

BỘ THÔNG TIN VÀ TRUYỀN THÔNG
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



NGUYỄN ANH TUẤN

**NGHIÊN CỨU GIẢI PHÁP PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ
HIỆU NĂNG HỆ THỐNG THÔNG TIN VÔ TUYẾN
THỂ HỆ MỚI SỬ DỤNG KỸ THUẬT THU THẬP
NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN**

Chuyên ngành: Kỹ thuật viễn thông

Mã số: 9.52.02.08

TÓM TẮT LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà nội-2020

**CÔNG TRÌNH ĐƯỢC HOÀN THÀNH TẠI:
HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

TẬP THỂ NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. PGS.TS Võ Nguyễn Quốc Bảo.**
- 2. TS. Trương Trung Kiên.**

PHẢN BIỆN 1:.....

PHẢN BIỆN 2:.....

PHẢN BIỆN 3:.....

Luận án được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận cấp Học viện theo Quyết định số...../QĐ-HV ngày...tháng...năm 2020 của Giám đốc Học viện Công nghệ Bưu chính viễn thông, họp tại Học viện công nghệ bưu chính viễn thông vào hồi.....giờ.....ngày.....tháng.....năm 2020

Có thể tìm hiểu Luận án tại:

- Thư viện Học viện Công nghệ bưu chính viễn thông.
- Thư viện Quốc gia Việt Nam.

MỞ ĐẦU

1. Bối cảnh nghiên cứu

Gần đây, hướng nghiên cứu về thu thập năng lượng từ tần số vô tuyến điện đã được các nhà khoa học quan tâm đặc biệt. Xu hướng công nghệ này hứa hẹn được áp dụng cho hệ thống thông tin vô tuyến thế hệ mới, đặc biệt là hệ thống thông tin di động 5G, hệ thống thông tin vô tuyến cảm biến, kết nối vạn vật (IoT- Internet of Thing). Có thể nhận thấy có hai phương thức truyền năng lượng vô tuyến đó là truyền năng lượng trường gần (cảm biến không dây); và truyền năng lượng trường xa là truyền năng lượng từ thiết bị có nguồn năng lượng vô hạn tới thiết bị cần nạp năng lượng ở cự ly nhất định. Ứng dụng của phương thức trường gần phổ biến hiện nay là các loại sạc không dây cho thiết bị điện thoại di động. Tuy nhiên, nhược điểm của phương thức này là thiết bị sạc và thiết bị được thu thập năng lượng được đặt sát vào nhau. Phương thức này không phù hợp với các thiết bị như thiết bị y tế gắn trên cơ thể con người, thiết bị di động, thiết bị cho mục đích an ninh, quốc phòng. Chính vì vậy, truyền năng lượng không dây trường xa đang được quan tâm nghiên cứu.

Để giải quyết những hạn chế của công nghệ thu thập năng lượng từ tự nhiên và thu thập năng lượng trường gần, tiến đến áp dụng cho hệ thống thông tin di động, các nhà khoa học gần đây quan tâm lại đến công nghệ thu thập từ tín hiệu vô tuyến với ý tưởng xuất phát từ Tesla. Các nghiên cứu này đã lần đầu tiên đề xuất mô hình cho phép máy phát truyền năng lượng vô tuyến và tín hiệu đồng thời. Gần đây, Zhou đã đề xuất những mô hình cụ thể cho các máy thu vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng.

Một trong những nhược điểm của mạng vô tuyến áp dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến hiện nay là hiệu suất thu thập và năng lượng thu thập qua kênh truyền fading thường không cao dẫn đến vùng phủ sóng của các mạng này rất hạn chế. Để khắc phục nhược điểm này, kỹ thuật chuyển tiếp và truyền thông cộng tác thường được sử dụng để mở rộng vùng phủ sóng và nâng cao hiệu năng của mạng vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Do đó, trong phạm vi nghiên cứu của luận án, Nghiên cứu sinh tập trung nghiên cứu hệ thống thông tin vô tuyến chuyển tiếp có sử dụng kỹ thuật truyền năng lượng không dây từ một nguồn năng lượng ổn định và thu thập năng lượng vô tuyến tại nút chuyển tiếp nhằm mục đích đánh giá và đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu năng mạng vô tuyến chuyển tiếp.

2. Đối tượng, phạm vi và phương pháp nghiên cứu

a) Đối tượng nghiên cứu

Đối tượng nghiên cứu của luận án là hệ thống thông tin vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Hệ thống thông tin vô tuyến được nghiên cứu trong luận án tập chung vào hệ thống vô tuyến chuyển tiếp gồm: chuyển tiếp một chiều, chuyển tiếp hai chiều và hệ thống vô tuyến nhận thức. Về kỹ thuật thu thập năng lượng gồm thu thập năng lượng từ nguồn nội tại của hệ thống hoặc từ nguồn năng lượng ổn định bên ngoài hệ thống.

b) Phạm vi nghiên cứu:

Phạm vi nghiên cứu của luận án bao gồm: (i) Lớp vật lý (physical layer) trong mô hình OSI (Open Systems Interconnection Reference Model); (ii) Tham số xác suất dừng hệ thống đánh giá hiệu năng hệ thống; (iii) Kênh truyền fading: Rayleigh, Nakagami- m , full-duplex, kỹ thuật MIMO.

c) Phương pháp nghiên cứu

Trong luận án này, ba phương pháp nghiên cứu đó là: phương pháp phân tích thống kê; phương pháp mô phỏng Monte-Carlo; phương pháp so sánh và đối chiếu.

Trước tiên, xây dựng mô hình toán cho các mô hình hệ thống nghiên cứu, sau đó sử dụng phương pháp phân tích thống kê và tiến hành phân tích hiệu năng của hệ thống dựa trên các tham số hiệu năng quan trọng, ví dụ như là xác suất dừng hệ thống. Sau đó, để kiểm chứng kết quả lý thuyết đạt được trên mô hình thống kê, thực hiện mô phỏng Monte-Carlo trên Matlab. Sự trùng khớp giữa kết quả mô phỏng và kết quả lý thuyết là minh chứng thể hiện sự đúng đắn của mô hình toán đã đề xuất. Cuối cùng, để chứng minh các ưu điểm của giao thức đề xuất trong luận án, sử dụng phương pháp so sánh, đối chiếu đối với mô hình đã được công bố.

Để triển khai các phương pháp nghiên cứu nêu trên, tiến hành thực hiện các bước như sau:

- ✓ Liên tục cập nhật các kết quả nghiên cứu trong lĩnh vực. Đánh giá các hướng nghiên cứu đó và các kết quả đạt được tương ứng bên cạnh các điều kiện giả sử đi kèm và từ đó đề xuất mô hình/giao thức tốt hơn.
- ✓ Dựa trên các mô hình/giao thức đề xuất: Lựa chọn các mô hình kênh truyền fading (Rayleigh, Nakgami- m) phù hợp và xây dựng mô hình toán học. Đồng thời lựa chọn thông số hiệu năng phù hợp, chứng minh được ưu điểm của mô hình/giao thức. Phân tích các thông số hiệu năng, biểu diễn ở dạng đóng (closed-form expression).
- ✓ Xây dựng chương trình mô phỏng trên phần mềm Matlab.
- ✓ So sánh kết quả đạt được với các nghiên cứu trước trong cùng điều kiện.
- ✓ Khảo sát đặc tính của hệ thống và ảnh hưởng của các tham số mạng và kênh truyền lên hiệu năng của hệ thống.
- ✓ Xây dựng và giải bài toán tối ưu hiệu năng của hệ thống.

3. Cấu trúc luận án

Luận án được cấu trúc bao gồm 04 chương và kết luận, kiến nghị nghiên cứu tiếp theo. Cụ thể như sau:

Chương 1: Tổng quan những vấn đề chung.

Chương 2: Phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống thông tin vô tuyến chuyển tiếp một chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng.

Chương 3: Phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống vô tuyến chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến.

Chương 4: Phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống thông tin vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến.

Phần kết luận và hướng nghiên cứu tương lai

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NHỮNG VẤN ĐỀ CHUNG

1.3. Xác suất dừng hệ thống vô tuyến

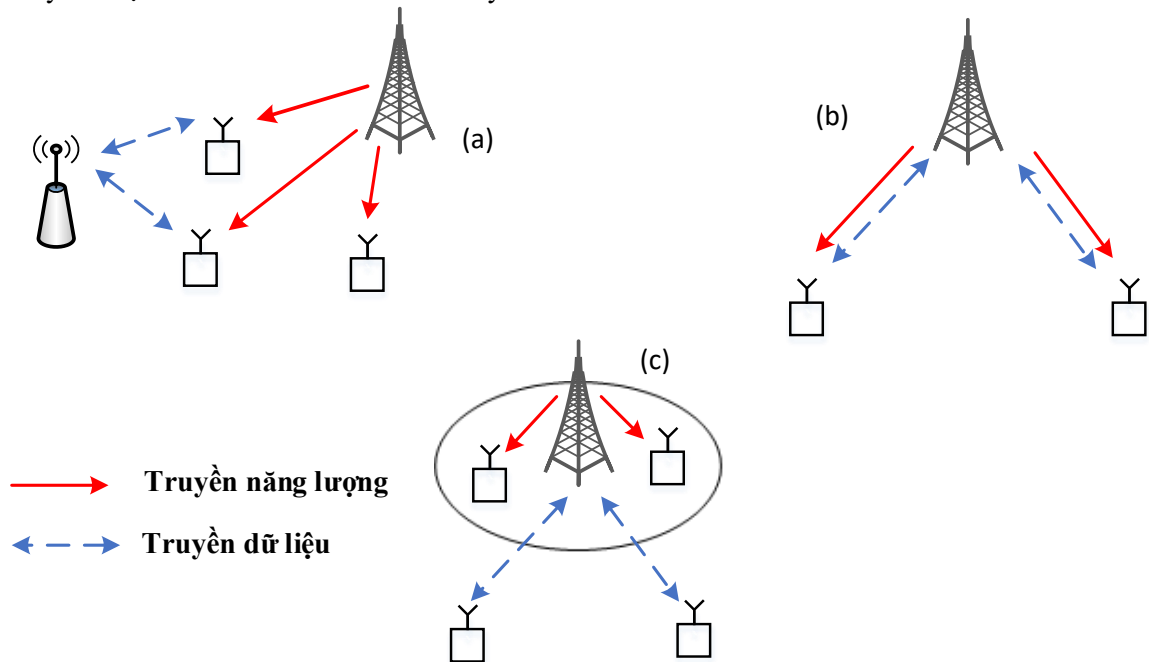
Xác suất dừng hệ thống là tham số đánh giá chất lượng hệ thống vô tuyến. Khi truyền tín hiệu vô tuyến trong môi trường đa đường thì tín hiệu thu được tại máy thu là một biến ngẫu nhiên. Nếu tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR tức thời tại đầu vào máy thu nhỏ hơn một mức ngưỡng xác định thì gần như máy thu không thể giải mã thành công tín hiệu thu được. Việc này sẽ xấu hơn nếu khoảng thời gian giữa các đường tín hiệu đến có độ trễ lớn. Trong môi trường fading chậm, xác suất dừng hệ thống OP (Outage Probability) được sử dụng để đánh giá chất lượng hệ thống vô tuyến. OP được định nghĩa là xác suất tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương tức thời tại đầu vào máy thu γ_R nhỏ hơn ngưỡng cho trước γ_{th} . Biểu diễn dạng toán học của OP như sau:

$$OP = P(\gamma_R < \gamma_{th}) = \int f_{\gamma_R}(\gamma) d\gamma, \quad (1.3)$$

Với, $f_{\gamma_R}(\gamma)$ là hàm PDF của SNR tức thời tại máy thu.

