

**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**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

Hà Nội-2020

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**

LUẬN ÁN TIẾN SĨ KỸ THUẬT

CHUYÊN NGÀNH: Kỹ thuật viễn thông

MÃ SỐ: 9.52.02.08

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

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

Hà Nội - 2020

LỜI CAM ĐOAN

Nghiên cứu sinh xin cam đoan những nội dung nghiên cứu trình bày trong Luận án là công trình nghiên cứu của nghiên cứu sinh dưới sự hướng dẫn của các giáo viên hướng dẫn. Các số liệu, kết quả trình bày trong luận án là hoàn toàn trung thực và chưa được công bố bởi bất kỳ tác giả nào hay bất kỳ công trình nào trước đây. Các kết quả sử dụng đều đã được trích dẫn và trình bày theo đúng quy định.

Hà Nội, ngày tháng năm 2020

Tác giả

Nguyễn Anh Tuấn

LỜI CẢM ƠN

Trong quá trình nghiên cứu, nghiên cứu sinh đã nhận được nhiều sự giúp đỡ quý giá. Đầu tiên, nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới PGS.TS Võ Nguyễn Quốc Bảo và TS. Trương Trung Kiên đã hướng dẫn, định hướng nghiên cứu khoa học, giúp đỡ tác giả trong quá trình nghiên cứu và hoàn thành Luận án. Nghiên cứu sinh cũng xin gửi lời cảm ơn sâu sắc tới các thành viên trong Phòng Thí nghiệm thông tin vô tuyến - Học viện Công nghệ bưu chính viễn thông đã góp ý khoa học cho nội dung luận án.

Nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn tới Lãnh đạo Học viện công nghệ bưu chính viễn thông, Hội đồng khoa học, Hội đồng Tiến sĩ, Khoa Quốc tế và đào tạo sau đại học, Khoa Viễn thông- Học viện Công nghệ bưu chính viễn thông đã tạo điều kiện thuận lợi cho tác giả hoàn thành luận án này.

Nghiên cứu sinh xin gửi lời cảm ơn tới gia đình, bạn bè, đồng nghiệp đã luôn ủng hộ, động viên, chia sẻ, giúp đỡ tác giả hoàn thành luận án.

Hà Nội, Ngày tháng năm 2020

Tác giả

Nguyễn Anh Tuấn

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN	i
LỜI CẢM ƠN	ii
DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT	v
DANH MỤC HÌNH VẼ.....	vii
DANH MỤC KÝ HIỆU TOÁN HỌC	ix
MỞ ĐẦU.....	1
CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NHỮNG VẤN ĐỀ CHUNG.....	6
1.1. Hệ thống vô tuyến chuyển tiếp	6
1.2. Mô hình toán học kênh truyền Nakagami-m	8
1.3. Xác suất dừng hệ thống vô tuyến	9
1.4. Tổng quan kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến.....	9
1.4.1. Kiến trúc vật lý máy thu năng lượng vô tuyến.....	10
1.4.2. Nguồn năng lượng vô tuyến	12
1.4.3. Giao thức thu nhận năng lượng trong mạng chuyển tiếp	12
1.5. Tổng quan tình hình nghiên cứu về kỹ thuật thu thập năng lượng.....	16
1.6. Những nghiên cứu liên quan và hướng nghiên cứu của luận án	17
1.7. Kết luận chương.....	20
CHƯƠNG 2. PHÂN TÍCH, ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN CHUYỂN TIẾP MỘT CHIỀU SỬ DỤNG KỸ THUẬT THU THẬP NĂNG LƯỢNG.....	21
2.1. Giới thiệu	21
2.2. Phân tích hiệu năng hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều với kênh truyền ước lượng không hoàn hảo	22
2.2.1. Mô hình hệ thống	23
2.2.2. Phân tích xác suất dừng hệ thống.....	28
2.2.3. Kết quả mô phỏng và phân tích.....	31
2.3. Phân tích hiệu năng hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều sử dụng kỹ thuật đa anten.....	33
2.3.1. Mô hình hệ thống	34

2.3.2. Phân tích hiệu năng hệ thống	36
2.3.3. Kết quả mô phỏng và phân tích.....	41
2.4. Hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều song công.....	45
2.4.1. Mô hình hệ thống	46
2.4.2. Phân tích hiệu năng hệ thống	49
2.4.3. Kết quả mô phỏng và phân tích.....	51
2.5. Kết luận chương.....	54
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	56
3.1. Giới thiệu	56
3.2. Hệ thống chuyển tiếp hai chiều với kênh truyền fading Rayleigh	57
3.2.2. Mô hình hệ thống	57
3.2.3. Phân tích hiệu năng hệ thống	59
3.2.4. Kết quả mô phỏng và phân tích.....	62
3.3. Hệ thống chuyển tiếp hai chiều với kênh truyền Nakagami- <i>m</i>	67
3.3.1. Phân tích xác suất dừng hệ thống.....	68
3.3.2. Kết quả mô phỏng và phân tích.....	70
3.4. Kết luận chương.....	72
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	74
4.1. Giới thiệu	74
4.2. Mô hình hệ thống.....	76
4.3. Phân tích hiệu năng hệ thống thứ cấp.....	79
4.4. Kết quả mô phỏng và phân tích.....	86
4.5. Kết luận chương.....	90
KẾT LUẬN VÀ HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO	92
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH CÔNG BỐ	97
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	98

DANH MỤC CÁC TỪ VIẾT TẮT

AF	Amplify and Forward	Khuếch đại và chuyển tiếp
AWGN	Additive White Gaussian Noise	Nhiều trắng Gauss cộng tính
BER	Bit Error Rate	Tỉ lệ lỗi bit
CDF	Cumulative distribution function	Hàm phân bố xác suất tích lũy
CMN	Conventional Multihop Network	Mạng truyền thông đa chặng truyền thống
CR	Cognitive radio	Vô tuyến nhận thức
CSI	Channel State Information	Thông tin trạng thái kênh
DF	Decode-and-Forward	Giải mã và chuyển tiếp
DT	Direct Transmission	Truyền trực tiếp
EH	Energy Harvesting	Thu thập năng lượng
FD	Full Duplex	Song công
HP	Half Duplex	Đơn công
IoT	Internet of Things	Kết nối vạn vật
MIMO	Multiple Input Multiple Output	Nhiều đầu vào nhiều đầu ra
MRC	Maximal Ratio Combining	Kết hợp tỷ số cực đại
OP	Outage Probability	Xác suất dừng hệ thống
PB	Power Beacon	Nguồn năng lượng ngoài
PDF	Probability Density Function	Hàm mật độ phân bố xác suất
PS	Power Splitting	Phân chia theo công suất
PSK	Phase Shift Keying	Điều chế pha
PT	Primary Transmitter	Máy phát sơ cấp
PU	Primary User	Máy thu sơ cấp
SE	Spectral Efficiency	Hiệu suất phổ tần

SER	Symbol Error Rate	Tỷ lệ lỗi symbol
SI	Self-Interference	Nhiều nội
SIC	Self-Interference Cancellation	Loại bỏ nhiễu nội
SNR	Signal-to-Noise Ratio	Tỷ số công suất tín hiệu trên công suất nhiễu
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
RSI	Residual Self-Interference	Nhiều nội dôi dư
TAS	Transmit Antenna Selection	Lựa chọn ăng ten phát
TS	Time Switching	Phân chia theo thời gian
WPT	Wireless Power Transfer	Truyền năng lượng vô tuyến

DANH MỤC HÌNH VẼ

Hình 1.1. Mô hình hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một nút chuyển tiếp.....	7
Hình 1.2. Mô hình hệ thống chuyển tiếp nhiều nút chuyển tiếp.....	7
Hình 1.3. Mô hình truyền và thu thập năng lượng vô tuyến.....	10
Hình 1.4. Sơ đồ khối thiết bị thu thập năng lượng vô tuyến.....	11
Hình 1.5. Giao thức thu thập năng lượng theo thời gian.....	13
Hình 1.6. Mô hình máy thu sử dụng giao thức phân chia theo thời gian.....	13
Hình 1.7. Giao thức phân chia theo ngưỡng công suất.....	14
Hình 1.8. Mô hình máy thu với kỹ thuật phân chia theo công suất.....	15
Hình 2.1. Mô hình hệ thống chuyển tiếp truyền gia tăng.....	24
Hình 2.2. Xác suất dừng hệ thống theo tỷ số tín hiệu trên nhiễu.....	31
Hình 2.3. Ảnh hưởng của α lên xác suất dừng hệ thống TS và ρ lên xác suất dừng hệ thống PS.	32
Hình 2.4. So sánh xác suất dừng hệ thống TS và PS với giá trị tối ưu của α và ρ	33
Hình 2.5. Mô hình lựa chọn nút chuyển tiếp từng phần.....	34
Hình 2.6. Khung thời gian truyền bán song công.....	36
Hình 2.7. Miền tích phân của công thức 2.45.....	38
Hình 2.8. So sánh kỹ thuật xấp xỉ đề xuất và kỹ thuật xấp xỉ truyền thống.....	42
Hình 2.9. Tỷ số xác suất dừng xấp xỉ và xác suất dừng mô phỏng.....	43
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.	43
Hình 2.11. Xác suất dừng hệ thống theo hệ số thời gian thu thập năng lượng với cấu hình nút nguồn và nút đích khác nhau.	44
Hình 2.12. Xác suất dừng hệ thống theo tỷ số tín hiệu trên nhiễu với các cấu hình khác nhau của nút nguồn và nút đích.....	45
Hình 2.13. Mô hình hệ thống chuyển tiếp song công thu thập năng lượng.....	46
Hình 2.14. Khảo sát OP theo SNR với tham số pha đỉnh m khác nhau.....	51
Hình 2.15. Khảo sát ảnh hưởng của SIC tới hiệu năng hệ thống.....	52
Hình 2.16. Khảo sát ảnh hưởng của m đến giá trị OP của hệ thống khi SNR=15 dB.....	53
Hình 2.17. Khảo sát OP theo α khi thay đổi SNR của hệ thống.....	54

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	57
Hình 3.2. Khảo sát xác suất dừng hệ thống theo P_{PB}	63
Hình 3.3. Khảo sát xác suất dừng hệ thống theo α	63
Hình 3.4. Xác suất dừng hệ thống theo P_{PB} : ảnh hưởng của vị trí PB.....	64
Hình 3.5. Xác suất dừng hệ thống theo α : ảnh hưởng của vị trí PB	65
Hình 3.6. Xác suất dừng hệ thống theo P_{PB} : ảnh hưởng của vị trí R	66
Hình 3.7. Xác suất dừng hệ thống theo α : ảnh hưởng của vị trí R	67
Hình 3.8. Khảo sát ảnh hưởng hệ số kênh truyền Nakagami- m tới OP	71
Hình 3.9. Khảo sát ảnh hưởng hệ số α tới OP khi thay đổi giá trị m	71
Hình 3.10. Khảo sát ảnh hưởng giá trị α tới OP khi thay đổi giá trị SNR	72
Hình 4.1. Mô hình hệ thống vô tuyến nhận thức thu thập năng lượng vô tuyến	76
Hình 4.2. Xác suất dừng hệ thống theo P_T và P_B	87
Hình 4.3. Xác suất dừng hệ thống theo I_p (dB)	88
Hình 4.4. Xác suất dừng hệ thống theo hệ số α	89
Hình 4.5. Xác suất dừng hệ thống theo vị trí của PB và P_T	90

DANH MỤC KÝ HIỆU TOÁN HỌC

$\mathbb{E}\{.\}$	Ký hiệu toán tử kỳ vọng
$E_i(.)$	Ký hiệu hàm tích phân mũ bậc i
$f_X(x)$	Hàm mật độ phân bố xác suất của biến ngẫu nhiên X (PDF)
$F_X(x)$	Hàm phân bố xác suất tích lũy của biến ngẫu nhiên X (CDF)
$I_0(.)$	Hàm Bessel sửa đổi bậc không loại một
I_p	Mức nhiễu tối đa đầu vào máy thu sơ cấp
$K_1(.)$	Hàm Bessel bậc nhất loại hai
$K[.,.]$	Hàm Bessel điều chỉnh loại hai
$Pr(.)$	Xác suất
γ_{th}	Ngưỡng dừng tại đầu vào máy thu
$\Gamma(.)$	Hàm Gamma hoàn chỉnh
$\Gamma(.,.)$	Hàm Gamma không hoàn chỉnh khuyết dưới
$\delta(.)$	Ký hiệu hàm Dirac
$CN(0, N_0)$	Phân bố chuẩn trung bình không, phương sai N_0
m	Tham số kênh truyền Nakagami- m
α	Hệ số phân chia thời gian thu thập năng lượng

MỞ ĐẦU

1. Bối cảnh nghiên cứu

Thu thập năng lượng và tái sử dụng năng lượng là một trong những hướng nghiên cứu được quan tâm gần đây và được xem là giải pháp quan trọng khả thi cho khái niệm “năng lượng xanh” [1] [2] [3] [4]. Trong xu hướng này, các nhà khoa học đã đề xuất nhiều kỹ thuật để thu thập năng lượng tự nhiên từ môi trường xung quanh, ví dụ như: thu thập năng lượng mặt trời, năng lượng gió, thủy triều, hoặc địa nhiệt [5]. Ưu điểm của các kỹ thuật thu thập năng lượng này là nguồn năng lượng dồi dào, nhưng nhược điểm là (i) đòi hỏi các hệ thống và kỹ thuật thu thập phức tạp và (ii) năng lượng thu thập không ổn định, phần nào phụ thuộc vào điều kiện thiên nhiên. Do đó, kỹ thuật thu thập năng lượng từ thiên nhiên khó có khả năng áp dụng vào trong các hệ thống thông tin, đặc biệt là thông tin vô tuyến di động khi mà kích thước và năng lực xử lý của hệ thống bị giới hạn [6] [7] [8].

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 được 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 khoảng cách giữa thiết bị cung cấp năng lượng và thiết bị thu năng lượng là giới hạn. 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 đến công nghệ thu thập từ tín hiệu vô tuyến với ý tưởng xuất phát từ Tesla [9]. 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 [5]. 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 [12].

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 vô tuyến 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 (NCS) tập trung nghiên cứu đánh giá hiệu năng hệ thống thông tin vô tuyến chuyển tiếp, hệ thống vô tuyến nhận thức có sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng nhằm mục đích đánh giá và đề xuất các giải pháp nâng cao hiệu năng hệ thống vô tuyến chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng.

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, đó là xác suất dừng hệ thống. Sau đó, kiểm chứng kết quả lý thuyết đạt được trên mô hình thống kê bằng 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 này sẽ trình bày các kỹ thuật và khái niệm chính liên quan tới hệ thống nghiên cứu trong luận án bao gồm: hệ thống vô tuyến chuyển tiếp, kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, các tham số ảnh hưởng tới hiệu năng của hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến. Chương này cũng dành một phần trình bày kết quả khảo sát những

nghiên cứu liên quan về kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến đến thời điểm hiện tại để làm rõ bài toán nghiên cứu của luận án cũng như các đóng góp của Luận án.

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 này tập trung vào phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống thông tin vô tuyến chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật truyền năng lượng vô tuyến và thu thập năng lượng vô tuyến. Trong chương này, NCS đề xuất, phân tích và đánh giá ba mô hình hệ thống chuyển tiếp hai chặng, cụ thể nút nguồn (S) vừa truyền thông tin và cũng là nguồn cung cấp năng lượng cho nút chuyển tiếp (R). Nút R có sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến do hạn chế về nguồn cung cấp năng lượng trực tiếp ví dụ như pin hay nguồn điện từ điện lưới. Mô hình thứ nhất sử dụng nhiều nút chuyển tiếp (R) và khảo sát ảnh hưởng của kênh truyền không hoàn hảo và hiệu năng của hệ thống. Mô hình thứ hai với giả sử rằng nút nguồn (S) và nút nguồn (D) có sử dụng đa ăng ten. Trong mô hình thứ ba, nút nguồn và nút đích sử dụng truyền bán song công, tuy nhiên nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật song công, cụ thể là nút (R) có hai anten có thể thu và phát tín hiệu đồng thời. Đối với ba mô hình này, NCS đã xác định công thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống và phân tích đánh giá các tham số ảnh hưởng tới hiệu năng 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. Chương 3 tập trung vào phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống thông tin vô tuyến chuyển tiếp hai chiều, sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến từ nguồn ngoài, trong bối cảnh các nút mạng bị hạn chế nguồn cung cấp năng lượng trực tiếp. Chương 3 tập trung vào mô hình hệ thống chuyển tiếp hai chiều có 03 nút và sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng từ nguồn ngoài ổn định (PB). NCS đã tiến hành phân tích đánh giá hiệu năng hệ thống với kênh truyền Rayleigh và Nakagami- m . Đồng thời, NCS cũng khảo sát ảnh hưởng của các tham số kênh truyền và tham số hệ thống lên hiệu năng của hệ thống. Từ kết quả khảo sát đánh giá, NCS đề xuất được giá trị tối ưu của các tham số nhằm nâng cao hiệu năng hệ thống.

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. Phân tích hiệu năng hệ

thông tin vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến từ nguồn ngoài và nguồn phát của mạng sơ cấp. Tại chương này, NCS đã đánh giá hiệu năng của hệ thống vô tuyến nhận thức với nút nguồn thu thập năng lượng từ nguồn ngoài ổn định và/hoặc từ nguồn năng lượng là máy phát trong mạng sơ cấp có công suất lớn. Đồng thời NCS đã đề xuất phương pháp phân tích và giải bài toán ảnh hưởng nhiều lần nhau giữa mạng sơ cấp và thứ cấp.

Phần kết luận và hướng nghiên cứu tiếp theo của Luận án sẽ trình bày tổng kết lại những nội dung nghiên cứu đã đạt được của Luận án, đồng thời đề xuất các hướng nghiên cứu tiếp theo của Luận án.

CHƯƠNG 1. TỔNG QUAN NHỮNG VẤN ĐỀ CHUNG

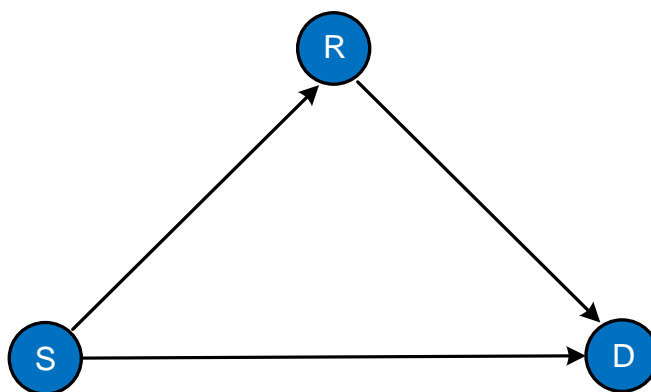
1.1. Hệ thống vô tuyến chuyển tiếp

Một trong những giải pháp nâng cao hiệu năng của hệ thống vô tuyến là sử dụng kỹ thuật phân tập phát và phân tập thu, hay gọi là MIMO (Multiple Input Multiple Output), nghĩa là dùng nhiều anten ở phía phát và nhiều anten (ăng ten) ở phía thu. Việc này sẽ dẫn tới tăng kích thước thiết bị do yêu cầu về khoảng cách giữa các anten để đảm bảo tính độc lập của tín hiệu phát hay nhận. Tuy nhiên, kích thước của thiết bị thường bị giới hạn trong một số trường hợp như các thiết bị thông tin di động cầm tay yêu cầu phải nhỏ gọn. Do đó, kỹ thuật phân tập không gian sẽ không thể thực hiện do các ràng buộc về kích thước thiết bị, về năng lực xử lý của thiết bị, cũng như về năng lượng lưu trữ cần thiết. Để khắc phục hạn chế đó, kỹ thuật chuyển tiếp hay kỹ thuật truyền thông cộng tác (hợp tác) gần đây được xem là một giải pháp hữu hiệu để tăng độ lợi phân tập không gian cho hệ thống khi mà phân tập thu không thể triển khai trên các thiết bị cầm tay.

Truyền thông hợp tác là khái niệm mới do tiến sĩ Laneman tại MIT đưa ra vào năm 2002 [13]. Truyền thông hợp tác cho phép các hệ thống vô tuyến đơn anten có thể hợp tác với nhau để truyền tải dữ liệu về nút đích nhằm tăng chất lượng của hệ thống, đạt được sự phân tập không gian phát như hệ thống MIMO. Hệ thống như vậy gọi là truyền thông hợp tác hay còn được gọi là hệ thống MIMO ảo. Kỹ thuật truyền thông hợp tác là trường hợp đặc biệt của truyền thông đa chặng chỉ với hai chặng. Hai loại mô hình hệ thống vô tuyến hợp tác tiêu biểu như sau:

a) Mô hình hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một nút chuyển tiếp

Mô hình hệ thống vô tuyến chuyển tiếp có một nút chuyển tiếp có 3 thành phần cơ bản: nút nguồn được ký hiệu là S; nút chuyển tiếp được ký hiệu R và nút thu tín hiệu đích, ký hiệu D. Chi tiết của mô hình như Hình 1.1 dưới đây.

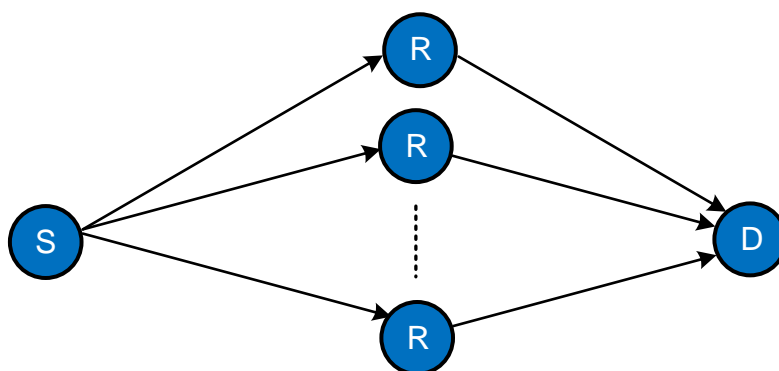


Hình 1.1. Mô hình hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một nút chuyển tiếp

Để truyền dữ liệu từ nút S tới nút D sẽ diễn ra trong hai khoảng thời gian trực giao. Trong khoảng thời gian thứ nhất: nút nguồn S phát quảng bá dữ liệu và tín hiệu này được nhận bởi nút đích D và nút chuyển tiếp R. Trong khoảng thời gian thứ hai, nút R sẽ chuyển tiếp dữ liệu thu được từ nút S và phát tới nút D. Trong trường hợp do nút D quá xa nút S (không nằm trong vùng phủ sóng) sẽ coi như không có đường truyền trực tiếp từ nút S tới nút D.

b) Mô hình hệ thống vô tuyến chuyển tiếp nhiều nút chuyển tiếp

Khác với mô hình hệ thống một nút chuyển tiếp, mô hình hệ thống chuyển tiếp nhiều nút chuyển tiếp như Hình 1.2 dưới đây. Tín hiệu từ nút nguồn S được phát tới N nút chuyển tiếp R nằm ở giữa nút nguồn và nút đích. Các nút chuyển tiếp nhận dữ liệu và phát tới nút đích. Mô hình này giúp tăng vùng phủ sóng của mạng thông tin vô tuyến.



Hình 1.2. Mô hình hệ thống chuyển tiếp nhiều nút chuyển tiếp

Để tăng độ lợi phân tập trong hệ thống vô tuyến chuyển tiếp, trong bối cảnh của truyền thông hợp tác chúng ta có thể sử dụng nhiều nút chuyển tiếp. Tuy nhiên, phương pháp truyền lặp lại từ các nút chuyển tiếp dẫn đến hiệu suất phổ tần thấp do

số lượng kênh trực giao sử dụng là bằng số lượng nút chuyển tiếp tham gia chuyển tiếp tín hiệu và hiệu suất phổ tần của hệ thống là tỉ lệ nghịch với số nút chuyển tiếp. Do đó, kỹ thuật lựa chọn nút chuyển tiếp ra đời đã khắc phục nhược điểm này và cho phép hệ thống đạt được độ lợi phân tập không gian đầy đủ.

1.2. Mô hình toán học kênh truyền Nakagami- m

Theo kết quả thực nghiệm, kênh truyền Nakagami- m phù hợp cho sóng ngắn truyền trên tầng điện ly. Một tín hiệu có biên độ phân bố theo phân bố Nakagami- m là tổng của nhiều tín hiệu phân bố Rayleigh độc lập và đồng nhất. Kênh truyền Nakagami- m phù hợp với các mô hình có can nhiễu vô tuyến từ nhiều nguồn khác nhau. Hệ số kênh truyền Nakagami- m là h , biên độ đáp ứng xung $|h|$ có phân bố theo phân bố Nakagami. Hàm mật độ phân bố xác suất của $|h|$ được xác định như sau:

$$f_{|h|}(x) = \begin{cases} \frac{2m^m x^{2m-1}}{\omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{mx^2}{\omega}\right), & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

với $\omega = \mathbb{E}\{|h|^2\}$ là công suất trung bình của kênh truyền, $\Gamma(\cdot; \cdot)$ là ký hiệu hàm Gamma, m là ký hiệu của tham số kênh truyền Nakagami- m , có giá trị từ $0 \rightarrow \infty$. Nếu giá trị m càng nhỏ thì giá trị kênh truyền càng xấu đi. Độ lợi kênh truyền $|h|^2$ của kênh truyền Nakagami- m là biến ngẫu nhiên phân bố theo phân bố Gamma, do đó hàm phân bố tích lũy của $|h|$ được xác định như sau:

$$F_{|h|^2}(x) = \begin{cases} 1 - \frac{\Gamma(m, mx/\omega)}{\Gamma(m)}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Kênh truyền Nakagami- m là kênh truyền có tính tổng quát nhất. Các kết quả nghiên cứu cho thấy từ kênh truyền Nakagami- m có thể suy ra các kênh fading khác bằng cách thay đổi tham số m . Nếu $m=1$ thì kênh truyền Nakagami- m sẽ trở thành kênh Rayleigh. Chú ý rằng với $m = \frac{(k+1)^2}{2k+1}$, kênh truyền Nakagami- m trở thành kênh fading Rice với hệ số Rice là k .

1.3. Xác suất dừng hệ thống vô tuyến

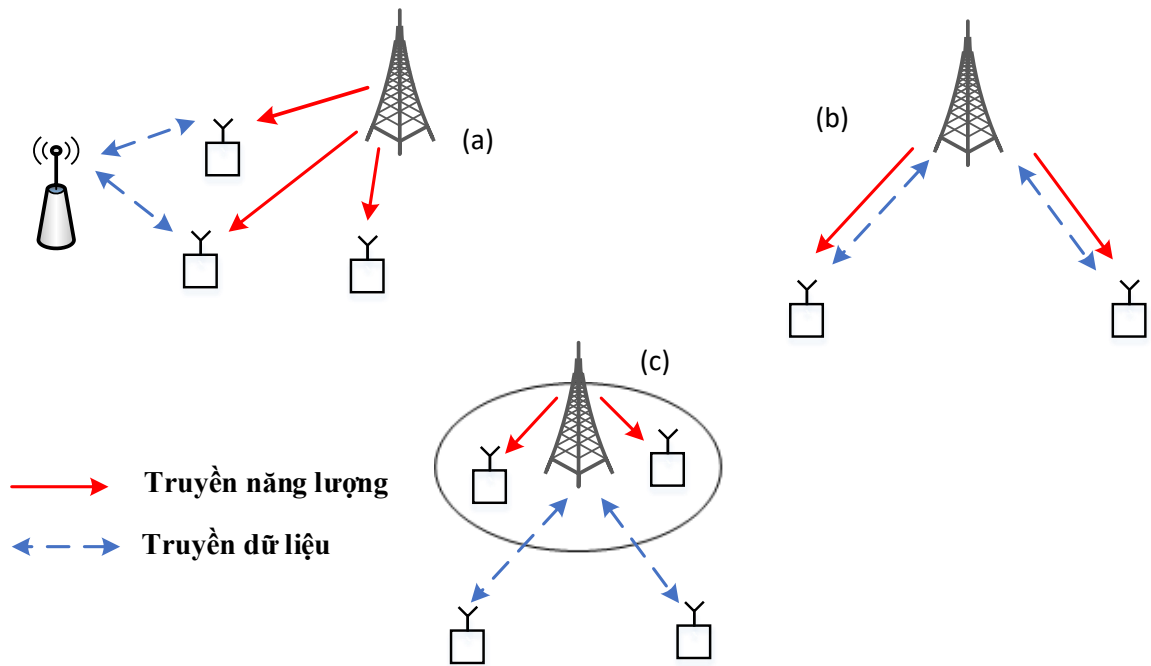
Xác suất dừng hệ thống là tham số đánh giá chất lượng hệ thống vô tuyến quan trọng đi từ khái niệm dung lượng Shannon của kênh truyền và tốc độ truyền mong muốn. Khi truyền tín hiệu vô tuyến trong môi trường đa đường thì tín hiệu thu được tại máy thu là một biến ngẫu nhiên. Nếu tỷ số tín hiệu trên nhiễu (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:

$$OP = \Pr(\gamma_R < \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_R}(\gamma) d\gamma \quad (1.3)$$

với $f_{\gamma_R}(\gamma)$ là hàm mật độ phân bố xác suất 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 vô tuyến 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 vô tuyến cho các nút mạng. Các nút mạng này dùng năng lượng thu thập được để tiến hành hoạt động 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 vô tuyến 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, đồng thời truyền năng lượng vô tuyến tới các nút của mạng vô tuyến khác. Cụ thể ba mô hình truyền năng lượng vô tuyến và thu thập năng lượng vô tuyến được mô tả như hình 1.3 dưới đây:

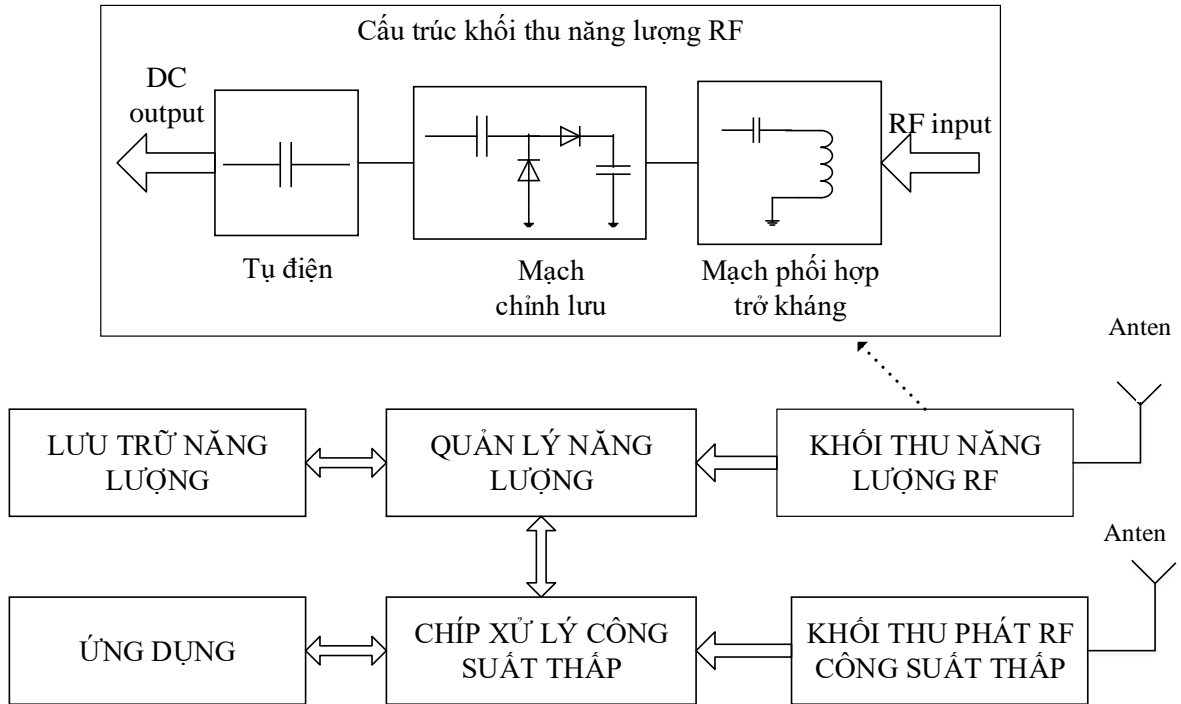


Hình 1.3. Mô hình truyền và thu thập năng lượng vô tuyến

Trong ba mô hình đề cập ở trên, 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 nhận được nhiều sự quan tâm nghiên cứu. Đối với các cảm biến vô tuyến, các nhà nghiên cứu bắt đầu nghiên cứu tới mô hình nguồn năng lượng độc lập vô hạn truyền năng lượng vô tuyến tới các nút mạng của hệ thống thông tin vô tuyến có nguồn năng lượng hạn chế. Gần đây, nhiều nhà nghiên cứu quan tâm mạng vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng từ máy phát của mạng sơ cấp và/hoặc một nguồn cung cấp năng lượng ổn định bên ngoài.

