

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



NGUYỄN VĂN HIỀN

**PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG MẠNG CHUYÊN TIẾP ĐA CHẶNG
SỬ DỤNG NGUỒN NĂNG LƯỢNG SÓNG VÔ TUYẾN VÀ KỸ THUẬT
TRUYỀN THÔNG CỘNG TÁC TĂNG CƯỜNG TRÊN MỖI CHẶNG**

LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

TP. HỒ CHÍ MINH - 2021

HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



NGUYỄN VĂN HIỀN

**PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG MẠNG CHUYÊN TIẾP ĐA CHẶNG
SỬ DỤNG NGUỒN NĂNG LƯỢNG SÓNG VÔ TUYẾN VÀ KỸ THUẬT
TRUYỀN THÔNG CỘNG TÁC TĂNG CƯỜNG TRÊN MỖI CHẶNG**

CHUYÊN NGÀNH : KỸ THUẬT VIỄN THÔNG

MÃ SỐ: 8.52.02.08

LUẬN VĂN THẠC SĨ KỸ THUẬT

(Theo định hướng ứng dụng)

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC: TS. TRẦN TRUNG DUY

TP. HỒ CHÍ MINH – 2021

LỜI CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi.

Các số liệu, kết quả nêu trong luận văn là trung thực và chưa từng được ai công bố trong bất kỳ công trình nào khác.

Tp. HCM, ngày 10 tháng 12 năm 2021

Học viên thực hiện luận văn

NGUYỄN VĂN HIỀN

LỜI CẢM ƠN

Tôi xin chân thành gửi lời cảm ơn sâu sắc đến Ban lãnh đạo Học viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn thông, Ban chủ nhiệm Khoa viễn thông 2 đã tạo điều kiện cho tôi được tham gia khóa học này.

Tôi xin chân thành cảm ơn quý thầy thuộc các khoa Cơ Bản 2, Công Nghệ Thông Tin 2, Điện tử 2, Viễn thông 2 đã truyền dạy những kiến thức và truyền tải những kinh nghiệm quý báu cho tôi.

Tôi cũng xin chân thành cảm ơn quý thầy cô thuộc Phòng Đào tạo và Khoa học Công nghệ. Đặc biệt, tôi xin cảm ơn cô Nguyễn Thị Phương Thảo đã hết lòng hỗ trợ cho khóa học của chúng tôi được tiến hành suôn sẻ, trọn vẹn.

Tôi xin gửi lời cảm ơn sâu sắc đến TS. Trần Trung Duy, người thầy đã định hướng, hỗ trợ và chỉ bảo cho tôi hoàn thành luận văn này. Đồng thời, tôi cũng xin gửi lời cảm ơn đến Sở Khoa Học và Công nghệ TP. HCM đã hỗ trợ tôi hoàn thành Luận án này, thông qua việc tài trợ Đề tài “Thiết kế mạng băng rộng cho Thành phố thông minh” với mã số đề tài 58/2021/HĐ-QKH-CN.

Trong luận văn này chắc chắn sẽ không tránh khỏi những hạn chế và thiếu sót, tôi rất mong nhận được những ý kiến đóng góp của quý thầy cô và quý bạn đọc để đề tài này được hoàn thiện hơn.

Tp. HCM, ngày 10 tháng 12 năm 2021

Học viên thực hiện luận văn

NGUYỄN VĂN HIỀN

MỤC LỤC

LỜI CAM ĐOAN.....	i
LỜI CẢM ƠN	ii
MỤC LỤC.....	iii
DANH SÁCH HÌNH VẼ	iv
CHƯƠNG 1: LÝ THUYẾT TỔNG QUAN	1
1.1. Giới thiệu về mạng vô tuyến chuyển tiếp.....	1
1.1.1. Khái niệm về mạng chuyển tiếp.....	1
1.1.2. Kỹ thuật khuếch đại chuyển tiếp.....	2
1.1.3. Kỹ thuật giải mã chuyển tiếp.....	4
1.2. Giới thiệu về truyền thông cộng tác	5
1.3. Chuyển tiếp đa chặng	7
1.3.1. Giới thiệu về kỹ thuật chuyển tiếp đa chặng	7
1.3.2. Mạng chuyển tiếp đa chặng.....	8
1.4. Giới thiệu về kỹ thuật thu thập năng lượng sóng vô tuyến	8
1.5. Các nghiên cứu liên quan và lý do chọn đề tài.....	10
1.5.1. Lý do chọn đề tài	10
1.5.2. Các nghiên cứu liên quan	12
CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH HỆ THỐNG.....	14
2.1. Mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường (MH-DT).....	14
2.2. Mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác (MH-CC)	17
2.3. Mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường (MH-IR)	21
CHƯƠNG 3: PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG	26
3.1. Mô hình kênh truyền	26
3.2. Định nghĩa xác suất dừng.....	26
3.3. OP của mô hình MH-DT	27
3.4. OP của mô hình MH-IR	28
3.5. OP của mô hình MH-CC.....	31
CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ LÝ THUYẾT.....	35
KẾT LUẬN.....	42
Các kết quả đạt được.....	42
Hướng phát triển đề tài	43
Công bố khoa học	43
TÀI LIỆU THAM KHẢO	45
BẢN CAM ĐOAN.....	49