1.4. Tổng quan kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến

Trong thực tế, có ba mô hình mạng truyền năng lượng không dây WPT (Wireless Power Transfer) và thu thập năng lượng vô tuyến (Energy Harvesting) như sau: (a) Một máy phát có nguồn năng lượng ổn định và truyền năng lượng không dây cho các nút mạng. Các nút mạng này dùng năng lượng thu thập được để phát/thu dữ liệu tới các nút mạng khác. (b) Một máy phát có nguồn năng lượng ổn định thực hiện đồng thời truyền năng lượng không dây và dữ liệu. Các nút mạng dùng năng lượng vô tuyến thu được để thu và phát dữ liệu tới máy phát đó. (c) Một máy phát vô tuyến phát/thu dữ liệu tới các nút mạng này và các nút mạng vô tuyến khác thu thập năng lượng vô tuyến từ máy phát này. Cụ thể ba mô hình truyền năng lượng không dây và thu thập năng lượng vô tuyến được mô tả như Hình 1.3 dưới đây:



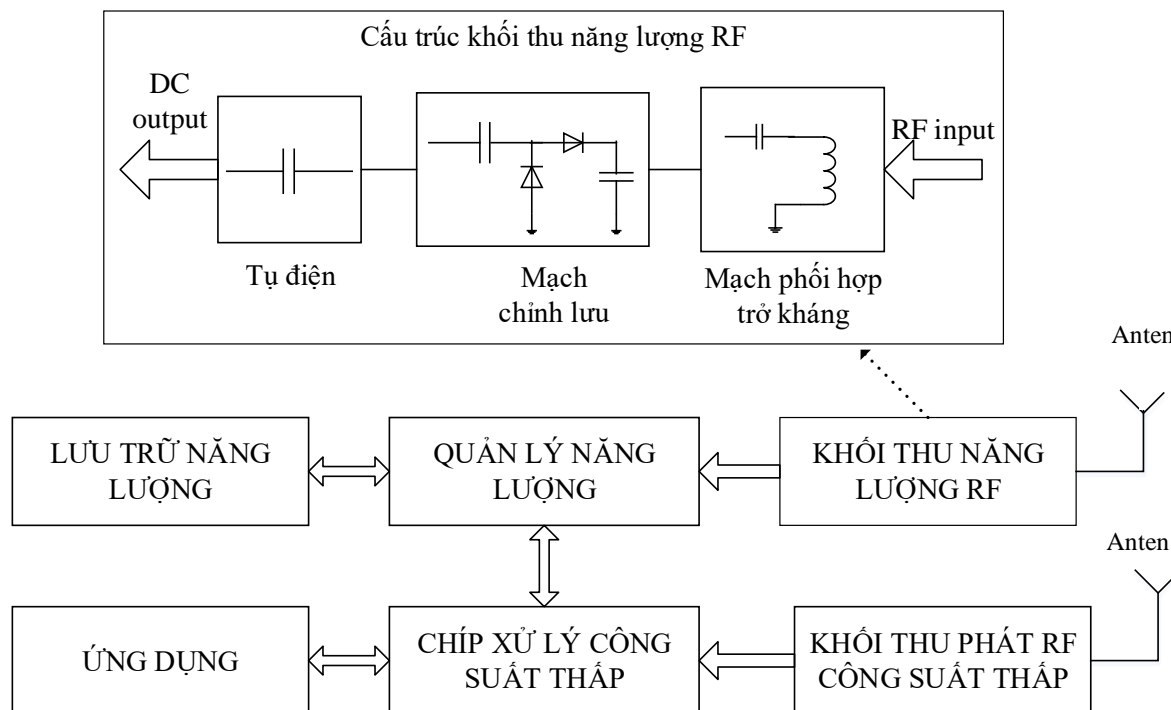
Hình 1. 3. Mô hình truyền năng lượng không dây

Mô hình máy phát truyền đồng thời năng lượng vô tuyến và dữ liệu tới các nút trong mạng có nguồn năng lượng hạn chế đã được quan tâm nghiên cứu. Gần đây, các nhà nghiên cứu bắt đầu

ngiên cứu tới mô hình nguồn năng lượng độc lập vô hạn truyền năng lượng không dây tới các nút mạng của hệ thống thông tin vô tuyến có nguồn năng lượng hạn chế.

1.4.1. Kiến trúc vật lý máy thu năng lượng vô tuyến

Sơ đồ khối thiết bị thu thập năng lượng vô tuyến như sau:



Hình 1. 4. Sơ đồ khối thiết bị thu thập năng lượng vô tuyến

1.5. Tổng quan tình hình nghiên cứu về kỹ thuật thu thập năng lượng

Thu thập năng lượng vô tuyến là một trong những chủ đề nghiên cứu chính của các nhà khoa học trên thế giới hiện nay [13]. Trong chủ đề này có thể tạm chia ra làm nhiều hướng nghiên cứu, cụ thể là:

- Thiết kế mạch (Circuit Design) thu thập năng lượng và thu thông tin đồng thời và không đồng thời, thiết kế mạch chia năng lượng theo thời gian hay theo năng lượng.
- Thiết kế các giao thức mạng vô tuyến thu thập năng lượng kết hợp với các công nghệ tiên tiến ở lớp vật lý: kỹ thuật đa anten (MIMO), truyền song công, vô tuyến nhận thức, bảo mật lớp vật lý, v.v.
- Đề xuất các phương pháp tính toán chính xác và xấp xỉ và tối ưu hiệu năng của mạng thu thập năng lượng.

1.6. Những nghiên cứu liên quan và hướng nghiên cứu của luận án

Qua khảo sát các nghiên cứu tiêu biểu, Nghiên cứu sinh đưa ra những vấn đề chính mà Luận án cần tập trung nghiên cứu giải quyết như sau:

- Đối với hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng, chưa có nhiều nghiên cứu trên kênh truyền ước lượng không hoàn hảo, tức là đã có đầy đủ thông tin về trạng thái kênh truyền (CSI). Trong thực tế thì rất khó có được CSI đầy đủ. Do đó, chỉ khi nghiên cứu với kênh truyền không hoàn hảo sẽ đánh giá chính xác hơn, sát thực hơn về chất

lượng và hiệu năng hệ thống. Một số nghiên cứu chưa đưa ra được công thức dạng tường minh cho xác suất dừng hệ thống nên việc đánh giá hiệu năng hệ thống chưa đạt được kết quả mong muốn. Luận án sẽ đưa ra nghiên cứu với kênh truyền không hoàn hảo và xác định công thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống.

- Đối với hệ thống vô tuyến chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng chưa có nhiều nghiên cứu trên kênh truyền Nakagami- m , một số nghiên cứu dừng lại ở kênh truyền fading Rayleigh, đây là kênh truyền tồi nhất trong thông tin vô tuyến. Các nghiên cứu ở kênh truyền Nakagami- m sẽ có ý nghĩa khoa học nhiều hơn. Một số nghiên cứu đã đánh giá chất lượng của hệ thống vô tuyến nhưng một số công trình nghiên cứu chưa đưa ra được công thức dạng đóng của xác suất dừng hệ thống hay dung lượng hệ thống, chỉ biểu diễn ở dạng chuỗi vô hạn. Luận án sẽ nghiên cứu hệ thống vô tuyến hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến với kênh truyền Nakagami- m và đề xuất phương pháp giải tích mới để xác định công thức tính xác suất dừng hệ thống.
- Với hệ thống vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng đã có một số nghiên cứu nhưng vấn đề thu thập năng lượng linh động từ một nguồn ngoài ổn định và nguồn phát công suất lớn của mạng sơ cấp chưa được nghiên cứu để làm nâng cao hơn nữa hiệu năng mạng vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến. Nếu chỉ nghiên cứu áp dụng kỹ thuật thu thập năng lượng từ mạng sơ cấp thì sẽ làm cho chất lượng hệ thống thấp vì phải đảm bảo mức ngưỡng công suất không gây nhiễu cho hệ thống thứ cấp. Tuy nhiên việc đề xuất phương thức sử dụng linh hoạt hai nguồn năng lượng và các kênh truyền gây nhiễu cho mạng vô tuyến nhận thức từ mạng sơ cấp sẽ dẫn tới xác định công thức cho xác suất dừng hệ thống trở lên phức tạp hơn rất nhiều. Luận án sẽ nghiên cứu mạng vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng linh hoạt từ nguồn ngoài và nguồn máy phát của mạng sơ cấp, đồng thời xây dựng mô hình toán học của hệ thống, đề xuất phương pháp giải tích mới để xác định công thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống và kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo.

Kết luận chương 1:

Chương 1 đã trình bày những kiến thức chung về hệ thống vô tuyến chuyển tiếp, mô hình toán học kênh truyền Nakagami- m , xác suất dừng hệ thống vô tuyến là những tham số ảnh hưởng tới hiệu năng hệ thống vô tuyến. Đây là những nội dung quan trọng liên quan tới kết quả nghiên cứu về phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống vô tuyến được nghiên cứu trong luận án.

Đề tài luận án nghiên cứu tập trung vào hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng nên khái niệm về kỹ thuật thu thập năng lượng, mô hình máy thu năng lượng vô tuyến, giao thức thu thập năng lượng tại máy thu năng lượng vô tuyến được trình bày trong Chương 1. Có hai giao thức thu thập năng lượng cơ bản gồm có giao thức phân chia theo thời gian và giao thức phân chia theo mức năng lượng.

Tại chương 1 cũng trình bày tổng quan các nghiên cứu liên quan về hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. NCS đã khảo sát đánh giá nghiên cứu trong và ngoài nước, đồng thời đánh giá những ưu điểm, hạn chế của những kết quả nghiên cứu đã công bố. Trên cơ sở đó, NCS đề ra hướng nghiên cứu chính của gồm ba phần: thứ nhất, NCS nghiên cứu hệ thống vô

tuyến chuyển tiếp một chiều, đánh giá hiệu năng của hệ thống với kênh truyền ước lượng không hoàn hảo, kênh truyền Nakagami- m , kỹ thuật đa ăng ten; thứ hai là NCS nghiên cứu hệ thống vô tuyến chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng, phân tích đánh giá hiệu năng hệ thống trên kênh truyền Nakagami- m ; thứ ba là, NCS nghiên cứu đánh giá hiệu năng hệ thống vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Kết quả nghiên cứu đặt mục tiêu là xác định công thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống và đánh giá tính chính xác của phương pháp giải tích bằng mô phỏng Monte-Carlo.

CHƯƠNG 2. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN CHUYỂN TIẾP MỘT CHIỀU SỬ DỤNG KỸ THUẬT THU THẬP NĂNG LƯỢNG

2.1 Giới thiệu

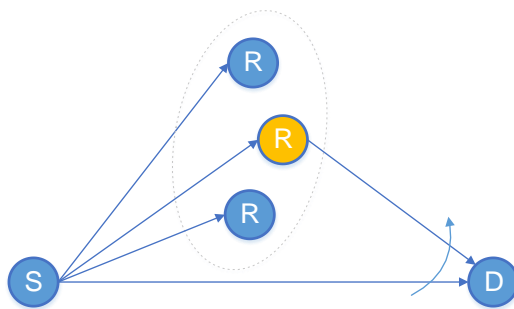
Tại Chương 2, Luận án đã thực hiện nghiên cứu đánh giá hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Chương 2 khảo sát đánh giá với ba loại hình khác nhau của hệ thống chuyển tiếp một chiều, bao gồm: (i) Hệ thống một chiều với kênh truyền không hoàn hảo, sử dụng nhiều nút chuyển tiếp (R); (ii) Hệ thống một chiều có nút phát, nút thu sử dụng đa ăng ten; (iii) Hệ thống một chiều sử dụng truyền song công full-duplex, có nguồn cung cấp năng lượng ổn định bên ngoài. Với ba điều kiện khác nhau của Hệ thống chuyển tiếp một chiều, nội dung Chương 2 trình bày cụ thể mô hình toán học hệ thống, các bước phân tích giải tích cụ thể để đưa ra biểu thức dạng đóng của xác suất dừng hệ thống.