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

Sơ đồ khối thiết bị thu thập năng lượng vô tuyến được L. Xiao đưa ra tại [14] như dưới đây:



Hình 1.4. Sơ đồ khối thiết bị thu thập năng lượng vô tuyến

Theo [14], thông tin vô tuyến thu được sẽ tách làm hai phần, một phần đi vào khối xử lý thông tin, phần còn lại tới khối thu thập năng lượng. Đối với khối thu thập năng lượng vô tuyến (Energy Harvesting), tín hiệu vô tuyến được đi qua bộ phối hợp trở kháng và chỉnh lưu để tạo ra nguồn điện một chiều. Sau đó nguồn năng lượng một chiều đi qua bộ quản lý năng lượng và được lưu trữ tại khối lưu trữ năng lượng. Nguồn năng lượng này được cấp cho bộ phận xử lý thông tin vô tuyến, và phát thông tin tới nút đích. Các thành phần của phần thu thập năng lượng RF như sau:

(i) **Anten:** được thiết kế để hoạt động ở một tần số đơn hoặc một dải tần số sao cho các nút mạng có thể được thu thập năng lượng từ một hoặc nhiều nguồn khác nhau. Thông thường thiết kế anten hoạt động ở dải tần nhất định.

(ii) **Mạch phối hợp trở kháng** (Impedance matching): là một mạch cộng hưởng ở một dải tần số theo thiết kế ban đầu để tối ưu sự truyền năng lượng giữa anten và mạch chỉnh lưu. Với dải tần số thiết kế, đảm bảo hiệu năng của mạch phối hợp trở kháng là lớn nhất.

(iii) **Mạch chỉnh lưu** (Voltage multiplier): thành phần chính là đi-ốt tạo thành mạch chỉnh lưu để chuyển đổi tín hiệu AC (tín hiệu RF) thu được thành tín hiệu một chiều DC.

(iv) **Tụ điện** (Capacitor): là thành phần ổn định dòng ra cung cấp cho thành phần quản lý năng lượng. Khi năng lượng RF không có sẵn, các tụ điện có thể cung cấp năng lượng trong một khoảng thời gian ngắn.

1.4.2. Nguồn năng lượng vô tuyến

Khác với thu thập năng lượng các nguồn tự nhiên, thu thập năng lượng vô tuyến (RF) phụ thuộc vào khoảng cách máy phát năng lượng tới máy thu năng lượng vô tuyến, có trường hợp máy thu năng lượng cố định, hoặc máy thu năng lượng là di động. Vị trí của nguồn thu năng lượng vô tuyến sẽ quyết định mức năng lượng thu được. Có nhiều nguồn năng lượng vô tuyến hiện nay như nguồn năng lượng từ máy phát truyền hình công suất lớn, liên tục (có thể lên tới 1000kW), nguồn năng lượng cung cấp cho thiết bị nhận dạng vô tuyến (RFID) là khoảng 4-10W, đây được xem như nguồn năng lượng RF chuyên dụng có thể được phát triển để cung cấp cho những nút mạng cần nhiều năng lượng và liên tục. Nguồn RF chuyên dụng có thể sử dụng ở dải tần số được miễn cấp phép sử dụng tần số. Máy phát Powercaster hoạt động ở tần số 915MHz với công suất 1W tới 3W là ví dụ điển hình về nguồn RF chuyên dụng đã được thương mại hoá.

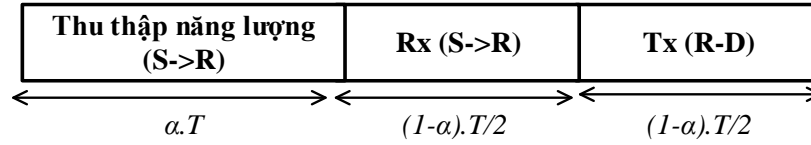
Tỷ lệ thu thập năng lượng vô tuyến từ một số nguồn phát điển hình hiện nay như [14] : máy phát đẳng hướng trên tần số 915 MHz, với công suất 4W, ở cự ly 15m thì tỷ lệ thu thập năng lượng là $5,5\mu\text{W}$; Máy phát đẳng hướng trên tần số 868 MHz (băng tần RFID 866-868MHz) có công suất 1,78 W, ở cự ly 25m thì tỷ lệ thu thập năng lượng là $2,3\mu\text{W}$; Một máy phát truyền hình công suất 960kW (phát sóng ở tần số 680 MHz), ở cự ly 4,1km thì tỷ lệ thu thập năng lượng là $60\mu\text{W}$.

1.4.3. Giao thức thu nhận năng lượng trong mạng chuyển tiếp

a) Giao thức phân chia theo thời gian

Quá trình thu thập năng lượng phân chia theo thời gian (TS- Time Switching) là quá trình xử lý tín hiệu tại nút chuyển tiếp theo trình tự. Đầu tiên, thu thập năng lượng cho nút chuyển tiếp, sau đó tín hiệu thông tin được xử lý tại nút chuyển tiếp, sau đó nút chuyển tiếp sử dụng năng lượng thu thập được để truyền

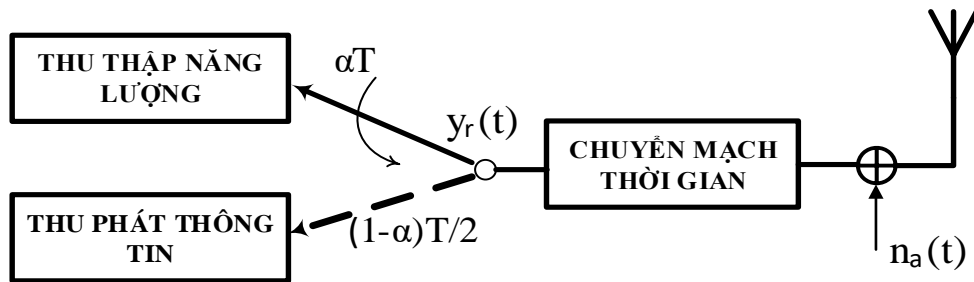
phát tín hiệu tới nút đích. Giao thức truyền từ nút nguồn tới nút đích như Hình 1.5 dưới đây:



Hình 1.5. Giao thức thu thập năng lượng theo thời gian

Hình 1.5 mô tả giao thức thu thập thông tin và chuyển tiếp dữ liệu tại nút chuyển tiếp R. Gọi T là chu kỳ phát tín hiệu từ nút nguồn tới nút đích, α là hệ số phân chia thời gian, với $0 \leq \alpha \leq 1$. Nút chuyển tiếp R dành thời gian αT để thu năng lượng từ nút nguồn S. Sau đó dành thời gian $\frac{(1-\alpha)T}{2}$ để xử lý tín hiệu, và dành thời gian còn lại $\frac{(1-\alpha)T}{2}$ để chuyển tiếp dữ liệu tới nút đích D. Trong trường hợp $\alpha = 0$, nút nguồn S sẽ không thu thập năng lượng và không thể truyền thông tin tới nút đích, hệ thống sẽ dừng. Trường hợp $\alpha = 1$, nút nguồn S dành toàn bộ thời gian T để thu thập năng lượng nên không có thời gian truyền thông tin tới nút đích, hệ thống cũng dừng. Hay nói cách khác hệ thống chỉ hoạt động khi $0 < \alpha < 1$.

Mô hình máy thu sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng phân chia theo thời gian được mô tả như hình 1.6 dưới đây [14]:



Hình 1.6. Mô hình máy thu sử dụng giao thức phân chia theo thời gian

Tín hiệu thu được tại nút chuyển tiếp $y_r(t)$ có dạng như sau:

$$y_r(t) = \frac{1}{\sqrt{d_1^l}} \sqrt{P_S} h_{SR} s(t) + n_a(t), \quad (1.4)$$

với h_{SR} là độ lợi kênh truyền chặng 1 từ S tới R, d_1 là khoảng cách từ S tới R, P_S là công suất phát tại nút nguồn; l là hệ số suy hao đường truyền; $s(t)$ là tín hiệu từ

nguồn với công suất trung bình chuẩn hoá, $E\{|s(t)|^2\} = 1$; $n_a(t)$ là tạp âm tại nút chuyển tiếp. Năng lượng nút chuyển tiếp thu thập được trong khoảng thời gian αT là E_h được xác định như sau [15]:

$$E_h = \frac{\varepsilon P_S |h_{SR}|^2}{d_1'} \alpha T, \quad (1.5)$$

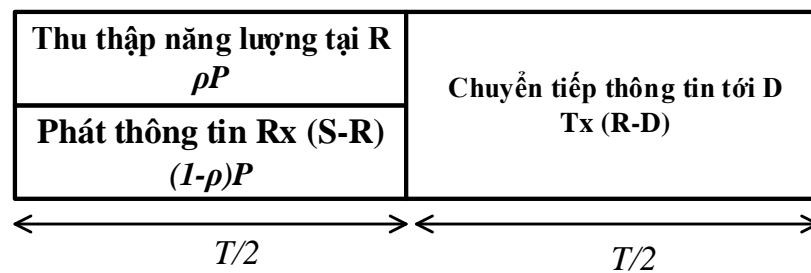
với ε là hệ số hiệu suất thu thập năng lượng của hệ thống và $0 < \varepsilon < 1$.

Từ công thức (1.5), công suất phát của nút chuyển tiếp khi chuyển tiếp dữ liệu tới nút đích P_R được tính như sau:

$$P_R = \frac{E_h}{(1-\alpha)T/2} = \frac{2\varepsilon P_S |h_{SR}|^2 \alpha}{d_1'(1-\alpha)}. \quad (1.6)$$

b) Giao thức phân chia theo ngưỡng công suất

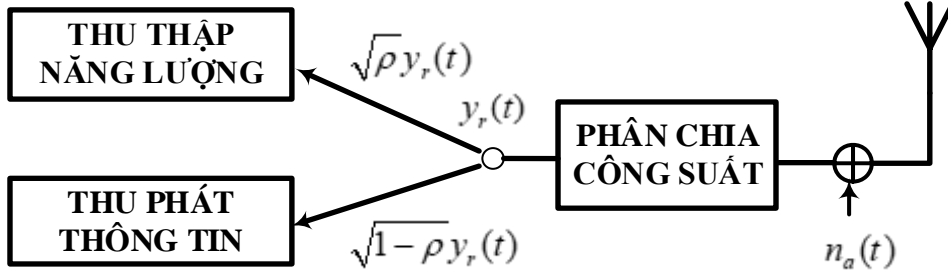
Quá trình thu thập năng lượng phân chia theo ngưỡng công suất (PS- Power Splitting) là quá trình xử lý thông tin tại nút chuyển tiếp chia thành hai giai đoạn. Đầu tiên, tín hiệu tới nút chuyển tiếp được tách thành hai phần, phần tín hiệu dành cho thu thập năng lượng, phần còn lại là thông tin cần chuyển tiếp. Nửa thời gian sau, tín hiệu được phát đi tới nút đích, ở đây nút chuyển tiếp dành toàn bộ năng lượng thu thập được để phát thông tin tới nút đích. Mô hình giao thức truyền như hình 1.7 dưới đây:



Hình 1.7. Giao thức phân chia theo ngưỡng công suất

Giao thức thu thập thông tin và chuyển tiếp dữ liệu tại nút chuyển tiếp. Gọi $y_r(t)$ là tín hiệu thu được tại nút chuyển tiếp có công suất là P . Gọi T là chu kỳ phát tín hiệu, nửa chu kỳ đầu $T/2$ nút nguồn S truyền tín hiệu tới nút chuyển tiếp R. Trong nửa chu kỳ sau $T/2$ nút chuyển tiếp R chuyển tiếp thông tin tới nút đích D. Gọi ρ là hệ số chia công suất của tín hiệu thu được tại nút chuyển tiếp, với

$0 < \rho < 1$. Theo đó, nút chuyển tiếp dành công suất ρP chuyển tiếp dữ liệu từ nút chuyển tiếp đến nút đích và công suất $(1 - \rho)P$ để giải mã thông tin. Hình 1.8 dưới đây mô tả sơ đồ máy thu với kỹ thuật phân chia theo ngưỡng công suất [14].



Hình 1.8. Mô hình máy thu với kỹ thuật phân chia theo công suất

Tín hiệu thu được tại nút chuyển tiếp $y_r(t)$ có dạng:

$$y_r(t) = \frac{1}{\sqrt{d_1'}} \sqrt{P_S} h_{SR} s(t) + n_a(t) . \quad (1.7)$$

Công suất của tín hiệu thu được là:

$$P = \frac{P_S |h_{SR}|^2}{d_1'} \quad (1.8)$$

Theo nguyên lý hoạt động một phần công suất của tín hiệu dành cho thu thập năng lượng, do đó tín hiệu thu thập được $y_{r_h}(t)$ có dạng:

$$\begin{aligned} y_{r_h}(t) &= \sqrt{\rho} y_r(t) \\ &= \frac{1}{\sqrt{d_1'}} \sqrt{P_S \rho} h_{SR} s(t) + \sqrt{\rho} n_a(t). \end{aligned} \quad (1.9)$$

Do năng lượng chỉ thu thập trong nửa chu kỳ $T/2$ nên năng lượng thu thập được tại nút chuyển tiếp E_h được tính như sau [15]:

$$E_h = \frac{\varepsilon P_S |h_{SR}|^2 \rho}{d_1'} (T/2). \quad (1.10)$$

Nút chuyển tiếp dành hết năng lượng thu thập được cho việc chuyển tiếp dữ liệu từ nút chuyển tiếp về nút đích trong nửa chu kỳ cuối $T/2$. Vì vậy công suất phát P_R từ nút chuyển tiếp về nút đích là:

$$P_R = \frac{E_n}{T/2} = \frac{\varepsilon P_S |h_{SR}|^2 \rho}{d_1^l}. \quad (1.11)$$

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:

- (i) 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.
- (ii) 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.
- (iii) Đề xuất các phương pháp tính toán chính xác hoặc xấp xỉ và tối ưu hiệu năng của mạng thu thập năng lượng.

Nếu phân loại theo nhóm nghiên cứu nổi bật về kỹ thuật thu thập năng lượng trên thế giới, chúng ta có thể liệt kê như sau:

- Nhóm nghiên cứu của giáo sư Rui Zhang (Đại Học Quốc Gia Singapore, Singapore) là nhóm tiên phong trên thế giới về lĩnh vực này, đã có những đóng góp rất quan trọng tại [16].
- Nhóm của giáo sư I. Krikidis (Đại Học Cyprus, Cyprus) đã khảo sát các kỹ thuật beamforming, chuyển tiếp, truyền thông hợp tác, chuyển tiếp đơn công/song công và trả lời câu hỏi về tỷ lệ thời gian tối ưu cho hệ thống giữa thời gian chuyển tiếp dữ liệu hay thời gian thu thập năng lượng khi các nút hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Các nghiên cứu tiêu biểu của nhóm tại [26].
- Nhóm của giáo sư Aylin Yener (Pennsylvania State University, USA): nghiên cứu về các chính sách thích ứng cho hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng ở kênh fading. Nghiên cứu tiêu biểu đã công bố tại [28].
- Và rất nhiều nhóm khác trên thế giới.

Tại Việt Nam, hiện tại cũng có một số nhóm nghiên cứu về lĩnh vực liên quan tới hướng nghiên cứu của luận án như sau:

- GS. TS. Trần Xuân Nam tập trung nghiên cứu về MIMO và các biến thể, ứng dụng của MIMO [30]-[31], [32];
- PGS. TS. Hồ Văn Khương nghiên cứu về hệ thống truyền thông hợp tác và vô tuyến nhận thức [33]-[37];
- TS. Hà Hoàng Kha nghiên cứu về tối ưu hiệu năng cho các hệ thống truyền thông hợp tác [38]-[40];
- TS. Trương Trung Kiên nghiên cứu về MIMO và hệ thống vô tuyến cộng tác [47-49].
- Nhóm của PGS. TS. Võ Nguyễn Quốc Bảo và TS. Trần Trung Duy tập trung nghiên cứu về truyền thông hợp tác, truyền thông chuyển tiếp, vô tuyến nhận thức, bảo mật lớp vật lý và gần đây là hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Các nghiên cứu tiêu biểu của nhóm như [50]-[57].

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

Để thấy rõ được bức tranh nghiên cứu của các nhà khoa học trên thế giới về hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, Nghiên cứu sinh khảo sát đánh giá các công trình nghiên cứu liên quan đã công bố trên các tạp chí, hội nghị quốc tế uy tín để từ đó xác định ra hướng nghiên cứu riêng, xác định mục tiêu nghiên cứu và đề xuất được những đóng góp khoa học.

Năm 2016, một số nhà khoa học đã có những nghiên cứu về mạng vô tuyến chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng ở nút chuyển tiếp [67-68]. Tại [67], Nút nguồn và nút đích sử dụng năng lượng sẵn có từ pin hay từ điện lưới, trong khi nút chuyển tiếp sử dụng năng lượng thu thập từ nguồn vô tuyến. Tuy nhiên, tại [67], tác giả chưa đưa ra được công thức dạng đóng của xác suất dừng hệ thống. Tại nghiên cứu [68] tác giả chỉ xác định được xác suất dừng hệ thống ở dạng chuỗi vô hạn và kết quả nghiên cứu cho kênh truyền là hoàn hảo, giả thiết chưa sát với thực tế. Ngoài ra, 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 tín hiệu trên nhiễu cao dựa trên hàm BesselK đề xuất bởi Nasir và các cộng sự trong [72]. 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.

Năm 2017, các nhà khoa học có những nghiên cứu về mạng vô tuyến chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Tại [75], tác giả đã xem xét mạng chuyển tiếp hai chiều thu thập năng lượng vô tuyến với một nút mạng không thu thập năng lượng và một nút mạng có sử dụng thu thập năng lượng. Nhóm tác giả đã đề xuất một giao thức truyền tối ưu dựa trên mô hình thu thập năng lượng ngẫu nhiên. Tại [76], nhóm tác giả đã phân tích chất lượng hệ thống truyền chuyển tiếp DF hai chiều ba pha thời gian trong đó nút chuyển tiếp thu thập năng lượng từ tín hiệu vô tuyến trong hai pha đầu tiên để chuyển đổi thành nguồn phát tín hiệu trong pha thời gian thứ ba. Với nghiên cứu này, nhóm tác giả phân tích chất lượng hệ thống theo hai thông số là xác suất dừng và thông lượng. Tuy nhiên, nhóm tác giả chưa đưa ra biểu thức dạng tường minh của xác suất dừng của toàn hệ thống và chưa nghiên cứu với kênh truyền Nakagami- m .

Năm 2018, nhiều nhà nghiên cứu đã kết hợp hệ thống chuyển tiếp song công (Full-Duplex) sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng như các bài báo [84] [85]. Các nghiên cứu đều tập trung vào mô hình mà nút chuyển tiếp thu nhận thông tin và năng lượng từ một nguồn chính. Tuy nhiên, vấn đề tránh ảnh hưởng của nhiễu đôi dư (RSI) chưa được quan tâm giải quyết.

Qua khảo sát các nghiên cứu liên quan, NCS đưa ra một số nhận xét như sau:

- Hệ thống thu thập năng lượng vô tuyến có nhược điểm là hiệu suất thu thập năng lượng thấp dẫn đến vùng phủ sóng kém. Để cải thiện vùng phủ sóng của mạng thu thập năng lượng vô tuyến, chúng ta cần áp dụng nhiều kỹ thuật như:
 - ✓ Kỹ thuật chuyển tiếp một chiều/hai chiều hay truyền thông hợp tác, kỹ thuật MIMO, kỹ thuật lựa chọn nút chuyển tiếp.
 - ✓ Máy phát năng lượng cố định (Power Beacon).
- Phân tích hiệu năng của hệ thống thu thập năng lượng vô tuyến ở dạng tường minh là chưa nhiều, hiện nay chỉ tồn tại xấp xỉ xác suất dừng hệ thống (do Nassir) đề nghị ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao khi mà hệ thống lại hoạt động ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp do năng lượng thu thập thấp.
- Để áp dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vào trong thực tế, ví dụ như mạng 5G và sau 5G, chúng ta cần phải xem xét kỹ thuật này trong bối cảnh thực tế ví dụ

như kênh truyền ước lượng không hoàn hảo hay kết hợp với các kỹ thuật khác như truyền song công, v.v.,

Sau khi đánh giá, phân tích, NCS 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 về kỹ thuật MIMO, truyền song công, 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 ước lượng không hoàn hảo, kỹ thuật MIMO, full-duplex 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 thiếu tính tổng quát 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

nhiệm vụ 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.

1.7. Kết luận chương

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 gồm ba phần: (i) 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; (ii) 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 ; (iii) thứ ba là, NCS nghiên cứu đánh giá hiệu năng hệ thống vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng.

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

2.1. Giới thiệu

Tại chương 2, Luận án thực hiện nghiên cứu đánh giá hệ thống vô tuyến chuyên tiếp một chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Chương 2 khảo sát đánh giá với ba loại hình khác nhau trong hệ thống chuyên tiếp một chiều, bao gồm: (i) Hệ thống chuyên tiếp một chiều với kênh truyền ước lượng không hoàn hảo, sử dụng nhiều nút chuyên tiếp (R); (ii) Hệ thống chuyên tiếp một chiều có nút phát và nút thu sử dụng đa ăng ten; (iii) Hệ thống một chiều sử dụng truyền song công, có nguồn cung cấp năng lượng ổn định bên ngoài. Với ba điều kiện khác nhau của hệ thống chuyên 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 và 3.

Trong mô hình (i), luận văn nghiên cứu cả hai phương pháp thu thập năng lượng vô tuyến phân chia theo thời gian (TS-Time Switching) và phân chia theo công suất (PS-Power Splitting). Để nâng cao hiệu năng của hệ thống, kỹ thuật chọn lựa nút chuyên tiếp đơn phần (Partial Relay Selection) và kỹ thuật truyền gia tăng đã được đề xuất. Luận án cũng khảo sát bài toán thực tế trong đó việc ước lượng kênh là không hoàn hảo. Phần này cũng đã đưa ra các phân tích toán học mới cho phép đánh giá xác suất dừng của hệ thống trên kênh truyền fading Rayleigh. Kết quả mô phỏng Monte-Carlo xác nhận tính chính xác của phương pháp phân tích đề xuất và mô hình đề xuất có ưu điểm so với phương pháp truyền trực tiếp ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu trung bình và cao. Đồng thời, các phân tích đánh giá cũng chỉ ra rằng hiệu năng của hệ thống TS và PS là như nhau nếu hệ số phân chia thời gian và phân chia năng lượng là tối ưu.

Với mô hình hệ thống thứ hai (ii), chương 2 đề xuất mô hình chuyên tiếp 02 chặng MIMO thu thập năng lượng vô tuyến khi nút nguồn và nút đích trang bị nhiều ăng ten, và nút chuyên tiếp chỉ có 01 ăng ten. Để cung cấp năng lượng hiệu quả cho nút chuyên tiếp và nâng cao chất lượng kênh truyền tại chặng thứ nhất, chương 2 đề xuất kỹ thuật chọn lựa ăng ten phát tốt nhất tại nguồn. Mặt khác, kỹ thuật kết hợp

MRC được sử dụng để nâng cao hiệu quả giải mã tại nút đích. Hơn thế nữa, chương 2 cũng đã đưa ra các phân tích và đánh giá mới cho phép xấp xỉ tốt hơn xác suất dừng hệ thống so với phương pháp phân tích xấp xỉ truyền thống, vốn chỉ phù hợp cho mạng với nút mạng đơn ăng ten. Các kết quả phân tích đề xuất được kiểm chứng với kết quả mô phỏng. Đồng thời đặc tính của mạng nghiên cứu cũng được nghiên cứu và kiểm chứng.

Khác với hai mô hình trên, mô hình (iii) nghiên cứu kỹ thuật truyền song công (full-duplex) nhằm nâng cao tốc độ truyền dẫn của hệ thống chuyển tiếp một chiều. Hơn nữa, mô hình (iii) cũng đề xuất một mô hình thu thập năng lượng hiệu quả, trong đó nguồn ngoài PB cung cấp năng lượng cho nút nguồn và nút chuyển tiếp. Công thức toán học của xác suất dừng hệ thống được xác định dưới dạng tường minh khi xem xét với kênh truyền fading Nakagami- m .

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

Hệ thống vô tuyến chuyển tiếp không những mở rộng vùng phủ sóng của mạng vô tuyến, mà còn có khả năng trong việc chống lại các ảnh hưởng xấu của các kênh fading mà không cần sử dụng nhiều tài nguyên tần số thêm. Kỹ thuật phân tập gồm kỹ phân tập phát và phân tập thu [40-45] (đa ăng ten ở nút nguồn và đa ăng ten ở nút đích) áp dụng cho mạng chuyển tiếp với mục đích cải thiện vùng phủ sóng và/hoặc nâng cao hơn nữa hiệu năng của mạng.

Khi áp dụng kỹ thuật thu thập năng lượng tại nút chuyển tiếp dẫn tới hiệu suất thu thập và năng lượng thu thập qua kênh truyền fading thường không cao, dẫn đến vùng phủ sóng rất hạn chế [58]. Để giải quyết bài toán này, kỹ thuật chuyển tiếp và truyền thông hợp tác thường được sử dụng để mở rộng vùng phủ sóng của các mạng vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng, ví dụ như [61]. Tuy nhiên, nhược điểm cố hữu của kỹ thuật chuyển tiếp và truyền thông hợp tác là hiệu suất phổ tần không cao, cần ít nhất hai khe thời gian cho một đơn vị dữ liệu, ngay cả khi kênh truyền trực tiếp từ nút nguồn đến nút đích là đủ tốt để giải điều chế đúng dữ liệu. Một trong giải pháp cải thiện hiệu suất phổ tần cho kỹ thuật chuyển tiếp và truyền thông hợp tác là kỹ thuật truyền gia tăng, nhiều nút chuyển tiếp [65].

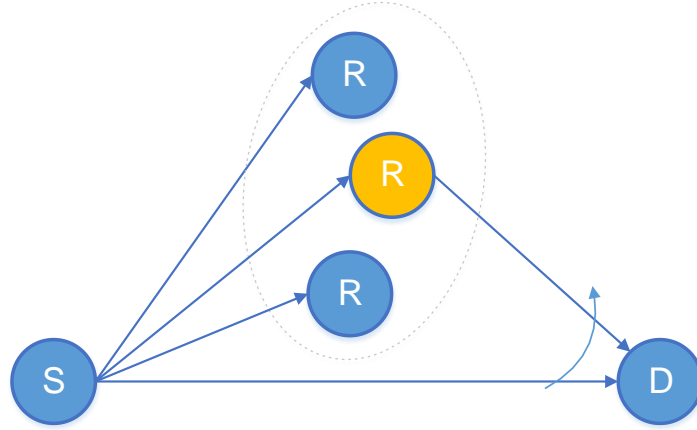
Tại phần này sẽ xem xét hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều có nhiều nút chuyển tiếp với kênh truyền không lý tưởng, sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng tại các nút chuyển tiếp. Việc sử dụng nhiều nút chuyển tiếp để tăng độ lợi phân tập trong hệ thống vô tuyến. Tuy nhiên, phương pháp này cho hiệu suất phổ tần thấp và tỷ lệ nghịch với số nút chuyển tiếp.

Đã có những nghiên cứu về mạng vô tuyến chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng ở nút chuyển tiếp [67-68]. Tại [67], Nút nguồn và nút đích sử dụng năng lượng sẵn có từ pin hay từ điện lưới, trong khi nút chuyển tiếp sử dụng năng lượng thu thập. Tuy nhiên, kết quả phân tích của xác suất dừng hệ thống trong [67] không được biểu diễn ở dạng đóng và kết quả trong [68] được biểu diễn ở dạng chuỗi vô hạn và cả hai đều giả sử kênh truyền là hoàn hảo.

Phần này đưa ra phương pháp phân tích mới để phân tích hiệu năng của hệ thống truyền gia tăng với kỹ thuật lựa chọn nút chuyển tiếp từng phần trong điều kiện kênh truyền không lý tưởng. Cả hai giao thức thu thập năng lượng phân chia năng lượng theo thời gian và theo công suất đều được xem xét. Công thức toán học của xác suất dừng hệ thống được xác định ở dạng tường minh và được kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo. Kết quả phân tích đã chỉ ra ưu điểm của hệ thống nghiên cứu ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu trung bình đến cao.

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 thống, 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

Gọi h_{SR_m} là hệ số kênh truyền từ nút nguồn đến nút chuyển tiếp R_m . Các nút chuyển tiếp thường sử dụng kỹ thuật điều chế hỗ trợ kỹ thuật chuỗi huấn luyện (pilot symbol assisted modulation) để ước lượng h_{SR_m} [31, 32]. Giá trị thực của hệ số kênh truyền từ $S \rightarrow R_m$ ký hiệu là \tilde{h}_{SR_m} liên hệ với h_{SR_m} thông qua mô hình sau:

$$\tilde{h}_{SR_m} = \beta h_{SR_m} + \sqrt{1 - \beta^2} \eta, \quad (2.1)$$

với β là hệ số tương quan kênh truyền đồng thời thể hiện chất lượng của quá trình ước lượng kênh truyền. Trong thực tế, β phụ thuộc vào tỷ số tín hiệu trên nhiễu trung bình và chiều dài của chuỗi ước lượng. Trong (2.1), η là sai lệch trong quá trình ước lượng được mô hình hóa là biến ngẫu nhiên Gauss phức với phương sai là λ_{SR_m} .

Khi có nhiều nút chuyển tiếp, hệ thống sẽ sử dụng kỹ thuật chọn nút chuyển tiếp từng phần để chọn nút chuyển tiếp có tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu tốt nhất bằng kỹ thuật định thời được đề xuất bởi Bletsas trong [69]. Sau khi nhận tín hiệu từ nút nguồn, thời gian định thời của mỗi nút chuyển tiếp sẽ tỷ lệ nghịch với độ lợi kênh truyền từ nút nguồn đến chính nó. Nút chuyển tiếp có thời gian định thời ngắn nhất sẽ phát trước tiên và cũng là nút chuyển tiếp của hệ thống trong pha chuyển tiếp trong khi các nút khác sẽ giữ im lặng. Tuy nhiên, do ảnh hưởng của kênh truyền không hoàn hảo, nên nút chuyển tiếp được chọn, ký hiệu là R_b , ký hiệu như sau:

$$R_b = \arg \max_{m=1, \dots, M} \tilde{\gamma}_{SR_m} \quad (2.2)$$

với

$$\tilde{\gamma}_{SR_m} = \frac{P_S |\tilde{h}_{SR_m}|^2}{N_0}, \quad (2.3)$$

Trong (2.3), P_S là công suất phát trung bình của nút nguồn và N_0 là phương sai của nhiễu trắng tại máy thu. Cần chú ý rằng:

$$\arg \max_{m=1, \dots, M} \tilde{\gamma}_{SR_m} \neq \arg \max_{m=1, \dots, M} \gamma_{SR_m}, \quad (2.4)$$

với $\gamma_{SR_m} = \frac{P_S |h_{SR_m}|^2}{N_0}$, nên hiệu năng hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật lựa chọn nút chuyển tiếp từng phần sẽ bị suy giảm.

Với kỹ thuật truyền gia tăng, quá trình truyền dữ liệu từ nút nguồn đến nút đích diễn ra trong hai pha: pha truyền quảng bá và pha truyền gia tăng. Trong pha quảng bá, nút nguồn sẽ truyền quảng bá dữ liệu, dữ liệu này sẽ được nhận tại nút đích và nút chuyển tiếp. Tại cuối pha này, nút đích sẽ kiểm tra tỷ số tín hiệu trên nhiễu nhận được, nếu tỷ số tín hiệu trên nhiễu lớn hơn giá trị cho trước, nút đích sẽ thực hiện giải điều chế mà không cần pha truyền gia tăng và sau đó tiếp tục với khung dữ liệu kế tiếp. Ngược lại, nút đích sẽ gửi tín hiệu hồi tiếp yêu cầu pha chuyển tiếp từ các nút chuyển tiếp. Trong pha truyền gia tăng, nút đích sẽ sử dụng tín hiệu hồi tiếp yêu cầu nút chuyển tiếp được lựa chọn chuyển tiếp tín hiệu mà nó nhận được từ nút nguồn.

Tại nút chuyển tiếp, xem xét hai phương thức thu thập năng lượng theo hai giao thức đó là phân chia theo thời gian và phân chia theo năng lượng như dưới đây.

a. Với hệ thống sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng giao thức phân chia theo thời gian:

Khảo sát hệ thống sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng với giao thức phân chia năng lượng theo thời gian (sau đây gọi là hệ thống TS), ta đặt T là khoảng thời gian truyền của một symbol và α là hệ số phân chia thời gian để thu thập năng lượng. Quá trình truyền thông tin từ nút nguồn đến nút đích sẽ diễn ra trong hai pha: pha quảng bá và pha truyền gia tăng với tỷ lệ thời gian lần lượt là $\frac{1-\alpha}{2}T$ và $\frac{1-\alpha}{2}T$. Do bản chất của hệ thống truyền gia tăng, pha quảng bá là pha bắt buộc và

pha truyền gia tăng là pha tùy chọn phụ thuộc vào chất lượng của kênh truyền trực tiếp.