DANH SÁCH HÌNH VẼ

Hình 1. 1: Kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp AF.....	2
Hình 1. 2: Kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp DF.....	4
Hình 1. 3: Mô hình truyền thông công tác.....	5
Hình 1. 4: Mô hình truyền thông công tác tăng cường: đích giải mã thành công dữ liệu ở khe thời gian đầu tiên và phản hồi bằng thông điệp ACK.....	6
Hình 1. 5: Mô hình truyền thông công tác tăng cường: đích không giải mã thành công dữ liệu ở khe thời gian đầu tiên và phản hồi bằng thông điệp NACK để yêu cầu sự giúp đỡ từ nút chuyển tiếp.....	7
Hình 1. 6: Mạng chuyển tiếp đa chặng: sử dụng nhiều nút chuyển tiếp trung gian.	8
Hình 1. 7: Thu thập năng lượng sóng vô tuyến.	10
Hình 2. 1: Mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường sử dụng nguồn năng lượng sóng vô tuyến.	14
Hình 2. 2: Sự truyền dữ liệu ở khe thời gian thứ k trong mô hình MH-DT.....	15
Hình 2. 3: Hai pha trong khe thời gian thứ k trong mô hình MH-DT: (Pha 1) T_{k-1} thu thập năng lượng từ B; và (Pha 2) T_{k-1} gửi dữ liệu đến T_k	16
Hình 2. 4: Mô hình MH-CC.	17
Hình 2. 5: Sự truyền dữ liệu ở chặng thứ k trong mô hình MH-CC.....	18
Hình 2. 6: Ba pha trong khe thời gian thứ k trong mô hình MH-CC.....	18
Hình 2. 7: Mô hình MH-IR.....	22
Hình 2. 8: Sự truyền dữ liệu ở chặng thứ k trong mô hình MH-IR.	23
Hình 2. 9: Ba pha trong khe thời gian thứ k trong mô hình MH-IR.....	23
Hình 4. 1: Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) khi $K = 3$ và $\alpha = 0.2$	35
Hình 4. 2: Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) khi $K = 4$ và $\alpha = 0.1$	37
Hình 4. 3: Xác suất dừng vẽ theo K khi $\Delta = 25$ dB và $\alpha = 0.15$	37
Hình 4. 4: Xác suất dừng vẽ theo K khi $\Delta = 25$ dB và $\beta = 0.5$	38
Hình 4. 5: Xác suất dừng vẽ theo α khi $\Delta = 20$ dB, $K = 3$ và $\beta = (1 - \alpha) / 2$	39
Hình 4. 6: Xác suất dừng vẽ theo α khi $\Delta = 25$ dB và $K = 4$	40
Hình 4. 7: Xác suất dừng vẽ theo β khi $\Delta = 25$ dB, $K = 3$ và $\alpha = 0.1$	41

CHƯƠNG 1: LÝ THUYẾT TỔNG QUAN

1.1. Giới thiệu về mạng vô tuyến chuyển tiếp

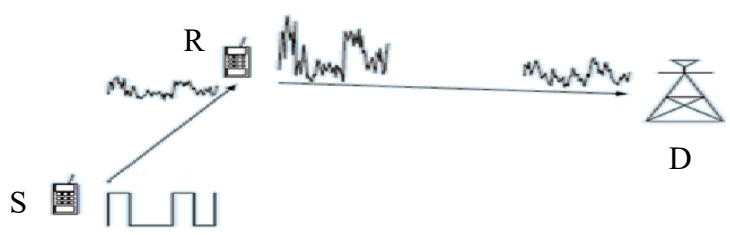
1.1.1. Khái niệm về mạng chuyển tiếp

Như chúng ta đã biết, truyền dẫn trong thông tin vô tuyến thường bị ảnh hưởng bởi nhiều lý do khác nhau như thời tiết hay địa hình, ... làm suy giảm chất lượng tín hiệu. Do tín hiệu được truyền từ máy phát đến máy thu theo nhiều đường nên gây ra hiện tượng Fading dẫn đến chất lượng bị giảm đi là không thể tránh khỏi. Vì vậy kỹ thuật chuyển tiếp đã được ra đời với mục đích giải quyết các vấn đề đó bằng cách dùng các nút trung gian ở giữa để chuyển tiếp tín hiệu.