Đóng góp của chương 2 được trình bày tại công trình công bố số 1, 2, 3.

2.2. Phân tích hiệu năng hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều với kênh truyền không hoàn hảo

2.2.1. Mô hình hệ thống

Tại phần này sẽ xem xét hệ thống truyền gia tăng thu thập năng lượng có một nút nguồn (S), một nút đích (D) và N nút chuyển tiếp thu thập năng lượng, lần lượt ký hiệu là R_1, \dots, R_N . Khác với mạng chuyển tiếp gia tăng truyền thông, các nút chuyển tiếp ở đây thu thập năng lượng từ nút nguồn và sử dụng năng lượng này để hỗ trợ đường truyền trực tiếp



Hình 2. 1. Mô hình hệ thống chuyển tiếp truyền gia tăng

2.2.2. Xác định xác suất dừng hệ thống:

a) Xác suất dừng hệ thống đối với hệ thống phân chia năng lượng theo thời gian

Công thức xác định xác suất dừng hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr \left[\frac{1-\alpha}{2} \log_2(1+\gamma_{\text{SD}}) < \mathcal{R}_t \right] \Pr \left[\frac{1-\alpha}{2} \log_2(1+\gamma_{\mathcal{R}}) < \mathcal{R}_t \right] \\ &= F_{\gamma_{\text{SD}}} \left(2^{\frac{2\mathcal{R}_t}{1-\alpha}} - 1 \right) F_{\gamma_{\mathcal{R}}} \left(2^{\frac{2\mathcal{R}_t}{1-\alpha}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.29)$$

b) Xác suất dừng hệ thống đối với hệ thống phân chia năng lượng theo ngưỡng công suất:

Xác suất dừng của hệ thống được viết như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr \left[\frac{1}{2} \log_2(1+\gamma_{\text{SD}}) < \mathcal{R}_t \right] \Pr \left[\frac{1}{2} \log_2(1+\gamma_{\mathcal{R}}) < \mathcal{R}_t \right] \\ &= F_{\gamma_{\text{SD}}} \left(2^{2\mathcal{R}_t} - 1 \right) F_{\gamma_{\mathcal{R}}} \left(2^{2\mathcal{R}_t} - 1 \right). \end{aligned} \quad (2.30)$$

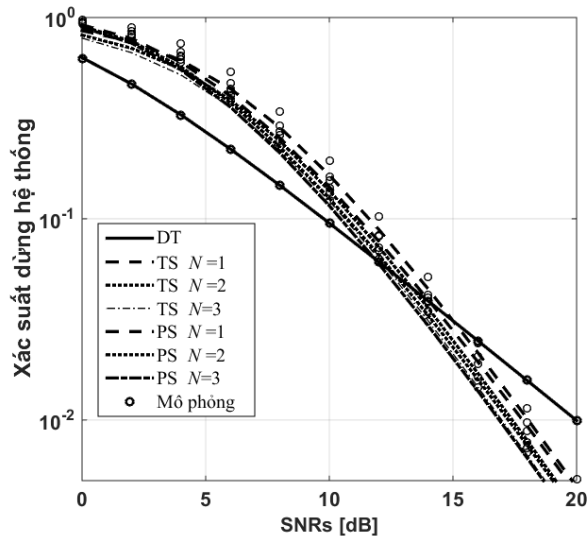
Với:

$$F_{\gamma_{\text{SD}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\eta_{\text{SD}}}\right) \quad (2.31)$$

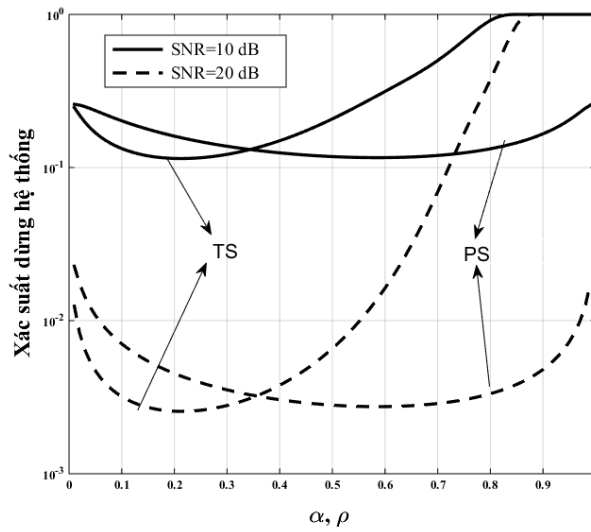
$$\begin{aligned} F_{\gamma_{\mathcal{R}}}(\gamma) &= 1 - \sum_{m=1}^M \binom{M}{m} (-1)^{m-1} \frac{m}{\bar{\gamma}_{\text{SR}} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]} \\ &\quad \times 2 \sqrt{\frac{\gamma \bar{\gamma}_{\text{SR}} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]}{\chi \lambda_{\text{RD}} m}} \\ &\quad \times \text{BesselK} \left[1, 2 \sqrt{\frac{\gamma m}{\chi \lambda_{\text{RD}} \bar{\gamma}_{\text{SR}} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]}} \right] \end{aligned} \quad (2.34)$$

Thay (2.31) và (2.34) lần lượt vào (2.29) và (2.30) xác định được dạng đóng của công thức tính xác suất dừng hệ thống cho hai trường hợp TS và PS.

2.2.3. Kết quả mô phỏng và phân tích



Hình 2. 2. Xác suất dừng hệ thống theo tỷ số tín hiệu trên nhiễu

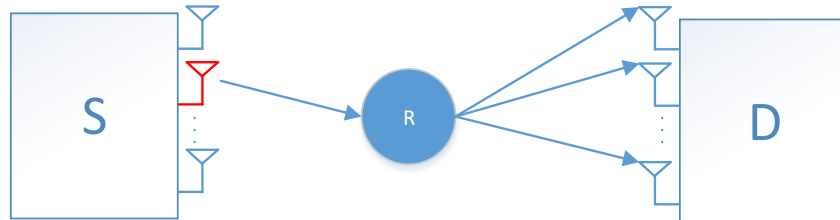


Hình 2. 3. Ảnh hưởng của α lên xác suất dừng hệ thống TS và ρ lên xác suất dừng hệ thống PS.

2.3. Phân tích hiệu năng mạng vô tuyến chuyển tiếp một chiều sử dụng kỹ thuật đa anten

Trong phần này sẽ nghiên cứu áp dụng kỹ thuật lựa chọn anten phía máy phát (TAS-Transmit Antenna Selection) và kỹ thuật kết hợp tối ưu tại phía nút đích (MRC-Maximal Raito Combining) để nâng cao hiệu năng của mạng chuyển tiếp hai chặng thu thập năng lượng. Để đánh giá hiệu năng hệ thống, sẽ phân tích xác suất dừng ở kênh truyền fading Rayleigh. Các kết quả phân tích sẽ được kiểm chứng bởi mô phỏng Monte-Carlo trên phần mềm Matlab.

2.3.1. Mô hình hệ thống



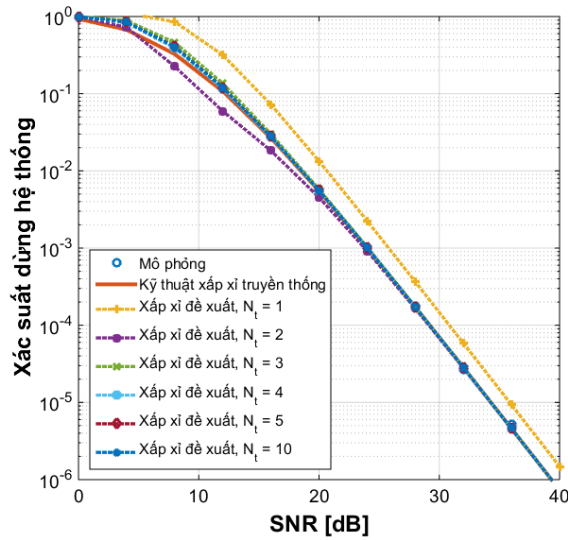
Hình 2. 4. Mô hình lựa chọn nút chuyển tiếp từng phần

2.3.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

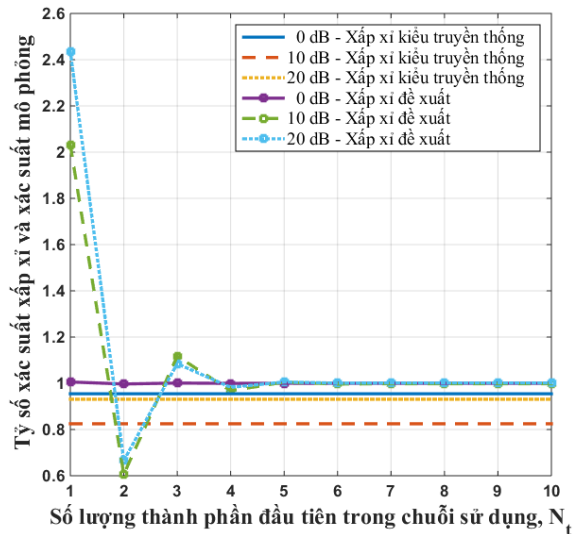
Công thức xác định xác suất dừng hệ thống như sau:

$$\begin{aligned}
OP \approx & 1 - \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=0}^{N_D-1} \sum_{k=0}^{N_t} \frac{(-1)^{i+k-1}}{j!k!} \binom{N_S}{i} \frac{i}{\lambda_1} \left(\frac{\gamma_{th}}{2\epsilon\alpha P_S \lambda_2} \right)^{k+j} \\
& \times \left[\frac{(-1)^{j+k}}{(j+k-1)!} \left(\frac{i}{\lambda_1} \right)^{j+k-1} \text{Ei} \left(-\frac{i}{\lambda_1} \frac{\gamma_{th}}{P_S/N_0} \right) \right. \\
& \left. + \frac{e^{-\frac{i}{\lambda_1} \frac{\gamma_{th}}{P_S/N_0}}}{\left(\frac{\gamma_{th}}{P_S/N_0} \right)^{j+k-1}} \sum_{\ell=0}^{j+k-2} \frac{(-1)^\ell \left(\frac{i}{\lambda_1} \right)^\ell \left(\frac{\gamma_{th}}{P_S/N_0} \right)^\ell}{(j+k-1)(j+k-2)\dots(j+k-1-\ell)} \right]
\end{aligned} \tag{2.61}$$

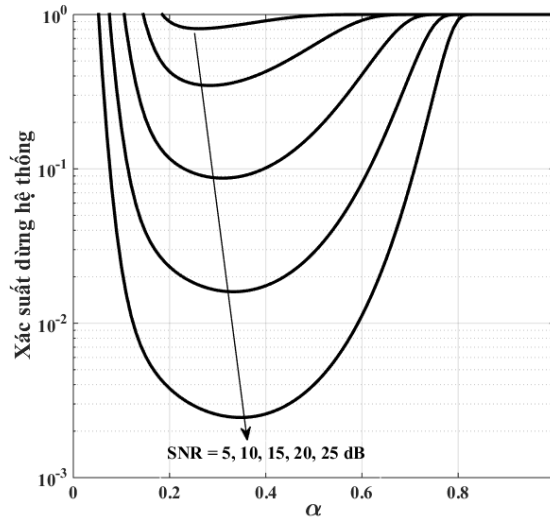
2.3.3. Kết quả mô phỏng và phân tích



Hình 2.8. So sánh kỹ thuật xấp xỉ đề xuất và kỹ thuật xấp xỉ truyền thống



Hình 2.9. Tỷ số xác suất dừng xấp xỉ và xác suất dừng mô phỏng

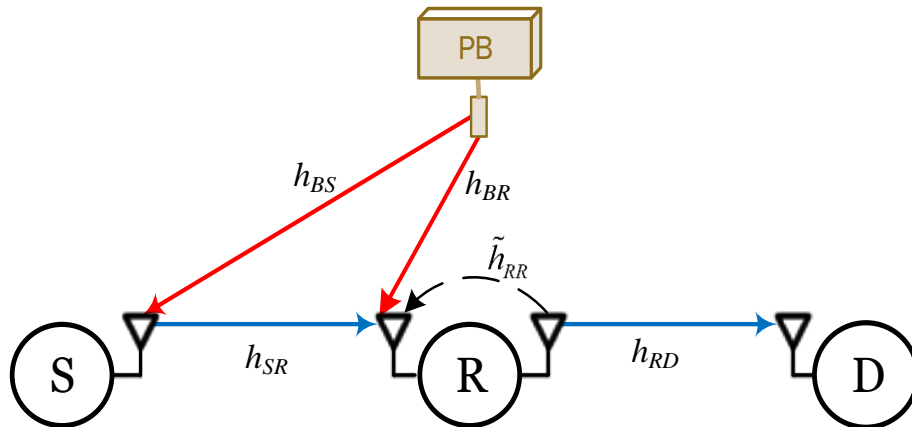


Hình 2.10. Xác suất dừng theo hệ số thời gian thu thập năng lượng với các trường hợp tỷ số tín hiệu trên nhiễu khác nhau.