Trong pha truyền gia tăng, nút chuyển tiếp sẽ thực hiện thu thập năng lượng trong khoảng thời gian αT và sau đó thực hiện chuyển tiếp tín hiệu trong khoảng thời gian $\frac{1-\alpha}{2}T$. Năng lượng mà nút chuyển tiếp thu thập được như sau:

$$E_h = \varepsilon P_S \left| \tilde{h}_{SR_b} \right|^2 \alpha T . \quad (2.5)$$

Từ (2.5), có thể tính công suất phát của nút chuyển tiếp khi thực hiện chuyển tiếp tín hiệu như sau:

$$P_R = \varepsilon \frac{2\alpha}{1-\alpha} P_S \left| \tilde{h}_{SR_b} \right|^2 . \quad (2.6)$$

Giả sử nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và điều chế, tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương của hệ thống như sau:

$$\gamma_\Sigma = \min(\tilde{\gamma}_{SR_b}, \gamma_{R_bD}) , \quad (2.7)$$

với $\tilde{\gamma}_{SR_b}$ và γ_{R_bD} lần lượt là tỷ số tín hiệu trên nhiễu từ kênh truyền $S \rightarrow R_b$ và $S \rightarrow R_b$.

Có thể viết γ_{SR_b} như sau:

$$\tilde{\gamma}_{SR_b} = \frac{P_S}{N_0} \max_{m=1, \dots, M} \tilde{\gamma}_{SR_m} , \quad (2.8)$$

và

$$\gamma_{R_bD} = \frac{P_R \left| h_{R_bD} \right|^2}{N_0} = \varepsilon \frac{\alpha}{1-\alpha} \frac{P_S}{N_0} \left| \tilde{h}_{SR_b} \right|^2 \left| h_{R_bD} \right|^2 \quad (2.9)$$

b. Với hệ thống sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng giao thức phân chia năng lượng theo mức công suất:

Khác với giao thức phân chia theo thời gian, hệ thống sử dụng giao thức phân chia theo mức công suất (sau đây gọi là hệ thống PS) sẽ cho phép chia năng lượng tín hiệu thu được thành hai thành phần: phần để giải điều chế tín hiệu và phần thu thập để chuyển tiếp tín hiệu. Khi đó, một nửa thời gian đầu $\frac{T}{2}$, nút nguồn sẽ

quảng bá dữ liệu trong khi các nút chuyển tiếp được lựa chọn nhận tín hiệu và năng lượng. Năng lượng thu thập tại nút chuyển tiếp được lựa chọn là:

$$E_h = \varepsilon \rho P_S \left| \tilde{h}_{SR_b} \right|^2 \frac{T}{2}, \quad (2.10)$$

với ρ là hệ số phân chia năng lượng của bộ thu thập năng lượng.

Trong khe thời gian sau $\frac{T}{2}$, nút chuyển tiếp sẽ chuyển tiếp dữ liệu với công suất như sau:

$$P_R = \varepsilon \rho P_S \left| \tilde{h}_{SR_b} \right|^2. \quad (2.11)$$

Có thể viết $\tilde{\gamma}_{SR_b}$ như sau:

$$\tilde{\gamma}_{SR_b} = \frac{(1-\rho)P_S}{(1-\rho)N_{a,0} + N_{b,0}} \max_{m=1,\dots,M} \left| \tilde{h}_{SR_m} \right|^2. \quad (2.12)$$

Để đơn giản, giả sử rằng $N_{a,0} = N_{b,0} = N_0$ dẫn đến

$$\tilde{\gamma}_{SR_b} = \frac{1-\rho}{2-\rho} \frac{P_S}{N_0} \max_{m=1,\dots,M} \left| \tilde{h}_{SR_m} \right|^2, \quad (2.13)$$

Với kênh truyền của chặng hai, tỷ số tín hiệu trên nhiễu tức thời xác định như sau:

$$\gamma_{R_bD} = \frac{P_R \left| h_{R_bD} \right|^2}{N_0} = \frac{\eta \rho P_S \left| \tilde{h}_{SR_b} \right|^2}{N_0} \left| h_{R_bD} \right|^2. \quad (2.14)$$

Kết hợp (2.8) và (2.13), viết lại $\tilde{\gamma}_{SR_b}$ trong cả hai trường hợp TS và PS như sau:

$$\tilde{\gamma}_{SR_b} = \chi_1 \frac{P_S}{N_0} \max_{m=1,\dots,M} \left| \tilde{h}_{SR_m} \right|^2, \quad (2.15)$$

với:

$$\chi_1 = \begin{cases} 1, & TS \\ \frac{1-\rho}{2-\rho}, & PS \end{cases} \quad (2.16)$$

Quan sát (2.9) và (2.14), ta thấy γ_{R_bD} có cùng dạng như sau:

$$\gamma_{R_bD} = \chi_2 \tilde{\gamma}_{SR_b} \left| h_{R_bD} \right|^2 \quad (2.17)$$

với

$$\chi_2 = \begin{cases} \varepsilon \frac{2\alpha}{1-\alpha}, & TS \\ \varepsilon\rho, & PS \end{cases}. \quad (2.18)$$

2.2.2. Phân tích xác suất dừng hệ thống

Trong phần này, sẽ phân tích xác suất dừng của hệ thống. Hàm mật độ phân

bố xác suất kết hợp giữa $\tilde{\gamma}_{SR_m}$ và γ_{SR_m} với $\gamma_{SR_m} = \chi_1 \frac{P_S |h_{SR_m}|^2}{N_0}$ ở kênh fading

Rayleigh có dạng như sau:

$$f_{\tilde{\gamma}_{SR_m}, \gamma_{SR_m}}(x, y) = \frac{e^{-\frac{x+y}{(1-\beta^2)\eta_{SR}}}}{(1-\beta^2)\bar{\gamma}_{SR}^2} I_0\left(\frac{2\beta\sqrt{xy}}{(1-\beta^2)\bar{\gamma}_{SR}}\right), \quad (2.19)$$

với $I_0(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi e^x \cos\theta d\theta$ là hàm Bessel điều chỉnh bậc một của loại một (the zeroth-order modified Bessel function of the first kind) [70].

Ở đây, giả sử rằng các nút chuyển tiếp do quá trình gom nhóm (cluster) nên

có khoảng cách đối với nút nguồn là như nhau, cụ thể là $\bar{\gamma}_{SR_m} = \frac{\chi_1 P_S \lambda_{SR_m}}{N_0} = \bar{\gamma}_{SR} \forall m$.

Áp dụng nguyên tắc thống kê quy nạp, hàm PDF của $\tilde{\gamma}_{SR_b}$, ký hiệu là

$f_{\tilde{\gamma}_{SR_b}}(\gamma)$, được xác định như sau [71]:

$$f_{\tilde{\gamma}_{SR_b}}(x) = \int_0^\infty f_{\tilde{\gamma}_{SR_b}|\gamma_{SR_b}}(x|y) f_{\gamma_{SR_b}}(y) dy, \quad (2.20)$$

với $f_{\tilde{\gamma}_{SR_b}|\gamma_{SR_b}}(x|y)$ là hàm PDF điều kiện của $\tilde{\gamma}_{SR_b}$ trên γ_{SR_b} , được viết lại như sau:

$$f_{\tilde{\gamma}_{SR_b}|\gamma_{SR_b}}(x|y) = \frac{f_{\tilde{\gamma}_{SR_m}, \gamma_{SR_m}}(x, y)}{f_{\gamma_{SR_m}}(y)}. \quad (2.21)$$

Thay thế (2.21) vào (2.20), viết lại hàm PDF của $\tilde{\gamma}_{SR_b}$ như sau:

$$f_{\tilde{\gamma}_{SR_b}}(x) = \int_0^\infty \frac{f_{\tilde{\gamma}_{SR_m}, \gamma_{SR_m}}(x, y) f_{\gamma_{SR_b}}(y)}{f_{\gamma_{SR_m}}(y)} dy, \quad (2.22)$$

Khi đó, hàm PDF của γ_{SR_b} có dạng như sau:

$$f_{\gamma_{SR_b}}(\gamma) = M \left[F_{\gamma_{SR_m}}(\gamma) \right]^{M-1} f_{\gamma_{SR_m}}(\gamma), \quad (2.23)$$

Với $F_{\gamma_{SR_m}}(y)$ và $f_{\gamma_{SR_m}}(y)$ lần lượt là hàm CDF và PDF của γ_{SR_m} . Xem xét kênh truyền fading Rayleigh:

$$F_{\gamma_{SR_m}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right), \quad (2.24)$$

và

$$f_{\gamma_{SR_m}}(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}_{SR}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right). \quad (2.25)$$

Thay thế (2.23) và (2.24) vào (2.22), sau đó sử dụng biểu thức nhị phân Newton, ta có:

$$f_{\gamma_{SR_b}}(y) = \sum_{m=1}^M \binom{M}{m} (-1)^{m-1} \frac{m}{\bar{\gamma}_{SR}} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \quad (2.26)$$

Thay thế (2.19), (2.25), và (2.26) vào (2.22) và thực hiện tích phân theo γ xác định được hàm PDF của $\tilde{\gamma}_{SR_b}$ như sau:

$$f_{\tilde{\gamma}_{SR_b}}(y) = \sum_{m=1}^M \binom{M}{m} (-1)^{m-1} \frac{m}{\bar{\gamma}_{SR} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}_{SR} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]}\right) \quad (2.27)$$

Giả sử nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp, tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của kênh truyền chuyển tiếp là như sau:

$$\gamma_{\mathcal{R}} = \min(\tilde{\gamma}_{SR_b}, \gamma_{R_bD}) \quad (2.28)$$

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

Trong trường hợp này, do chỉ có thời gian $\frac{1-\alpha}{2}T$ sử dụng để truyền dữ liệu, áp dụng định lý tổng xác suất, với \mathcal{R}_t là tốc độ dữ liệu mong muốn, có thể viết xác suất dừng của hệ thống như sau:

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

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

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

Để xác định được xác suất dừng hệ thống TS và hệ thống PS theo (2.29) và (2.30), cần xác định được:

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

Xác định $F_{\gamma_{\mathcal{R}}}(\gamma)$ như sau:

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{\mathcal{R}}}(\gamma) &= \Pr \left[\min(\tilde{\gamma}_{\text{SR}_b}, \gamma_{\text{R}_b\text{D}}) < \gamma \right] \\
&= 1 - \Pr \left[\tilde{\gamma}_{\text{SR}_b} > \gamma, \Gamma \tilde{\gamma}_{\text{SR}_b} \mid h_{\text{R}_b\text{D}} \right]^2 > \gamma \right] \\
&= 1 - \int_{\gamma}^{\infty} \left[1 - F_{\mid h_{\text{R}_b\text{D}} \mid^2} \left(\frac{\gamma}{\Gamma x} \right) \right] f_{\tilde{\gamma}_{\text{SR}_b}}(x) dx
\end{aligned} \tag{2.32}$$

Khi $F_{\mid h_{\text{R}_b\text{D}} \mid^2}(\gamma)$ có cùng dạng với $F_{\gamma_{\text{SD}}}(\gamma)$, thay thế (2.27) vào (2.32), ta có:

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{\mathcal{R}}}(\gamma) &= 1 - \sum_{m=1}^M \binom{M}{m} (-1)^{m-1} \frac{m}{\bar{\gamma}_{\text{SR}} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]} \\
&\quad \times \int_{\gamma}^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma \lambda_{\text{RD}} x} - \frac{mx}{\bar{\gamma}_{\text{SR}} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]}\right) dx.
\end{aligned} \tag{2.33}$$

Khi ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiều cao, nên có thể xấp xỉ $F_{\gamma_{\mathcal{R}}}(\gamma)$ như sau:

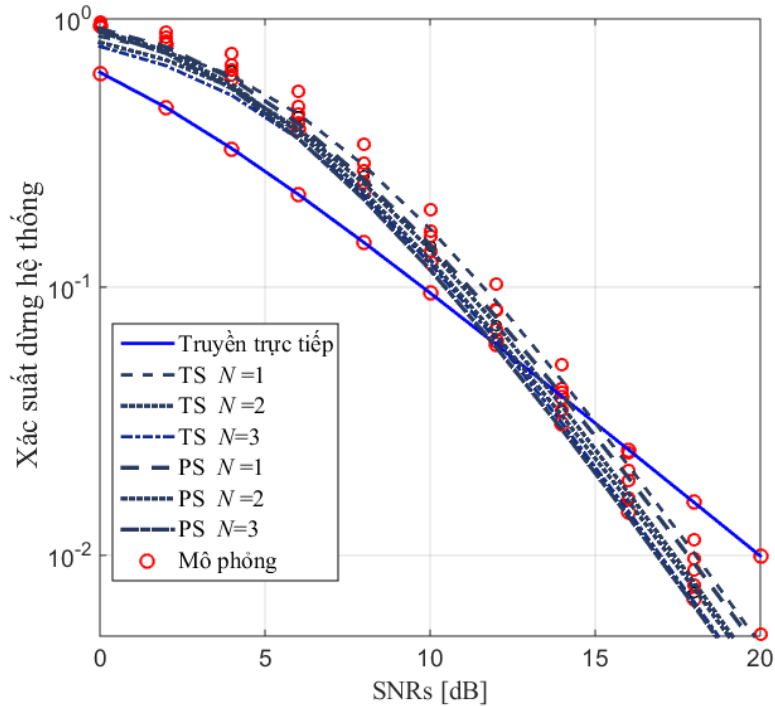
$$\begin{aligned}
F_{\gamma_R}(\gamma) &= 1 - \sum_{m=1}^M \binom{M}{m} (-1)^{m-1} \frac{m}{\bar{\gamma}_{SR} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]} \\
&\times 2 \sqrt{\frac{\gamma \bar{\gamma}_{SR} [1 + (m-1)(1-\beta^2)]}{\chi \lambda_{RD} m}} \\
&\times \text{BesselK} \left[1, 2 \sqrt{\frac{\gamma m}{\chi \lambda_{RD}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

với $\text{BesselK}[\cdot, \cdot]$ là hàm Bessel điều chỉnh loại hai [70].

Cuối cùng, 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.

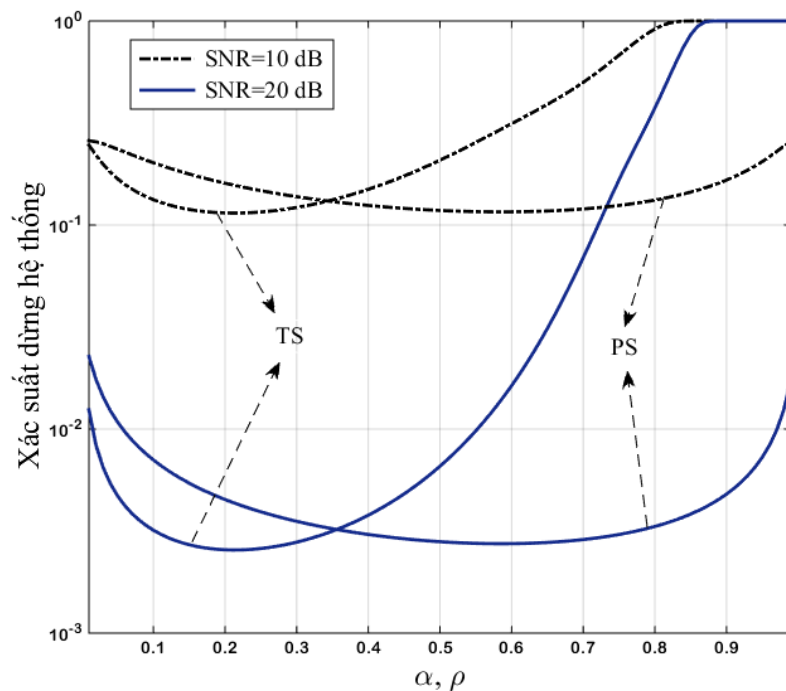
2.2.3. Kết quả mô phỏng và phân tích

Trong phần này, NCS sẽ thực hiện mô phỏng hệ thống TS và PS trên phần mềm Matlab nhằm kiểm chứng phương pháp phân tích đề xuất và chứng minh ưu điểm của mô hình đề xuất trong trường hợp kênh truyền không hoàn hảo. Kênh truyền xem xét là kênh truyền fading Rayleigh với độ lợi trung bình của các kênh truyền lần lượt là: $\lambda_{SD} = 1$, $\lambda_{SR} = 2$, và $\lambda_{RD} = 3$. Các tham số của hệ thống được chọn như sau: $\mathcal{R} = 1 \text{ bit/s/Hz}$, $\varepsilon = 0.6$, $\alpha = 0.3$, $\rho = 0.5$, và $\beta = 0.7$.



Hình 2.2. Xác suất dừng hệ thống theo tỷ số tín hiệu trên nhiễu

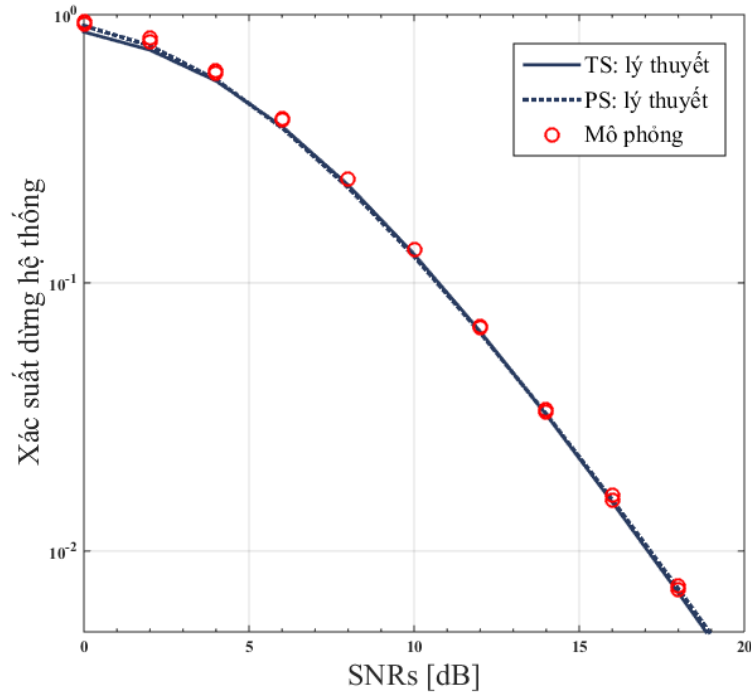
Trong hình 2.2 biểu diễn xác suất dừng của hệ thống TS và PS khi số lượng nút chuyển tiếp thay đổi từ 01 đến 03. Có thể thấy rằng, hiệu năng của hệ thống được cải thiện khi số lượng nút chuyển tiếp tăng lên trong cả hai trường hợp. Tuy nhiên, mức độ cải thiện sẽ giảm khi số lượng nút càng tăng. Để tham chiếu, NCS vẽ xác suất dừng của hệ thống truyền trực tiếp (DT). Giả thiết rằng nút nguồn trong cả hai trường hợp đều sử dụng cùng một mức công suất phát và tốc độ truyền dữ liệu mong muốn. Hình 2.2 chỉ ra rằng mô hình truyền gia tăng đề xuất chỉ hiệu quả ở vùng tỷ số tín hiệu trên nhiễu trung bình đến cao, nghĩa là không hiệu quả ở vùng nhiễu thấp. Cụ thể, mô hình TS và PS sẽ tốt hơn mô hình truyền trực tiếp lần lượt ở xấp xỉ 12 dB và 14 dB. Kết quả này được lý giải là do mô hình truyền gia tăng sử dụng nhiều hơn một pha truyền khi mà kênh truyền trực tiếp không đảm bảo tốc độ truyền mong muốn.



Hình 2.3. Ảnh hưởng của α lên xác suất dừng hệ thống TS và ρ lên xác suất dừng hệ thống PS.

Hình 2.3 biểu diễn xác suất dừng hệ thống OP theo giá trị của α cho hệ thống TS và giá trị ρ của hệ thống PS. Hệ số phân chia thời gian α và hệ số phân chia năng lượng ρ là hệ số quan trọng và ảnh hưởng nhiều tới hiệu năng hệ thống. Xem xét với hai trường hợp tỷ số tín hiệu trên nhiễu trung bình (SNR) lần lượt là 10 dB và

20 dB. Hình 2.3 chỉ ra rằng giá trị tối ưu của α và ρ đối với hệ thống TS và PS và không phụ thuộc vào SNR. Cụ thể, trong cùng một điều kiện kênh truyền, giá trị tối ưu của α xấp xỉ là 0.21 và giá trị tối ưu của ρ xấp xỉ là 0.59 và đặc biệt là không phụ thuộc vào tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR.



Hình 2.4. So sánh xác suất dừng hệ thống TS và PS với giá trị tối ưu của α và ρ

Hình 2.4 biểu diễn xác suất dừng hệ thống OP theo tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu SNR với lựa chọn số nút chuyển tiếp là 03, lựa chọn giá trị tối ưu của $\alpha = 0,21$ và $\rho = 0,59$. So sánh xác suất dừng hệ thống TS và PS trong cùng điều kiện kênh truyền nhận thấy rằng xác suất dừng của hệ thống trong cả hai trường hợp với cùng số lượng nút chuyển tiếp là hoàn toàn tương đương.

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

Trong phần này sẽ phân tích 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, NCS phân tích xác suất dừng

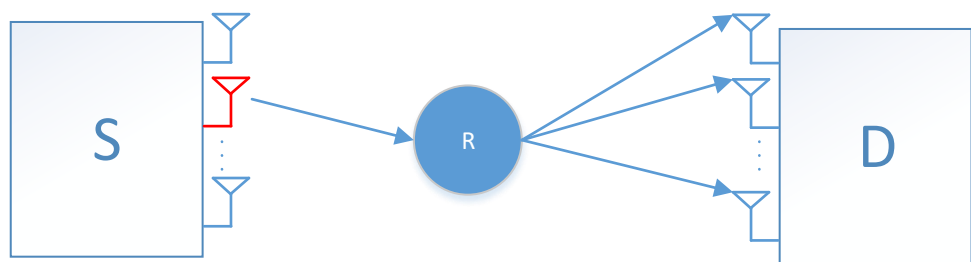
ở kênh truyền fading Rayleigh. Các kết quả phân tích sẽ được kiểm chứng bởi mô phỏng Monte-Carlo trên phần mềm Matlab.

Để phân tích hiệu năng của mạng, 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 đề xuất bởi Nasir và các cộng sự trong [72]. Nhược điểm của kỹ thuật này là độ sai lệch sẽ tăng nhanh ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiều thấp, đặc biệt là các chặng không đối xứng. Với mô hình đề xuất, nghiên cứu sinh 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 của Nasir và có thể áp dụng cho hệ thống sử dụng nhiều anten.

2.3.1. Mô hình hệ thống

Xem xét mô hình hệ thống như hình 2.5 bao gồm một nút nguồn (S), một nút chuyển tiếp (R) và một nút đích (D). Giả sử rằng nút nguồn và nút đích lần lượt có N_S và N_D anten trong khi nút chuyển tiếp chỉ có một anten.

Giả sử rằng nút nguồn S và một nút đích D được cung cấp năng lượng ổn định, nút R bị giới hạn về nguồn cung cấp năng lượng và phải thu thập năng lượng vô tuyến từ S để thu phát thông tin.



Hình 2.5. Mô hình lựa chọn nút chuyển tiếp từng phần

Giả sử không tồn tại kênh truyền trực tiếp từ nút nguồn S tới nút đích D, do vùng phủ sóng của nút nguồn giới hạn hoặc do có vật cản giữa nút nguồn và nút đích. Gọi $h_{1,i}$ với $i = 1, \dots, N_S$ và $h_{2,j}$ với $j = 1, \dots, N_D$ lần lượt là hệ số kênh truyền của kênh truyền từ anten thứ i của nút nguồn S tới R và kênh truyền từ nút chuyển tiếp R đến anten thứ j của nút đích D.

Xem xét ở kênh truyền fading Rayleigh, độ lợi kênh truyền $|h_{1,i}|^2$ và $|h_{2,j}|^2$ có phân bố hàm mũ với tham số λ_1 và λ_2 .

Giả sử rằng hệ thống sử dụng kỹ thuật bán song công và nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp DF (Decode-Forward) để chuyển tiếp dữ liệu đến nút đích, sử dụng giao thức phân chia năng lượng theo thời gian. Đặt T là chu kỳ phát của một symbol, quá trình truyền bán song công diễn ra theo ba pha thời gian như sau:

Pha 1: là pha thu thập năng lượng của nút chuyển tiếp, diễn ra trong khoảng thời gian αT với α là hệ số phân chia thời gian thu thập năng lượng, $0 < \alpha < 1$. Khi đó, năng lượng mà nút chuyển tiếp thu thập được là:

$$E_H = \varepsilon P_S |h_{i^*}|^2 \alpha T, \quad (2.35)$$

với ε là hệ số hiệu suất chuyển đổi năng lượng $0 < \varepsilon < 1$ và P_S là công suất phát tại nút nguồn S. Ký hiệu i^* là chỉ số của anten có tỷ số tín hiệu trên nhiễu lớn nhất của chặng 1, với $i^* = \arg \max_{1, \dots, N_S} |h_{1,i}|^2$.

Pha 2: là pha quảng bá dữ liệu của nút nguồn, diễn ra trong khoảng thời gian $(1-\alpha)T/2$. Với kỹ thuật lựa chọn anten phát tại nút nguồn, nên tại anten có tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu lớn nhất của chặng 1, sẽ được chọn để truyền dữ liệu về nút chuyển tiếp với giả sử rằng kênh truyền là không đổi trong pha 1 và pha 2 dẫn đến tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu của chặng 1 như sau:

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{P_S |h_{1,i^*}|^2}{N_0} \\ &= \frac{P_S}{N_0} \max_{1, \dots, N_S} |h_{1,i}|^2, \end{aligned} \quad (2.36)$$

với N_0 là công suất nhiễu AWGN tại các máy thu.

Pha 3: là pha chuyển tiếp dữ liệu của nút chuyển tiếp đến nút đích diễn ra trong khoảng thời gian $(1-\alpha)T/2$ với công suất như sau:

$$P_R = \frac{2\varepsilon\alpha P_S |h_{1,i^*}|^2}{1-\alpha} \quad (2.37)$$

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu từ nút chuyển tiếp đến anten thứ j của nút đích được cho như sau:

$$\gamma_{2,j} = \frac{2\varepsilon\alpha P_S |h_{1,i^*}|^2 |h_{2,j}|^2}{(1-\alpha)N_0} \quad (2.38)$$

Giả sử nút đích sử dụng kỹ thuật kết hợp tối ưu MRC, tỷ số tín hiệu trên nhiễu của chặng hai được xác định như sau:

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \sum_{j=1}^{N_D} \frac{2\varepsilon\alpha P_S |h_{1,i^*}|^2 |h_{2,j}|^2}{(1-\alpha)N_0} \\ &= \frac{2\varepsilon\alpha P_S |h_{1,i^*}|^2}{(1-\alpha)N_0} \sum_{j=1}^{N_D} |h_{2,j}|^2 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Chu kỳ phát tín hiệu T

Pha 1 Thu thập năng lượng	Pha 2 Quảng bá tín hiệu (S tới R)	Pha 3 Chuyển tiếp tín hiệu (R tới D)
αT	$(1-\alpha)T/2$	$(1-\alpha)T/2$

Hình 2. 6. Khung thời gian truyền bán song công

Khi nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp, hiệu năng của hệ thống sẽ bị quyết định bởi chặng yếu hơn. Biểu diễn theo biểu thức toán học, tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương của hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \gamma_\Sigma &= \min(\gamma_1, \gamma_2) \\ &= \min\left(\frac{P_S}{N_0} \max_{i=1, \dots, N_S} |h_{1,i}|^2, \frac{2\varepsilon\alpha P_S^2}{(1-\alpha)N_0} \max_{i=1, \dots, N_S} |h_{1,i}| \sum_{j=1}^{N_D} |h_{2,j}|^2\right) \end{aligned} \quad (2.40)$$

2.3.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

Biểu thức tính dung lượng C chuẩn hóa tức thời hệ thống theo α là:

$$C(\alpha) = \frac{1-\alpha}{2} \log_2(1 + \gamma_\Sigma), \quad (2.41)$$

với tiền tố $\frac{1-\alpha}{2}$ là do quá trình thu thập năng lượng và truyền đơn công. Từ (2.41),

có thể xác định xác suất dừng của hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr \left[\frac{1-\alpha}{2} \log_2(1+\gamma_\Sigma) < \mathcal{R} \right] \\ &= \Pr \left[\gamma_\Sigma < 2^{\frac{2\mathcal{R}}{1-\alpha}} - 1 \right], \end{aligned} \quad (2.42)$$

với $\gamma_{th} = 2^{\frac{2\mathcal{R}}{1-\alpha}} - 1$, \mathcal{R} là tốc độ dữ liệu mong muốn.

Để dễ dàng phân tích, đặt tham số như sau:

$$\beta_1 = \max_{i=1, \dots, N_s} |h_{1,i}|^2. \quad (2.43)$$

và

$$\beta_2 = \sum_{j=1}^{N_D} |h_{2,j}|^2. \quad (2.44)$$

Khi đó, ta có thể viết lại OP ở (2.42) như sau

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr \left[\min \left(\frac{P_s}{N_0} \beta_1, \frac{2\varepsilon\alpha P_s}{(1-\alpha)N_0} \beta_1 \beta_2 \right) < \gamma_{th} \right] \\ &= 1 - \Pr \left(\frac{P_s}{N_0} \beta_1 > \gamma_{th}, \frac{2\varepsilon\alpha P_s}{(1-\alpha)N_0} \beta_1 \beta_2 > \gamma_{th} \right) \\ &= 1 - \Pr \left(\underbrace{\beta_1 > \frac{\gamma_{th}}{\frac{P_s}{N_0}}, \beta_1 \beta_2 > \frac{\gamma_{th}}{\frac{2\varepsilon\alpha P_s}{(1-\alpha)N_0}}}_{\mathcal{I}} \right) \end{aligned} \quad (2.45)$$

Để có thể tính toán xác suất dừng OP, cần biết được hàm CDF và PDF của β_1 và β_2 .

Giả sử kênh truyền là độc lập lẫn nhau, xác định hàm CDF của β_1 như sau:

$$F_{\beta_1}(x) = \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_1}} \right)^{N_s}. \quad (2.46)$$

Triển khai nhị thức Newton cho biểu thức (2.46):

$$F_{\beta_1}(x) = \sum_{i=1}^{N_s} \binom{N_s}{i} (-1)^{i-1} \left(1 - e^{-\frac{x}{\lambda_1}} \right) \quad (2.47)$$

Từ (2.47), xác định hàm PDF của β_1 như sau:

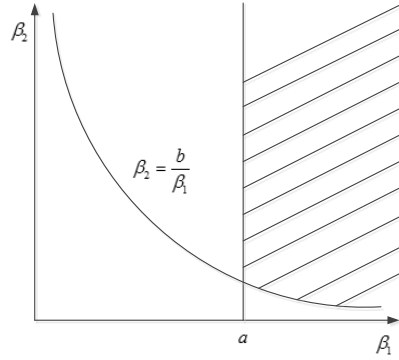
$$f_{\beta_1}(x) = \sum_{i=1}^{N_S} (-1)^{i-1} \binom{N_S}{i} \frac{i}{\lambda_1} e^{-\frac{ix}{\lambda_1}} \quad (2.48)$$

Khi nút đích sử dụng kỹ thuật MRC, xác định hàm CDF và PDF của β_2 như sau:

$$F_{\beta_2}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda_2}} \sum_{j=0}^{N_D-1} \frac{1}{j!} \left(\frac{x}{\lambda_2}\right)^j. \quad (2.49)$$

và

$$f_{\beta_2}(x) = \frac{x^{N_D-1} e^{-\frac{x}{\lambda_2}}}{\Gamma(N_D) \lambda_2^{N_D}}. \quad (2.50)$$



Hình 2.7. Miền tích phân của công thức 2.45

Đặt $a = \frac{\gamma_{th}}{\frac{P_S}{N_0}}$ và $b = \frac{\gamma_{th}}{\frac{2\epsilon\alpha P_S}{(1-\alpha)N_0}}$, \mathcal{I} trong công thức (2.45) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(a, b) &= \Pr(\beta_1 > a, \beta_1 \beta_2 > b) \\ &= \int_a^{\infty} \left[1 - F_{\beta_2}\left(\frac{b}{x}\right) \right] f_{\beta_1}(x) dx \end{aligned} \quad (2.51)$$

Kết hợp (2.48) và (2.49), xác định được:

$$\mathcal{I}(a, b) = \int_a^{\infty} \left[e^{-\frac{b}{\lambda_2 x}} \sum_{j=0}^{N_D-1} \frac{1}{j!} \left(\frac{b}{\lambda_2 x}\right)^j \right] \sum_{i=1}^{N_S} (-1)^{i-1} \binom{N_S}{i} \frac{i}{\lambda_1} e^{-\frac{ix}{\lambda_1}} dx \quad (2.52)$$

Hoán đổi vị trí của dấu tổng và dấu tích phân trong (2.52), ta viết lại $\mathcal{I}(a,b)$ như sau:

$$\mathcal{I}(a,b) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_D-1} \frac{(-1)^{i-1} i}{j! \lambda_1} \binom{N_s}{i} \left(\frac{b}{\lambda_2} \right)^j \underbrace{\int_a^\infty \frac{e^{-\left(\frac{i}{\lambda_1} x + \frac{b/\lambda_2}{x}\right)}}{x^j} dx}_{\mathcal{J}} \quad (2.53)$$

Tích phân \mathcal{J} trong (2.53) chưa tồn tại ở dạng đóng. Để giải quyết vấn đề này, quan sát tại vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu lớn thì $a = \frac{\gamma_{th}}{\frac{P_s}{N_0}} \rightarrow 0$, nên có thể xấp xỉ \mathcal{J} bằng cách thay đổi cận từ a về 0 như sau:

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &\approx \int_0^\infty \frac{e^{-\left(\frac{i}{\lambda_1} x + \frac{b/\lambda_2}{x}\right)}}{x^j} dx \\ &= 2 \left(\frac{i \lambda_2}{\lambda_1 b} \right)^{\frac{j-1}{2}} \text{BesselK} \left[j-1, 2 \sqrt{\frac{ib}{\lambda_1 \lambda_2}} \right]. \end{aligned} \quad (2.54)$$

với $\text{BesselK}[n,z]$ là hàm Bessel điều chỉnh loại hai [70].