Mạng chuyển tiếp [1] là sự kết hợp của các liên kết gắn với nhau để có thể phủ sóng được một khu vực rộng lớn bằng cách sử dụng thiết bị chuyển tiếp trung gian (Relay) giữa trạm gốc (Base Station: BS) và máy thu (Mobile Station: MS).

Một mạng chuyển tiếp cơ bản thường bao gồm ba thành phần chính, đó là nút nguồn (Source), nút chuyển tiếp (Relay) và nút đích (Destination). Mỗi nút sẽ có một vai trò khác nhau. Nút nguồn là nút gửi dữ liệu đến nút đích, và muốn có thể đến được nút đích thì nút nguồn phải gửi dữ liệu thông qua các nút chuyển tiếp. Các nút chuyển tiếp lúc này sẽ có nhiệm vụ chuyển tiếp dữ liệu từ nút nguồn gửi đến. Nút chuyển tiếp có thể sử dụng kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp (Amplify-and-Forward - AF) [2] hoặc kỹ thuật giải mã chuyển tiếp (Decode-and-Forward - DF) [2]. Trong kỹ thuật chuyển tiếp DF, nút chuyển tiếp sẽ giải mã dữ liệu nhận được từ nút nguồn, sau đó tiến hành mã hóa lại và gửi đến nút đích. Ngược lại, nút chuyển tiếp trong phương pháp AF chỉ đơn giản khuếch đại tín hiệu nhận được từ nguồn và chuyển tiếp tín hiệu đi. Mặc dù phương pháp DF phức tạp hơn phương pháp AF, tuy nhiên, phương pháp DF loại bỏ được nhiễu tại nút chuyển tiếp, và do đó tránh được sự tích lũy nhiễu ở nút đích. Cuối cùng, nút đích sẽ giải mã tín hiệu nhận được từ nút chuyển tiếp (trong một số trường hợp, nút đích còn có thể nhận được tín hiệu từ nút nguồn và cũng có thể sử dụng tín hiệu từ nguồn để giải mã dữ liệu).

1.1.2. Kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp



Hình 1. 1: Kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp AF.

Khuếch đại và chuyển tiếp hay còn gọi chuyển tiếp tương tự (analog relaying) [2]-[3] là một phương thức chuyển tiếp tín hiệu đơn giản. Như tên gọi, nút chuyển tiếp trong phương thức khuếch đại và chuyển tiếp chỉ đơn giản khuếch đại tín hiệu mà nhận được trước khi chuyển tiếp về nút tiếp theo.

Mô hình hệ thống khuếch đại và chuyển tiếp bao gồm một nút nguồn (S), một nút chuyển tiếp (R) và một nút đích (D) như trình bày ở Hình 1.1. Quá trình truyền tin từ nút S về nút D sẽ diễn ra trong hai khe thời gian trực giao, khe thời gian đầu sẽ dành cho chặng 1 từ S đến R và khe thứ 2 sẽ dành cho chặng 2 từ R đến D.

Gọi h_{SR} và h_{RD} lần lượt là hệ số kênh truyền fading của chặng 1 và chặng 2, tín hiệu nhận tại nút chuyển tiếp như sau:

$$y_R = \sqrt{P_S} h_{SR} x_S + n_R, \quad (1.1)$$

trong đó x_S là tín hiệu điều chế tại nút nguồn S, P_S là công suất phát của nguồn S; và n_R là nhiễu Gauss trắng cộng tính (Additive White Gaussian Noise - AWGN) tại nút chuyển tiếp R. n_R là biến ngẫu nhiên có phân phối Gauss với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai σ_0^2 .

Tiếp đến, nút chuyển tiếp R sẽ thực hiện khuếch đại tín hiệu nhận được, và chuyển tiếp tín hiệu này về nút đích D. Tín hiệu nhận được tại nút đích D được viết như sau:

$$y_D = Gy_R h_2 + n_D, \quad (1.2)$$

trong đó, G là hệ số khuếch đại, và n_D là AWGN tại nút đích D có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai σ_0^2 .