2.4. Hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều full-duplex

Tại phần này, phân tích đánh giá mạng vô tuyến với một nút chuyển tiếp sử dụng truyền thông Full-duplex và nhận năng lượng không dây từ một nguồn ngoài (Beacon) có đa anten, khác với các nghiên cứu được nêu ở trên. Nguồn ngoài có nhiều anten cũng sẽ tăng khả năng truyền năng lượng không dây. Thêm vào đó, việc phân tích đối với kênh truyền Nakagami-m. Bằng phương pháp giải tích tìm công thức dạng tường minh của hệ thống, phần này cũng đưa ra một số đề xuất mới với việc xem xét, đánh giá SIC với nhiều tham số kênh truyền, số lượng anten của Beacon, thời gian cho thu nhận năng lượng tại nút chuyển tiếp và khả năng SIC. Kết quả nghiên cứu cũng chỉ ra hiệu năng hệ thống bị ảnh hưởng lớn với RSI của chế độ Full-duplex, đặc biệt là ở miền SNR cao. Đồng thời, hiệu năng hệ thống đạt được bão hòa sớm khi RSI đủ lớn. Các kết quả phân tích được kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo.

2.4.1. Mô hình hệ thống



Hình 2.13. Mô hình hệ thống chuyển tiếp Full-duplex

2.4.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

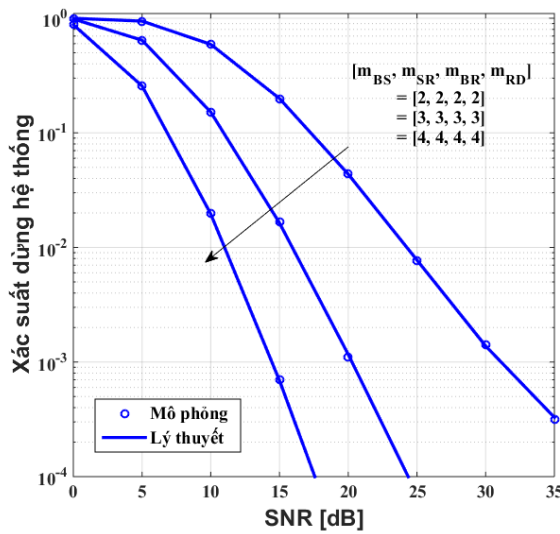
$$OP = OP_1 + OP_2 - OP_1 OP_2, \tag{2.75}$$

$$OP_1 = 1 - (\lambda_{BS} m_{BS})^{m_1} \frac{1}{\Gamma(m_{BS})} \sum_{k=0}^{m_{SR}-1} \frac{1}{k!} (\mathcal{X}_1 \lambda_{SR} m_{SR})^k 2 \left(\frac{\mathcal{X}_1 m_{SR} \lambda_{SR}}{m_{BS} \lambda_{BS}} \right)^{\frac{m_{BS}-k}{2}} K_{m_{BS}-k} \left(2 \sqrt{\frac{\mathcal{X}_1 m_{SR} \lambda_{SR}}{m_{BS} \lambda_{BS}}} \right), \tag{2.80}$$

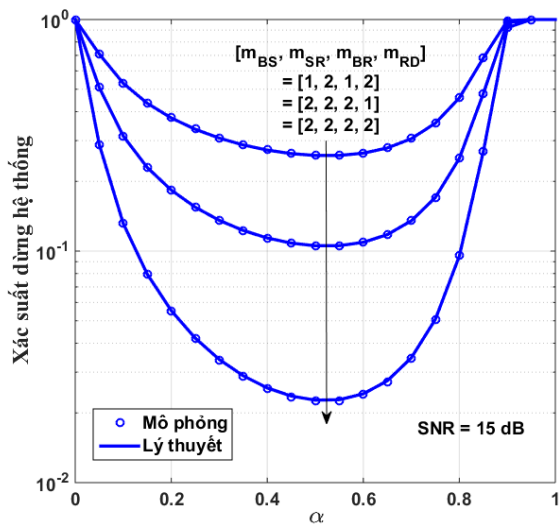
$$OP_2 = 1 - (\lambda_{BR} m_{BR})^{m_{BR}} \frac{1}{\Gamma(m_{BR})} \sum_{l=0}^{m_{RD}-1} \frac{1}{l!} (\mathcal{X}_2 m_{RD} \lambda_{RD})^l 2 \left(\frac{\mathcal{X}_2 \lambda_{RD} m_{RD}}{\lambda_{BR} m_{BR}} \right)^{\frac{m_{BR}-l}{2}} K_{m_{BR}-l} \left(2 \sqrt{\frac{\mathcal{X}_2 \lambda_{RD} m_{RD}}{\lambda_{BR} m_{BR}}} \right). \tag{2.81}$$

Thay (2.80), (2.81) vào (2.75) được công thức tính xác suất dừng hệ thống.

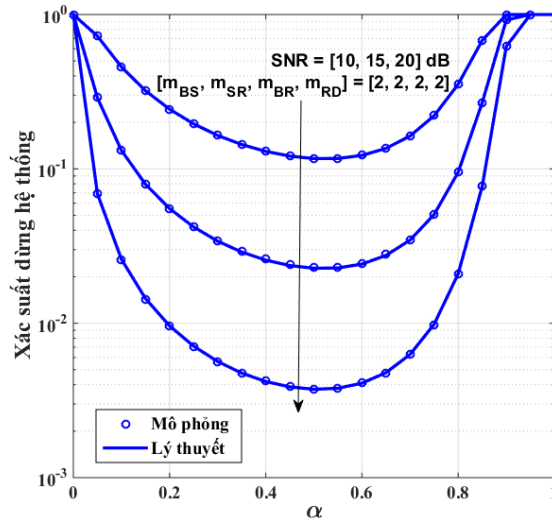
2.4.3 Kết quả mô phỏng và phân tích



Hình 2.14. Khảo sát OP theo SNR với tham số pha đình m khác nhau.



Hình 2.16. Khảo sát ảnh hưởng của tham số pha đình đến giá trị OP của hệ thống.



Hình 2.17. Khảo sát OP theo α khi thay đổi SNR của hệ thống

Kết luận chương 2:

Chương 2 đã nghiên cứu ba mô hình hệ thống vô tuyến một chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng bao gồm: (i) Mô hình truyền gia tăng với kênh truyền không hoàn hảo; (ii) Mô hình mạng vô tuyến chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật MIMO; (iii) Mô hình truyền song công với kênh truyền Nakagami- m .

Trong mô hình (i), NCS đã đề xuất phương pháp phân tích hiệu năng hệ thống truyền gia tăng thu thập năng lượng vô tuyến với kỹ thuật lựa chọn nút chuyển tiếp và kênh truyền không hoàn hảo ở kênh truyền fading Rayleigh. Cả hai giao thức thu thập năng lượng TS và PS đều được xem xét. Kết quả phân tích chỉ ra rằng hệ thống đề xuất tốt hơn hệ thống truyền trực tiếp ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu (SNR) trung bình và cao. Xác suất dừng hệ thống với giá trị tối ưu của α và ρ là không đổi và không phụ thuộc vào SNR.

Trong mô hình (ii), NCS đã xây dựng mô hình toán cho hệ thống thu thập năng lượng nhiều nút chuyển tiếp với kỹ thuật TAS ở nút nguồn và kỹ thuật MRC ở nút đích. Nội dung nghiên cứu cũng đề xuất kỹ thuật tính toán xác suất dừng hệ thống tốt hơn phương pháp truyền thống và chứng minh rằng độ lợi phân tập của hệ thống là tương đương với hệ thống tương tự truyền thống (không dùng thu thập năng lượng).

Với mô hình (iii), NCS đã phân tích hiệu năng hệ thống chuyển tiếp song công với kênh truyền Nakagami- m , nút nguồn và nút chuyển tiếp thu thập năng lượng từ nguồn ngoài. Xác suất dừng hệ thống dạng tường minh được xác định. Kết quả phân tích đã xác định được giá trị hệ số phân chia thời gian tối ưu không phụ thuộc vào SNR và hệ số kênh truyền m .

Đóng góp chính của chương 2 là đưa ra các mô hình hiệu quả nhằm tăng độ ổn định, độ lợi phân tập, tăng tốc độ truyền dữ liệu, và giảm xác suất dừng cho hệ thống. Hơn nữa, chương 2 cũng đưa ra các biểu thức toán học dạng đóng (closed form) để đánh giá hiệu năng của các mô hình đề xuất. Các biểu thức dạng đóng này dễ dàng sử dụng trong việc thiết kế và tối ưu hệ thống.

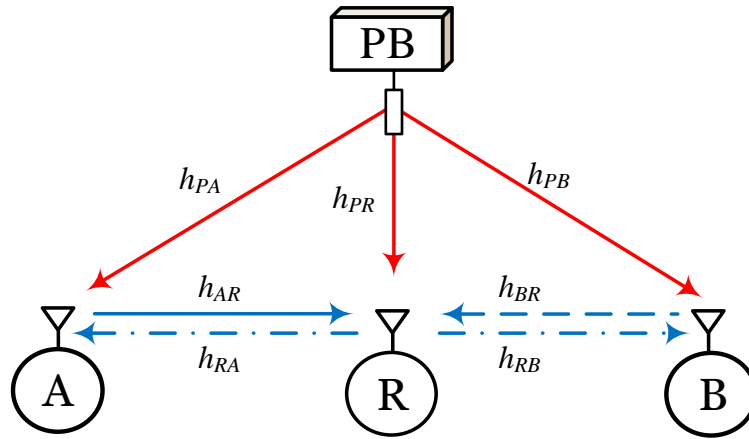
CHƯƠNG 3. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN CHUYỂN TIẾP HAI CHIỀU SỬ DỤNG KỸ THUẬT THU THẬP NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN

3.1. Giới thiệu

Khác với Chương 2 là nghiên cứu về hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều, thông tin truyền từ nút nguồn tới nút đích thông qua nút chuyển tiếp, Chương 3 nghiên cứu về hệ thống vô tuyến chuyển tiếp hai chiều, hai nút nguồn trao đổi thông tin thông qua nút chuyển tiếp. Chương này lần lượt phân tích đánh giá hiệu năng mạng vô tuyến chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, với kênh truyền fading rayleigh, kênh truyền Nakagami-m. Nghiên cứu lần lượt đưa ra được biểu thức dạng đóng của xác suất dừng hệ thống và mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng kết quả

Đóng góp của chương 3 được trình bày tại công trình công bố số 4 và 5.