Sử dụng kết quả từ (2.53), (2.54) và (2.45), xác suất dừng của hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &\approx 1 - \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_D-1} \frac{(-1)^{i-1} i}{j! \lambda_1} \binom{N_s}{i} \left(\frac{\gamma_{th}}{\frac{2\varepsilon\alpha P_s \lambda_2}{(1-\alpha)N_0}} \right)^j \\ &\quad \times \left(\frac{1-\alpha}{2\varepsilon\alpha} \right)^{\frac{j-1}{2}} 2 \text{BesselK} \left[j-1, 2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}}{P_s} \frac{\gamma_{th}}{2\varepsilon\alpha P_s}} \right. \\ &\quad \left. \sqrt{\frac{1}{N_0} \frac{1}{(1-\alpha)N_0}} \right]. \end{aligned} \quad (2.55)$$

Kỹ thuật xấp xỉ cho OP đạt được ở (2.55) dựa trên giả sử rằng hệ thống hoạt động ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao và chặng đầu tiên yếu hơn chặng thứ 2. Tuy nhiên, khi hệ thống thu thập hoạt động ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp có thể gây ra những sai lệch cho OP.

Để xác định OP chính xác hơn, NCS sẽ đề xuất một kỹ thuật xấp xỉ mới, cho phép đánh giá chính xác hơn xác suất dừng của hệ thống ở vùng tín hiệu trung bình và thấp. Cụ thể như sau:

Từ tích phân $\mathcal{J} = \int_a^\infty \frac{e^{-\left(\frac{i}{\lambda_1}x + \frac{b/\lambda_2}{x}\right)}}{x^j} dx$ ở (2.54) và sử dụng chuỗi cho hàm mũ, công thức

[21 Eq. (1.211.1)] ở [80], cụ thể như sau:

$$e^x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}, \quad (2.56)$$

Ta có thành phần tích phân thứ hai của \mathcal{J} như sau:

$$e^{-\frac{b/\lambda_2}{x}} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \left(\frac{b/\lambda_2}{x}\right)^k \quad (2.57)$$

Sử dụng (2.56), ta có:

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= \int_a^\infty \frac{e^{-\frac{i}{\lambda_1}x} e^{-\frac{b/\lambda_2}{x}}}{x^j} dx \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \left(\frac{b}{\lambda_2}\right)^k \int_a^\infty \frac{e^{-\frac{i}{\lambda_1}x}}{x^{j+k}} dx \end{aligned} \quad (2.58)$$

Áp dụng công thức [57 Eq. (3.351.4)] ở [80], ta có:

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \left(\frac{b}{\lambda_2}\right)^k \times \left[(-1)^{j+k} \frac{\left(\frac{i}{\lambda_1}\right)^{j+k-1} \text{Ei}\left(-\frac{ia}{\lambda_1}\right)}{(j+k-1)!} \right. \\ &\quad \left. + \frac{e^{-\frac{ia}{\lambda_1}}}{a^{j+k-1}} \sum_{\ell=0}^{j+k-2} \frac{(-1)^\ell \left(\frac{i}{\lambda_1}\right)^\ell a^\ell}{(j+k-1)(j+k-2)\dots(j+k-1-\ell)} \right] \end{aligned} \quad (2.59)$$

Từ (2.58), (2.59) và (2.45), ta có thể xác định suất dừng của hệ thống như sau:

$$\begin{aligned}
\text{OP} = & 1 - \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=0}^{N_D-1} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{i+k-1}}{j!k!} \binom{N_S}{i} \frac{i}{\lambda_1} \left(\frac{\gamma_{th}}{2\varepsilon\alpha P_S \lambda_2} \right)^{k+j} \\
& \times \left[\frac{(-1)^{j+k}}{(j+k-1)!} \left(\frac{i}{\lambda_1} \right)^{j+k-1} \text{Ei} \left(-\frac{i}{\lambda_1} \frac{\gamma_{th}}{P_S/N_0} \right) \right. \\
& \left. + \frac{e^{-\frac{i}{\lambda_1} \frac{\gamma_{th}}{P_S/N_0}}}{\left(\frac{\gamma_{th}}{P_S/N_0} \right)^{j+k-1}} \sum_{\ell=0}^{j+k-2} \frac{(-1)^\ell \left(\frac{i}{\lambda_1} \right)^\ell \left(\frac{\gamma_{th}}{P_S/N_0} \right)^\ell}{(j+k-1)(j+k-2)\dots(j+k-1-\ell)} \right]. \tag{2.60}
\end{aligned}$$

Trong thực tế, không thể tiến hành khảo sát với giá trị k tiến tới vô hạn. Khi mà chuỗi vô hạn của e^x mà sử dụng là chuỗi hội tụ, có thể sử dụng một số thành phần đầu tiên của chuỗi để xấp xỉ và đạt kết quả mong đợi. Gọi N_t là số thành phần đầu tiên của chuỗi (2.60), có thể xấp xỉ OP như sau:

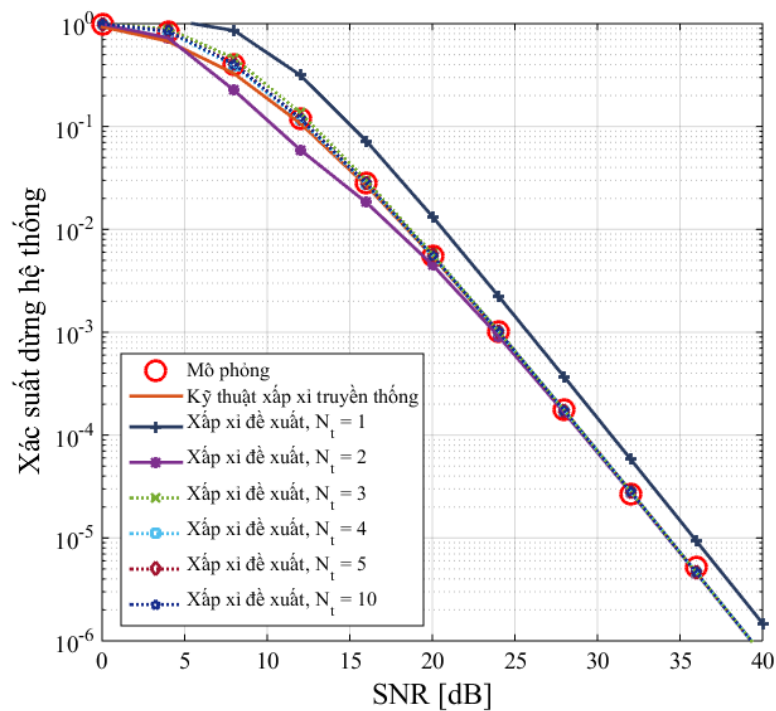
$$\begin{aligned}
\text{OP} \approx & 1 - \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{j=0}^{N_D-1} \sum_{k=0}^{N_t} \frac{(-1)^{i+k-1}}{j!k!} \binom{N_S}{i} \frac{i}{\lambda_1} \left(\frac{\gamma_{th}}{2\varepsilon\alpha P_S \lambda_2} \right)^{k+j} \\
& \times \left[\frac{(-1)^{j+k}}{(j+k-1)!} \left(\frac{i}{\lambda_1}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

2.3.3. Kết quả mô phỏng và phân tích

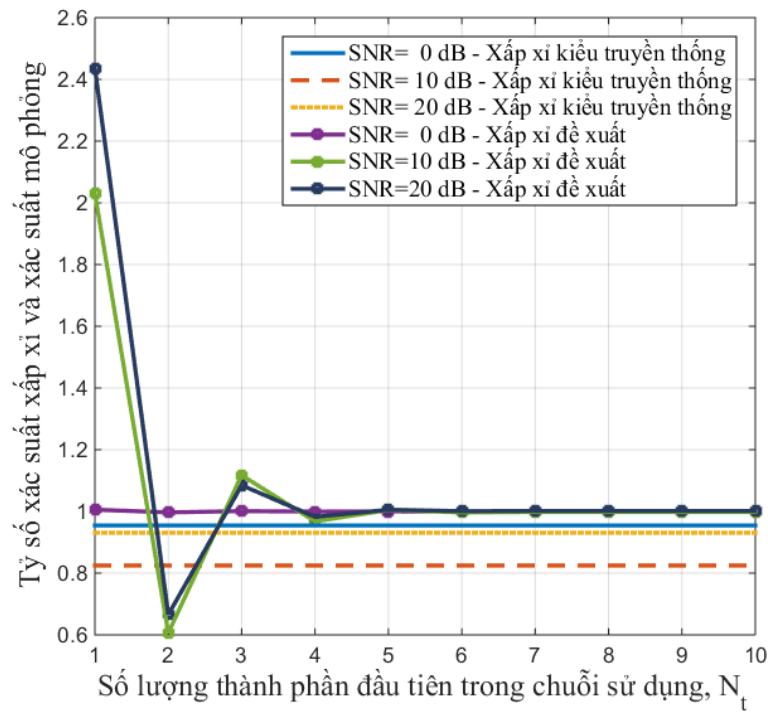
Mục đích của phần này bao gồm: i) Kiểm chứng tính đúng đắn của các phân tích lý thuyết ở trên, ii) Khảo sát ưu và nhược điểm của giao thức đề xuất, iii) Khảo sát ảnh hưởng của các tham số hệ thống và kênh truyền lên hiệu năng hệ thống.

Trong hình 2.8 biểu diễn xác suất dừng hệ thống theo SNR, khảo sát đánh giá kỹ thuật xấp xỉ đề ra bằng cách thay đổi số lượng thành phần trong chuỗi từ 1

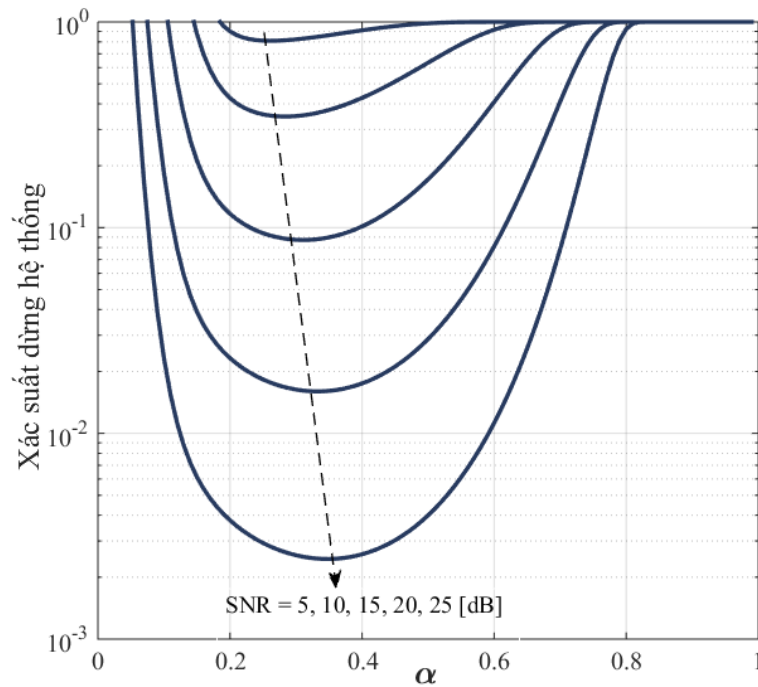
đến 10 và đồng thời so sánh với kết quả mô phỏng (là kết quả chính xác) và với kết quả của kỹ thuật xấp xỉ truyền thống. Như chỉ ra trên hình 2.8, chỉ cần số lượng thành phần N_t là 03 trở lên là cho kết quả tốt hơn kỹ thuật truyền thống trong vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu từ 0 đến 40 dB. Các kết quả này được xác nhận một lần nữa trong hình 2.9, so sánh tỷ số của xác suất dừng xấp xỉ theo kỹ thuật truyền thống với xác suất dừng mô phỏng và tỷ số của xác suất dừng xấp xỉ theo kỹ thuật đề xuất với xác suất dừng mô phỏng. Một lần nữa khẳng định kỹ thuật xấp xỉ đề xuất chính xác hơn kỹ thuật xấp xỉ truyền thống khi N_t từ 03 trở lên.



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

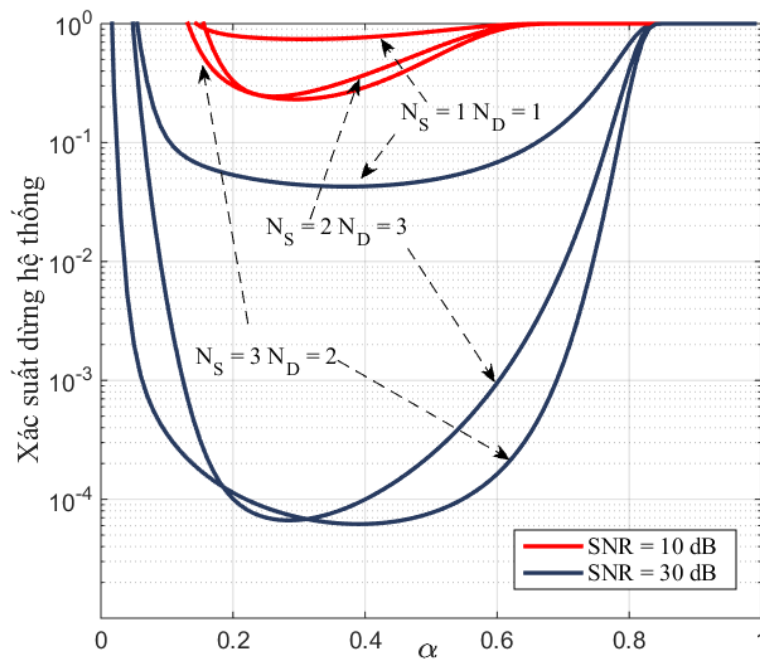


Hình 2.9. Tỷ số xác suất dừng xấp xỉ và xác suất dừng mô phỏng



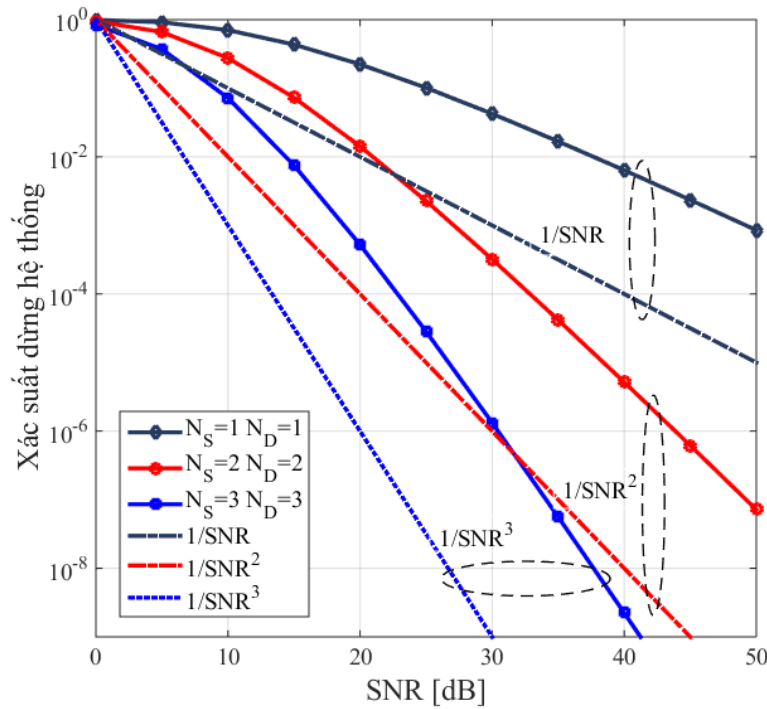
Hình 2.10. Xác suất dừng theo hệ số thời gian thu thập năng lượng với các trường hợp tỷ số tín hiệu trên nhiễu khác nhau.

Trong hình 2.10 khảo sát ảnh hưởng của hệ số phân chia thời gian α tới xác suất dừng hệ thống OP khi thay đổi tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu SNR. Khảo sát OP khi thay đổi SNR qua các giá trị 5, 10, 15, 20, 25 dB. Xác suất dừng hệ thống càng nhỏ, hiệu năng hệ thống càng cao khi SNR tăng. Để xác suất dừng hệ thống nhỏ nhất ta xác định được giá trị α tối ưu. Có thể thấy rằng, khi tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của hệ thống tăng thì giá trị α tối ưu cũng thay đổi và có xu hướng tăng. Điều này có thể lý giải khi SNR cao thì thời gian dành cho thu thập năng lượng nhiều hơn và hiệu năng hệ thống tăng lên.



Hình 2.11. Xác suất dừng hệ thống theo hệ số thời gian thu thập năng lượng với cấu hình nút nguồn và nút đích khác nhau.

Mục đích của hình 2.11 là khảo sát ảnh hưởng của cấu hình nút nguồn và cấu hình nút đích (số lượng anten) lên giá trị tối ưu của α khi thay đổi số lượng anten của S và D với SNR lựa chọn lần lượt là 10dB và 30dB. Khảo sát ba cấu hình tiêu biểu, cụ thể $N_S = 1, N_D = 1$; $N_S = 2, N_D = 3$; và $N_S = 3, N_D = 2$. Hiệu năng của hệ thống tăng khi số lượng anten S và anten D tăng lên. Có thể kết luận rằng giá trị α là một hàm phức tạp của số lượng anten nút phát và thu cũng như tỷ số tín hiệu trên nhiễu của hệ thống.



Hình 2.12. Xác suất dừng hệ thống theo tỷ số tín hiệu trên nhiễu với các cấu hình khác nhau của nút nguồn và nút đích

Trong hình 2.12, khảo sát độ lợi phân tập của hệ thống bằng cách xem xét 03 cấu hình tiêu biểu và đồng thời vẽ các đường tham chiếu $1/\text{SNR}^1$, $1/\text{SNR}^2$, $1/\text{SNR}^3$ để so sánh. Độ lợi phân tập của các hệ thống là $\min(N_S, N_D)$ khi mà độ dốc của các đường xác suất dừng là bằng độ dốc của các đường tham chiếu, cụ thể độ lợi phân tập của các hệ thống $N_S = 1, N_D = 1$; $N_S = 2, N_D = 2$; $N_S = 3, N_D = 3$ lần lượt là 1, 2 và 3. Đến đây có thể kết luận rằng độ lợi phân tập của hệ thống thu thập năng lượng là tương đương với độ lợi phân tập của hệ thống chuyển tiếp tương tự truyền thống.

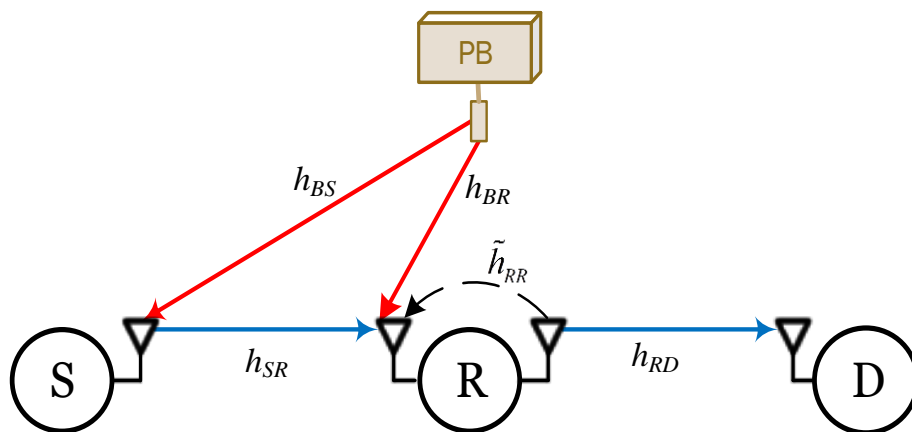
2.4. Hệ thống vô tuyến chuyển tiếp một chiều song công

Cho đến nay đã có nhiều nghiên cứu tập trung vào phân tích hiệu năng của các mạng chuyển tiếp song công (FD: Full-duplex) ví dụ như [101-103]. Các nhà nghiên cứu đã xác định được biểu thức toán học cho xác suất dừng hệ thống (OP) cũng như chứng minh rằng dưới tác động nhiễu nội đôi dư (RSI), hiệu năng hệ thống đạt đến mức bão hòa trên miền tín hiệu trên nhiễu (SNR) cao. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng sử dụng phương pháp tối ưu năng lượng cho chế độ FD có thể cải thiện hiệu năng hệ thống như [104]. Ngoài ra, bằng cách sử dụng kỹ thuật loại bỏ nhiễu nội (SIC) cho các thiết bị FD, hệ thống chuyển tiếp FD có thể có hiệu năng

cao hơn so với hệ thống chuyển tiếp truyền thống [105]. Gần đây, có một số nghiên cứu kết hợp ưu điểm của kỹ thuật truyền chuyển tiếp song công sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, ví dụ như [106-107], với giả thiết rằng các nút mạng vừa thu nhận thông tin vừa thu thập năng lượng. Tuy nhiên, còn rất ít nghiên cứu mô hình mạng chuyển tiếp song công thu thập năng lượng từ nguồn ngoài ổn định do việc xác định công thức toán học đánh giá hiệu năng mạng vô tuyến phức tạp hơn và cần có những đề xuất phương pháp giải tích mới để giải quyết bài toán đánh giá hiệu năng mạng vô tuyến chuyển tiếp song công sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến.

Trong phần này, NCS đề xuất và phân tích hệ thống vô tuyến với một nút chuyển tiếp sử dụng truyền thông song công, trong đó nút nguồn (S) và nút chuyển tiếp (R) nhận năng lượng vô tuyến từ một nguồn ngoài PB (Power Beacon). NCS xác định, phân tích công thức dạng tường minh của xác suất dừng hệ thống ở kênh truyền tổng quát Nakagami- m và đồng thời khảo sát ảnh hưởng của các tham số hệ thống và kênh truyền lên hiệu năng của hệ thống. Các kết quả phân tích được kiểm chứng bằng mô phỏng Monte-Carlo cho thấy các bước phân tích hoàn toàn chính xác.

2.4.1. Mô hình hệ thống



Hình 2.13. Mô hình hệ thống chuyển tiếp song công thu thập năng lượng

Mô hình hệ thống có 04 nút gồm một nút nguồn S, nút chuyển tiếp R, nút đích (D) và một nút phát năng lượng vô tuyến PB. Nút đích D nhận thông tin từ nút nguồn S thông qua nút chuyển tiếp R. Giả thiết không tồn tại đường truyền trực tiếp từ S tới D do khoảng cách quá xa. Trong mô hình này, S và D có một anten, trong

khi đó, R có 02 anten (một anten nhận tín hiệu, một anten phát tín hiệu). Nút R hoạt động ở chế độ song công, có thể thu và phát thông tin cùng lúc trên cùng một tần số. Trong khi đó, S và D hoạt động ở chế độ đơn công (Half-Duplex). Trong mô hình này, giả thiết S và R có nguồn cung cấp năng lượng hạn chế và trước tiên cần thu thập năng lượng từ nguồn PB. Sau đó, S và R sử dụng năng lượng thu thập này để phát và nhận thông tin. Giả thiết rằng, năng lượng thu được sẽ được dùng hết cho nhận và phát thông tin của S và R. Nguồn ngoài PB truyền năng lượng vô tuyến cho S và R. Giả thiết vị trí của PB là phù hợp cho việc truyền năng lượng. Phân tích mô hình hệ thống với kênh truyền Nakagami- m .

Gọi T là chu kỳ truyền thông tin từ nguồn S tới D. Khi sử dụng công nghệ thu thập năng lượng với kỹ thuật chuyển tiếp, hệ thống chia chu kỳ truyền thông T thành hai phần thời gian theo tỷ số phân chia thời gian α với $0 < \alpha < 1$, cụ thể là phần thời gian đầu αT dành cho hoạt động thu thập năng lượng và phần thời gian còn lại $(1-\alpha)T$ dành cho hoạt động truyền và nhận thông tin. Gọi α là tỷ số phân chia thời gian, ta có thời gian lần lượt cho pha thời gian đầu là αT . Xem xét trong phần thời gian đầu αT , các nút thu thập năng lượng vô tuyến từ PB để phục vụ hoạt động truyền nhận. Gọi E_h^S và E_h^R lần lượt là năng lượng thu thập tại S và R, ta có:

$$E_h^S = \varepsilon \alpha T P_B |h_{BS}|^2, \quad (2.62)$$

$$E_h^R = \varepsilon \alpha T P_B |h_{BR}|^2 \quad (2.63)$$

với P_B là công suất phát của PB; ε là hiệu suất thu thập năng lượng vô tuyến và có giá trị $0 \leq \varepsilon \leq 1$. $h_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}$ với $\mathcal{X} \in \{S, R\}$ và $\mathcal{Y} \in \{R, D\}$ là hệ số của các kênh truyền vô tuyến từ $\mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$. Từ (2.62) và (2.63), chúng ta có thể xác định công suất phát của S và R từ năng lượng thu thập là như sau:

$$P_S = \frac{\varepsilon \alpha P_B}{1-\alpha} |h_{BS}|^2, \quad (2.64)$$

$$P_R = \frac{\varepsilon \alpha P_B}{1-\alpha} |h_{BR}|^2. \quad (2.65)$$

Xem xét trong phần thời gian sau $(1-\alpha)T$, S phát thông tin tới R và đồng thời R chuyển tiếp thông tin tới D dùng kỹ thuật DF khi mà R hoạt động theo chế độ song công. Tín hiệu nhận tại R và D lần lượt như sau:

$$y_R = h_{SR}x_S + \tilde{h}_{RR}x_R + n_R, \quad (2.66)$$

$$y_D = h_{RD}x_R + n_D, \quad (2.67)$$

với x_S và x_R lần lượt là tín hiệu sau điều chế tại S và R. Khi hệ thống sử dụng kỹ thuật DF, x_R là tín hiệu mà nút R điều chế lại sau khi giải điều chế tín hiệu nhận tại nút nguồn. Trong (2.66), \tilde{h}_{RR} là hệ số kênh truyền tự can nhiễu từ anten phát đến anten thu của R gây ra do chế độ truyền song công. n_y là nhiễu trắng (Additive White Gaussian Noise) tại máy thu \mathcal{Y} có trung bình bằng không và phương sai bằng N_0 . Từ (2.66), chúng ta có thể xác định được công suất của tín hiệu tự can nhiễu (Self-Interference) tại R như sau:

$$\mathbb{E}\left\{P_R |\tilde{h}_{RR}|^2\right\} = \frac{\varepsilon\alpha P_B}{1-\alpha} \mathbb{E}\left\{|\tilde{h}_{RR}|^2 |h_{BR}|^2\right\}. \quad (2.68)$$

với $\mathbb{E}\{\cdot\}$ là toán tử kỳ vọng thống kê.

Chúng ta giả sử rằng nút R được trang bị kỹ thuật loại bỏ tín hiệu tự can nhiễu (Self-Interference Cancellation - SIC). Tuy nhiên, trong thực tế tín hiệu tự can nhiễu tại sẽ không bị loại bỏ hoàn toàn do tính không hoàn hảo của phân cứng mà sẽ còn tồn tại một phần, gọi là can nhiễu nội dôi dư (Residual Self-Interference - RSI), gọi là I_{RSI} , I_{RSI} là biến ngẫu nhiên tuân theo phân bố Gauss có phương sai là:

$$\sigma_{RSI}^2 = \kappa \frac{\varepsilon\alpha P_B}{1-\alpha}, \quad (2.69)$$

với κ là hiệu suất SIC tại nút chuyển tiếp R.

Kết hợp (2.66) và (2.69), chúng ta xấp xỉ tín hiệu nhận tại R như sau:

$$y_R = h_{SR}x_S + I_{RSI} + n_R. \quad (2.70)$$

Từ (2.67) và (2.70), chúng ta có thể xác định tỷ số tín hiệu trên nhiễu cộng với nhiễu nội tại gây ra tại R và D như sau:

$$\begin{aligned} \gamma_{SR} &= \frac{P_B |h_{SR}|^2}{\sigma_{RSI} + N_0} \\ &= \frac{\varepsilon\alpha P_B |h_{BS}|^2 |h_{SR}|^2}{(1-\alpha)(\sigma_{RSI}^2 + N_0)}, \end{aligned} \quad (2.71)$$

và

$$\begin{aligned}\gamma_{\text{RD}} &= \frac{P_{\text{R}} |h_{\text{RD}}|^2}{N_0} \\ &= \frac{\varepsilon \alpha P_{\text{B}} |h_{\text{BR}}|^2 |h_{\text{RD}}|^2}{(1-\alpha)N_0}\end{aligned}\quad (2.72)$$

Đối với hệ thống chuyên tiếp giải mã và chuyên tiếp cố định, hiệu năng của hệ thống phụ thuộc vào chặng có tỷ số tín hiệu trên nhiễu nhỏ nhất, do đó ta có thể mô hình hóa tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương của hệ thống như sau:

$$\gamma_e = \min(\gamma_{\text{SR}}, \gamma_{\text{RD}}). \quad (2.73)$$

Xem xét ở kênh truyền fading Nakagami- m và giới hạn cho trường hợp m nguyên, ta có hàm CDF và PDF của γ_{xy} lần lượt có dạng như sau:

$$f_{\gamma_{xy}}(\gamma) = \frac{(\lambda_{xy} m_{xy})^{m_{xy}}}{(m_{xy} - 1)!} \gamma^{m_{xy}-1} \exp(-m_{xy} \lambda_{xy} \gamma), \quad (2.74)$$

$$F_{\gamma_{xy}}(\gamma) = 1 - \exp(-\lambda_{xy} m_{xy} \gamma) \sum_{k=0}^{m_{xy}-1} \frac{(\lambda_{xy} m_{xy} \gamma)^k}{k!}, \quad (2.75)$$

trong đó m_{xy} là tham số Nakagami và $\lambda_{xy} = 1 / \mathbb{E}\{|h_{xy}|^2\}$

2.4.2. Phân tích hiệu năng hệ thống

Trong phần này sẽ phân tích xác suất dừng của hệ thống ở kênh truyền fading Nakagami- m . Từ tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu tương đương của hệ thống γ_e , ta viết xác suất dừng của hệ thống theo định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned}\text{OP} &= \Pr[(1-\alpha) \log_2(1+\gamma_e) < \mathcal{R}] \\ &= \Pr(\gamma_e < \gamma_{\text{th}}),\end{aligned}\quad (2.76)$$

với \mathcal{R} là tốc độ truyền mong muốn của hệ thống và $\gamma_{\text{th}} = 2^{\frac{\mathcal{R}}{1-\alpha}} - 1$. Kết hợp (2.72) và (2.73), OP được viết lại như sau:

$$\text{OP} = \Pr[\min(\gamma_{\text{SR}}, \gamma_{\text{RD}}) < \gamma_{\text{th}}] \quad (2.77)$$

Quan sát γ_{SR} và γ_{RD} ở công thức (2.71) và (2.72), ta có thể thấy rằng γ_{SR} và γ_{RD} độc lập thống kê với nhau khi các nút mạng thu thập năng lượng từ nguồn phát bên ngoài PB. Do đó, ta có thể triển khai công thức (2.77) như sau:

$$\begin{aligned}
\text{OP} &= 1 - \Pr[\min(\gamma_{\text{SR}}, \gamma_{\text{RD}}) > \gamma_{\text{th}}] \\
&= 1 - \Pr(\gamma_{\text{SR}} > \gamma_{\text{th}}) \Pr(\gamma_{\text{RD}} > \gamma_{\text{th}}) \\
&= 1 - [1 - F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{th}})] [1 - F_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{th}})]
\end{aligned} \tag{2.78}$$

với $F_{\gamma_{\mathcal{XY}}}(\gamma)$ là hàm phân bố xác suất tích lũy của $\gamma_{\mathcal{XY}}$.