Gọi P_R là công suất phát của nút chuyển tiếp R , và để đảm bảo nút chuyển tiếp phát với mức công suất này, ta có:

$$\begin{aligned} P_R &= E\{|Gy_R|^2\} = G^2 E\{|y_R|^2\} \\ &= G^2 (P_S |h_{SR}|^2 + \sigma_0^2). \end{aligned} \quad (1.3)$$

Vì vậy, hệ số khuếch đại G được thiết lập như sau:

$$G = \sqrt{\frac{P_R}{P_S |h_{SR}|^2 + \sigma_0^2}}. \quad (1.4)$$

Sử dụng công thức (1.4), tỷ số SNR (Signal-to-Noise Ratio) toàn chặng ($S \rightarrow R \rightarrow D$) được tính như sau (xem trong các tài liệu [2]-[3])

$$\gamma_{AF}^{e2e} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + 1}. \quad (1.5)$$

Trong công thức (1.5), γ_1 và γ_2 lần lượt là SNR của chặng thứ nhất (giữa S và R) và chặng thứ hai (giữa R và D), cụ thể:

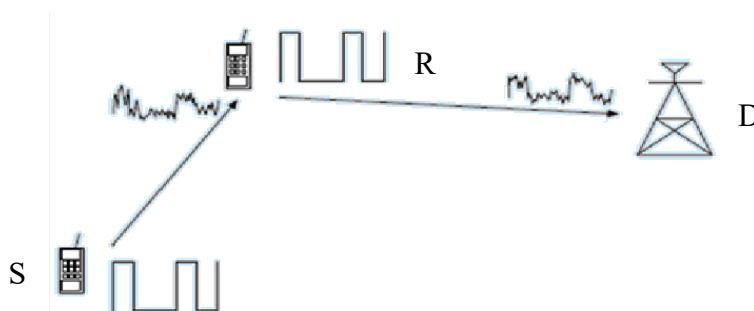
$$\gamma_1 = \frac{P_S |h_{SR}|^2}{\sigma_0^2}, \gamma_2 = \frac{P_R |h_{RD}|^2}{\sigma_0^2}. \quad (1.6)$$

Ưu điểm của kỹ thuật AF là đơn giản, dễ triển khai, nút chuyển tiếp xử lý nhanh. Nhược điểm của kỹ thuật AF là phần nhiễu cũng sẽ được khuếch đại tại nút chuyển tiếp dẫn đến là sẽ phức tạp trong việc giải điều chế tại nút đích. Nếu thực hiện việc chuyển tiếp qua nhiều chặng mức thì nhiễu sẽ tích lũy tại nút đích, làm giảm SNR nhận được tại nút đích.

Do đó, luận văn nghiên cứu áp dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp (DF) cho các nút chuyển tiếp để tránh sự tích lũy nhiễu trong quá trình chuyển tiếp dữ liệu.

1.1.3. Kỹ thuật giải mã chuyển tiếp

Kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp DF còn gọi là chuyển tiếp số (Digital Relaying) [2], [4]. Tương tự như Hình 1.1, ta xem xét hệ thống gồm hai chặng như trong Hình 1.2. Thuật toán giải mã và chuyển tiếp được mô tả ngắn gọn như sau: trong khoảng thời gian thứ nhất, nút nguồn phát tín hiệu của nó đến nút đích và nút chuyển tiếp. Trong khoảng thời gian thứ hai, nút chuyển tiếp thực hiện giải điều chế và giải mã tín hiệu nhận được từ nút nguồn, sau đó mã hóa lại và phát lại tín hiệu tới nút đích.



Hình 1. 2: Kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp DF.

Về mặt kỹ thuật, kiểu AF đơn giản hơn nhưng đòi hỏi nút chuyển tiếp có đủ bộ nhớ để lưu trữ các mẫu tín hiệu thu trước khi thực hiện khuếch đại và chuyển tiếp. Trong khi đó, kiểu DF lại có ưu điểm là thích hợp cho các hệ thống số có sử dụng mã hóa. Tuy nhiên, tại vùng tỷ số tín hiệu trên nhiễu cao tại máy thu đầu cuối thì hiệu năng của hệ thống dùng hai kiểu xử lý tín hiệu này là hoàn toàn như nhau.

Với kỹ thuật DF, hiệu năng của toàn hệ thống sẽ ảnh hưởng bởi chặng yếu nhất trong mạng. Do đó, tỷ số SNR toàn chặng của kỹ thuật này được tính như sau: (xem [2], [4])

$$\gamma_{DF}^{e2c} = \min(\gamma_1, \gamma_2), \quad (1.7)$$

trong đó, γ_1 và γ_2 được đưa ra trong công thức (1.6).