3.2.2. Mô hình hệ thống



Hình 3. 1. Hệ thống chuyển tiếp hai chiều thu thập năng lượng sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp DF với một nguồn phát năng lượng

3.3. Mạng chuyển tiếp hai chiều với kênh truyền Nakagami-m

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr(\gamma_{AR} < \gamma_{th}) + \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th})\Pr(\gamma_{BR} < \gamma_{th}) \\ &\quad + \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th})\Pr(\gamma_{BR} \geq \gamma_{th})\Pr(\gamma_R < \gamma_{th}) \\ &= 1 - \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th})\Pr(\gamma_{BR} \geq \gamma_{th})\Pr(\gamma_R \geq \gamma_{th}). \end{aligned} \quad (3.32)$$

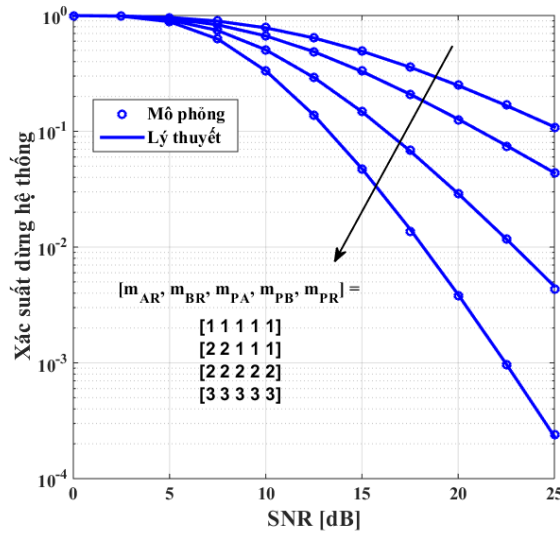
$$\Pr[\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}] = \frac{(m_{AR}\lambda_{AR})^{m_{AR}}}{m_{AR}!} \sum_{t=0}^{m_{PA}} \frac{(m_{PA}\lambda_{PA}\Upsilon)^t}{t!} \int_0^{+\infty} x^{m_{AR}-1-t} \exp\left(-m_{PA}\lambda_{PA}\frac{\Upsilon}{x}\right) \exp(-m_{AR}\lambda_{AR}x) dx. \quad (3.35)$$

$$\Pr[\gamma_{BR} \geq \gamma_{th}] = \sum_{t=0}^{m_{PB}} \frac{2(m_{PB}m_{BR}\lambda_{PB}\lambda_{BR}\Upsilon)^{\frac{m_{BR}+t}{2}}}{t!(m_{BR}-1)!} K_{m_{BR}-t}\left(2\sqrt{m_{PB}m_{BR}\lambda_{PB}\lambda_{BR}\Upsilon}\right). \quad (3.37)$$

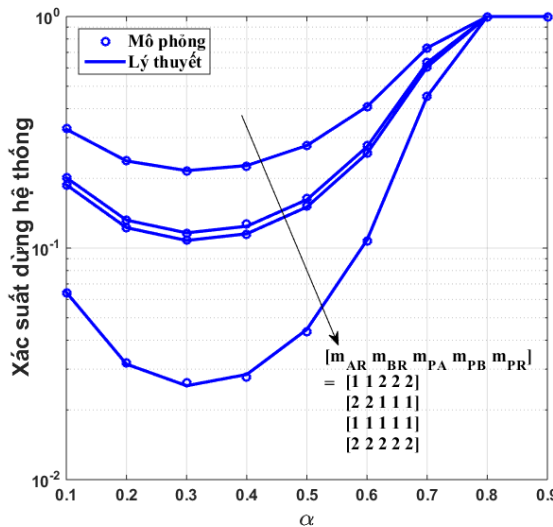
$$\begin{aligned}
\Pr[\gamma_R \geq \gamma_{th}] &= \frac{(m_{PR} \lambda_{PR})^{m_{PR}}}{(m_{PR} - 1)!} \sum_{t=0}^{m_{RA}-1} \sum_{v=0}^{m_{RB}-1} \frac{(m_{RA} \lambda_{RA})^t}{t!} \frac{(m_{RB} \lambda_{RB})^v}{v!} \Upsilon^{t+v} \\
&\times \int_0^{+\infty} x^{m_{PR}-t-v-1} \exp\left(-\frac{(m_{RA} \lambda_{RA} + m_{RB} \lambda_{RB}) \Upsilon}{x}\right) \exp(-m_{PR} \lambda_{PR} x) dx \\
&= \sum_{t=0}^{m_{RA}-1} \sum_{v=0}^{m_{RB}-1} 2 \frac{(m_{RA} \lambda_{RA})^t}{t!} \frac{(m_{RB} \lambda_{RB})^v}{v!} \frac{(m_{PR} \lambda_{PR})^{\frac{m_{PR}+t+v}{2}}}{(m_{PR} - 1)!} \\
&\times (m_{RA} \lambda_{RA} + m_{RB} \lambda_{RB})^{\frac{m_{PR}-t-v}{2}} \Upsilon^{\frac{m_{PR}+t+v}{2}} \\
&\times K_{m_{PR}-t-v} \left(2\sqrt{(m_{RA} \lambda_{RA} + m_{RB} \lambda_{RB}) m_{PR} \lambda_{PR} \Upsilon} \right).
\end{aligned} \tag{3.41}$$

Thay các kết quả ở (3.35), (3.37) và (3.41) vào (3.32), sẽ xác định được một biểu thức của xác suất dừng OP.

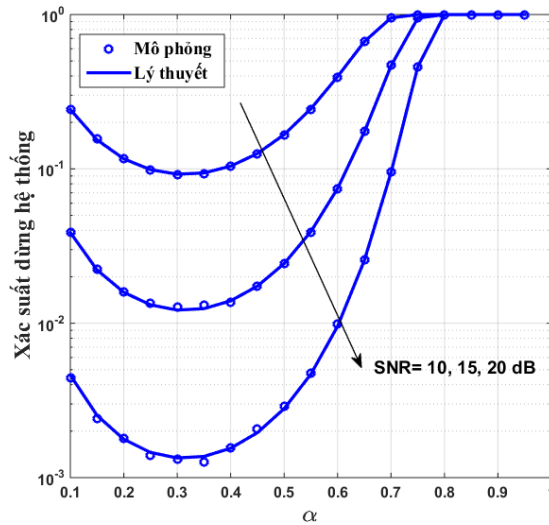
3.3.2. Kết quả mô phỏng và phân tích



Hình 3.8. Khảo sát ảnh hưởng hệ số kênh truyền Nakagami-m tới OP



Hình 3.9. Khảo sát ảnh hưởng hệ số α tới OP với thay đổi các giá trị hệ số kênh truyền Nakagami-m



Hình 3.10. Khảo sát ảnh hưởng giá trị α tới OP khi thay đổi giá trị SNR

Kết luận chương 3

Chương 3 xem xét mô hình hệ thống chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng, hai nút nguồn trao đổi thông tin qua nút chuyển tiếp. Các nút trong hệ thống thu thập năng lượng từ nguồn ngoài ổn định để thu phát thông tin. Chương 3 đã nghiên cứu đánh giá hiệu năng hệ thống trên kênh truyền fading Rayleigh và Nakagami- m . Công thức xác suất dừng hệ thống ở dạng đóng và đã được mô phỏng Monte-Carlo kiểm chứng tính đúng đắn của phương pháp giải tích. Kết quả khảo sát cho thấy hiệu năng của hệ thống phụ thuộc vào hệ số phân chia thời gian thu thập năng lượng, SNR, công suất và vị trí của nguồn ngoài PB cũng như tham số kênh truyền Nakagami- m .

Đóng góp chính của Chương 3 là đề xuất mô hình chuyển tiếp hai chiều thu thập năng lượng vô tuyến từ nguồn ngoài PB. Mạng chuyển tiếp hai chiều ba pha (ba pha truyền dữ liệu) nâng cao đáng kể tốc độ truyền dẫn khi so sánh với chuyển tiếp hai chiều bốn pha thông thường. Chương 3 đưa ra các công thức tính chính xác xác suất dừng hệ thống trên các kênh truyền fading. Các biểu thức này đều ở dạng đóng nên có thể sử dụng hiệu quả trong việc thiết kế và tối ưu hệ thống. Chương 3 cũng thực hiện mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng tất cả các công thức đưa ra, cũng như khảo sát sự ảnh hưởng của các thông số hệ thống lên chất lượng dịch vụ của mô hình khảo sát. Kết quả cho thấy, với kênh truyền Nakagami- m , giá trị hệ số thời gian thu thập năng lượng tối ưu là xấp xỉ 0.3 như với trường hợp kênh truyền fading Rayleigh. Hiệu năng hệ thống tăng khi tăng các hệ số kênh truyền Nakagami- m .

CHƯƠNG 4. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG THÔNG TIN VÔ TUYẾN NHẬN THỨC SỬ DỤNG KỸ THUẬT THU THẬP NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN

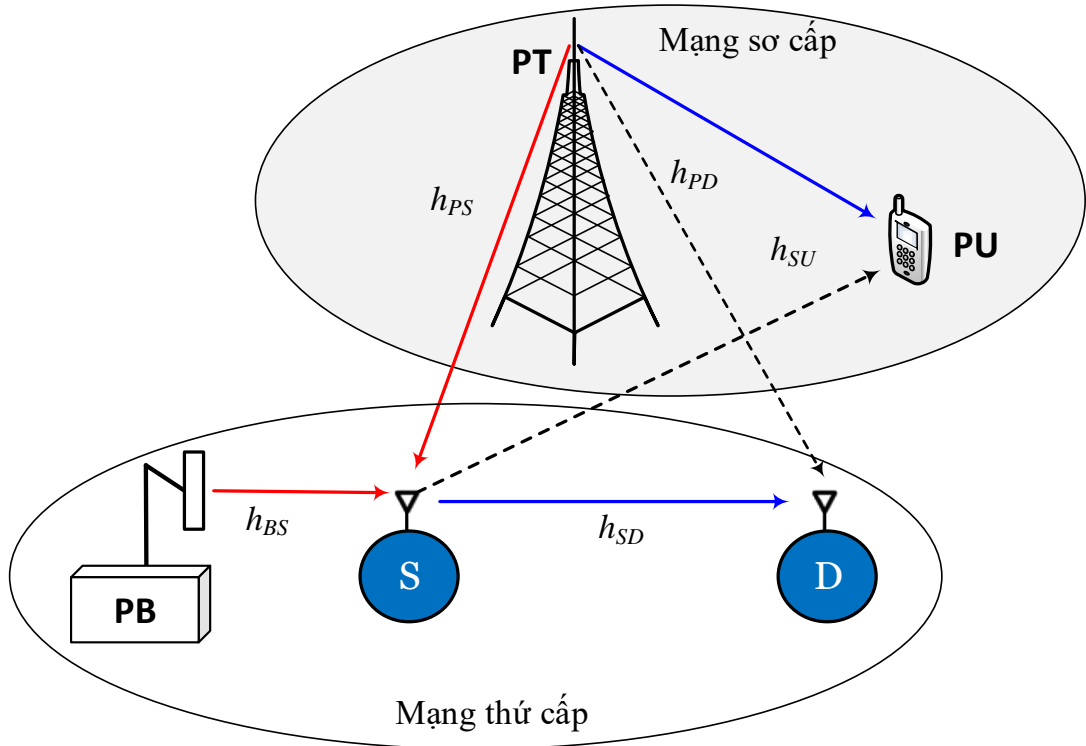
4.1. Giới thiệu

Nội dung nghiên cứu của Chương 4 về hệ thống vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng từ nguồn phát năng lượng là máy phát của mạng sơ cấp và một nguồn ngoài độc lập. Nút nguồn phát dữ liệu của mạng thứ cấp không có năng lượng lưu trữ mà sử dụng năng lượng thu thập từ hai nguồn phát năng lượng linh hoạt để cung cấp cho các hoạt động truyền phát thông tin. Chương này đã đề xuất phương pháp để phân tích xác suất dừng chính xác của hệ thống và biểu diễn dưới dạng tường minh. Kết quả mô phỏng đã xác nhận tính chính xác của kết quả phân tích và

chỉ ra công suất máy phát sơ cấp và vị trí của mạng thứ cấp ảnh hưởng tới hiệu năng hệ thống.