Chúng ta cũng thấy rằng γ_{SR} và γ_{RD} ở công thức (2.71) và (2.72) có cùng một dạng, nên chúng ta có thể tìm hàm CDF của γ_{SR} và từ đó suy ra dạng của γ_{RD} .

Hàm CDF của γ_{SR} , $F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{th}})$, viết lại như sau:

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{th}}) &= \Pr(\gamma_{\text{SR}} < \gamma_{\text{th}}) \\
&= \Pr\left(\frac{\varepsilon\alpha P_B |h_{\text{BS}}|^2 |h_{\text{SR}}|^2}{(1-\alpha)(\sigma_{\text{RSI}}^2 + N_0)} < \gamma_{\text{th}}\right)
\end{aligned} \tag{2.79}$$

Sử dụng xác suất có điều kiện, ta viết lại $F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{th}})$ như sau:

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{th}}) &= \Pr(\gamma_{\text{SR}} < \gamma_{\text{th}}) \\
&= \Pr\left(\frac{\varepsilon\alpha P_B |h_{\text{BS}}|^2 |h_{\text{SR}}|^2}{(1-\alpha)(\sigma_{\text{RSI}}^2 + N_0)} < \gamma_{\text{th}}\right) \\
&= \int_0^\infty \Pr\left(|h_{\text{BS}}|^2 < \frac{(1-\alpha)(\sigma_{\text{RSI}}^2 + N_0)\gamma}{\varepsilon\alpha P_B x}\right) f_{|h_{\text{SR}}|^2}(x) dx \\
&= \int_0^\infty F_{|h_{\text{BS}}|^2}\left(\frac{(1-\alpha)(\sigma_{\text{RSI}}^2 + N_0)\gamma}{\varepsilon\alpha P_B x}\right) f_{|h_{\text{SR}}|^2}(x) dx
\end{aligned} \tag{2.80}$$

Thay thế (2.74) và (2.75) vào (2.80) và sử dụng biến đổi số (3.351.3) và (3.471.9) của [80], ta có:

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{th}}) &= 1 - \frac{(\lambda_{\text{BS}} m_{\text{BS}})^{m_{\text{BS}}}}{\Gamma(m_{\text{BS}})} \sum_{k=0}^{m_{\text{SR}}-1} \frac{1}{k!} (\lambda_{\text{SR}} m_{\text{SR}} \mathcal{X}_1)^k \\
&\quad \times 2 \left(\frac{m_{\text{SR}} \lambda_{\text{SR}} \mathcal{X}_1}{m_{\text{BS}} \lambda_{\text{BS}}}\right)^{\frac{m_{\text{BS}}-k}{2}} K_{m_{\text{BS}}-k} \left(2 \sqrt{\frac{\mathcal{X}_1 m_{\text{SR}} \lambda_{\text{SR}}}{m_{\text{BS}} \lambda_{\text{BS}}}}\right),
\end{aligned} \tag{2.81}$$

với $\mathcal{X}_1 = \frac{(1-\alpha)(\sigma_{\text{RSI}}^2 + N_0)\gamma_{\text{th}}}{\varepsilon\alpha P_B}$.

Sử dụng phương pháp tương tự, ta có thể tìm được $F_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{th}})$ như sau:

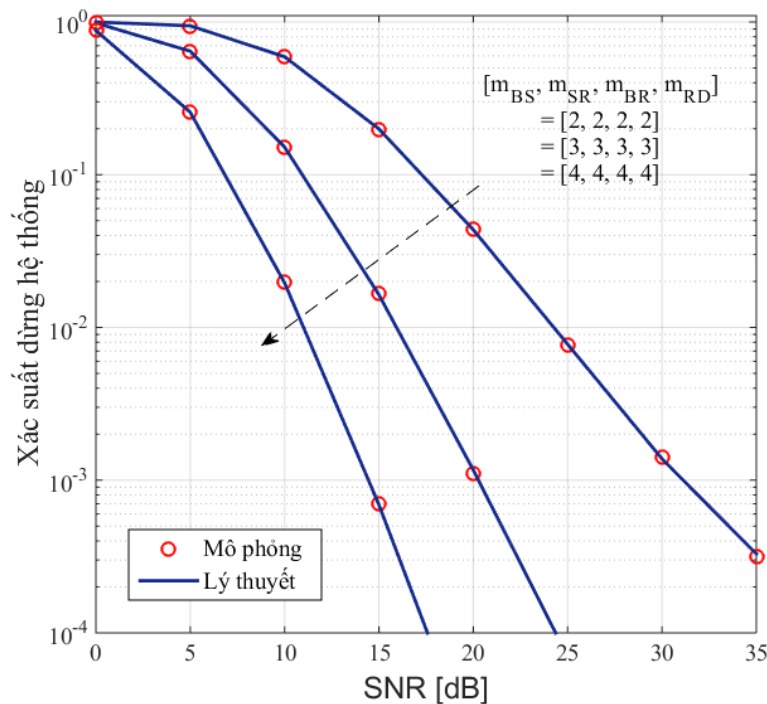
$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{RD}}(\gamma_{th}) &= \Pr\left(\frac{\varepsilon\alpha P_B |h_{BR}|^2 |h_{RD}|^2}{(1-\alpha)N_0} < \gamma_{th}\right) \\
&= 1 - \frac{(\lambda_{BR} m_{BR})^{m_{BR}}}{\Gamma(m_{BR})} \sum_{l=0}^{m_{RD}-1} \frac{1}{l!} (m_{RD} \lambda_{RD} \mathcal{X}_2)^l \\
&\quad \times 2 \left(\frac{\lambda_{RD} m_{RD} \mathcal{X}_2}{\lambda_{BR} m_{BR}}\right)^{\frac{m_{BR}-l}{2}} K_{m_{RD}-l} \left(2\sqrt{\frac{\mathcal{X}_2 \lambda_{RD} m_{RD}}{\lambda_{BR} m_{BR}}}\right)
\end{aligned} \tag{2.82}$$

với $\mathcal{X}_2 = \frac{(1-\alpha)N_0\gamma_{th}}{\varepsilon\alpha P_B}$.

Thay thế (2.81) và (2.82) vào (2.78), ta sẽ có được dạng đóng chính xác của xác suất dừng hệ thống.

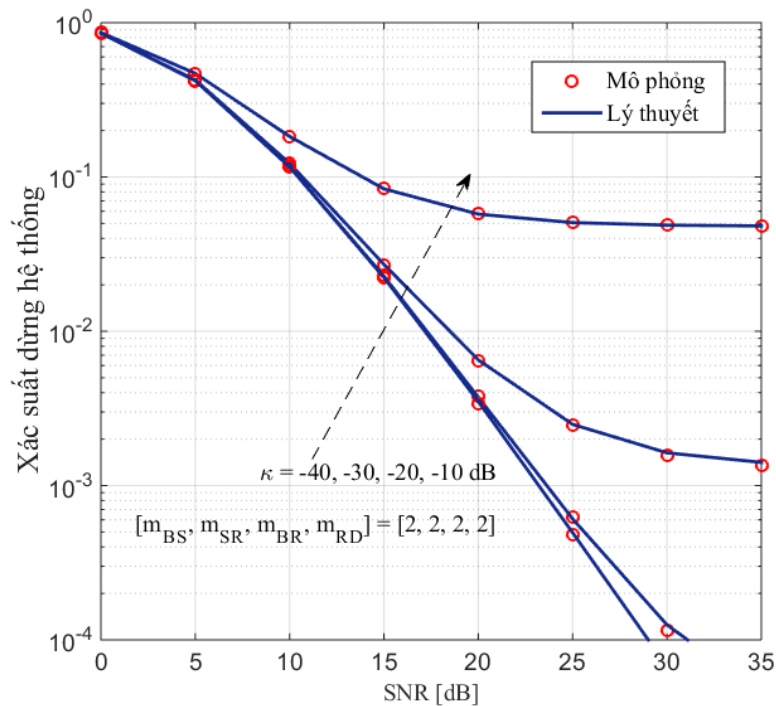
2.4.3. Kết quả mô phỏng và phân tích

Phần trước đã xác định được công thức tính OP của hệ thống cho mạng chuyển tiếp song công. Phần này sẽ khảo sát, mô phỏng để chứng minh tính đúng đắn của phân tích lý thuyết. Hệ số thu thập năng lượng là $\varepsilon = 0,85$. Các kết quả khảo sát với SNR trung bình và các tham số Nakagami- m , ảnh hưởng lớn tới hệ thống. Trước tiên, khảo sát với xác suất dừng hệ thống OP với tốc độ dữ liệu tối thiểu là $\mathcal{R} = 1$ bit/s/Hz.



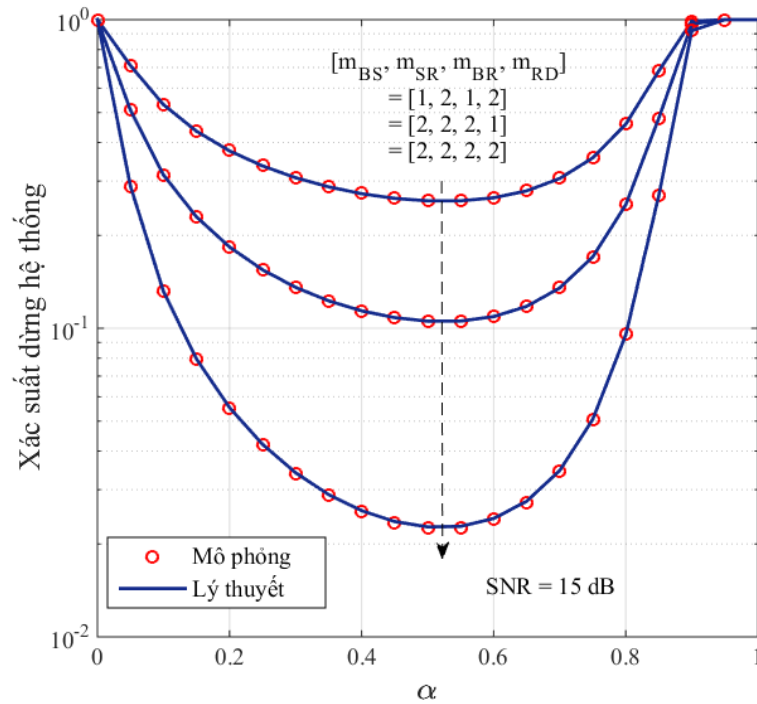
Hình 2.14. Khảo sát OP theo SNR với tham số pha đình m khác nhau.

Trong hình 2.14, các tham số kênh Nakagami- m được thay đổi để xác định ảnh hưởng của chúng tới hiệu năng hệ thống. Xem xét 3 trường hợp của giá trị fading là [2 2 2 2], [3 3 3 3], và [4 4 4 4]. Tham số m là nghịch đảo của phương sai chuẩn hóa. Hoặc có thể coi giá trị m như là các tia truyền trực tiếp từ nút phát đến nút nhận. Chọn hệ số phân chia thời gian $\alpha=0,3$; hệ số hiệu suất thu thập năng lượng $\varepsilon=0,85$. Giá trị SIC được xem xét với $\kappa=-30$ dB. Như kết quả tại hình 2.14, khi tăng giá trị m thì hiệu năng hệ thống tăng. Bậc phân tập của hệ thống đạt được gần xấp xỉ theo giá trị m .



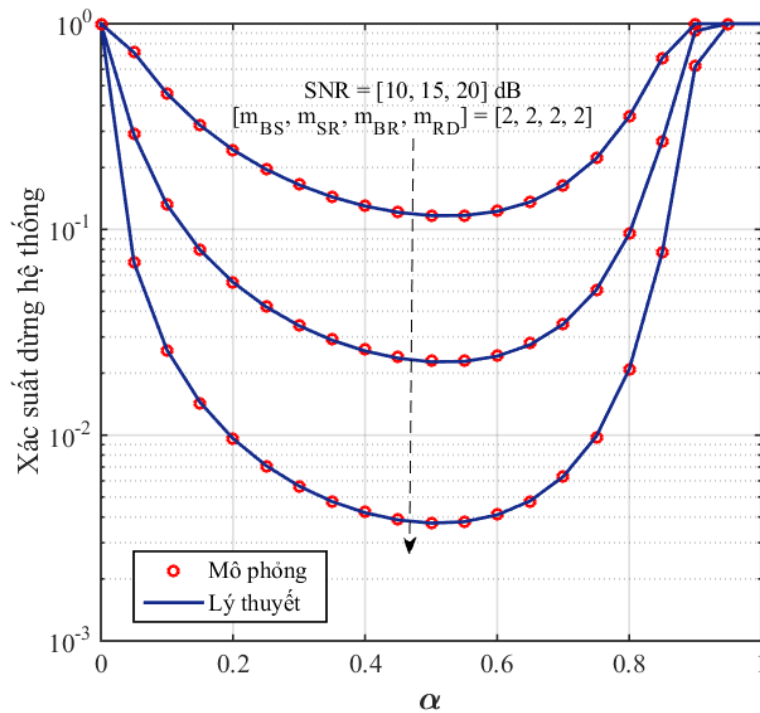
Hình 2.15. Khảo sát ảnh hưởng của SIC tới hiệu năng hệ thống

Hình 2.15, khảo sát ảnh hưởng của SIC tới xác suất dừng hệ thống bằng cách xem xét 4 giá trị của κ từ -40 dB, -30 dB, -20 dB, và -10 dB. Các tham số hệ thống thiết lập cho Hình 3 là $\alpha = 0.5$ và $[m_{BS}, m_{SR}, m_{BR}, m_{RD}] = [2, 2, 2, 2]$. Quan sát trên đồ thị, có thể thấy rằng can nhiễu nội dôi dư có ảnh hưởng rất lớn đến hiệu năng hệ thống. Ví dụ như, khi nhiễu dư bằng -10 dB hoặc -20 dB, xác suất dừng hệ thống gần như bão hòa ở giá trị 20 dB. Từ kết quả này chúng ta có thể nhận định rằng để đảm bảo hiệu năng hệ thống thì việc thiết kế hệ thống FD cần thiết phải lựa chọn công suất truyền phù hợp và bộ loại bỏ can nhiễu (SIC) cần có phẩm chất tốt.



Hình 2.16. Khảo sát ảnh hưởng của m đến giá trị OP của hệ thống khi SNR=15 dB

Hình 2.16 trình bày kết quả khảo sát xác suất dừng hệ thống theo hệ số phân chia thời gian α với ba trường hợp của hệ số fading lần lượt là [1 2 1 2], [2 2 2 1], và [2 2 2 2]. Hình 2.16 chỉ ra rằng tồn tại giá trị α làm cho xác suất dừng hệ thống nhỏ nhất. Với cùng một tỷ số SNR, khi m càng lớn, điểm cực tiểu OP càng nhỏ, hay nói cách khác phẩm chất của hệ thống càng tốt. Hình 2.16 cũng chỉ ra rằng để hiệu năng hệ thống tốt nhất, giá trị hệ số phân chia thời gian tối ưu xấp xỉ 0.5 trong cả 3 trường hợp.



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

Hình 2.17 trình bày kết quả mô phỏng và phân tích giá trị OP theo hệ số phân chia thời gian α . Trong kết quả này khi thay đổi SNR với các giá trị khác nhau lần lượt là 10, 15, 20 dB, tham số pha đỉnh Nakagami- m được cài đặt như trên đồ thị. Từ kết quả chỉ ra rằng khi SNR lớn thì OP được cải thiện, điều này phù hợp với các hệ thống vô tuyến. Ở các mức tín hiệu nhận được khác nhau, tương ứng với công suất phát khác nhau, do trong phân tích và mô phỏng cố định tham số trung bình độ lợi kênh truyền nhưng hệ số phân chia thời gian có giá trị xấp xỉ ở 0.5 thì xác suất dừng hệ thống nhỏ nhất. Kết quả này có thể sử dụng để cấu hình phần mềm phương thức phân chia thời gian TS trong hệ thống thu thập năng lượng để đảm bảo hiệu năng luôn đạt lớn nhất.

2.5. Kết luận chương

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 nút nguồn S và nút đích D có nhiều anten. 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 đề xuất phương pháp giải tích mới, các phương thức nâng cao hiệu năng hệ thống vô tuyến chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng. Chương 2 đã 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. Những mô hình đề xuất tại chương 2 có thể ứng dụng thiết kế các mạng kết nối vạn vật, cảm biến, truyền thông tin về cảnh báo mực nước, cháy rừng, thiên tai và nhiều loại ứng dụng khác.

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.

Mạng chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng cũng được quan tâm nghiên cứu như ở [73], [74], [75], [76]. Cụ thể, trong [73], nhóm tác giả đã đánh giá hiệu năng của hệ thống truyền chuyển tiếp hai chiều trong môi trường vô tuyến nhận thức với nút chuyển tiếp thu thập năng lượng trong điều kiện suy giảm phân cứng. Trong [74], Tutuncuoglu và cộng sự đã đề xuất các giao thức cho phép tối đa tổng thông lượng của mạng chuyển tiếp hai chiều với giả sử các nút mạng hoạt động dựa trên năng lượng thu thập và không có bộ đệm. Các kết quả phân tích đã chỉ ra rằng kỹ thuật chuyển tiếp có ảnh hưởng đáng kể lên giao thức truyền tối ưu. Tại [75] đã xem xét mạng chuyển tiếp hai chiều thu thập năng lượng vô tuyến với một nút mạng không thu thập năng lượng và một nút mạng có sử dụng thu thập năng lượng. Nhóm tác giả đã đề xuất một giao thức truyền tối ưu dựa trên mô hình thu thập năng lượng ngẫu nhiên. Gần đây, tại [76], nhóm tác giả đã phân tích chất lượng hệ thống truyền chuyển tiếp DF hai chiều ba pha thời gian trong đó nút chuyển tiếp thu thập năng lượng từ tín hiệu vô tuyến trong hai pha đầu tiên để chuyển đổi thành nguồn phát tín hiệu trong pha thời gian thứ ba. Tại đây, nhóm tác giả phân tích xác suất dừng hệ thống. Tuy nhiên, nhóm tác giả chưa đưa ra biểu thức dạng tường minh của xác suất dừng toàn hệ thống. Các nghiên cứu về mạng vô tuyến chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng từ nguồn ngoài

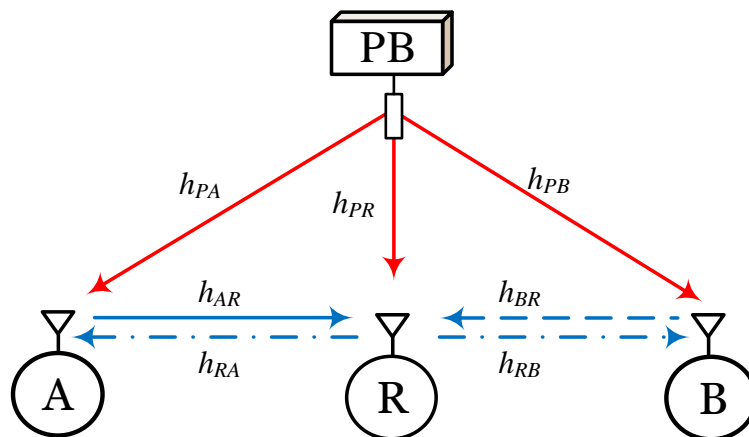
chưa nhiều vì tính phức tạp trong xây dựng công thức toán đánh giá hiệu năng hệ thống.

Trong chương 3, NCS sẽ phân tích xác suất dừng hệ thống chuyển tiếp hai chiều sử dụng nguồn ngoài cung cấp năng lượng vô tuyến cho tất cả các nút mạng. Đồng thời phân tích hiệu năng hệ thống lần lượt trên kênh truyền Rayleigh và Nakagami- m .

3.2. Hệ thống chuyển tiếp hai chiều với kênh truyền fading Rayleigh

Trong phần này sẽ đề xuất mô hình chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp sử dụng năng lượng thu thập với bốn khe thời gian. Các nút mạng thu thập năng lượng từ nguồn phát năng lượng độc lập. Nội dung nghiên cứu sẽ phân tích và biểu diễn xác suất dừng hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh ở dạng tường minh.

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

Hệ thống chuyển tiếp hai chiều thu thập năng lượng gồm hai nút nguồn (ký hiệu A và B), một nút chuyển tiếp (ký hiệu R) và một nút cung cấp năng lượng (ký hiệu PB). Giả sử rằng các nút A, B, và R đều không được trang bị nguồn năng lượng và phải sử dụng năng lượng thu thập từ PB. Mô hình này rất thực tế thường ứng dụng cho mạng cảm biến vô tuyến với các nút mạng thường dựa vào năng lượng thu thập để hoạt động.

Quá trình truyền năng lượng và thông tin của hệ thống diễn ra trong bốn khe thời gian con có thời gian lần lượt là: αT , $\frac{(1-\alpha)T}{3}$, $\frac{(1-\alpha)T}{3}$, và $\frac{(1-\alpha)T}{3}$ với α là hệ số phân chia thời gian với $\alpha \in (0,1)$ và T là thời gian truyền của một symbol chuẩn trong chế độ truyền trực tiếp. Trong thực tế, giá trị α là một tham số hiệu năng quan trọng, và có thể chọn α để hiệu năng hệ thống tối ưu [77] và [78].

Trong khe thời gian con thứ nhất, PB phát năng lượng cho các nút A, B, và R. Trong khe thời gian con thứ 2 và 3, nút nguồn A và B lần lượt truyền thông tin về nút chuyển tiếp R. Trong khe thời gian cuối cùng, nút R chuyển tiếp thông tin nhận được từ nút A (và B) về nguồn B (và A) dùng giao thức giải mã và chuyển tiếp.

Gọi h_{XY} với $\mathcal{X} \in \{A,B,R,P\}$ và $\mathcal{Y} \in \{A,B,R\}$ là hệ số kênh truyền từ $\mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$, ta có $|h_{xy}|^2$ có phân bố hàm mũ với giá trị trung bình λ_{xy} khi xem xét hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh.

Xem xét khe thời gian con thứ nhất, năng lượng thu thập tại nút A, B và R từ PB lần lượt như sau:

$$E_A = \varepsilon P_{PB} \alpha T |h_{PA}|^2 \quad (3.1)$$

$$E_B = \varepsilon P_{PB} \alpha T |h_{PB}|^2, \quad (3.2)$$

và

$$E_R = \varepsilon P_{PB} \alpha T |h_{PR}|^2, \quad (3.3)$$

với ε là hiệu suất thu thập năng lượng và P_{PB} là công suất phát trung bình của PB.

Xem xét trong khoảng thời gian $\frac{(1-\alpha)T}{3}$, xác định được công suất phát của A, B,

và R như sau:

$$P_A = \frac{3\varepsilon P_{PB} \alpha |h_{PA}|^2}{1-\alpha}, \quad (3.4)$$

$$P_B = \frac{3\varepsilon P_{PB} \alpha |h_{PB}|^2}{1-\alpha}, \quad (3.5)$$

và

$$P_R = \frac{3\varepsilon P_{PB} \alpha |h_{PR}|^2}{1-\alpha}. \quad (3.6)$$

Khi đó, tỷ số tín hiệu nhận được tại R trong khe thời gian con thứ 2 và 3 như sau:

$$\gamma_{AR} = \frac{P_A |h_{AR}|^2}{N_0} = \frac{3\varepsilon\alpha P_{PB}}{1-\alpha} \frac{|h_{PA}|^2 |h_{AR}|^2}{N_0}, \quad (3.7)$$

$$\gamma_{BR} = \frac{P_B |h_{BR}|^2}{N_0} = \frac{3\varepsilon\alpha P_{PB}}{1-\alpha} \frac{|h_{PB}|^2 |h_{BR}|^2}{N_0}, \quad (3.8)$$

với N_0 là công suất nhiễu trắng tại máy thu.

Tương tự, tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại A và B trong khe thời gian con thứ 4 như sau

$$\gamma_{RA} = \frac{P_R |h_{RA}|^2}{N_0} = \frac{3\varepsilon\alpha P_{PB}}{1-\alpha} \frac{|h_{PR}|^2 |h_{RA}|^2}{N_0}, \quad (3.9)$$

$$\gamma_{RB} = \frac{P_R |h_{RB}|^2}{N_0} = \frac{3\varepsilon\alpha P_{PB}}{1-\alpha} \frac{|h_{PR}|^2 |h_{RB}|^2}{N_0}. \quad (3.10)$$

3.2.3. Phân tích hiệu năng hệ thống

Trong phần này, NCS sẽ phân tích xác suất dừng của hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh. Sử dụng ba khe thời gian con để truyền thông tin, hệ thống chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp sẽ xem là dừng nếu bất kỳ một khe thời gian con nào không đảm bảo tốc độ dữ liệu truyền mong muốn cho trước, \mathcal{R} . Áp dụng định luật tổng xác suất, có thể viết xác suất dừng hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr[f(\gamma_{AR}) < \mathcal{R}] \\ &+ \Pr[f(\gamma_{AR}) \geq \mathcal{R}, f(\gamma_{BR}) < \mathcal{R}] \\ &+ \Pr(f(\gamma_{AR}) \geq \mathcal{R}, f(\gamma_{BR}) \geq \mathcal{R}, f(\gamma_R) < \mathcal{R}), \end{aligned} \quad (3.11)$$

với $f(\gamma_{\mathcal{M}}) = \frac{1-\alpha}{3} \log_2(1 + \gamma_{\mathcal{M}})$ với $\mathcal{M} \in \{\text{AR}, \text{BR}, \text{R}\}$; γ_R là tỷ số tín hiệu trên

nhiều tương đương của khe thời gian con thứ 4. Khi nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp (DF), ta có:

$$\gamma_R = \min(\gamma_{RA}, \gamma_{RB}). \quad (3.12)$$

Từ (3.7), (3.8), và (3.12), có thể viết OP lại do tính độc lập thống kê của γ_{AR} , γ_{BR} , và γ_R như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr(\gamma_{AR} < \gamma_{th}) + \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{BR} < \gamma_{th}) \\ &+ \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{BR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_R < \gamma_{th}) \\ &= 1 - \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{BR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_R \geq \gamma_{th}), \end{aligned} \quad (3.13)$$

với $\gamma_{th} = 2^{\frac{3\mathcal{R}}{1-\alpha}} - 1$ và dấu “=” ở (3.13) có được do sử dụng tính chất $\Pr(\gamma_{XY} < \gamma_{th}) = 1 - \Pr(\gamma_{XY} \geq \gamma_{th})$.

Để tìm được OP, cần tính toán $\Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th})$, $\Pr(\gamma_{BR} > \gamma_{th})$ và $\Pr(\gamma_R > \gamma_{th})$. Cụ thể viết lại (3.7) như sau:

$$\Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) = 1 - \Pr\left(\frac{3\varepsilon\alpha P_{PB} |h_{PA}|^2 |h_{AR}|^2}{1-\alpha N_0} < \gamma_{th}\right). \quad (3.14)$$

Sử dụng xác suất có điều kiện, (3.14) có thể viết lại như sau:

$$\Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) = 1 - \int_0^\infty F_{|h_{AR}|^2}\left(\frac{\gamma_{th} N_0}{\frac{3\varepsilon\alpha P_{PB}}{1-\alpha} x}\right) f_{|h_{PA}|^2}(x) dx, \quad (3.15)$$

với $F_{|h_{AR}|^2}(\gamma)$ và $f_{|h_{PA}|^2}(\gamma)$ lần lượt là hàm CDF của $|h_{AR}|^2$ và hàm PDF của $|h_{PA}|^2$.

Thay thế $F_{|h_{AR}|^2}(\gamma)$ có dạng như sau:

$$F_{|h_{AR}|^2}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\lambda_{AR}}\right) \quad (3.16)$$

và $f_{|h_{PA}|^2}(\gamma)$ có dạng như sau:

$$f_{|h_{PA}|^2}(\gamma) = \frac{1}{\lambda_{PA}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\lambda_{PA}}\right) \quad (3.17)$$

Thay vào (3.15), xác định được

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th}) &= 1 - \int_0^\infty \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{AR}} \frac{\gamma_{th} N_0}{\frac{3\varepsilon\alpha P_{PB}}{1-\alpha} \gamma_{PA}}\right)\right) \\ &\quad \times \frac{1}{\lambda_{PA}} \exp\left(-\frac{\gamma_{PA}}{\lambda_{PA}}\right) d\gamma_{PA} \\ &= \frac{1}{\lambda_{PA}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{AR}} \frac{\gamma_{th} N_0}{\frac{3\varepsilon\alpha P_{PB}}{1-\alpha} \gamma_{PA}} - \frac{\gamma_{PA}}{\lambda_{PA}}\right) d\gamma_{PA}. \end{aligned} \quad (3.18)$$

Sử dụng biến đổi (3.321.1) ở [80], ta xác định được:

$$\Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) = 2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\varepsilon\alpha P_{PB}\lambda_{AR}\lambda_{AP}}} \times \mathcal{K}_1 \left(2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\varepsilon\alpha P_{PB}\lambda_{AR}\lambda_{PA}}} \right), \quad (3.19)$$

với $\mathcal{K}_1(x)$ làm hàm Bessel điều chỉnh loại 2 bậc 1 [70].

Từ (3.7) và (3.8), nhận thấy rằng γ_{AR} và γ_{BR} có cùng một dạng, nên từ $\Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th})$, dễ dàng suy ra $\Pr(\gamma_{BR} > \gamma_{th})$ như sau:

$$\Pr(\gamma_{BR} \geq \gamma_{th}) = 2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\varepsilon\alpha P_{PB}\lambda_{BR}\lambda_{PB}}} \times \mathcal{K}_1 \left(2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\varepsilon\alpha P_{PB}\lambda_{BR}\lambda_{PB}}} \right). \quad (3.20)$$

Bây giờ sẽ tìm $\Pr(\gamma_R \geq \gamma_{th})$ bằng cách xem xét γ_{RA} và γ_{RB} ở (3.9) và (3.10) và nhận thấy γ_{RA} và γ_{RB} là tương quan với nhau do có một thành phần chung $|h_{PR}|^2$. Do đó, áp dụng xác suất có điều kiện, chúng ta có thể viết $\Pr(\gamma_R > \gamma_{th})$ như sau:

$$\Pr(\gamma_R \geq \gamma_{th}) = 1 - \int_0^\infty F_{\gamma_R|\gamma_{PR}}(\gamma_{th}) f_{\gamma_{PR}}(\gamma_{PR}) d\gamma_{PR}. \quad (3.21)$$

Nhắc lại (3.12), có thể viết lại biểu thức như sau:

$$F_{\gamma_R|\gamma_{PR}}(\gamma_{th}) = 1 - \Pr(\gamma_{RA} | \gamma_{PR} > \gamma_{th}, \gamma_{RB} | \gamma_{PR} > \gamma_{th}) \quad (3.22)$$

Khi điều kiện trên $\gamma_{PR}, \gamma_{RA} | \gamma_{PR}$ và $\gamma_{RB} | \gamma_{PR}$ là độc lập thống kê với nhau, nên ta có thể viết lại (3.22) như sau:

$$F_{\gamma_R|\gamma_{PR}}(\gamma_{th}) = 1 - \Pr(\gamma_{RA} | \gamma_{PR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{RB} | \gamma_{PR} \geq \gamma_{th}). \quad (3.23)$$

Đối với kênh fading Rayleigh:

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{RA} | \gamma_{PR} \geq \gamma_{th}) &= \Pr \left(|h_{RA}|^2 > \frac{\gamma_{th} N_0 (1-\alpha)}{3\varepsilon\alpha P_{PB} |h_{PR}|^2} \right) \\ &= \exp \left(- \frac{\gamma_{th} N_0 (1-\alpha)}{3\varepsilon\alpha P_{PB} \lambda_{RA} |h_{PR}|^2} \right). \end{aligned} \quad (3.24)$$

Với cách làm tương tự, ta xác định được:

$$\Pr(\gamma_{\text{RB}} | \gamma_{\text{PR}} \geq \gamma_{\text{th}}) = \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0 (1-\alpha)}{3\varepsilon\alpha P_{\text{PB}} \lambda_{\text{RB}} |h_{\text{PR}}|^2}\right). \quad (3.25)$$

Kết hợp (3.22), (3.23), (3.24), và (3.25), ta có:

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{\text{R}} \geq \gamma_{\text{th}}) &= 1 - \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0 (1-\alpha)}{3\varepsilon\alpha P_{\text{PB}} \lambda_{\text{RA}} \gamma_{\text{PR}}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0 (1-\alpha)}{3\varepsilon\alpha P_{\text{PB}} \lambda_{\text{RB}} \gamma_{\text{PR}}}\right) \right] \\ &\quad \times \frac{1}{\lambda_{\text{PR}}} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{PR}}}{\lambda_{\text{PR}}}\right) d\gamma_{\text{PR}} \end{aligned} \quad (3.26)$$

với $\gamma_{\text{PR}} = |h_{\text{PR}}|^2$.