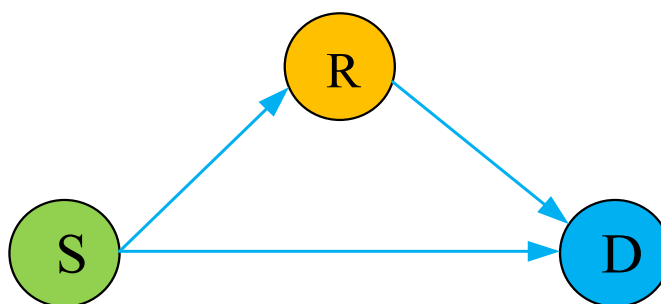
Ưu điểm của kỹ thuật DF là dễ dàng tích hợp vào hệ thống số, nhiễu được loại bỏ tại nút chuyển tiếp. Từ các công thức (1.5) và (1.7), ta có thể chứng minh được rằng tỷ số SNR toàn chặng của mô hình chuyển tiếp DF luôn tốt hơn mô hình chuyển tiếp AF. Thật vậy,

$$\gamma_{AF}^{e2e} = \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2 + 1} < \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} < \frac{\gamma_1 \gamma_2}{\max(\gamma_1, \gamma_2)} = \min(\gamma_1, \gamma_2) = \gamma_{DF}^{e2e}. \quad (1.8)$$

Ở chiều ngược lại, nhược điểm của kỹ thuật DF là độ trễ lớn do kỹ thuật này sẽ phức tạp hơn so với kỹ thuật AF vì nút chuyển tiếp phải thực hiện các bước xử lý tín hiệu phức tạp hơn. Quá trình giải điều chế có thể bị sai và nút chuyển tiếp có thể chuyển tiếp tín hiệu sai đến nút đích.

1.2. Giới thiệu về truyền thông cộng tác

Mô hình truyền thông cộng tác (cooperative communication) thông thường cũng có ba nút: một nút nguồn, một nút chuyển tiếp và một nút đích. Điểm khác biệt chính giữa mô hình truyền thông cộng tác và mô hình chuyển tiếp thông thường ở chỗ: mô hình truyền thông cộng tác khai thác đường liên kết trực tiếp giữa nguồn và đích [5].

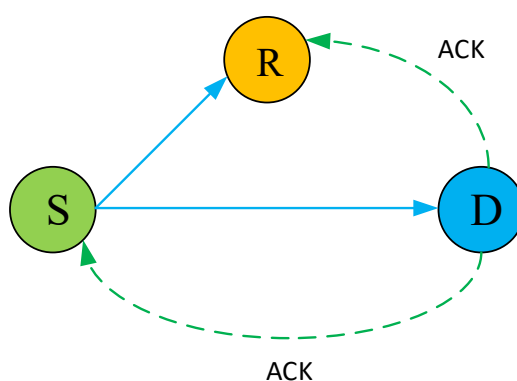


Hình 1. 3: Mô hình truyền thông cộng tác.

Hoạt động của mô hình truyền thông cộng tác cũng bao gồm hai pha. Trong pha đầu tiên, nguồn gửi dữ liệu đến nút chuyển tiếp và đích D. Sau đó, nút chuyển tiếp sẽ xử lý dữ liệu nhận được, và chuyển tiếp dữ liệu này đến đích trong pha thứ hai theo phương pháp DF hoặc AF. Sau hai khe thời gian, nút đích có thể nhận được hai phiên bản khác nhau của tín hiệu nguồn. Để nâng cao khả năng giải mã dữ liệu, nút

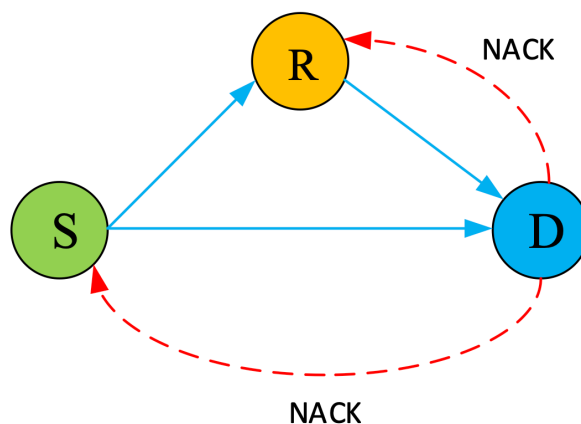
đích D có thể sử dụng các kỹ thuật kết hợp như kết hợp chọn lựa SC (Selection Combining) [6], kết hợp tỷ lệ tối đa MRC (Maximal Ratio Combining) [6] hay kết hợp cân bằng độ lợi EGC (Equal Gain Combining) [7].

Tuy nhiên, ta có thể thấy rằng truyền thông cộng tác thông thường không đạt được hiệu quả phổ bởi hệ thống phải mất hai khe thời gian để truyền dẫn chỉ một gói dữ liệu đến đích. Do đó, để nâng cao hiệu quả phổ cho việc triển khai mô hình truyền thông cộng tác, giao thức truyền thông cộng tác tăng cường (incremental relaying protocol) đã được đề xuất. Quá trình hoạt động của giao thức này diễn ra như sau: đầu tiên, nguồn S quảng bá dữ liệu đến đích và nút chuyển tiếp. Sau khi nhận được dữ liệu từ nguồn, cả đích và nút chuyển tiếp tiến hành giải mã dữ liệu. Nếu đích có thể giải mã thành công dữ liệu, đích sẽ gửi một thông điệp ACK để thông báo, và trong trường hợp này, nút chuyển tiếp sẽ không cần gửi dữ liệu đến đích nữa (xem Hình vẽ 1.4). Do đó, truyền thông cộng tác tăng cường chỉ cần sử dụng một khe thời gian truyền dữ liệu khi kênh truyền giữa nguồn S và đích D tốt. Hơn nữa, kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường cũng không yêu cầu sử dụng kỹ thuật MRC tại nút đích do kênh truyền giữa nguồn và đích không tốt khi nút chuyển tiếp R được yêu cầu hợp tác.