Đóng góp của chương 4 được trình bày tại công trình công bố số 6 và 7.

4.2. Mô hình hệ thống



Hình 4. 1. Mô hình hệ thống vô tuyến nhận thức thu thập năng lượng vô tuyến

Bốn phương thức thu thập năng lượng của nút S được đề xuất như sau:

Phương thức BS: chỉ nguồn năng lượng ngoài ổn định cung cấp năng lượng cho nút S trong hệ thống thứ cấp. Giả thiết máy phát của hệ thống sơ cấp PT ở xa và nó không gây nhiễu cho hệ thống thứ cấp.

Phương thức PTS: Chỉ có máy phát PT truyền năng lượng vô tuyến cho nút S. Nhưng máy phát PT của hệ thống sơ cấp gây nhiễu cho hệ thống thứ cấp. Trường hợp này không có nguồn năng lượng ngoài PB.

Phương thức MBT: Có hai nguồn năng lượng đó là máy phát PT và một nguồn năng lượng ngoài PB. Nhưng nút S sẽ lựa chọn nguồn năng lượng có mức cao nhất để thu thập năng lượng.

Phương thức SBT: Hai nguồn năng lượng PT và PB cung cấp cho nút S. Nút S thu thập năng lượng của cả hai nguồn đồng thời để được mức năng lượng cao nhất nhưng vẫn đảm bảo phát thông tin tới D không gây nhiễu cho PU và cũng không bị nhiễu gây ra bởi PT.

4.3. Phân tích hiệu năng hệ thống thứ cấp

Phần này sẽ tính xác suất dừng của hệ thống trong bốn phương thức thu thập năng lượng. Công thức xác định xác suất dừng hệ thống tổng quát được xác định như sau:

$$P_{out}^{sch} = \Pr\left[(1 - \alpha) \log_2(1 + \gamma_S^{sch}) < R_{th}\right], \quad (4.11)$$

với $sch \in \{BS, PTS, MBT, SBT\}$.

a. Phương thức BS:

Từ (4.11) Xác suất dừng hệ thống của phương thức BS được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
OP^{BS} &= F_{\gamma_s}^{BS}(\gamma_{th}) \\
&= \underbrace{\int_0^{+\infty} F_{|h_{SU}|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PB} x} \right) F_{|h_{SD}|^2} \left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa P_{PB} x} \right) f_{|h_{BS}|^2}(x) dx}_{I_1} \\
&\quad + \underbrace{\int_0^{+\infty} \left[1 - F_{|h_{BS}|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PB} x} \right) \right] F_{|h_{SD}|^2} \left(\frac{\gamma_{th} x}{I_p} \right) f_{|h_{SU}|^2}(x) dx}_{I_2}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

trong đó: $\gamma_{th} = 2^{\frac{R_{th}}{1-\alpha}} - 1$

Biểu thức I_1 của công thức (4.16) được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
I_1 &= \int_0^{+\infty} \left[1 - \exp \left(-\frac{\lambda_{SU} I_p}{\kappa P_{PB} x} \right) \right] \left[1 - \exp \left(-\frac{\lambda_{SD} \gamma_{th}}{\kappa \Psi x} \right) \right] \\
&\quad \times \lambda_{BS} \exp(-\lambda_{BS} x) dx \\
&= 1 - \chi(\theta) - \chi(\vartheta) + \chi(\theta + \vartheta)
\end{aligned} \tag{4.14}$$

Tiếp theo, xác định được I_2 như sau:

$$\begin{aligned}
I_2 &= \int_0^{+\infty} \exp \left(-\frac{\lambda_{BS} I_p}{\kappa P_{PB} x} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{\lambda_{SD} \gamma_{th} x}{I_p} \right) \right] \lambda_{SU} \exp(-\lambda_{SU} x) dx \\
&= \chi(\vartheta) - \frac{\lambda_{SU} I_p}{\lambda_{SD} \gamma_{th} + I_p \lambda_{SU}} \chi(\theta + \vartheta).
\end{aligned} \tag{4.15}$$

Thay (4.14) và (4.15) vào (4.13) có thể xác định được xác suất dừng của hệ thống.

b. Phương thức PTS

Xác suất dừng hệ thống OP được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
OP^{PTS} &= F_{\gamma_s}^{PTS}(\gamma_{th}) \\
&= \underbrace{\int_0^{+\infty} F_X \left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa x} \right) F_{|h_{SU}|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) f_{|h_{PS}|^2}(x) dx}_{I_3} \\
&\quad + \underbrace{\int_0^{+\infty} \left[1 - F_{|h_{PS}|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) \right] F_X \left(\frac{\gamma_{th} P_{PT} x}{I_p} \right) f_{|h_{SU}|^2}(x) dx}_{I_4},
\end{aligned} \tag{4.17}$$

với $X = |h_{SD}|^2 / |h_{PD}|^2$.

$$I_3 = \int_0^{+\infty} \frac{\Omega \lambda_{PS} \exp(-\lambda_{PS} x)}{x + \Omega} dx - \int_0^{+\infty} \frac{\Omega \lambda_{PS}}{x + \Omega} \exp \left(-\frac{I_p \lambda_{SU}}{\kappa P_{PT} x} - \lambda_{PS} x \right) dx \tag{4.19}$$

Áp dụng biến đổi (3.383.10) tại [80] để xác định biểu thức I_3 như sau:

$$I_3 = \Omega \lambda_{PS} \exp(\Omega \lambda_{PS}) \Gamma(0, \Omega \lambda_{PS}) - \Theta(\Omega, \lambda_{PS}, \lambda_{SU} \zeta) \tag{4.20}$$

Tương tự, biểu thức I_4 được xác định:

$$I_4 = \int_0^{+\infty} \frac{\phi \lambda_{SU} x}{1 + \phi x} \exp \left(-\frac{\lambda_{PS} \zeta}{x} - \lambda_{SU} x \right) dx = Y(\phi, \lambda_{SU}, \lambda_{PS} \zeta) \tag{4.21}$$

Sau đó, thay thế (4.20) và (4.21) vào (4.17), ta xác định được xác suất dừng hệ thống OP.

c. Phương thức MBT:

Trường hợp này, nguồn năng lượng cung cấp cho hệ thống thứ cấp bao gồm cả PT và PB. Nguồn năng lượng được chọn là nguồn năng lượng có mức cao hơn. SNR của hệ thống thứ cấp được xác định như sau:

$$\gamma_s^{MBT} = \min \left(\max \left(\kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \kappa P_{PT} |h_{PS}|^2 \right), \frac{I_p}{|h_{SU}|^2} \right) \frac{|h_{SD}|^2}{P_{PT} |h_{PD}|^2} \quad (4.22)$$

Xác suất dừng hệ thống OP được xác định như sau:

$$\begin{aligned} OP^{MBT} &= F_{\gamma_s}^{MBT}(\gamma_{th}) \\ &= \int_0^{+\infty} \underbrace{F_X \left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa x} \right) F_{|h_{SU}|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right)}_{I_5} f_Y(x) dx \\ &\quad + \int_0^{+\infty} \underbrace{\left[1 - F_Y \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) \right] F_X \left(\frac{\gamma_{th} P_{PT} x}{I_p} \right)}_{I_6} f_{|h_{SU}|^2}(x) dx \end{aligned} \quad (4.23)$$

Biểu thức I_5 tại công thức (4.23) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} I_5 &= \Pr \left[\frac{|h_{SD}|^2}{|h_{PD}|^2} < \frac{\gamma_{th}}{\kappa Y}, |h_{SU}|^2 < \frac{I_p}{\kappa P_{PT} Y} \right] \\ &= \int_0^{+\infty} F_X \left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa x} \right) F_{|h_{SU}|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) f_Y(x) dx, \end{aligned} \quad (4.24)$$

với $\mu = \frac{P_{PB}}{P_{PT}}$, $X = \frac{|h_{SD}|^2}{|h_{PD}|^2}$ và $Y = \max(\mu |h_{BS}|^2, |h_{PS}|^2)$.

$$\begin{aligned} I_5 &= \lambda_{PS} \Omega \exp(\lambda_{PS} \Omega) \Gamma(0, \lambda_{PS} \Omega) + \frac{\lambda_{BS}}{\mu} \Omega \exp\left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} \Omega\right) \Gamma\left(0, \frac{\lambda_{BS}}{\mu} \Omega\right) \\ &\quad - \left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS}\right) \Omega \exp\left(\left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS}\right) \Omega\right) \Gamma\left(0, \left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS}\right) \Omega\right) \\ &\quad - \Theta(\Omega, \lambda_{PS}, \lambda_{SU} \zeta) - \Theta\left(\Omega, \frac{\lambda_{BS}}{\mu}, \lambda_{SU} \zeta\right) + \Theta\left(\Omega, \frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS}, \lambda_{SU} \zeta\right) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Tương tự, ta xác định được I_6 như sau:

$$\begin{aligned} I_6 &= \Upsilon\left(\frac{\Omega}{\zeta}, \lambda_{SU}, \lambda_{PS} \zeta\right) + \Upsilon\left(\frac{\Omega}{\zeta}, \lambda_{SU}, \frac{\lambda_{BS} \lambda_{PS} \zeta}{\mu}\right) \\ &\quad - \Upsilon\left(\frac{\Omega}{\zeta}, \lambda_{SU}, \frac{\lambda_{BS} \lambda_{PS} \zeta}{\mu} + \lambda_{PS} \zeta\right) \end{aligned} \quad (4.30)$$

Thay thế (4.28) và (4.30) vào (4.23) xác định được xác suất dừng hệ thống.

d. Phương thức SBT

Xác suất dừng hệ thống với phương thức SBT được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
OP^{SBT} &= F_{\gamma_s}^{SBT}(\gamma_{th}) \\
&= \Pr \left[\underbrace{\kappa \left(P_{PB} |h_{BS}|^2 + P_{PT} |h_{PS}|^2 \right) \frac{|h_{SD}|^2}{P_{PT} |h_{PD}|^2} < \gamma_{th},}_{I_7} \right. \\
&\quad \left. \underbrace{\left(P_{PB} |h_{BS}|^2 + P_{PT} |h_{PS}|^2 \right) \kappa < \frac{I_p}{|h_{SU}|^2}}_{I_8} \right] \\
&\quad + \Pr \left[\underbrace{\frac{I_p}{|h_{SU}|^2} \frac{|h|^2}{P_{PT} |h_{PD}|^2} < \gamma_{th},}_{I_7} \right. \\
&\quad \left. \underbrace{\left(P_{PB} |h_{BS}|^2 + P_{PT} |h_{PS}|^2 \right) \kappa > \frac{I_p}{|h_{SU}|^2}}_{I_8} \right]
\end{aligned} \tag{4.32}$$

Biểu thức I_7 của công thức (4.32) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned}
I_7 &= \Pr \left[\frac{|h_{SD}|^2}{|h_{PD}|^2} < \frac{\gamma_{th}}{\kappa Q}, |h_{SU}|^2 < \frac{I_p}{\kappa P_{PT} Q} \right] \\
&= \int_0^{+\infty} F_X \left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa x} \right) F_{|h_{SU}|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) f_Q(x) dx,
\end{aligned} \tag{4.33}$$

với $X = \frac{|h_{SD}|^2}{|h_{PD}|^2}$ và $Q = \mu |h_{BS}|^2 + |h_{PS}|^2$.

$$\begin{aligned}
I_7 &= \lambda_{h_{BS}} \Omega \exp(\lambda_{h_{BS}} \Omega) \Gamma(0, \lambda_{h_{BS}} \Omega) + \frac{\lambda_{h_{BS}}}{\lambda_{h_{BS}} - \mu \lambda_{h_{PS}}} \times \left[\frac{\lambda_{h_{PS}} \Omega \exp(\lambda_{h_{PS}} \Omega) \Gamma(0, \lambda_{h_{PS}} \Omega)}{-\lambda \Omega \exp(\lambda \Omega) \Gamma(0, \lambda \Omega)} \right] \\
&\quad - \Theta(\Omega, \lambda_{h_{BS}}, \lambda_{h_{SU}} \zeta) - \frac{\lambda_{h_{BS}}}{\lambda_{h_{BS}} - \mu \lambda_{h_{PS}}} \left[\Theta(\Omega, \lambda_{h_{PS}}, \lambda_{h_{SU}} \zeta) - \Theta(\Omega, \lambda, \lambda_{h_{SU}} \zeta) \right],
\end{aligned} \tag{4.36}$$

với $\lambda = \lambda_{h_{BS}} + \lambda_{h_{PS}} - \mu \lambda_{h_{PS}}$.