Sử dụng lại biến đổi (3.321.1) ở [80], ta có:

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{\text{R}} \geq \gamma_{\text{th}}) &= 2 \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}} N_0 (1-\alpha)}{3\varepsilon\alpha P_{\text{PB}} \lambda_{\text{PR}}} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{RA}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{RB}}} \right)} \\ &\quad \times \mathcal{K}_1 \left(2 \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}} N_0 (1-\alpha)}{3\varepsilon\alpha P_{\text{PB}} \lambda_{\text{PR}}} \left(\frac{1}{\lambda_{\text{RA}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{RB}}} \right)} \right) \end{aligned} \quad (3.27)$$

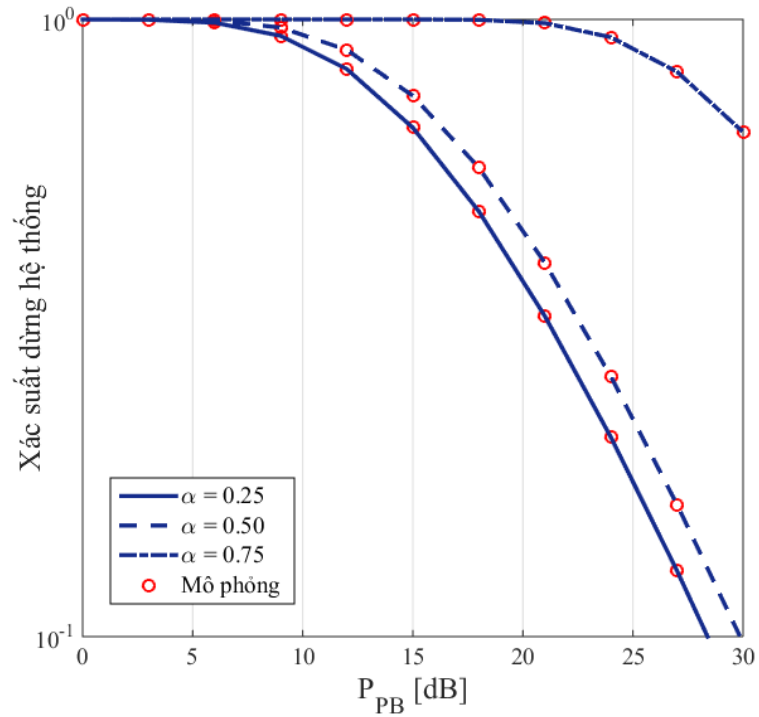
Cuối cùng, thay thế (3.19), (3.20) và (3.27) vào (3.13), ta xác định được kết quả dạng đóng của xác suất dừng hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh.

3.2.4. Kết quả mô phỏng và phân tích

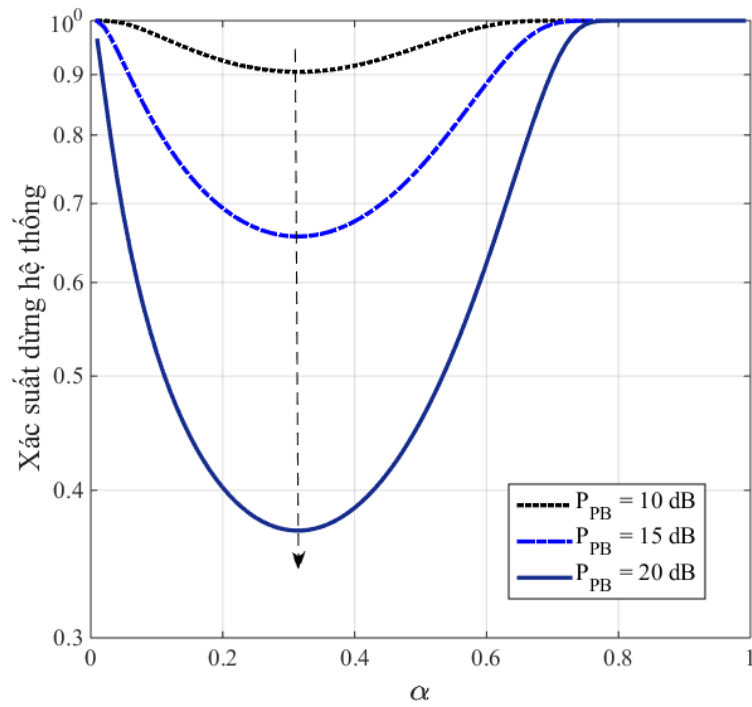
Trong phần này, NCS sẽ thực hiện mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng kết quả lý thuyết phân tích ở phần trên và khảo sát đặc tính của hệ thống. Để đơn giản, giả sử hệ thống được đặt trên một mặt phẳng hai chiều và các nút nguồn A, B, R và PB có tọa độ lần lượt là: (0, 0), (1, 0), (0.5, 0), và $(x_{\text{PB}}, y_{\text{PB}})$ ngoại trừ các khai báo khác. Với kênh truyền, sử dụng mô hình suy hao đường truyền đơn giản để mô hình hóa độ lợi kênh truyền trung bình, cụ thể $\lambda_{\mathcal{X}\mathcal{Y}} = d_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}^{-l}$ với $d_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}$ là khoảng cách vật lý giữa \mathcal{X} và \mathcal{Y} và l hệ số suy hao đường truyền có giá trị từ 2 đến 6, chọn $l = 3$. Các tham số hệ thống có giá trị như sau: $\varepsilon = 0.6$ và tốc độ dữ liệu tối thiểu là $\mathcal{R} = 1$ bit/s/Hz.

Hình 3.2. khảo sát ảnh hưởng của hệ số α lên xác suất dừng của hệ thống bằng cách khảo sát xác suất dừng hệ thống theo P_{PB} . Xem xét ba trường hợp của hệ số α , đó là 0.25, 0.5 và 0.75. Kết quả trong hình 3.2 chỉ ra rằng giá trị hệ thống sẽ có giá trị xác suất dừng thấp nhất khi $\alpha = 0.25$ và xác suất dừng lớn nhất khi

$\alpha = 0.75$. Bên cạnh đó, kết quả lý thuyết và kết quả mô phỏng trùng khít nhau, xác nhận phương pháp phân tích xác suất dừng ở phân trên là đúng đắn.



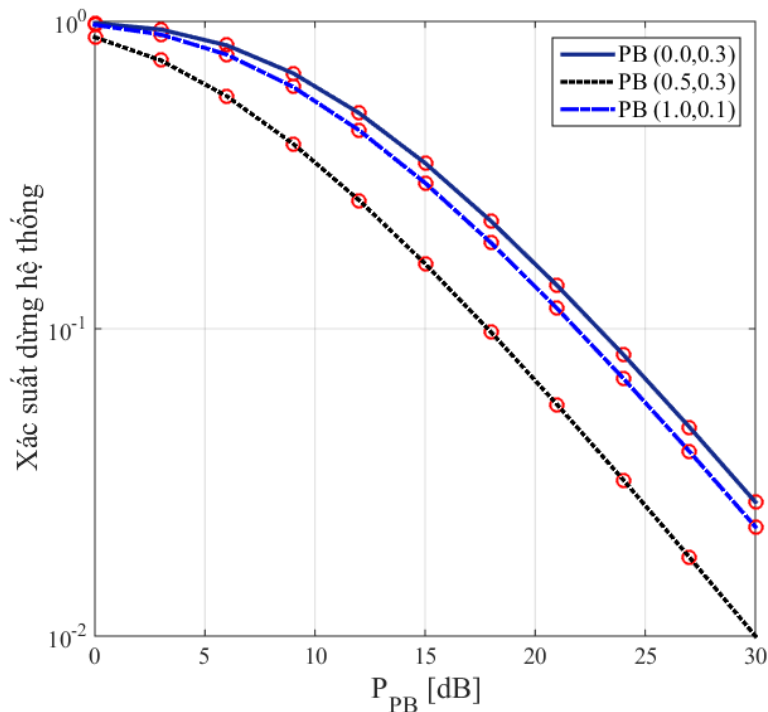
Hình 3.2. Khảo sát xác suất dừng hệ thống theo P_{PB}



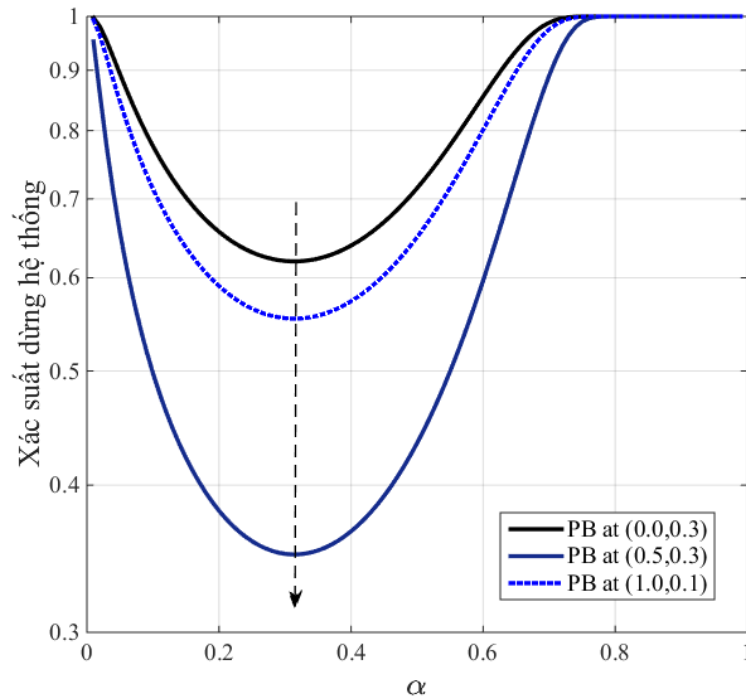
Hình 3.3. Khảo sát xác suất dừng hệ thống theo α

Để hiểu rõ ảnh hưởng của giá trị α tới xác suất dừng hệ thống, khảo sát xác suất dừng hệ thống theo α với ba trường hợp của P_{PB} trong hình 3.3. Từ hình 3.3 có thể thấy rằng, xác suất dừng hệ thống phụ thuộc mạnh vào giá trị α . Khi giá trị α lớn hơn 0.7, thì hệ thống hoàn toàn bị dừng, nghĩa là thời gian không đủ để truyền dữ liệu theo tốc độ mong muốn. Hình 3.3 chỉ ra rằng tồn tại một giá trị α tối ưu làm cho xác suất dừng hệ thống là nhỏ nhất. Kết quả phân tích mô phỏng trong hình 3.3 cũng chỉ ra rằng giá trị α tối ưu là không phụ thuộc vào P_{PB} và đều cho cùng một giá trị xấp xỉ là 0.3.

Trong hình 3.4, khảo sát ảnh hưởng vị trí của PB lên xác suất dừng của hệ thống. Xem xét ba vị trí tiêu biểu của PB bao gồm: Trường hợp 1: PB rất gần nguồn A tại tọa độ (0, 0.3), Trường hợp 2: PB rất gần nút chuyển tiếp R tại tọa độ (0.5, 0.3), và trường hợp 3: PB rất gần nút nguồn B tại tọa độ (1, 0.3). Trường hợp 2 cho xác suất dừng tốt hơn trường hợp 3, và trường hợp 3 cho xác suất dừng tốt hơn trường hợp 1. Hay nói cách khác, cải thiện năng lượng thu thập tại nút chuyển tiếp sẽ cải thiện hiệu năng của hệ thống một cách đáng kể.



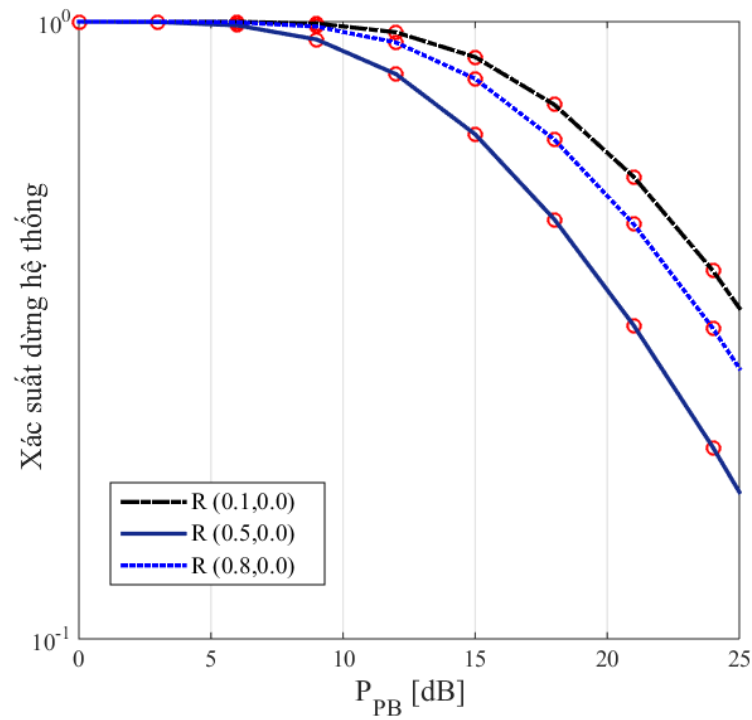
Hình 3.4. Xác suất dừng hệ thống theo P_{PB} : ảnh hưởng của vị trí PB



Hình 3.5. Xác suất dừng hệ thống theo α : ảnh hưởng của vị trí PB

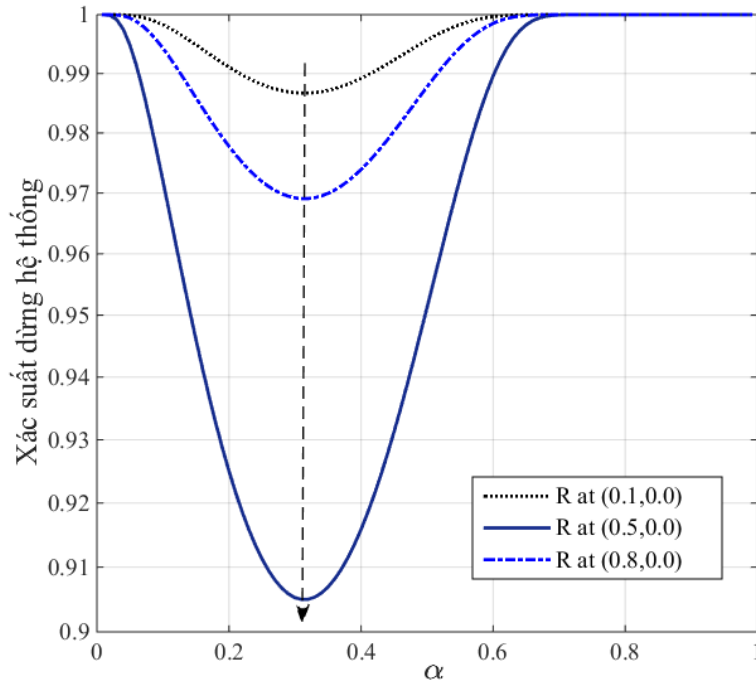
Trong hình 3.5 khảo sát xác suất dừng hệ thống theo hệ số phân chia thời gian khi thay đổi vị trí PB, chọn $d_{AR}=0.5$; $P_{PB}=10$ dB. Có thể nhận thấy rằng giá trị tối ưu của α lại không phụ thuộc vào vị trí của PB như chỉ ra ở hình 3.5. Hình 3.5 cũng chỉ ra rằng trong cả 3 trường hợp, xác suất dừng hệ thống là nhỏ nhất khi α xấp xỉ 0.3.

Trong hình 3.6 và 3.7 dưới đây, khảo sát ảnh hưởng của vị trí nút chuyển tiếp R lên hiệu năng của hệ thống. Giả sử rằng R nằm trên đường thẳng kết nối giữa nút nguồn A và B và khoảng cách giữa nguồn A và B là chuẩn hóa bằng 1, xem xét 3 trường hợp tiêu biểu của R, cụ thể là R rất gần nguồn A tại tọa độ (0.1, 0), R rất gần nguồn B tại tọa độ (0.5, 0), và R nằm ngay giữa nguồn A và nguồn B tại tọa độ (0.8, 0). Chọn $(x_{PB}, y_{PB}) = (0.5, 1)$, $\alpha=0.3$, $P_{PB}=10$ dB. Tương tự như các mạng chuyển tiếp hai chiều truyền thống, nút chuyển tiếp nằm tại ngay giữa nguồn A và nguồn B cho xác suất dừng hệ thống thấp nhất, tiếp theo là trường hợp nút chuyển tiếp nằm gần nguồn B và cuối cùng là trường hợp nút chuyển tiếp nằm gần nguồn A. Các kết quả đạt được là hợp lý với kết quả phân tích và dễ dàng lý giải bằng cách vận dụng hiệu ứng suy hao đường truyền.



Hình 3.6. Xác suất dừng hệ thống theo P_{PB} : ảnh hưởng của vị trí R

Trong hình 3.7, khảo sát xác suất dừng hệ thống theo hệ số phân chia thời gian α khi thay đổi vị trí R . Có thể khẳng định một lần nữa là hệ thống sẽ bị dừng khi giá trị α lớn (hay nói cách khác nếu dừng trên 70% một chu kỳ thời gian cho thu thập năng lượng thì hệ thống sẽ dừng). Giá trị tối ưu của α không phụ thuộc vào vị trí của nút chuyển tiếp trong cả ba trường hợp khảo sát. Trong trường hợp này giá trị tối ưu của α xấp xỉ 0.3.



Hình 3.7. Xác suất dừng hệ thống theo α : ảnh hưởng của vị trí R

Trong phần này đã đề xuất mô hình chuyển tiếp hai chiều giải mã và chuyển tiếp với một nút cung cấp năng lượng. Phần này đã phân tích xác suất dừng hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh và sử dụng mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng tính chính xác của phương pháp phân tích đề xuất. Các kết quả mô phỏng đã chỉ ra rằng giá trị α tối ưu không phụ thuộc vào vị trí của PB và R và hiệu năng của hệ thống sẽ cải thiện tốt nhất nếu PB được đặt gần nút chuyển tiếp.

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

Mục 3.2 đã phân tích hiệu năng của hệ thống với kênh truyền fading Rayleigh. Nhưng để đánh giá một cách tổng quát, phần này sẽ đánh giá hiệu năng của hệ thống trên kênh truyền Nakagami- m với mô hình hệ thống không thay đổi.

Trước hết, ta xem xét hàm CDF và PDF của γ_{xy} ở kênh truyền Nakagami- m , cụ thể hàm CDF và PDF của γ_{xy} sẽ lần lượt có dạng:

$$F_{\gamma_{xy}}(x) = 1 - \exp(-m_{xy}\lambda_{xy}x) \sum_{t=0}^{m_{xy}-1} \frac{(m_{xy}\lambda_{xy})^t}{t!} x^t, \quad (3.28)$$

$$f_{\gamma_{xy}}(x) = \frac{(m_{xy}\lambda_{xy})^{m_{xy}}}{(m_{xy}-1)!} x^{m_{xy}-1} \exp(-m_{xy}\lambda_{xy}x), \quad (3.29)$$

với $m_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}$ là hệ số Nakagami- m và $\lambda_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}$ bằng nghịch đảo giá trị trung bình của $\gamma_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}$ của kênh truyền từ \mathcal{X} tới \mathcal{Y} .

3.3.1. Phân tích xác suất dừng hệ thống

Trong phần này, NCS sẽ phân tích xác suất dừng của hệ thống ở kênh truyền Nakagami- m . Tương tự như hệ thống hoạt động ở kênh truyền Rayleigh fading, khi sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp, hệ thống sẽ dừng nếu bất kỳ một khe thời gian con nào không đảm bảo tốc độ dữ liệu mong muốn cho trước (\mathcal{R}). Do đó, ta xác định xác suất dừng hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr[C_{\text{AR}} < \mathcal{R}] \\ &\quad + \Pr[C_{\text{AR}} \geq \mathcal{R}, C_{\text{BR}} < \mathcal{R}] \\ &\quad + \Pr(C_{\text{AR}} \geq \mathcal{R}, C_{\text{BR}} \geq \mathcal{R}, \min(C_{\text{RA}}, C_{\text{RB}}) < \mathcal{R}). \end{aligned} \quad (3.30)$$

Sử dụng (3.7)-(3.10), có thể viết lại (3.30) như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr[C_{\text{AR}} < \mathcal{R}] \\ &\quad + \Pr[C_{\text{AR}} \geq \mathcal{R}, C_{\text{BR}} < \mathcal{R}] \\ &\quad + \Pr(C_{\text{AR}} \geq \mathcal{R}, C_{\text{BR}} \geq \mathcal{R}, \min(C_{\text{RA}}, C_{\text{RB}}) < \mathcal{R}), \end{aligned} \quad (3.31)$$

với $\gamma_{th} = 2^{\frac{3R}{1-\alpha}} - 1$ và $\gamma_{\text{R}} = \min(\gamma_{\text{RA}}, \gamma_{\text{RB}})$.

Hơn nữa, do tính độc lập thống kê của γ_{AR} , γ_{BR} , và γ_{R} , có thể viết lại OP dưới dạng sau:

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

Do đó, để tìm được OP, ta cần xác định được $\Pr(\gamma_{\text{AR}} \geq \gamma_{th})$, $\Pr(\gamma_{\text{BR}} \geq \gamma_{th})$ và $\Pr(\gamma_{\text{R}} \geq \gamma_{th})$. Đầu tiên, xét xác suất $\Pr(\gamma_{\text{AR}} \geq \gamma_{th})$ như sau:

$$\Pr[\gamma_{\text{AR}} \geq \gamma_{th}] = \Pr(\gamma_{\text{PA}}\gamma_{\text{AR}} \geq \Upsilon), \quad (3.33)$$

với $\Upsilon = \frac{\gamma_{th}}{\omega\Delta}$.

Sử dụng xác suất có điều kiện, có thể viết (3.33) ở dạng như sau:

$$\Pr[\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}] = \int_0^{+\infty} \left(1 - F_{\gamma_{PA}}\left(\frac{\Upsilon}{x}\right)\right) f_{\gamma_{AR}}(x) dx. \quad (3.34)$$

Thay các hàm CDF và PDF đã đưa ra trong (3.28) và (3.29) vào trong (3.34), ta có:

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

Sử dụng biến đổi (3.471.9) ở [80], (3.35) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \Pr[\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}] &= \frac{(m_{AR} \lambda_{AR})^{m_{AR}}}{(m_{AR} - 1)!} \sum_{t=0}^{m_{PA}-1} \frac{2(m_{PA} \lambda_{PA} \Upsilon)^t}{t!} \left(\frac{m_{PA} \lambda_{PA} \Upsilon}{m_{AR} \lambda_{AR}}\right)^{\frac{m_{AR}-t}{2}} \\ &\times K_{m_{AR}-t}\left(2\sqrt{m_{PA} m_{AR} \lambda_{PA} \lambda_{AR} \Upsilon}\right) \\ &= \sum_{t=0}^{m_{PA}-1} \frac{2(m_{PA} m_{AR} \lambda_{PA} \lambda_{AR} \Upsilon)^{\frac{m_{AR}+t}{2}}}{t!(m_{AR} - 1)!} K_{m_{AR}-t}\left(2\sqrt{m_{PA} m_{AR} \lambda_{PA} \lambda_{AR} \Upsilon}\right), \end{aligned} \quad (3.36)$$

với $K_{m_{AR}-t}(x)$ làm hàm Bessel điều chỉnh loại 2 với bậc $m_{AR} - t$ [70].

Tương tự như $\Pr[\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}]$, ta xác định $\Pr[\gamma_{BR} \geq \gamma_{th}]$ như sau:

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

Sau khi có $\Pr[\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}]$, $\Pr[\gamma_{BR} \geq \gamma_{th}]$, ta có thể xác định $\Pr(\gamma_R \geq \gamma_{th})$ bằng cách xem xét γ_{RA} và γ_{RB} ở (3.9) và (3.10) và nhận thấy γ_{RA} và γ_{RB} là tương quan với nhau do có một thành phần chung γ_{PR} . Do đó, áp dụng xác suất có điều kiện, có thể viết $\Pr(\gamma_R \geq \gamma_{th})$ như sau:

$$\Pr[\gamma_R \geq \gamma_{th}] = \Pr[\gamma_{PR} \min(\gamma_{RA}, \gamma_{RB}) \geq \Upsilon]. \quad (3.38)$$

Đặt $M = \min(\gamma_{RA}, \gamma_{RB})$, ta tìm được hàm CDF của M như sau:

$$\begin{aligned} F_M(x) &= 1 - (1 - F_{\gamma_{RA}}(x))(1 - F_{\gamma_{RB}}(x)) \\ &= 1 - \sum_{t=0}^{m_{RA}-1} \sum_{v=0}^{m_{RB}-1} \frac{(m_{RA} \lambda_{RA})^t}{t!} \frac{(m_{RB} \lambda_{RB})^v}{v!} x^{t+v} \exp(-(m_{RA} \lambda_{RA} + m_{RB} \lambda_{RB})x). \end{aligned} \quad (3.39)$$

Tương tự, có thể viết lại $\Pr(\gamma_R \geq \gamma_{th})$ như sau:

$$\Pr[\gamma_R \geq \gamma_{th}] = \Pr[\gamma_{PR} M \geq \gamma_{th}] = \int_0^{+\infty} \left(1 - F_M\left(\frac{\Upsilon}{x}\right)\right) f_{\gamma_{PR}}(x) dx. \quad (3.40)$$

Sử dụng (3.39), ta xác định được:

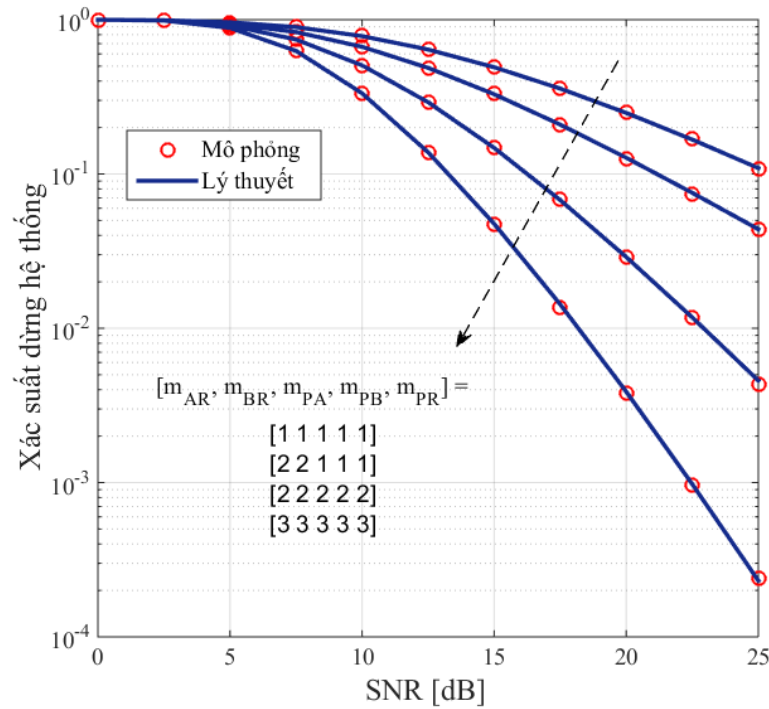
$$\begin{aligned} \Pr[\gamma_R \geq \gamma_{th}] &= \frac{(m_{PR} \lambda_{PR})^{m_{PR}}}{(m_{PR} - 1)!} \sum_{t=0}^{m_{RA}-1} \sum_{v=0}^{m_{RB}-1} \frac{(m_{RA} \lambda_{RA})^t}{t!} \frac{(m_{RB} \lambda_{RB})^v}{v!} \Upsilon^{t+v} \\ &\quad \times \int_0^{+\infty} x^{m_{PR}-t-v-1} \exp\left(-\left(m_{RA}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

Cuối cùng, thay các kết quả ở (3.35), (3.37) và (3.41) vào (3.32), ta xác định được biểu thức của xác suất dừng OP.

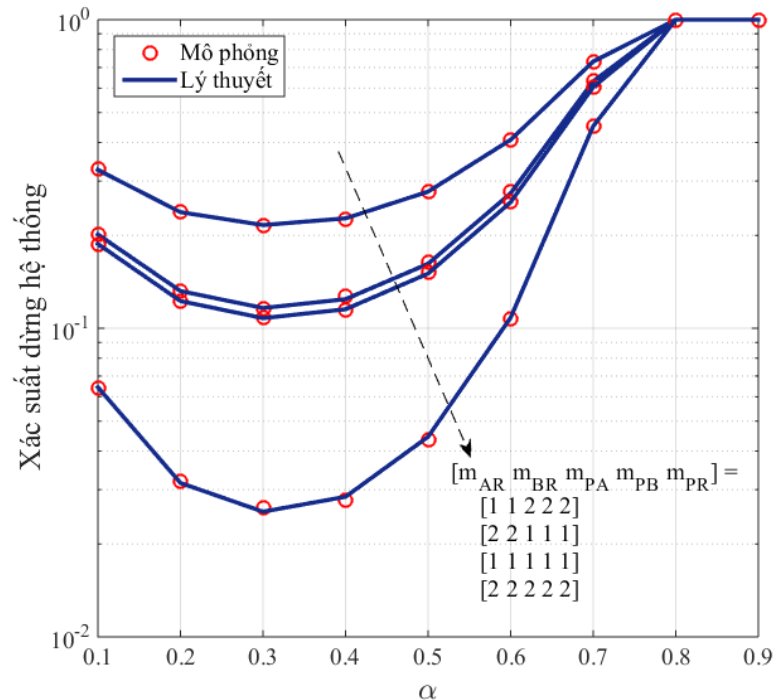
3.3.2. Kết quả mô phỏng và phân tích

Trong phần này, NCS sẽ thực hiện mô phỏng Monte-Carlo để thực hiện hai mục đích (i) kiểm chứng tính chính xác của phương pháp và kết quả lý thuyết phân tích ở phần trên và (ii) khảo sát đặc tính của hệ thống. Để đơn giản, chúng ta xem xét hệ thống được đặt trên một mặt phẳng hai chiều với các nút nguồn A, B, R và PB có tọa độ lần lượt là: (0, 0), (1, 0), $(x_R, 0)$, và (x_P, y_P) . Với suy hao đường truyền, chúng ta sử dụng mô hình suy hao đường truyền đơn giản để mô hình hóa độ lợi kênh truyền trung bình, cụ thể $\lambda_{xy} = d_{xy}^{-l}$ với d_{xy} là khoảng cách vật lý giữa \mathcal{X} và \mathcal{Y} và l là hệ số suy hao đường truyền có giá trị tiêu biểu từ 2 đến 6. Ở đây, ta chọn $l = 3$. Các tham số hệ thống có giá trị như sau: $\varepsilon = 0.6$ và $\mathcal{R} = 1$ bit/s/Hz.

Hình 3.8 khảo sát ảnh hưởng hệ số kênh truyền tới xác suất dừng của hệ thống với 04 trường hợp: (i) $[m_{AR} \ m_{BR} \ m_{PA} \ m_{PB} \ m_{PR}] = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$; (ii) $[m_{AR} \ m_{BR} \ m_{PA} \ m_{PB} \ m_{PR}] = [2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1]$; (iii) $[m_{AR} \ m_{BR} \ m_{PA} \ m_{PB} \ m_{PR}] = [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$; (iv) $[m_{AR} \ m_{BR} \ m_{PA} \ m_{PB} \ m_{PR}] = [3 \ 3 \ 3 \ 3 \ 3]$; Có thể nhận thấy trường hợp (i) cho ta kết quả xấu nhất. Hình 3.8 cũng cho thấy với giá trị hệ số kênh truyền càng cao thì xác suất dừng hệ thống càng được cải thiện. Kết quả mô phỏng cho thấy tính đúng đắn của phân tích giải tích nêu trên.