Hình 1. 4: Mô hình truyền thông cộng tác tăng cường: đích giải mã thành công dữ liệu ở khe thời gian đầu tiên và phản hồi bằng thông điệp ACK.

Trong trường hợp nút đích không thể giải mã thành công dữ liệu nguồn, nút đích sẽ gửi một thông điệp NACK để thông báo tình trạng, và trong trường hợp này, nút chuyển tiếp R sẽ được sử dụng để gửi dữ liệu đến đích D (xem Hình vẽ 1.5).



Hình 1. 5: Mô hình truyền thông cộng tác tăng cường: đích không giải mã thành công dữ liệu ở khe thời gian đầu tiên và phản hồi bằng thông điệp NACK để yêu cầu sự giúp đỡ từ nút chuyển tiếp.

Tóm lại, trong truyền thông cộng tác tăng cường, nếu kênh truyền giữa nguồn và đích đủ tốt thì hệ thống sẽ hoạt động như mô hình truyền trực tiếp và không cần sự tham gia của nút chuyển tiếp nữa. Ngược lại, khi kênh liên kết trực tiếp không tốt, nút chuyển tiếp sẽ được sử dụng để gửi dữ liệu nguồn đến đích. Về mặt hiệu quả phổ, rõ ràng rằng mô hình truyền thông cộng tác tăng cường nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần khi so sánh với truyền thông cộng tác tăng cường.

1.3. Chuyển tiếp đa chặng

1.3.1. Giới thiệu về kỹ thuật chuyển tiếp đa chặng

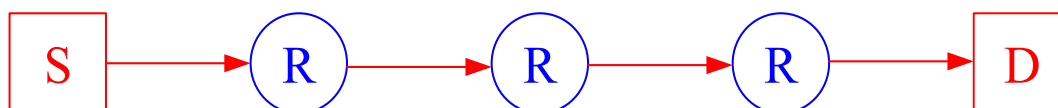
Dựa vào số chặng (Hop) giữa nút nguồn và nút đích ta có thể phân loại kỹ thuật chuyển tiếp: chuyển tiếp hai chặng (Two-hop relaying hay dual-hop relaying) [2]-[5], và chuyển tiếp đa chặng (Multi-hop relaying) [8]-[10]. Ngoài ra, ta có thể phân loại mạng chuyển tiếp thành: chuyển tiếp đơn hướng (one – way relay) và chuyển tiếp song hướng (two – way relay). Cuối cùng, dựa vào kỹ thuật xử lý ở nút chuyển tiếp mà ta phân loại mạng giải mã và chuyển tiếp (DF: Decode and Forward) hay khuếch đại và chuyển tiếp (AF: Amplify and Forward).

Trong kỹ thuật AF đã được nhắc đến trong mục 1.1.2, nút chuyển tiếp nhận tín hiệu từ nguồn sẽ khuếch đại tín hiệu nhận được và gửi đến nút kế tiếp. Trong kỹ thuật AF này, nút chuyển tiếp sẽ không giải mã tín hiệu nhận được và như vậy, khi khuếch đại tín hiệu nhận được sẽ khuếch đại luôn nhiễu chứa trong tín hiệu [2].

Trong kỹ thuật DF [2] đã được nhắc đến trong mục 1.1.3, nút chuyển tiếp sau khi nhận tín hiệu nguồn sẽ giải mã đến tín hiệu gốc, rồi mã hoá lại trước khi chuyển đến nút kế tiếp.

1.3.2. Mạng chuyển tiếp đa chặng

Mở rộng chuyển tiếp hai chặng với nhiều nút chuyển tiếp, ta sẽ có mô hình chuyển tiếp đa chặng như trong Hình 1.6. Tương tự như chuyển tiếp hai chặng, các nút chuyển tiếp có thể sử dụng kỹ thuật AF và DF để chuyển tiếp dữ liệu đến chặng kế tiếp hoặc chuyển tiếp đến đích. Tuy nhiên, sự chuyển tiếp đa chặng sẽ gia tăng thời gian trễ và có thể nâng cao độ phức tạp khi xử lý dữ liệu tại các nút chuyển tiếp trung gian. Mặt khác, chuyển tiếp đa chặng sẽ thích hợp cho các nút tự quản bởi công suất phát hạn chế của thiết bị, khoảng cách xa giữa nguồn và đích.



