh truyền fading Rayleigh và Nakagami- m . Tuy nhiên, hai loại kênh truyền này chưa phải tổng quát nhất. Vì vậy, hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án là xem xét các kênh truyền tổng quát hơn như kênh truyền có Line of Sight (LoS) [75], [76], kênh truyền Weibull [77], [78], ... vào bài toán phân tích hiệu năng hiện tại.

- CRN có ba cơ chế hoạt động. luận án này chỉ nghiên cứu về bảo mật lớp vật lý của CRN dạng nền. Do đó, hướng nghiên cứu tiếp theo của luận án là xem xét các cơ chế còn lại (phủ [79], [80] và đan xen [81], [82]) để hoàn thiện nghiên cứu về CRN.

- EHUCRRN ở chương 5 và các công trình liên quan cho thấy sử dụng nút chuyển tiếp giúp nâng cao hiệu năng PLS. Tuy nhiên, các công trình này được khảo sát trên mặt phẳng hai chiều, từ đó chưa phản ánh được tọa độ các nút trong không gian thực. Vì vậy, sử dụng thiết bị bay không người lái như trong [84], [85] đóng vai trò như thiết bị chuyển tiếp và khảo sát bài toán trong không gian ba chiều là hướng nghiên cứu tiếp theo đáng quan tâm.

- Gần đây, đa truy nhập không trực giao (NOMA) đã trở thành một kỹ thuật đa truy nhập phổ biến và được ưa chuộng hơn đa truy nhập trực giao (OMA) cho truyền thông vô tuyến trong thời gian gần đây. Ưu điểm chính của NOMA là cải thiện đáng kể hiệu suất phổ so với OMA [86]. Vì vậy, kết hợp NOMA với vô tuyến nhận thức sẽ làm tăng thêm hiệu suất sử dụng phổ tần. Do đó, NOMA là hướng nghiên cứu tiếp theo cần được quan tâm đúng mức.