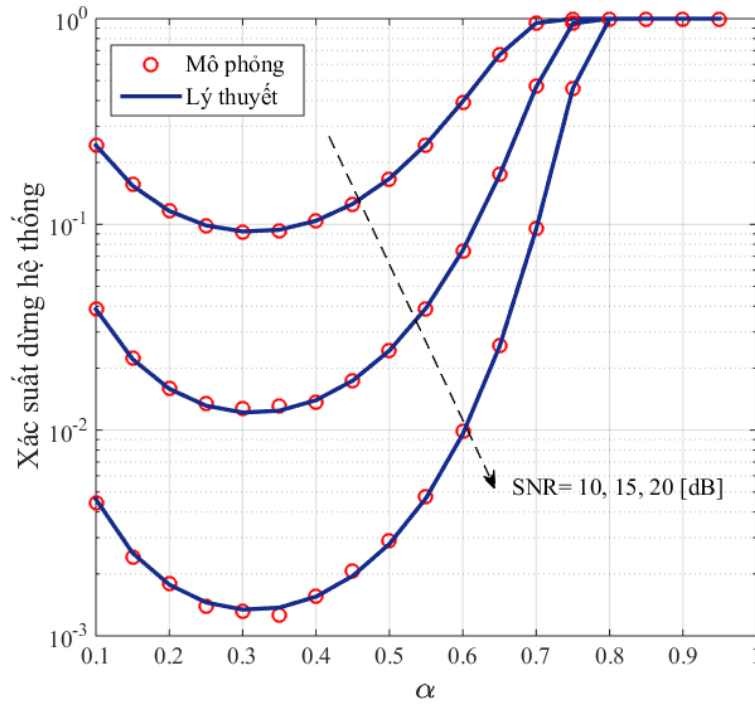
Hình 3.8. Khảo sát ảnh hưởng hệ số kênh truyền Nakagami- m tới OP



Hình 3.9. Khảo sát ảnh hưởng hệ số α tới OP khi thay đổi giá trị m

Hình 3.9 và 3.10 tiếp tục khảo sát ảnh hưởng của giá trị hệ số phân chia thời gian thu thập năng lượng α tới xác suất dừng hệ thống. Hình 3.9 khảo sát 04 trường hợp thay đổi giá trị tham số kênh truyền Nakagami- m : (i) $[m_{AR} \ m_{BR} \ m_{PA} \ m_{PB} \ m_{PR}] = [1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 2]$; (ii) $[m_{AR} \ m_{BR} \ m_{PA} \ m_{PB} \ m_{PR}] = [2 \ 2 \ 1 \ 1 \ 1]$; (iii) $[m_{AR} \ m_{BR} \ m_{PA} \ m_{PB} \ m_{PR}] =$

$[1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]$; (iv) $[m_{AR} \ m_{BR} \ m_{PA} \ m_{PB} \ m_{PR}] = [2 \ 2 \ 2 \ 2 \ 2]$. Có thể nhận thấy hiệu năng hệ thống tăng cải thiện khi hệ số kênh truyền tăng lên. Hệ số phân chia thời gian tối ưu không phụ thuộc vào hệ số kênh truyền và xấp xỉ 0,3.



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

Kết quả khảo sát ở hình 3.10, với giá trị SNR thay đổi 10 dB, 15 dB, 20 dB. Có thể nhận thấy rằng, xác suất dừng hệ thống ở tất cả các trường hợp là nhỏ nhất khi giá trị phân chia thời gian thu thập năng lượng α tối ưu. Thứ hai là, hệ thống sẽ dừng hoạt động khi hệ số α lớn hơn một giá trị nhất định. Thứ ba là, cùng với một hệ thống giá trị tối ưu của α không phụ thuộc vào SNR và hệ số kênh truyền Nakagami- m . Giá trị của α tối ưu trong khảo sát này là xấp xỉ 0,3 khi giá trị SNR thay đổi từ 10 dB, 15dB, 20 dB.

3.4. Kết luận chương

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 .

Mô hình hệ thống hai chiều được đề xuất tại chương 3 có thể ứng dụng vào mạng cảm biến phục vụ cho phát triển nông nghiệp thông minh như trồng trọt, thành phố thông minh.

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

Trong chương 4, NCS sẽ nghiên cứu 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 đề xuất phương pháp để phân tích xác suất dừng chính xác của hệ thống và biểu diễn được 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.

Vô tuyến nhận thức (Cognitive Radio-CR) là công nghệ hứa hẹn, giúp đạt được hiệu quả sử dụng tần số tốt hơn so với phương pháp phân bổ phổ tần truyền thống bằng cách cho phép mạng sơ cấp (được cấp phép sử dụng tần số) hoạt động trên cùng băng tần của mạng thứ cấp (miễn cấp phép sử dụng tần số) mà không gây can nhiễu lẫn nhau. Vô tuyến nhận thức thường được áp dụng trong thực tế khi mà vùng phủ sóng của mạng sơ cấp lớn hơn rất nhiều so với mạng thứ cấp, ví dụ như mạng cảm biến vô tuyến trong nhà hay trong văn phòng hoạt động trong băng tần của truyền hình quảng bá.

Gần đây, kỹ thuật thu thập năng lượng được xem xét tích hợp cho mạng vô tuyến nhận thức khi mà cho phép tận dụng được ưu điểm của cả hai công nghệ. Cụ thể, trong bài báo [89], nhóm tác giả nghiên cứu mạng vô tuyến chuyển tiếp trong môi trường vô tuyến nhận thức. Trong bài báo này, tác giả phân tích hiệu năng hệ thống nhưng chưa xác định được công thức dạng đóng của xác suất dừng hệ thống. Tại [90], nhóm tác giả đã đề xuất cơ chế truyền thông hợp tác mà ở đó hệ thống thứ cấp thu thập năng lượng từ máy phát của hệ thống sơ cấp. Bài báo [91] đã đề xuất kỹ thuật thu thập năng lượng và phương thức sử dụng tần số của hệ thống vô tuyến nhận thức xem xét phần cứng không hoàn hảo. Nhóm tác giả đã chỉ ra rằng xác suất

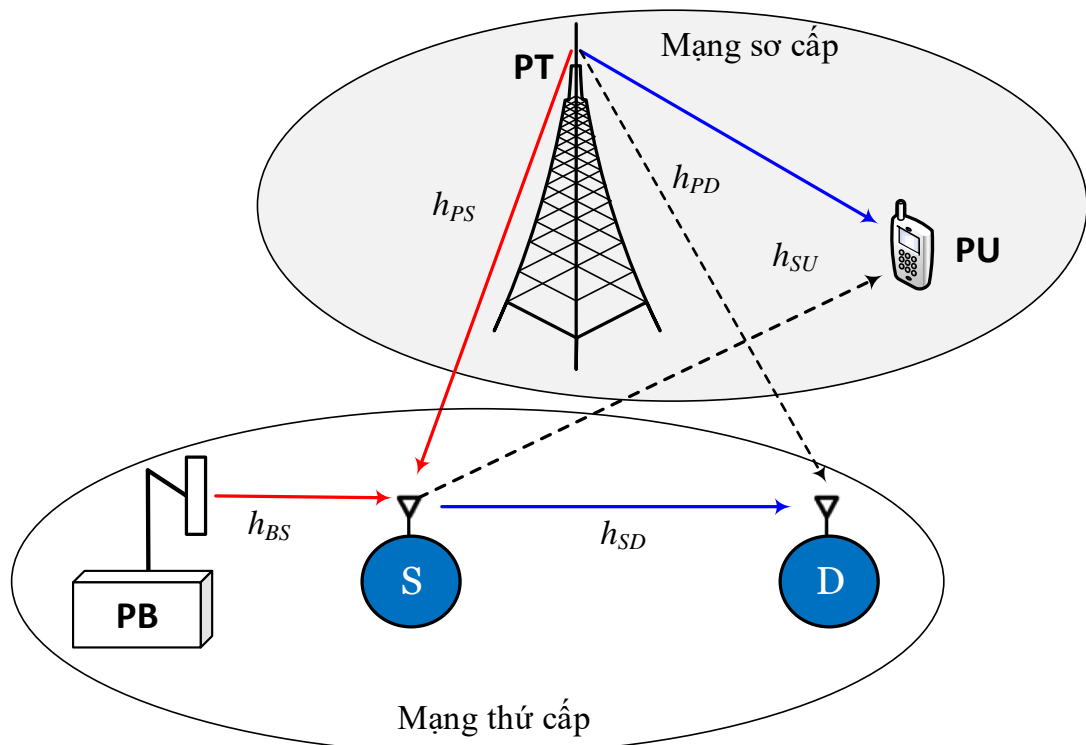
dùng hệ thống đã được cải thiện bằng việc tăng số lượng anten của máy phát và thu của hệ thống thứ cấp. Tại [92], nhóm tác giả nghiên cứu thông lượng tối đa cho trường hợp một máy phát thứ cấp thu thập năng lượng vô tuyến từ môi trường xung quanh. Tại [93], tác giả xem xét mạng chuyển tiếp trong môi trường vô tuyến nhận thức, nút nguồn và nút chuyển tiếp của mạng thứ cấp có thể thu thập năng lượng từ máy phát của mạng sơ cấp để phát thông tin. Tại [94], nhóm tác giả đề xuất phương thức mới cho thu thập năng lượng vô tuyến với mạng vô tuyến nhận thức có nhiều máy thu sơ cấp (PU). Với đề xuất này, nút mạng của hệ thống vô tuyến nhận thức có thể thu thập năng lượng từ mạng sơ cấp. Nhóm tác giả cũng xem xét ảnh hưởng của các tham số trong hệ thống đề xuất và xác định được công thức dạng tường minh cho xác suất dùng hệ thống thứ cấp.

Thêm vào đó, nhiều nhà nghiên cứu đã tập trung vào nghiên cứu việc truyền năng lượng vô tuyến từ một nguồn ngoài có nguồn năng lượng vô hạn. Với việc thu thập năng lượng từ một nguồn ngoài ổn định tăng hiệu năng của hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng [95-97]. Tại [95], nhóm tác giả xem xét và phân tích hiệu năng hệ thống đa chặng, ở đó các nút thu thập năng lượng vô tuyến từ nhiều nguồn ngoài PB và dùng năng lượng thu thập được để truyền và thu thông tin từ các nút khác. Nút đích có nhiều anten và áp dụng kỹ thuật MRC để tổng hợp tín hiệu thu được. Tại [96], nhóm tác giả đã đề xuất phương thức thu phát thông tin và truyền năng lượng vô tuyến, ở đó việc thu thập năng lượng từ một nguồn ngoài. Tại [97], nhóm tác giả xem xét lợi ích của hướng tính anten từ nguồn ngoài PB truyền năng lượng vô tuyến. Hơn nữa, phương thức điều kiện thu thập năng lượng đã được đề xuất để có thể tăng khả năng thu thập năng lượng và kéo dài thời gian hoạt động của hệ thống. Hầu hết các mô hình nghiên cứu trước đây đều thu thập năng lượng từ máy phát của mạng sơ cấp (PT) hoặc nguồn ngoài PB mà rất ít nghiên cứu kết hợp thu thập năng lượng đồng thời từ cả hai nguồn PT và PB.

Có thể nhận thấy, nhược điểm của hệ thống vô tuyến nhận thức là hiệu năng của cả mạng sơ cấp và thứ cấp phụ thuộc lẫn nhau, đặc biệt là trong trường hợp mạng thứ cấp thu thập năng lượng từ mạng sơ cấp. Cụ thể, khi công suất của máy phát mạng sơ cấp càng lớn thì năng lượng thu thập tại mạng thứ cấp cao nhưng cũng dẫn đến hiệu suất truyền thông tin giảm xuống do can nhiễu từ mạng sơ cấp

đến mạng thứ cấp cao. Và khi chúng ta giảm công suất phát của mạng sơ cấp PT dẫn tới năng lượng thu thập được tại hệ thống thứ cấp giảm và hiệu năng hệ thống thứ cấp giảm theo. Vì vậy, một nguồn năng lượng ngoài ổn định cung cấp năng lượng cho hệ thống thứ cấp sẽ tăng hiệu năng của hệ thống. Hơn nữa, để tăng hiệu năng của hệ thống thứ cấp, tại chương 4, NCS đề xuất cơ chế thu thập năng lượng của hệ thống thứ cấp đó là linh động kết hợp của hai nguồn năng lượng PT và PB. Bằng phương pháp xấp xỉ mới, NCS đã đề xuất phương pháp xác định công thức xác suất dừng hệ thống thứ cấp và xác định các tham số tối ưu để hệ thống có hiệu năng cao nhất.

4.2. Mô hình hệ thống



Hình 4.1. Mô hình hệ thống vô tuyến nhận thức thu thập năng lượng vô tuyến

Hình 4.1 trình bày mô hình hệ thống vô tuyến nhận thức thu thập năng lượng, bao gồm hệ thống sơ cấp và hệ thống thứ cấp. Hệ thống thứ cấp gồm nút phát (ký hiệu S) và nút đích (ký hiệu D). Nút S phát thông tin tới D nhưng S bị hạn chế về năng lượng. Do đó, nút S sẽ thu thập năng lượng từ PT (Primary Transmitter) là máy phát của hệ thống sơ cấp hoặc/và từ nguồn năng lượng ngoài ổn định PB (Power Beacon). Gọi T là chu kỳ truyền thông tin từ nguồn S tới D. Ở mỗi chu kỳ, phần thời gian đầu αT là thời gian S thu thập năng lượng từ PB hoặc/và PT, khoảng

thời gian $(1-\alpha)T$ là dùng để phát thông tin từ S tới D, α là hệ số phân chia thời gian, với $0 < \alpha < 1$.

Ký hiệu h_{XY} và d_{XY} tương ứng là hệ số kênh truyền và khoảng cách giữa hai nút X và Y, với $X, Y \in \{B(PB), S, P(PT), U(PU), D\}$. Độ lợi kênh truyền ($|h_{XY}|^2$) có phân bố hàm mũ với giá trị trung bình $\lambda_{XY} = d_{XY}^{-l}$, với l là hệ số suy hao đường truyền. Tốc độ dữ liệu truyền mong muốn cho trước là \mathcal{R} .

Bốn phương thức thu thập năng lượng của nút S được đưa ra 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 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 có thể 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 đồng thời hai nguồn 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.

❖ **Với phương thức BS:**

Năng lượng thu thập tại S là:

$$EH_S = \varepsilon \alpha T P_{PB} |h_{BS}|^2, \quad (4.1)$$

với ε là hiệu suất chuyển đổi năng lượng, h_{BS} là hệ số kênh truyền từ PB tới S. Công suất phát của S trong khoảng thời gian $(1-\alpha)T$ là:

$$P_S^{EH} = \kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \quad (4.2)$$

với hệ số κ được định nghĩa $\kappa = \frac{\varepsilon \alpha}{1-\alpha}$.

Hơn nữa, để không ảnh hưởng đến PU trong mạng sơ cấp thì công suất tại S phải nhỏ hơn mức ngưỡng I_p được quy định bởi PU. Công suất cực đại tại S được xác định như sau:

$$P_S^I = \frac{I_p}{|h_{SU}|^2}. \quad (4.3)$$

với h_{SU} là hệ số kênh truyền từ S tới PU.

Từ (4.2 và (4.3), công suất phát tại S được biểu diễn như sau:

$$P_S^{BS} = \min\left(\kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \frac{I_p}{|h_{SU}|^2}\right), \quad (4.4)$$

với I_p là mức ngưỡng cho phép tại PU.

❖ Với phương thức PTS:

Tương tự như phương thức BS, công suất tại S sau khi thu thập năng lượng được xác định như sau:

$$P_S^{EH} = \kappa P_{PT} |h_{PS}|^2, \quad (4.5)$$

với h_{PS} là hệ số kênh truyền từ PT tới S.

Công suất tối đa cho phép tại S để không gây can nhiễu lên PU được xác định như công thức (4.3). Do đó, công suất phát tại S được biểu diễn như sau:

$$P_S^{PTS} = \min\left(\kappa P_{PT} |h_{PS}|^2, \frac{I_p}{|h_{SU}|^2}\right). \quad (4.6)$$

❖ Với phương thức MBT:

Một cách tương tự, công suất tại S sau khi thu thập năng lượng như sau:

$$P_S^{EH} = \max\left(\kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \kappa P_{PT} |h_{PS}|^2\right). \quad (4.7)$$

Công suất tối đa cho phép tại S để không gây can nhiễu lên PU cũng được xác định như công thức (4.3). Do đó, công suất phát tại S được biểu diễn như sau:

$$P_S^{MBT} = \min\left(\max\left(\kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \kappa P_{PT} |h_{PS}|^2\right), \frac{I_p}{|h_{SU}|^2}\right). \quad (4.8)$$

❖ Với phương thức SBT:

Một cách tương tự, công suất tại S sau khi thu thập năng lượng như sau:

$$P_S^{EH} = \kappa P_{PB} |h_{BS}|^2 + \kappa P_{PT} |h_{PS}|^2. \quad (4.9)$$

Công suất tối đa cho phép tại S để không gây can nhiễu lên PU cũng được xác định như công thức (4.3). Do đó, công suất phát tại S được biểu diễn như sau:

$$P_S^{SBT} = \min \left(\kappa (P_{PB} |h_{BS}|^2 + P_{PT} |h_{PS}|^2), \frac{I_p}{|h_{SU}|^2} \right). \quad (4.10)$$

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:

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

với $sch \in \{BS, PTS, MBT, SBT\}$, \mathcal{R}_{th} là tốc độ dữ liệu mong muốn.

Để tối ưu trình bày các biểu thức toán học, ta định nghĩa một số hàm và hệ số như sau:

$$\Theta(a, b, c) = \int_0^{+\infty} \frac{ab}{x+a} \exp\left(-\frac{c}{x} - bx\right) dx,$$

$$\Upsilon(a, b, c) = \int_0^{\infty} \frac{abx}{1+ax} \exp\left(-\frac{c}{x} - bx\right) dx,$$

$$\zeta = \frac{I_p}{\kappa P_{PT}}, \quad \Omega = \frac{\lambda_{SD} \gamma_{th}}{\kappa \lambda_{PD}}, \quad \phi = \frac{\Omega}{\zeta},$$

$$\theta = \frac{\lambda_{SD} \gamma_{th} \lambda_{BS}}{\kappa P_{PB}}, \quad \vartheta = \frac{\lambda_{SU} \lambda_{BS} I_p}{\kappa P_{PB}},$$

$$\chi(x) = 2\sqrt{x} K_1(2\sqrt{x}).$$

Xác suất dừng của hệ thống thứ cấp theo từng phương thức thu thập năng lượng được xác định lần lượt như dưới đây:

a. Phương thức BS

Với trường hợp chỉ có PB là truyền năng lượng vô tuyến cho hệ thống thứ cấp, tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu (SNR) được xác định như sau:

$$\gamma_S^{BS} = \min \left(\kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \frac{I_p}{|h_{SU}|^2} \right) |h_{SD}|^2, \quad (4.12)$$

với $\kappa = \frac{\varepsilon\alpha}{1-\alpha}$.

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

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

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

Biểu thức I_1 của công thức (4.13) 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 cho phương thức BS.

b. Phương thức PTS

Với trường hợp này, hệ thống thứ cấp thu thập năng lượng từ nguồn phát PT của hệ thống sơ cấp. Xác định SNR của hệ thống thứ cấp như sau:

$$\gamma_S^{PTS} = \min \left(\kappa P_{PT} |h_{PS}|^2, \frac{I_p}{|h_{SU}|^2} \right) \frac{|h_{SD}|^2}{P_{PT} |h_{PD}|^2} \quad (4.16)$$

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

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

với $X = |h_{SD}|^2 / |h_{PD}|^2$.

Hàm CDF của X được tính như sau:

$$\begin{aligned} F_X(y) &= \Pr \left[\frac{|h_{SD}|^2}{|h_{PD}|^2} < y \right] \\ &= \int_0^{+\infty} F_{|h_{SD}|^2}(yx) f_{|h_{PD}|^2}(x) dx = \frac{\lambda_{SD} y}{\lambda_{PD} + \lambda_{SD} y} \end{aligned} \quad (4.18)$$

Thay (4.18) vào biểu thức thứ nhất của công thức (4.17), chúng ta có thể xác định được biểu thức I_3 như sau:

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

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

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

Tương tự, biểu thức I_4 được xác định:

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

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

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:

$$\begin{aligned} OP^{MBT} &= F_{\gamma_S}^{MBT}(\gamma_{th}) \\ &= \Pr\left[\max\left(\kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \kappa P_{PT} |h_{PS}|^2\right) \frac{|h_{SD}|^2}{P_{PT} |h_{PD}|^2} < \gamma_{th}, \right. \\ &\quad \left. \max\left(\kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \kappa P_{PT} |h_{PS}|^2\right) < \frac{I_p}{|h_{SU}|^2}\right] \\ &\quad + \Pr\left[\frac{I_p}{|h_{SU}|^2} \frac{|h|^2}{P_{PT} |h_{PD}|^2} < \gamma_{th}, \right. \\ &\quad \left. \max\left(\kappa P_{PB} |h_{BS}|^2, \kappa P_{PT} |h_{PS}|^2\right) > \frac{I_p}{|h_{SU}|^2}\right] \\ &= \underbrace{\int_0^{+\infty} F_X\left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa x}\right) F_{|h_{SU}|^2}\left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x}\right) f_Y(x) dx}_{I_5} \\ &\quad + \underbrace{\int_0^{+\infty} \left[1 - F_Y\left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x}\right)\right] F_X\left(\frac{\gamma_{th} P_{PT} x}{I_p}\right) f_{|h_{SU}|^2}(x) dx}_{I_6} \end{aligned} \quad (4.23)$$

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

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

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

Xác định CDF và PDF của Y lần lượt như sau:

$$\begin{aligned}
F_Y(z) &= \Pr \left[\max(\mu |h_{BS}|^2, |h_{PS}|^2) < z \right] = F_{|h_{BS}|^2} \left(\frac{z}{\mu} \right) F_{|h_{PS}|^2}(z) \\
&= 1 - \exp(-\lambda_{PS} z) - \exp\left(-\frac{\lambda_{BS} z}{\mu}\right) + \exp\left(-\frac{\lambda_{BS} z}{\mu} - \lambda_{PS} z\right).
\end{aligned} \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}
f_Y(z) &= \lambda_{PS} \exp(-\lambda_{PS} z) + \frac{\lambda_{BS}}{\mu} \exp\left(-\frac{\lambda_{BS} z}{\mu}\right) \\
&\quad - \left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS} \right) \exp\left(-\left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS}\right) z\right).
\end{aligned} \tag{4.26}$$

Thay thế CDF của X (4.18) và PDF của Y (4.26) vào công thức (4.24), ta có:

$$\begin{aligned}
I_5 &= \int_0^{+\infty} \left[\frac{\Omega}{x + \Omega} \lambda_{PS} \exp(-\lambda_{PS} x) + \frac{\Omega}{x + \Omega} \frac{\lambda_{BS}}{\mu} \exp\left(-\frac{\lambda_{BS} x}{\mu}\right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{\Omega}{x + \Omega} \left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS} \right) \exp\left(-\left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS}\right) x\right) \right] dx \\
&\quad - \int_0^{+\infty} \left[\frac{\Omega}{x + \Omega} \lambda_{PS} \exp\left(-\frac{\lambda_{SU} \zeta}{x} - \lambda_{PS} x\right) \right. \\
&\quad \left. + \frac{\Omega}{x + \Omega} \frac{\lambda_{BS}}{\mu} \exp\left(-\frac{\lambda_{SU} \zeta}{x} - \frac{\lambda_{BS} x}{\mu}\right) \right. \\
&\quad \left. - \frac{\Omega}{x + \Omega} \left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS} \right) \exp\left(-\frac{\lambda_{SU} \zeta}{x} - \left(\frac{\lambda_{BS}}{\mu} + \lambda_{PS}\right) x\right) \right] dx
\end{aligned} \tag{4.27}$$

Áp dụng biến đổi (3.383.10) tại [80] xác định được biểu thức I_5 như sau:

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

Biểu thức còn lại của công thức (4.23) là biểu thức I_6 được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
I_6 &= \Pr \left[\max\left(\mu |h_{BS}|^2, |h_{PS}|^2\right) > \frac{I_p}{\kappa P_{PT} |h_{SU}|^2}, \frac{I_p}{|h_{SU}|^2} \frac{|h_{SD}|^2}{P_{PT} |h_{PD}|^2} < \gamma_{th} \right] \\
&= \int_0^{+\infty} \left[1 - F_Y\left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x}\right) \right] F_X\left(\frac{\gamma_{th} P_{PT} x}{I_p}\right) f_{|h_{SU}|^2}(x) dx \\
&= \int_0^{+\infty} \left[\frac{\lambda_{SU} \Omega}{\zeta} \frac{x}{1 + \frac{\Omega}{\zeta} x} \exp\left(-\frac{\lambda_{PS} I_p}{\kappa P_{PT} x} - \lambda_{SU} x\right) \right. \\
&\quad + \frac{\lambda_{SU} \Omega}{\zeta} \frac{x}{1 + \frac{\Omega}{\zeta} x} \exp\left(-\frac{\lambda_{BS} I_p}{\mu \kappa P_{PT} x} - \lambda_{SU} x\right) \\
&\quad \left. - \frac{\lambda_{SU} \Omega}{\zeta} \frac{x}{1 + \frac{\Omega}{\zeta} x} \exp\left(-\left(\frac{\lambda_{BS} I_p}{\mu \kappa P_{PT}} + \frac{\lambda_{PS} I_p}{\kappa P_{PT}}\right) \frac{1}{x} - \lambda_{SU} x\right) \right] dx
\end{aligned} \tag{4.29}$$

Sau khi thực hiện biến đổi, ta có:

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

Thay thế (4.28) và (4.30) vào (4.23), ta xác định được xác suất dừng hệ thống cho phương thức MBT.

d. Phương thức SBT

Đối với phương thức SBT, nguồn năng lượng cung cấp cho nút S của hệ thống thứ cấp bao gồm cả PT và PB. Nút S sẽ tổng hợp năng lượng của cả hai nguồn PT và PB. SNR của hệ thống thứ cấp được xác định như sau:

$$\gamma_S^{SBT} = \min \left(\kappa \left(P_{PB} |h_{BS}|^2 + P_{PT} |h_{PS}|^2 \right), \frac{I_p}{|h_{SU}|^2} \right) \frac{|h_{SD}|^2}{P_{PT} |h_{PD}|^2} \quad (4.31)$$

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

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

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

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

với $Q = \mu |h_{BS}|^2 + |h_{PS}|^2$.

Xác định CDF và PDF của Q lần lượt như sau:

$$\begin{aligned} F_Q(z) &= \Pr \left[\mu |h_{BS}|^2 + |h_{PS}|^2 < z \right] \\ &= \int_{x=0}^z \int_{y=0}^{z-\mu x} f_{|h_{BS}|^2}(x) f_{|h_{PS}|^2}(y) dx dy \\ &= \int_{x=0}^z \left[\lambda_{h_{BS}} \exp(-\lambda_{h_{BS}} x) \right. \\ &\quad \left. - \lambda_{h_{BS}} \exp(-\lambda_{h_{PS}} z) \exp(-\lambda_{h_{BS}} x + \mu \lambda_{h_{PS}} x) \right] dx \\ &= 1 - \exp(-\lambda_{h_{BS}} z) \\ &\quad - \frac{\lambda_{h_{BS}}}{\lambda_{h_{BS}} - \mu \lambda_{h_{PS}}} \left[\exp(-\lambda_{h_{PS}} z) - \exp(-\lambda_{h_{BS}} z - \lambda_{h_{PS}} z + \mu \lambda_{h_{PS}} z) \right] \end{aligned} \quad (4.34)$$

$$f_Q(z) = \lambda_{h_{BS}} \exp(-\lambda_{h_{BS}} z) + \frac{\lambda_{h_{BS}}}{\lambda_{h_{BS}} - \mu\lambda_{h_{PS}}} \left[\lambda_{h_{PS}} \exp(-\lambda_{h_{PS}} z) - (\lambda_{h_{BS}} + \lambda_{h_{PS}} - \mu\lambda_{h_{PS}}) \exp(-(\lambda_{h_{BS}} + \lambda_{h_{PS}} - \mu\lambda_{h_{PS}}) z) \right] \quad (4.35)$$

Thay thế CDF của X (4.18) và PDF của Q (4.35) vào công thức (4.33), ta xác định được:

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

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

Tương tự như vậy, biểu thức I_8 của công thức (4.32) được xác định như sau:

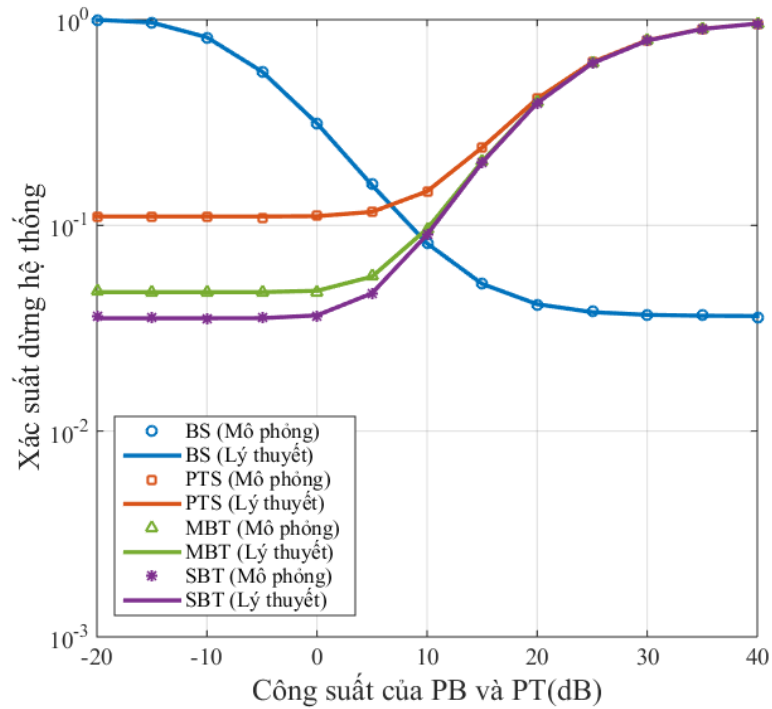
$$I_8 = \int_0^{+\infty} \left[1 - F_Q \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) \right] F_X \left(\frac{\gamma_{th} P_{PT} x}{I_p} \right) f_{|h_{SU}|^2}(x) dx = \int_0^{+\infty} \frac{\phi \lambda_{h_{SU}} x}{1 + \phi x} \exp \left(-\frac{\lambda_{h_{BS}} \zeta}{x} - \lambda_{h_{SU}} x \right) dx + \frac{\lambda_{h_{BS}}}{\lambda_{h_{BS}} - \mu\lambda_{h_{PS}}} \left[\int_0^{+\infty} \frac{\phi \lambda_{h_{SU}} x}{1 + \phi x} \exp \left(-\frac{\lambda_{h_{PS}} \zeta}{x} - \lambda_{h_{SU}} x \right) dx - \int_0^{+\infty} \frac{\phi \lambda_{h_{SU}} x}{1 + \phi x} \exp \left(-\frac{\lambda \zeta}{x} - \lambda_{h_{SU}} x \right) dx \right], \quad (4.37)$$

$$= \Upsilon(\phi, \lambda_{h_{SU}}, \lambda_{h_{BS}} \zeta) + \frac{\lambda_{h_{BS}}}{\lambda_{h_{BS}} - \mu\lambda_{h_{PS}}} \left[\Upsilon(\phi, \lambda_{h_{SU}}, \lambda_{h_{PS}} \zeta) - \Upsilon(\phi, \lambda_{h_{SU}}, \lambda \zeta) \right].$$

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

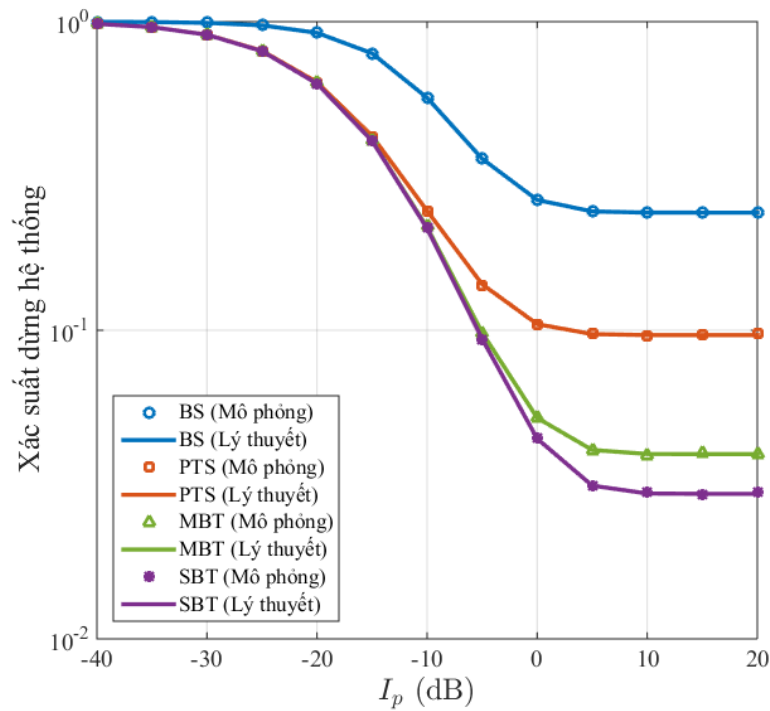
4.4. Kết quả mô phỏng và phân tích

Trong phần trước đã xác định được công thức tính xác suất dừng 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.