Hình 1. 6: Mạng chuyển tiếp đa chặng: sử dụng nhiều nút chuyển tiếp trung gian.

1.4. Giới thiệu về kỹ thuật thu thập năng lượng sóng vô tuyến

1.4.1. Thu thập năng lượng là gì?

Ngày nay do sự gia tăng nhanh chóng của các thiết bị vô tuyến, xuất phát từ nhu cầu ngày càng tăng của người dùng, vấn đề năng lượng sẽ trở nên cấp thiết khi xét đến các thiết bị nhỏ như điện thoại di động, các thiết bị cảm biến,...Bởi vì sự hạn chế về nguồn năng lượng, cũng như việc hoạt động thường xuyên làm năng lượng của các thiết bị này suy giảm một cách nhanh chóng, do đó rút ngắn thời gian sống của các mạng hoạt động dựa trên các thiết bị này. Khi số lượng các thiết bị rất lớn, và

được triển khai ở những khu vực có diện tích rộng, việc nạp năng lượng cho các thiết bị là một bài toán cần được giải quyết. Nếu sử dụng nguồn điện lưới đã được chỉnh lưu và hạ áp thì nút cảm biến sẽ được cấp nguồn ổn định, nhưng lại mất đi tính “không dây”. Hơn nữa, khi triển khai các thiết bị ở khu vực hẻo lánh hoặc có địa hình khắc nghiệt, việc lắp đặt một cơ sở hạ tầng để cấp nguồn cho các thiết bị sẽ không khả thi. Một giải pháp khác được xem xét đó là các thiết bị có thể được cấp năng lượng bằng pin, tuy nhiên việc thay pin định kỳ cho một số lượng lớn các thiết bị cũng là một bài toán nan giải. Đã có rất nhiều nghiên cứu cả về phần cứng lẫn phần mềm nhằm tăng hiệu quả sử dụng năng lượng của các nút không dây nhưng dù có giảm công suất sử dụng đi bao nhiêu, tăng thời gian sử dụng pin lên bao lâu đi nữa thì đến một lúc nào đó năng lượng dự trữ của pin vẫn cạn kiệt và nút cảm biến sẽ ngừng hoạt động.

Để giải quyết bài toán năng lượng, ngoài các phương pháp hiệu quả năng lượng như các thiết kế hiệu quả năng lượng ở lớp MAC, thiết kế các chế độ hoạt động hợp lý (như active, sleep, stand by),... một giải pháp hiệu quả khác để duy trì nguồn năng lượng cho các thiết bị đó là thu thập năng lượng từ bên ngoài (Energy Harvesting). Việc thu thập năng lượng có thể đến từ năng lượng mặt trời, năng lượng gió, nhiệt điện, tiếng ồn âm thanh... Tuy nhiên, cũng cần lưu ý rằng, cần có sự hợp tác giữa các thiết kế hiệu quả năng lượng và các kỹ thuật thu thập năng lượng. Nói cách khác, việc tối ưu năng lượng phải được thực hiện ở cả cấp độ phần cứng và phần mềm, kết hợp nhiều phương pháp và giải pháp khác nhau. Hệ thống thu thập năng lượng cho phép các thiết bị thu thập năng lượng từ mặt trời, độ rung, gió, hiệu ứng nhiệt điện và môi trường vô tuyến điện và chuyển chúng thành năng lượng điện. Các anten trong thiết bị cũng có thể thu thập năng lượng từ năng lượng tần số vô tuyến, năng lượng này sẽ chuyển thành năng lượng một chiều cung cấp cho thiết bị.

1.4.2. Thu thập năng lượng sóng vô tuyến (Radio Frequency Energy Harvesting)

Khác với nguồn năng lượng từ mặt trời, gió phụ thuộc rất nhiều vào môi trường, thu thập năng lượng tần số vô tuyến (RF) có thể đạt được sự ổn định cao hơn

(không phụ thuộc nhiều vào môi trường xung quanh). Thật vậy, thu thập năng lượng sóng vô tuyến [11]-[14] chỉ yêu cầu một hoặc nhiều nguồn phát sóng vô tuyến ổn định. Hơn nữa, việc tích hợp giữa truyền thông tin và thu thập năng lượng có thể được thực hiện đồng thời qua việc phát sóng vô tuyến. Đây chính là ưu điểm của thu thập năng lượng sóng vô tuyến cho các thiết bị truyền thông vô tuyến.



Hình 1. 7: Thu thập năng lượng sóng vô tuyến.