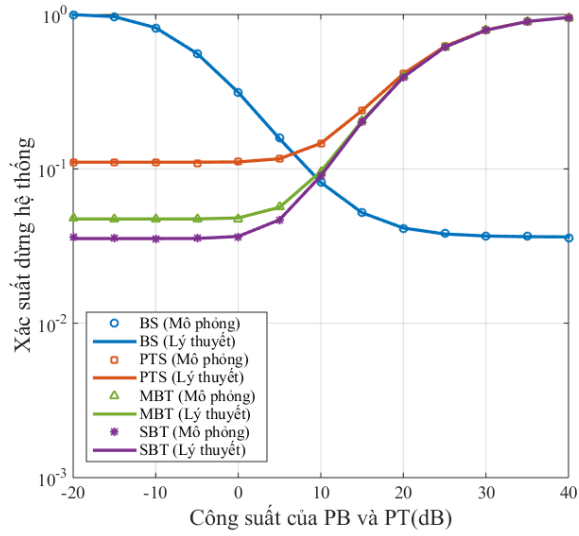
Tương tự như vậy, biểu thức I_8 có thể viết lại như sau:

$$\begin{aligned}
I_8 &= \int_0^{+\infty} \left[1 - F_Y \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) \right] F_X \left(\frac{\gamma_{th} P_{PT} x}{I_p} \right) f_{|h_{SU}|^2}(x) dx \\
&= \Upsilon(\phi, \lambda_{h_{SU}}, \lambda_{h_{BS}} \zeta) + \frac{\lambda_{h_{BS}}}{\lambda_{h_{BS}} - \mu \lambda_{h_{PS}}} \left[\Upsilon(\phi, \lambda_{h_{SU}}, \lambda_{h_{PS}} \zeta) - \Upsilon(\phi, \lambda_{h_{SU}}, \lambda \zeta) \right].
\end{aligned} \tag{4.37}$$

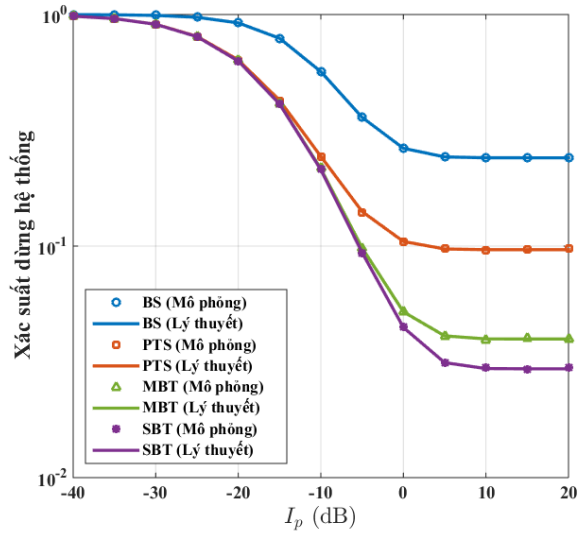
Thay thế (4.36) và (4.37) vào công thức (4.32) ta xác định được xác suất dừng hệ thống cho phương thức SBT.

4.4. Kết quả mô phỏng và phân tích

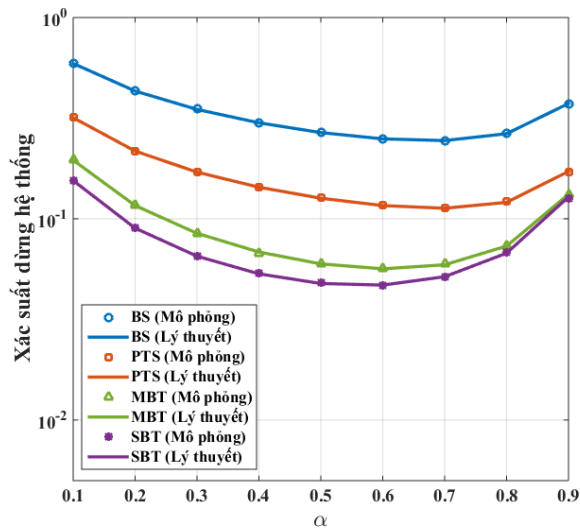
Trong phần trước, NCS đã xác định được công thức tính OP của hệ thống cho hệ thống vô tuyến nhận thức có sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng tại nút nguồn S với nguồn năng lượng từ nguồn năng lượng ngoài PT và PB. Phần này sẽ sử dụng mô phỏng Monte-Carlo để chứng minh tính đúng đắn của phân tích lý thuyết. Các tham số sử dụng để khảo sát được chọn: hệ số suy hao $l = 3$; hiệu suất thu thập năng lượng $\varepsilon = 0.6$; tốc độ dữ liệu tối thiểu là $\mathcal{R} = 1$ bit/s/Hz.



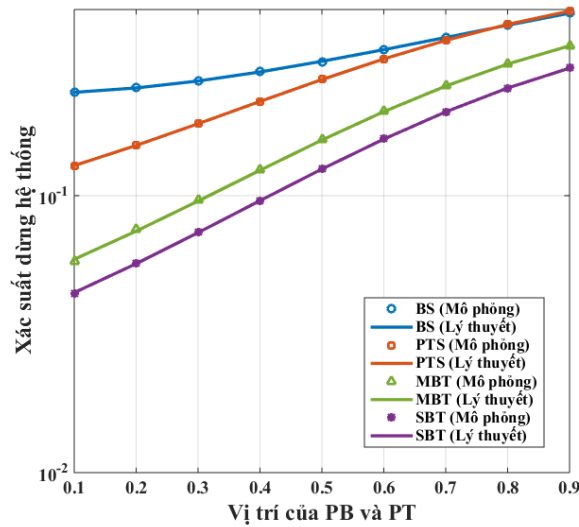
Hình 4.2. Xác suất dừng hệ thống theo PT và PB



Hình 4.3. Xác suất dừng hệ thống theo I_p (dB)



Hình 4.4. Xác suất dừng hệ thống theo hệ số α



Hình 4.5. Xác suất dừng hệ thống theo khoảng cách của PB và PT tới nút nguồn S

4.5. Kết luận chương 4

Tại chương 4, đã phân tích đánh giá hiệu năng hệ thống vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Nút nguồn S của hệ thống thứ cấp thu thập năng lượng linh hoạt từ hai nguồn năng lượng đó là nguồn ngoài ổn định PB và nguồn máy phát PT của hệ thống sơ cấp. Thu thập năng lượng của nút nguồn S phụ thuộc nhiều vào công suất PT đảm bảo hệ thống thứ cấp và sơ cấp không ảnh hưởng lẫn nhau. Kết quả khảo sát xác suất dừng hệ thống cho thấy phương thức SBT cho hiệu năng hệ thống tốt nhất. Kết quả phân tích cũng đã xác định được giá trị hệ số phân chia thời gian thu thập năng lượng tối ưu để hiệu năng hệ thống tốt nhất. Đồng thời cũng chỉ ra rằng công suất và vị trí của PT, PB ảnh hưởng lớn tới hiệu năng hệ thống.

Đóng góp chính của chương 4 là đề xuất mô hình thu thập năng lượng sóng vô tuyến trong môi trường vô tuyến nhận thức. Dưới sự tác động của nút phát sơ cấp lên hệ thống thứ cấp, cũng như sự giới hạn công suất phát của nút phát thứ cấp, chương 4 đề xuất bốn phương thức thu thập năng lượng tại nút nguồn của mạng thứ cấp nhằm nâng cao hiệu năng cho mạng thứ cấp. Phương pháp giải tích xấp xỉ đã được sử dụng để xác định xác suất dừng hệ thống dưới dạng công thức dạng đóng. Hiệu năng của các mô hình đề xuất được đánh giá thông qua mô phỏng và phân tích.

KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

A. Một số kết quả đạt được của Luận án

1. Sự cần thiết nâng cao hiệu năng hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng

So với hệ thống vô tuyến thông thường, hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng sẽ phức tạp hơn và hoặc kích thước lớn hơn, cụ thể là các thiết bị vô tuyến phải trang bị bộ thu thập năng lượng sóng vô tuyến nên đòi hỏi công nghệ tốt để việc thu thập năng lượng hiệu quả và cung cấp đủ công suất mong muốn cho các thiết bị trong mạng. Sự phức tạp đến từ việc đồng bộ cao giữa thiết bị phát và thiết bị thu trong pha thu thập năng lượng hay đồng bộ giữa các thiết bị và nguồn cung cấp năng lượng sóng vô tuyến bên ngoài. Do đó, hệ thống sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng sẽ có nhiều yếu tố tác động làm suy giảm chất lượng truyền dữ liệu. Hiệu năng hệ

thống sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng có thể thấp hơn do Hệ thống sử dụng một khoảng thời gian cho việc thu thập năng lượng, nên thời gian dành cho việc truyền dữ liệu sẽ ít hơn, dẫn đến tốc độ truyền thông tin thấp hơn phương pháp truyền thông thường. Bên cạnh đó, năng lượng thu thập sử dụng cho việc truyền dữ liệu có thể thấp (do công nghệ) cũng ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống. Việc phân bổ thời gian dành cho việc thu thập năng lượng cần được tính toán thích hợp để nâng cao hiệu năng hệ thống nên cần có cơ chế tính toán thích hợp. Mặc dù vậy, việc tính toán này sẽ phức tạp hơn nhiều so với mô hình truyền thông vì cần đánh giá và lựa chọn nút mạng để tính toán trong mỗi mô hình nghiên cứu.