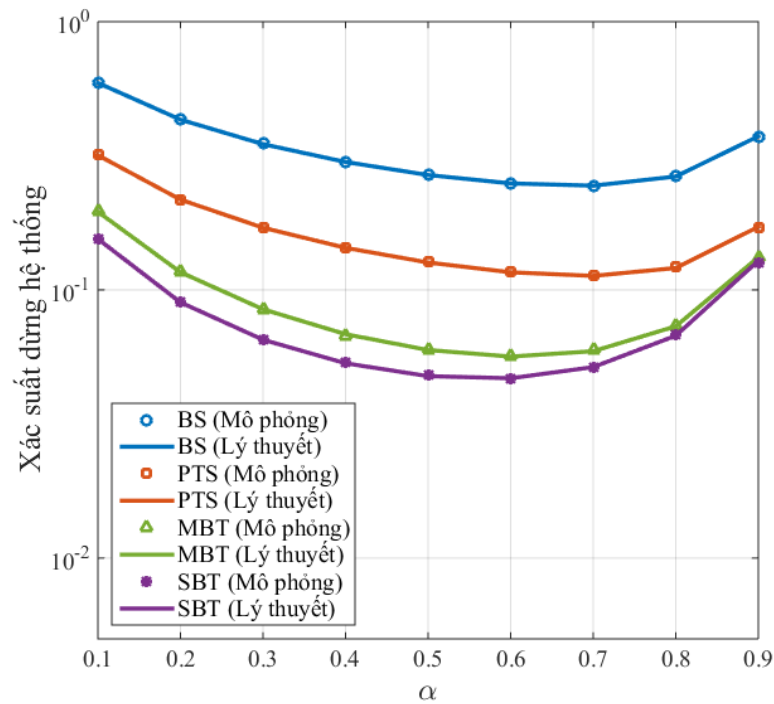
Hình 4.2. Xác suất dừng hệ thống theo PT và PB

Tại hình 4.2 biểu diễn xác suất dừng hệ thống theo công suất của PT và PB, công suất máy phát PB và PT từ -20 tới 40 dB trong phương thức BS, PTS, MBT và SBT. Kết quả mô phỏng cho thấy kết quả phân tích lý thuyết và mô phỏng là trùng khớp cho thấy tính đúng đắn của phân tích và xác định biểu thức tính xác suất dừng hệ thống. Có thể nhận thấy, với phương thức PTS, MBT và SBT, hiệu năng của hệ thống cao khi công suất máy phát của PT và PB thấp từ -20 tới 10 dB. Sau đó hiệu năng hệ thống giảm xuống khi công suất PT và PB tăng lên. Với phương thức BS thì ngược lại, hiệu năng hệ thống thấp khi nguồn năng lượng PB có công suất thấp và hiệu năng tăng lên khi công suất lớn từ 10 dB tới 40 dB. Nguyên nhân là trong các phương thức PTS, MBT và SBT, nút nguồn thu thập năng lượng từ cả PB và PT, do đó khi công suất PT tăng lên sẽ tỷ lệ thuận với công suất nhiễu gây ra cho hệ thống thứ cấp. Kết quả là hiệu năng hệ thống giảm. Trong khi đó với phương thức BS, nút nguồn chỉ thu thập năng lượng từ PB nên khi tăng công suất PB sẽ kéo theo sự cải thiện hiệu năng hệ thống.



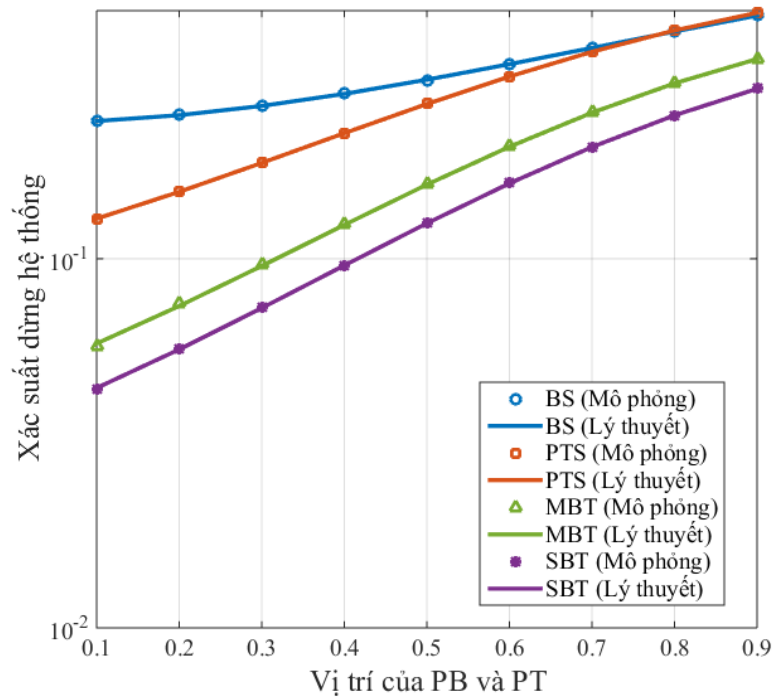
Hình 4.3. Xác suất dừng hệ thống theo I_p (dB)

Hình 4.3 mô phỏng xác suất dừng hệ thống theo I_p . Xác suất dừng của tất cả các phương thức đạt bão hòa khi I_p cao hơn 5 dB. Nguyên nhân là tỷ lệ công suất tín hiệu trên nhiễu (SNR) của tất cả các phương thức đều bị giới hạn bởi ràng buộc về mức can nhiễu tối đa thể hiện như trong công thức (4.3) đối với các phương thức BS, PTS, MBT và SBT. Hơn nữa, hình 4.3 còn thể hiện hiệu năng hệ thống với phương thức SBT tốt nhất trong tất cả các phương thức đề xuất khi xét cùng trong một yêu cầu về ngưỡng nhiễu I_p của mạng vô tuyến nhận thức. Nguyên nhân vì phương thức SBT tổng hợp cả hai nguồn năng lượng PT và PB để thu thập, dẫn đến hiệu năng của hệ thống vượt trội hơn so với các phương thức BS, PTS và MBT. Phương thức SBT cho hiệu năng hệ thống tốt nhất do sử dụng cơ chế linh động, tổng hợp nguồn năng lượng từ cả PT và PB.



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

Hình 4.4 biểu diễn xác suất dừng của hệ thống là một hàm phức tạp theo biến α và hàm có đặc tính “hàm lồi” (convex function). Do đó tồn tại một giá trị tối ưu làm cho xác suất dừng đạt cực tiểu. Đối với phương thức MBT và SBT, giá trị α tối ưu khoảng 0.6 và 0.55 trong khi của phương thức BS và PTS lần lượt là khoảng 0.65 và 0.7, tương ứng. Như vậy là hiệu năng của hệ thống tối ưu khi hệ thống tiêu tốn khoảng 60% của một chu kỳ thời gian để thu thập năng lượng tại nút nguồn S. Một lần nữa cho thấy, hiệu năng của phương thức SBT là tối ưu nhất trong các phương thức thu thập năng lượng đề xuất.



Hình 4.5. Xác suất dừng hệ thống theo vị trí của PB và PT

Hình 4.5 mô phỏng xác suất dừng hệ thống theo khoảng cách của PT và PB tới Nút nguồn S của hệ thống vô tuyến nhận thức. Cự ly của PB tới S thay đổi từ 0.1 tới 1 theo trục X. Giả thiết khoảng cách từ S tới PB và PT là bằng nhau. Nhận thấy xác suất dừng của hệ thống cải thiện với các phương thức SBT. Hình 4.5 còn thể hiện sự phụ thuộc quan trọng của hiệu năng hệ thống vào việc định vị các vị trí của các nút PB và PT trong mạng cũng như vị trí của chúng đối với nút nguồn S. Cụ thể, khi các nút PB và PT di chuyển gần về phía nút nguồn, hiệu năng của các phương thức tăng lên vì nút nguồn có nhiều cơ hội thu thập được một lượng lớn năng lượng. Ngược lại, khi các nút PB và PT di chuyển ra xa nút nguồn, hiệu năng của các phương thức xấu đi vì nút nguồn thu thập năng lượng từ PB và PT một cách hạn chế hơn.

4.5. Kết luận chương

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. Chương 4 đã đề xuất 4 phương thức thu thập năng lượng. 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 mô hình đề xuất được đánh giá thông qua mô phỏng và phân tích.

Công thức toán học của xác suất dừng hệ thống ở dạng đóng sẽ ứng dụng cho thiết kế mạng cảm biến không dây ứng dụng trong thực tế nhằm sử dụng hiệu quả tài nguyên tần số của mạng vô tuyến nhận thức. Đồng thời tận dụng được nguồn năng lượng từ máy phát công suất lớn của mạng sơ cấp.

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:

Kết quả nghiên cứu của luận án chỉ ra rằng, 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, đã đề xuất ba mô hình tiêu biểu và đưa ra giải pháp phân tích và khảo sát đánh giá hiệu năng hệ thống. Luận án đã đưa ra 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 thống, 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 sử dụng năng lượng thu thập từ nguồn phát năng lượng (nguồn ngoài độc lập) để thực hiện 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 luận rằng 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. Đề xuất 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 nhiễu 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 kết quả nghiên cứu của luận án

Các kết quả nghiên cứu của luận án bao gồm các mô hình hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng và phương pháp phân tích, đánh giá hiệu năng hệ thống vô tuyến 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 vô tuyến thế hệ mới sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng.
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 cho mạng kết nối vạn vật (IoT), quản lý năng lượng, cảnh báo thiên tai, phát triển nông nghiệp thông minh.
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 nâng 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 nhiều 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.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Zou, J. Zhu, and R. Zhang, "Exploiting Network Cooperation in Green Wireless Communication," *Communications, IEEE Transactions*, vol. PP, pp. 1-12, 2013.
- [2] X. Huang, T. Han, and N. Ansari, "On Green Energy Powered Cognitive Radio Networks," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. PP, pp. 1-1, 2015.
- [3] X. Jie, D. Lingjie, and Z. Rui, "Cost-aware green cellular networks with energy and communication cooperation," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 53, pp. 257-263, 2015.
- [4] M. Zhang and Y. Liu, "Energy Harvesting for Physical-Layer Security in OFDMA Networks," *Information Forensics and Security, IEEE Transactions*, vol. 11, pp. 154-162, 2016.
- [5] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. PP, pp. 1-19, 2010.
- [6] C. R. Valenta and G. D. Durgin, "Harvesting Wireless Power: Survey of Energy-Harvester Conversion Efficiency in Far-Field, Wireless Power Transfer Systems," *Microwave Magazine, IEEE*, vol. 15, pp. 108-120, 2014.
- [7] S. A. Raza Zaidi, A. Afzal, M. Hafeez, M. Ghogho, D. C. McLernon, and A. Swami, "Solar energy empowered 5G cognitive metro-cellular networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 53, pp. 70-77, 2015.
- [8] D. Mishra, S. De, S. Jana, S. Basagni, K. Chowdhury, and W. Heinzelman, "Smart RF energy harvesting communications: challenges and opportunities," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 53, pp. 70-78, 2015.
- [9] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," *IEEE International Symposium on Information Theory 2008 (ISIT'08)*, 2008, pp. 1612-1616.
- [10] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer," *Proc. of the 2010 IEEE International Symposium on Information Theory Proceedings (ISIT)*, 2010, pp. 2363-2367.
- [11] R. J. M. Vullers, R. V. Schaijk, H. J. Visser, J. Penders, and C. V. Hoof, "Energy Harvesting for Autonomous Wireless Sensor Networks," *Solid-State Circuits Magazine, IEEE*, vol. 2, pp. 29-38, 2010.
- [12] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, pp. 4754-4767, 2013.
- [13] J. Nicholas Laneman, *Cooperative Diversity in Wireless Network: Algorithms and Architectures*. 2002.
- [14] L. Xiao, P. Wang, D. Niyato, D. Kim, and Z. Han, "Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. PP, pp. 1-1, 2015.
- [15] A. A. Nasir, Z. Xiangyun, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing," *Wireless Communications, IEEE Transactions*, vol. 12, pp. 3622-3636, 2013.

- [16] H. Ju and R. Zhang, "A Novel Mode Switching Scheme Utilizing Random Beamforming for Opportunistic Energy Harvesting," *Wireless Communications, IEEE Transaction*, vol. PP, pp. 1-13, 2014.
- [17] X. Jie and Z. Rui, "Throughput Optimal Policies for Energy Harvesting Wireless Transmitters with Non-Ideal Circuit Power," *Communications, IEEE Journal*, vol. 32, pp. 322-332, 2014.
- [18] H. Chuan, Z. Rui, and C. Shuguang, "Optimal Power Allocation for Outage Probability Minimization in Fading Channels with Energy Harvesting Constraints," *Wireless Communications, IEEE Transactions*, vol. 13, pp. 1074-1087, 2014.
- [19] Y. Zhao, B. Chen, and R. Zhang, "Optimal power management for remote estimation with an energy harvesting sensor," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 1, pp. 6471-6480, November, 2015.
- [20] H. Xing, L. Liu, and R. Zhang, "Secrecy wireless information and power transfer in fading wiretap channel," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 1, pp. 180-190, January, 2016
- [21] J. Zhang, T. Wei, X. Yuan, and R. Zhang, "Multi-antenna constant envelope wireless power transfer," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 1, no. 4, pp. 458-467, December 2017.
- [22] Y. Liu, J. Xu, and R. Zhang, "Exploiting interference for secrecy wireless information and power transfer", *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no.1, pp. 133-139, February 2018.
- [23] M. Mohammadi, B. K. Chalise, H. A. Suraweera, C. Zhong, G. Zheng, and I. Krikidis, "Throughput analysis and optimization of wireless-powered multiple antenna full-duplex relay systems", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, pp. 1769-1785, April 2016.
- [24] Krikidis, "Relay selection in wireless powered cooperative networks with energy storage", *IEEE Journal Selected Areas on Communications, Special Issue on Green Communications and Networking*, vol. 33, pp. 2596-2610, December 2015.
- [25] Z. Ding, I. Krikidis, B. Sharif and H. V. Poor, "Wireless information and power transfer in cooperative networks with spatially random relays", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 13, pp. 4440-4453, August 2014.
- [26] I. Ahmed, A. Ikhlef, R. Schober, and R. K. Mallik, "Joint Power Allocation and Relay Selection in Energy Harvesting AF Relay Systems," *Wireless Communications Letters, IEEE*, vol. 2, pp. 239-242, 2013.
- [27] I. Ahmed, A. Ikhlef, R. Schober, and R. K. Mallik, "Power Allocation for Conventional and Buffer-Aided Link Adaptive Relaying Systems with Energy Harvesting Nodes," *Wireless Communications, IEEE Transactions*, vol. 13, pp. 1182-1195, 2014.
- [28] Kaya Tutuncuoglu, Burak Varan, and Aylin Yener, "Throughput Maximization for Two-way Relay Channels with Energy Harvesting Nodes: The Impact of Relaying Strategies", *IEEE Transactions on Communications*, 63(6), pp. 2081-2093, Jun. 2015.
- [29] K. Tutuncuoglu and A. Yener, "Sum-rate optimal power policies for energy harvesting transmitters in an interference channel," *Communications and Networks*, vol. 14, pp. 151-161, 2012.

- [30] X. N. Tran, V.H Nguyen, T.T Bui, T.C. Dinh, Y. Karasawa, "Distributed Relay Selection for MIMO-SDM Cooperative Networks", *IEICE Trans. Communications*, vol. E95B, no. 4, pp.1170-1179, April 2012.
- [31] Van Canh Tran, Minh-Tuan Le, Xuan Nam Tran, and Trung Q. Duong, "MIMO Cooperative Communication Network Design with Relay Selection and SCI Feedback", *International Journal of Communications and Electronics*. 2015.
- [32] Quoc-Tuan Vien, Xuan-Huan Nguyen, B. Barn, Xuan Nam Tran, "On the Perspective Transformation for Efficient Relay Placement in Wireless Multicast Networks," *IEEE Communications Letters*, vol.19, no.2, pp.275-278, Feb. 2015.
- [33] Khuong Ho-Van,Thiem Do-Dac, "Analysis of security performance of relay selection in underlay cognitive networks", *IET Communications* 12(1): 102-108 (2018).
- [34] Khuong Ho-Van, Thiem Do-Dac: "Reliability-Security Trade-Off Analysis of Cognitive Radio Networks with Jamming and Licensed Interference", *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2018.
- [35] Khuong Ho-Van, "On the performance of maximum ratio combining in cooperative cognitive networks with proactive relay selection under channel information errors", *Telecommunication Systems* 65(3): 365-376 (2017).
- [36] Khuong Ho-Van, "On the Outage Performance of Reactive Relay Selection in Cooperative Cognitive Networks Over Nakagami-m Fading Channels", *Wireless Personal Communications* 96(1): 1007-1027 (2017).
- [37] Khuong Ho-Van, "Exact outage probability analysis of proactive relay selection in cognitive radio networks with MRC receivers", *Journal of Communications and Networks* : 288-298 (2016).
- [38] Umar Rashid, H. D. Tuan, P. Apkarian, and H. H. Kha, "Globally Optimized Power Allocation for Multiple Sensor Fusion of Linear and Nonlinear Networks," *IEEE Trans on Signal Processing*, Feb. 2011.
- [39] H. H. Kha, H. D. Tuan and H. H. Nguyen, "Fast Global Optimal Power Allocation in Wireless Networks by Local D.C. Programming", *IEEE Trans on Wireless Communications*, Jan. 2011.
- [40] H. D. Tuan, H. H. Kha, and H. H. Nguyen, "Minimized Error-Entropy in Channel State Estimation of Spatially Correlated MIMO-OFDM", *IEEE Trans on Information Theory*, Oct. 2010.
- [41] H. P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Multi-user MIMO system with channel prediction for time-varying environments", *Antennas and Propagation (APSURSI)*, 2011 IEEE International Symposium on, 2011, pp. 59-62.
- [42] H. P. Bui, Y. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Multiuser MIMO E-SDM Systems: Performance Evaluation and Improvement in Time-Varying Fading Environments", *Global Telecommunications Conference, IEEE GLOBECOM 2008*, pp 1-5.2008.
- [43] H. P. Bui, "Doppler spectrum and performance of E-SDM systems in indoor time-varying MIMO channels," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, pp. 1361-1364. 2007.
- [44] H. P. Bui, H. Nishimoto, Y. Ogawa, T. Nishimura, and T. Ohgane, "Channel characteristics and performance of MIMO E-SDM systems in an indoor time-

- varying fading environment," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010.
- [45] H. Nguyen-Le, T. Le-Ngoc, and C. C. Ko, "Joint channel estimation and synchronization for MIMO-OFDM in the presence of carrier and sampling frequency offsets," *Vehicular Technology, IEEE Transactions*, vol. 58, pp. 3075-3081, 2009.
- [46] V. Nguyen-Duy-Nhat, H. Nguyen-Le, C. Tang-Tan, and T. Le-Ngoc, "SIR Analysis for OFDM Transmission in the Presence of CFO, Phase Noise and Doubly Selective Fading," 2013.
- [47] K. T. Truong, S. Weber, and R. Heath, "Transmission capacity of two-way communication in wireless ad hoc networks," in *Communications, 2009. ICC'09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1-5.
- [48] K. T. Truong and R. Heath, "Interference alignment for the multiple-antenna amplify-and-forward relay interference channel," *Signals, Systems and Computers (ASILOMAR), Conference Record of the Forty Fifth Asilomar Conference on*, pp. 1288-1292. 2011.
- [49] K. T. Truong, P. Sartori, and R. W. Heath Jr, "Cooperative algorithms for MIMO amplify-and-forward relay networks," *arXiv preprint arXiv:1112.4553*, 2011.
- [50] B. Vo Nguyen Quoc, T. Q. Duong, D. Benevides da Costa, G. C. Alexandropoulos, and A. Nallanathan, "Cognitive Amplify-and-Forward Relaying with Best Relay Selection in Non-Identical Rayleigh Fading," *Communications Letters, IEEE*, vol. 17, pp. 475-478, 2013.
- [51] T.-T. Tran, V. N. Quoc Bao, V. Dinh Thanh, and T. Q. Duong, "Performance analysis and optimal relay position of cognitive spectrum-sharing dual-hop decode-and-forward networks," *Computing Management and Telecommunications (ComManTel), International Conference*, pp. 269-273. 2013.
- [52] D. T. Tran and V. N. Quoc Bao, "Outage performance of cooperative multihop transmission in cognitive underlay networks," *Computing, Management and Telecommunications (ComManTel), 2013 International Conference*, pp. 123-127. 2013.
- [53] V. N. Q. Bao, T. Q. Duong, A. Nallanathan, and C. Tellambura, "Effect of Imperfect Channel State Information on the Performance of Cognitive Multihop Relay Networks," *Globecom - Signal Processing for Communications Symposium. 2013*.
- [54] Quang Nhat Le, Vo Nguyen Quoc Bao, Beongku An, "Full-Duplex Distributed Switch-and-Stay Energy Harvesting Selection Relaying Networks with Imperfect CSI: Design and Outage Analysis", *Journal of Communications and Networks*, vol. 20, no. 1, pp. 29-46, Feb. 2018.
- [55] Hoang Van Toan, Vo Nguyen Quoc Bao, and Khoa N. Le, "Performance analysis of cognitive underlay two-way relay networks with interference and imperfect channel state information", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Feb. 2018.
- [56] Nguyen Toan Van, Nhu Tri Do, Vo Nguyen Quoc Bao, Beongku An, "Performance Analysis of Wireless Energy Harvesting Multihop Cluster-Based Networks over Nakagami-m Fading Channels", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3068 - 3084, Dec. 2017

- [57] Nhu Tri Do, Daniel Benevides da Costa, Trung Q Duong, Vo Nguyen Quoc Bao, Beongku An, "Exploiting Direct Links in Multiuser Multirelay SWIPT Cooperative Networks with Opportunistic Scheduling", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 5410-5427, Aug. 2017
- [58] A. A. Nasir, Z. Xiangyun, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Wireless-Powered Relays in Cooperative Communications: Time-Switching Relaying Protocols and Throughput Analysis", *Communications, IEEE Transactions*, vol. 63, pp. 1607-1622, 2015.
- [59] L. Xiao, P. Wang, D. Niyato, D. Kim, and Z. Han, "Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. PP, pp. 1-1, 2015.
- [60] S. Ulukus, A. Yener, E. Erkip, O. Simeone, M. Zorzi, P. Grover, *et al.*, "Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances," *Communications, IEEE Journal*, vol. PP, pp. 1-1, 2015.
- [61] Y. Dong, M. Hossain, and J. Cheng, "Performance of Wireless Powered Amplify and Forward Relaying Over Nakagami- m Fading Channels With Nonlinear Energy Harvester," *Communications Letters, IEEE*, vol. PP, pp. 1-1, 2016.
- [62] G. Zhu, C. Zhong, H. Suraweera, G. Karagiannidis, Z. Zhang, and T. Tsiftsis, "Wireless Information and Power Transfer in Relay Systems with Multiple Antennas and Interference," *Communications, IEEE Transactions*, vol. PP, pp. 1-1, 2015.
- [63] Z. Zheng, P. Mogen, Z. Zhongyuan, and L. Yong, "Joint Power Splitting and Antenna Selection in Energy Harvesting Relay Channels," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 22, pp. 823-827, 2015.
- [64] T. Li, P. Fan, and K. Letaief, "Outage Probability of Energy Harvesting Relay-aided Cooperative Networks Over Rayleigh Fading Channel," *Vehicular Technology, IEEE Transactions*, vol. PP, pp. 1-1, 2015.
- [65] V. N. Q. Bao and H. Y. Kong, "Incremental relaying for partial relay selection," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E93-B, pp. 1317-1321, May 2010.
- [66] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, pp. 3062-3080, 2004.
- [67] P. N. Son, H. Y. Kong, and A. Anpalagan, "Exact outage analysis of a decode-and-forward cooperative communication network with N th best energy harvesting relay selection," *Annals of Telecommunications*, vol. 71, pp. 251-263, 2016.
- [68] N. T. Van, H. M. Tan, T. M. Hoang, T. T. Duy, and V. N. Q. Bao, "Exact Outage Probability of Energy Harvesting Incremental Relaying Networks with MRC Receiver," *Proc. of The 2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC'16)*, Hanoi, 2016, pp. 120-125.
- [69] A. Bletsas, A. Khisti, D. P. Reed, and A. Lippman, "A Simple Cooperative Diversity Method Based on Network Path Selection," *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, vol. 24, pp. 659-672, March 2006.
- [70] M. Abramowitz and I. A. Stegun, "Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables", Washington: U.S. Govt.

- [71] A. Papoulis and S. U. Pillai, "Probability, random variables, and stochastic processes", 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2002.
- [72] A. A. Nasir, Z. Xiangyun, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, 2013.
- [73] D. K. Nguyen, M. Matthaiou, T. Q. Duong, and H. Ochi, "RF energy harvesting two-way cognitive DF relaying with transceiver impairments," *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, no. Jun. , pp. 1970-1975. 2015.
- [74] K. Tutuncuoglu, B. Varan, and A. Yener, "Throughput Maximization for Two-Way Relay Channels With Energy Harvesting Nodes: The Impact of Relaying Strategies," *Communications, IEEE Transactions*, vol. 63, no. 6, pp. 2081-2093, 2015.
- [75] W. Li, M. L. Ku, Y. Chen, K. J. R. Liu, and S. Zhu, "Performance Analysis for Two-Way Network-Coded Dual-Relay Networks with Stochastic Energy Harvesting," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.
- [76] N. T. P. Van, S. F. Hasan, X. Gui, S. Mukhopadhyay, and H. Tran, "Three-Step Two-Way Decode and Forward Relay With Energy Harvesting," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 4, pp. 857-860, 2017.
- [77] I. Krikidis, Z. Gan, and B. Ottersten, "Harvest-use cooperative networks with half/full-duplex relaying," *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, IEEE, pp. 4256-4260. 2013.
- [78] T. T. Thanh and V. N. Quoc Bao, "Wirelessly Energy Harvesting DF Dual-hop Relaying Networks: Optimal Time Splitting Ratio and Performance Analysis," *Journal of Science and Technology: Issue on Information and Communications Technology*, no. 2, pp. 16-20,2017.
- [79] B. Vo Nguyen Quoc and K. Hyung Yun, "Error probability performance for multi-hop decode-and-forward relaying over Rayleigh fading channels," *Advanced Communication Technology*, 11th International Conference, vol. 03, pp. 1512-1516. 2009.
- [80] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, A. Jeffrey, and D. Zwillinger, Table of integrals, series and products, 7th ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2007.
- [81] P. Xing, J. Liu, C. Zhai, X. Wang, and X. Zhang, "Multipair two-way full-duplex relaying with massive array and power allocation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.
- [82] C. Li, Z. Chen, Y. Wang, Y. Yao, and B. Xia, "Outage analysis of the full-duplex decode-and-forward two-way", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 5, pp. 4073-4086, May 2017.
- [83] G. J. Gonzalez, F. H. Gregorio, J. E. Cousseau, T. Riihonen, and R. Wichman, "Full-duplex amplify-andforward relays with optimized transmission power under imperfect transceiver electronics", *EURASIP J. Wireless Communication Network*, 2017.
- [84] Y. Alsaba, C. Y. Leow, and S. K. A. Rahim, "Full-duplex cooperative non-orthogonal multiple access with beamforming and energy harvesting", *IEEE Access*, vol. 6, pp.19 726-19 738, 2018.

- [85] Q. N. Le, V. N. Q. Bao, and B. An, "Full-duplex distributed switch-and-stay energy harvesting selection relaying networks with imperfect csi: Design and outage analysis", *Journal of Communications and Networks*, vol. 20, no. 1, pp. 29–46, Feb 2018.
- [86] D. Zhai, H. Chen, Z. Lin, Y. Li, and B. Vucetic, "Accumulate then transmit: Multi-user scheduling in full-duplex wireless-powered iot systems", *IEEE Internet of Things Journal*, 2018.
- [87] A. Koc, I. Altunbas, and E. Basar, "Two-way full-duplex spatial modulation systems with wireless powered AF relaying", *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017.
- [88] E. Bjornson, M. Matthaiou, and M. Debbah, "A new look at dual-hop relaying: Performance limits with hardware impairments", *IEEE Trans Communication*, vol. 61, no. 11, pp. 4512–4525, Nov. 2013.
- [89] D. K. Nguyen, M. Matthaiou, T. Q. Duong, and H. Ochi, "RF energy harvesting two-way cognitive DF relaying with transceiver impairments" in *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, pp. 1970-1975, 2015.
- [90] G. Zheng, Z. K. M. Ho, E. A. Jorswieck, and B. E. Ottersten, "Information and Energy Cooperation in Cognitive Radio Networks", *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 62, pp. 2290-2303, 2014.
- [91] T. N. NGUYEN, T. T. DUY, L. Gia-Thien, P. T. TRAN, and M. VOZNAK, "Energy Harvesting-based Spectrum Access With Incremental Cooperation, Relay Selection and Hardware Noises," *RADIOENGINEERING*, vol. 25, p. 11, 2016.
- [92] Z. Wang, Z. Chen, B. Xia, L. Luo, and J. Zhou, "Cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer: Design, analysis, and optimization", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, pp. 2562-2576, 2016.
- [93] S. A. Mousavifar, Y. Liu, C. Leung, M. ElKashlan, and T. Q. Duong, "Wireless Energy Harvesting and Spectrum Sharing in Cognitive Radio", *Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, *IEEE*, pp. 1-5, 2014.
- [94] Liu, Yuanwei, et al. "Wireless Energy Harvesting in a Cognitive Relay Network", *IEEE Trans. Wireless Communications* , pp.2498-250, 2016.
- [95] Nguyen Toan Van, Nhu Tri Do, Vo Nguyen Quoc Bao, Beongku An, "Performance Analysis of Wireless Energy Harvesting Multihop Cluster-Based Networks over Nakgami-*m* Fading Channels", *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3068 - 3084, Dec. 2017.
- [96] J. Guo, S. Durrani, X. Zhou, and H. Yanikomeroğlu, "Outage probability of ad hoc networks with wireless information and power transfer," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, pp. 409-412, 2015.
- [97] ZHANG, Keyi, et al. "AP scheduling protocol for power beacon with directional antenna in Energy Harvesting Networks", *Applied System Innovation (ICASI)*, 2017 *International Conference on*. *IEEE*, pp. 906-909, 2017.
- [98] D. H. Chen and Y. C. He, "Full-duplex secure communications in cellular networks with downlink wireless power transfer," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 1, pp. 265–277, Jan 2018.
- [99] P. Deng, B. Wang, W. Wu, and T. Guo, "Transmitter design in misonoma system with wireless-power supply," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 844–847, 2018.

- [100] Q. N. Le, V. N. Q. Bao, and B. An, "Full-duplex distributed switch-and-stay energy harvesting selection relaying networks with imperfect CSI: Design and outage analysis," *Journal of Communications and Networks*, vol. 20, no. 1, pp. 29–46, 2018.
- [101] K. E. Kolodziej, B. T. Perry, and J. S. Herd, "In-band full-duplex technology: Techniques and systems survey," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019.
- [102] A. H. Gazestani, S. A. Ghorashi, B. Mousavinasab, and M. Shikh-Bahaei, "A survey on implementation and applications of full duplex wireless communications," *Physical Communication*, vol. 34, pp. 121–134, 2019.
- [103] S. Dey, E. Sharma, and R. Budhiraja, "Scaling analysis of hardware-impaired two-way full-duplex massive MIMO relay," *IEEE Communications Letters*, 2019.
- [104] X.-T. Doan, N.-P. Nguyen, C. Yin, D. B. da Costa, and T. Q. Duong, "Cognitive full-duplex relay networks under the peak interference power constraint of multiple primary users," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2017, no. 1, p. 8, 2017.
- [105] A. Koc, I. Altunbas, and E. Basar, "Two-Way Full-Duplex Spatial Modulation Systems With Wireless Powered AF Relaying," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 444–447, 2018.
- [106] D. Chen and Y. He, "Full-Duplex Secure Communications in Cellular Networks With Downlink Wireless Power Transfer," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 1, pp. 265–277, 2018.
- [107] Nguyen, Toan-Van, and Beongku An. "Cognitive Multihop Wireless Powered Relaying Networks Over Nakagami-m Fading Channels." *IEEE Access*, 154600–154616, 2019.
- [108] V. N. Q. Bảo, "Sách Mô phỏng hệ thống truyền thông". Nhà Xuất Bản Khoa Học và Kỹ Thuật, 2020.
- [109] Van Nguyen, T., Do, T. N., Bao, V. N. Q., da Costa, D. B., & An, B. "On the Performance of Multihop Cognitive Wireless Powered D2D Communications in WSNs", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(3), 2684–2699, 2020.