2. Đề xuất mô hình hệ thống tiêu biểu, nghiên cứu phân tích đánh giá:

Trong luận án, ba mô hình tiêu biểu đã được phân tích và khảo sát đánh giá cũng như đã đề xuất được những kết quả nhằm nâng cao hiệu năng hệ thống. Cụ thể như sau:

#Mô hình 1: Hệ thống chuyển tiếp một chiều gồm 03 nút, nút nguồn (S) truyền thông tin tới nút đích (D) thông qua nút chuyển tiếp (R). Trường hợp thứ nhất phân tích hệ thống với nhiều nút chuyển tiếp R và kênh truyền ước lượng không hoàn hảo, kết quả phân tích đã chỉ ra ưu điểm của hệ thống ở vùng tỷ số tín hiệu trên nhiễu ở mức trung bình và cao. Trường hợp thứ 2 phân tích hệ thống với mô hình có nút nguồn S sử dụng nhiều anten, nút chuyển tiếp R đơn anten và nút đích D có đa anten. Đối với mô hình này, NCS đã đề xuất một phương pháp mới để phân tích xác suất dừng của hệ thống chuyển tiếp hai chặng với nút nguồn và nút đích được trang bị nhiều anten với nút chuyển tiếp sử dụng năng lượng thu thập vô tuyến để chuyển tiếp dữ liệu nhận từ nút nguồn. Phương pháp phân tích mới cho phép xấp xỉ tốt hơn xác suất dừng hệ thống so với phương pháp phân tích xấp xỉ truyền thông, vốn chỉ phù hợp cho mạng với nút mạng đơn anten. Trường hợp thứ 3 được xem xét khi nút chuyển tiếp R sử dụng kỹ thuật truyền song công. Khác với những nghiên cứu trước đây đã khảo sát trên trường hợp giảm nhiễu nội không hoàn hảo, Luận án này đã đưa ra được dạng tường minh công thức tính xác suất dừng hệ thống với kênh truyền Nakagami- m . Đồng thời Luận án đã khảo sát và phân tích ảnh hưởng của công suất nguồn năng lượng ngoài PB, tham số m của kênh truyền Nakagami- m , thời gian thu thập năng lượng và xem xét khả năng khắc phục nhiễu nội do hai anten của nút R gây nhiễu lẫn nhau. Kết quả mô phỏng sử dụng nguyên lý Monte-Carlo được sử dụng để chứng minh tính đúng đắn của kết quả giải tích.

Mô hình 2. Hệ thống vô tuyến chuyển tiếp hai chiều gồm 3 nút, hai nút A, B trao đổi thông tin hai chiều với nhau thông qua nút chuyển tiếp R. Các nút mạng không có năng lượng lưu trữ mà sử dụng năng lượng thu thập từ nguồn phát năng lượng (nguồn ngoài độc lập) để cung cấp cho các hoạt động truyền phát thông tin. Luận án đã nghiên cứu lần lượt mạng chuyển tiếp hai chiều với kênh truyền fading Rayleigh và kênh truyền Nakagami- m . Luận án đã đề xuất phương pháp để phân tích xác suất dừng chính xác của hệ thống và biểu diễn dưới dạng tường minh. Kết quả mô phỏng đã xác nhận tính chính xác của kết quả phân tích và chỉ ra rằng vị trí của nguồn phát và nút chuyển tiếp ảnh hưởng rất lớn đến hiệu năng của hệ thống. Từ kết quả phân tích xác suất dừng hệ thống đã đề xuất giá trị hệ số phân chia thời gian thu thập năng lượng tối ưu và kết luận hệ số phân chia thời gian tối ưu không phụ thuộc vào tỷ số tín hiệu trên nhiễu và hệ số kênh truyền.

Mô hình 3: Hệ thống vô tuyến nhận thức thu thập năng lượng vô tuyến từ nguồn ngoài PB và từ chính nguồn PT là máy phát của hệ thống sơ cấp với công suất lớn. Hệ thống vô tuyến nhận thức gồm nút nguồn S truyền thông tin tới nút đích D, sử dụng kênh tần số của hệ thống sơ

cấp (giả thiết máy phát truyền hình (PT) tới máy thu truyền hình (PU)). Nút nguồn S thu thập năng lượng từ PT hoặc/và PB. Nghiên cứu được khảo sát ảnh hưởng can nhiễu của PT tới D và từ S tới PU. Mức năng lượng thu thập tại S cũng có tính quyết định tới mức nhiễu tại PU và khoảng cách của D tới PT cũng quyết định mức nhiễu tại D. Nghiên cứu đã xác định được công thức dạng đóng đối với xác suất dừng hệ thống OP, và khảo sát các tham số liên quan ảnh hưởng tới xác suất dừng hệ thống. Có thể kết hiệu năng hệ thống phụ thuộc vào mức ngưỡng đầu vào máy thu sơ cấp (I_p), vị trí và công suất của máy phát sơ cấp và nguồn ngoài PB, đặc biệt là hệ số phân chia thời gian thu thập năng lượng. Với mô hình này, luận án đã đề xuất phương thức thu thập năng lượng linh hoạt từ PT và PB để nâng cao hiệu năng hệ thống. Đồng thời đã đề xuất giá trị hệ số phân chia thời gian tối ưu để hiệu năng hệ thống tốt nhất.

3. Về phương pháp giải tích mới áp dụng phân tích hiệu năng hệ thống:

Khác với hệ thống thông thường, việc phân tích đánh giá xác suất dừng cho hệ thống sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng phức tạp hơn nhiều. Để có được biểu thức xác định xác suất dừng hệ thống, Luận án đã đề xuất phương pháp xấp xỉ mới để xác định được công thức dạng tường minh cho xác suất dừng hệ thống. Để phân tích hiệu năng của hệ thống, các nghiên cứu trước đây đều sử dụng kỹ thuật xấp xỉ hợp lý ở vùng tỷ lệ trên nhiều cao dựa trên hàm BesselK. Nhược điểm của kỹ thuật này là độ sai lệch sẽ tăng nhanh ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp, đặc biệt là các chặng không đối xứng. Tại luận án đã đề xuất một kỹ thuật phân tích mới dựa vào phân tích chuỗi của hàm mũ và các kết quả phân tích cho kết quả chính xác hơn phương pháp truyền thống.

Luận án đã xây dựng các mô hình mạng sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp, nút mạng sử dụng đa ăng ten, hệ thống hai chiều, vô tuyến nhận thức. Phân tích đánh giá các mô hình được xem xét với kênh truyền ước lượng không hoàn hảo, kênh truyền Nakagami-m, truyền song công mang ý nghĩa tổng quát và sát với thực tế. Tuy nhiên, đổi lại sẽ làm phức tạp hơn việc phân tích đánh giá hiệu năng hệ thống. Mặc dù vậy, Luận án đã đưa ra được các phương pháp phân tích phù hợp để xác định được hiệu năng hệ thống và đưa ra được các giá trị tham số tối ưu để đạt hiệu năng hệ thống cao nhất.

B. Các ứng dụng của nghiên cứu

Các kết quả nghiên cứu bao gồm phương pháp phân tích và các mô hình đề xuất có thể ứng dụng như sau:

1. Đã đề xuất một số phương pháp giải tích mới để đánh giá hiệu năng của các hệ thống vô tuyến chuyển tiếp sử dụng thu thập năng lượng. Các phương pháp này có ưu điểm là phù hợp cho cả vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp và cao và áp dụng cho cả kênh truyền fading Rayleigh và Nakagami-m. Các biểu thức toán học dạng đóng của Xác suất dừng hệ thống có thể sử dụng trong việc thiết kế và tối ưu hệ thống.
2. Đã đề xuất 3 mô hình áp dụng các ưu điểm của kỹ thuật thu thập năng lượng, kỹ thuật chuyển tiếp cho phép tăng vùng phủ sóng cũng như nâng cao hiệu năng của hệ thống thu thập năng lượng vô tuyến, có thể ứng dụng cho các mạng cảm biến vô tuyến hay ứng dụng IoT.
3. Tối ưu các tham số ảnh hưởng tới hiệu năng hệ thống vô tuyến chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật truyền năng lượng vô tuyến và thu thập năng lượng vô tuyến. Đưa ra các tham số tối ưu cho giao thức thu thập năng lượng vô tuyến nhằm nâng cao hiệu năng của hệ thống vô tuyến

chuyển tiếp. Các mô hình đề xuất có thể tăng hiệu năng sử dụng phổ tần, kết hợp tận dụng nguồn năng lượng từ máy phát vô tuyến công suất lớn sẵn có đối với mạng vô tuyến nhận thức hạn chế về nguồn năng lượng cung cấp.

C. Hướng nghiên cứu phát triển của luận án:

1. Nghiên cứu mô hình mạng chuyển tiếp một chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng tại nút chuyển tiếp và nút chuyển tiếp sử dụng đa ăng ten. Với mô hình này sẽ làm tăng hiệu quả sử dụng tài nguyên tần số và năng cao độ tin cậy khi truyền thông tin tới nút đích, kết hợp sử dụng nhiều nguồn ngoài cung cấp năng lượng vô tuyến. Nhưng đổi lại việc xác định xác suất dừng hệ thống phức tạp hơn nhiều, đòi hỏi những đề xuất mới trong giải tích để tính toán xác suất dừng hệ thống.
2. Nghiên cứu mô hình mạng chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng tại tất cả các nút mạng, đồng thời kết hợp sử dụng kỹ thuật truyền song công (Full-Duplex) tại nút chuyển tiếp. Với mô hình mạng này sẽ thích hợp với mạng thông tin vô tuyến thế hệ mới nhưng việc xử lý nhiễu kênh truyền tại nút chuyển tiếp sẽ rất phức tạp. Với các nghiên cứu hiện nay chưa xác định được biểu thức tường minh của xác suất dừng hệ thống.
3. Nghiên cứu mạng vô tuyến nhận thức có sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến với nguồn ngoài ổn định sử dụng đa ăng ten hoặc với số lượng lớn. Đây là mô hình phức tạp nhưng có tính ứng dụng thực tế cao trong tương lai. Tuy nhiên, bài toán giải quyết nhiễu vô tuyến giữa các kênh truyền vô tuyến là tương đối phức tạp.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ

1. Võ Nguyễn Quốc Bảo, **Nguyễn Anh Tuấn** “Ảnh hưởng của kênh truyền không hoàn hảo lên hiệu năng của mạng chuyển tiếp gia tăng thu thập năng lượng vô tuyến”, *Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin và Truyền thông*, trang 48-57, Số 3(CS.01), 2016.
2. **Nguyễn Anh Tuấn**, Võ Nguyễn Quốc Bảo, Lê Quốc Cường “Đề xuất phương pháp phân tích hiệu năng mới cho mạng MIMO hai chặng chuyển tiếp thu thập năng lượng”, *Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin và Truyền thông*, trang 50-56, Số 1(CS.01), 2017.
3. **Nguyễn Anh Tuấn**, Võ Nguyễn Quốc Bảo “Phân tích hiệu năng hệ thống chuyển tiếp song công sử dụng công nghệ thu thập năng lượng từ nguồn ngoài”, *Tạp chí khoa học và Công nghệ- Đại Học Đà Nẵng*, trang 70-74, Vol.18, No 5.1, 2020.
4. **Nguyễn Anh Tuấn**, Trần Thiên Thanh, Võ Nguyễn Quốc Bảo “Phân tích xác suất dừng hệ thống chuyển tiếp hai chiều sử dụng công nghệ thu thập năng lượng” *Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin và Truyền thông*, trang 29-36, Số 1&2 (CS.01), 2018.
5. **Nguyen Anh Tuan**, Vo Nguyen Quoc Bao, Truong Trung Kien, “Performance Analysis of Two-Way Decode-and-Forward Relaying System with Energy Harvesting Over Nakagami- m Fading Channels”, *2018 International Conference on Advanced Technologies for Communications*, pp. 265-269, ATC 2018.
6. **Nguyễn Anh Tuấn**, Võ Nguyễn Quốc Bảo, “Phân tích xác suất dừng hệ thống vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến”, *Tạp chí Khoa học công nghệ Thông tin và Truyền thông*, trang 26-33, số 3&4, (CS01), 2019.
7. **Nguyen Anh Tuan**, Nguyen Toan Van, “Energy Harvesting-based Transmission Schemes in Cognitive Radio Networks with a Power Beacon”, *Journal of Science and Technology - Technical Universities*, pp. 35-41, (144), 2020.