Ta xét mô hình thu thập năng lượng sóng vô tuyến như sau: một thiết bị vô tuyến B thu thập năng lượng từ một thiết bị vô tuyến A. Trong thực tế, A có thể là một trạm gốc có nguồn năng lượng ổn định, trong khi A là một thiết bị vô tuyến có nguồn năng lượng hữu hạn như điện thoại di động, thiết bị cảm biến, v.v. Nguồn A sẽ phát tín hiệu vô tuyến để B có thể thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến nhận được từ A. Giả sử thời gian thu thập năng lượng là T , thì năng lượng mà B có thể thu thập được sẽ là (xem [11]-[14])

$$Q_B = \eta T P_A |h_{AB}|^2, \quad (1.9)$$

trong đó, $\eta (0 < \eta < 1)$ là hiệu suất chuyển đổi năng lượng, P_A là công suất phát của nút A, h_{AB} là hệ số kênh fading giữa hai nút A và B, và $|h_{AB}|^2$ là độ lợi kênh.

1.5. Các nghiên cứu liên quan và lý do chọn đề tài

1.5.1. Lý do chọn đề tài

Như đã trình bày ở phần trên, chuyên tiếp là kỹ thuật hiệu quả được sử dụng trong các mạng truyền thông vô tuyến nhằm mở rộng vùng phủ sóng cho mạng, nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu (khi so sánh với việc truyền trực tiếp ở khoảng

cách xa), giảm công suất phát của các nút phát (do truyền dữ liệu ở khoảng cách ngắn), chống lại fading kênh truyền và suy hao đường truyền, ... Đặc biệt trong các hệ thống mạng không có cơ sở hạ tầng phục vụ (non-infrastructure networks) như mạng cảm biến không dây (Wireless sensor networks) [15], mạng adhoc di động [8] (Mobile adhoc networks),... các nút mạng bị giới hạn về năng lượng, kích thước, khả năng lưu trữ và tính toán. Do đó, chuyển tiếp đa chặng như là phương tiện không thể thiếu trong các loại hình mạng này. Thông thường, một tuyến giữa nguồn và đích sẽ được thiết lập, và dữ liệu nguồn sẽ được gửi đến đích theo từng chặng trên tuyến đã chọn. Tuy nhiên, dưới sự ảnh hưởng của nhiễu, đặc biệt là fading kênh truyền, hiệu năng của mạng chuyển tiếp đa chặng sẽ bị suy giảm nghiêm trọng. Để nâng cao hiệu năng cho mạng chuyển tiếp đa chặng, các kỹ thuật chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác đã được đề xuất. Trong các công trình [16]-[17], các tác giả đề xuất các mô hình truyền hợp tác hiệu quả, trong đó các nút ở phía sau cố gắng nhận dữ liệu từ các nút phát ở phía trước để nâng cao khả năng giải mã dữ liệu dưới sự tác động của fading kênh truyền. Tuy nhiên, các kỹ thuật đề xuất trong [16]-[17] có độ phức tạp rất lớn do yêu cầu sự đồng bộ cao giữa tất cả các nút trên tuyến. Các tác giả của các công bố [18]-[19] đưa ra mô hình chuyển tiếp cộng tác đơn giản hơn, trong đó truyền thông cộng tác được sử dụng tại mỗi chặng để nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu tại mỗi chặng.

Năng lượng cũng là một vấn đề then chốt cho các mạng không có cơ sở hạ tầng phục vụ khi số lượng nút trong mạng ngày càng lớn trong khi thiết bị lại bị giới hạn về năng lượng. Hơn thế nữa, khi số lượng nút mạng quá lớn, việc cung cấp năng lượng theo các phương pháp truyền thống như thay pin, dùng nguồn điện cố định để sạc pin, v.v. là không hiệu quả. Gần đây, thu thập năng lượng sóng vô tuyến (Radio Frequency Energy Harvesting (RF-EH)) [20]-[21] đã nhận được sự quan tâm đặc biệt của các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước. Khác với các phương pháp thu thập năng lượng khác, kỹ thuật RF-EH có thể vượt qua được một số điều kiện khách quan của môi trường như ngày và đêm, điều kiện thời tiết. Hơn nữa, kỹ thuật RF-EH chỉ cần yêu cầu một hoặc nhiều nguồn phát sóng vô tuyến ổn định. Việc tích hợp giữa

truyền thông tin và thu thập năng lượng có thể được thực hiện đồng thời qua việc phát sóng vô tuyến cũng là một ưu điểm của kỹ thuật RF-EH.

Trong luận văn này, học viên nghiên cứu mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng kỹ thuật RF-EH từ một trạm phát sóng vô tuyến trong mạng. Hơn nữa, mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường (incremental cooperative communication) tại mỗi chặng cũng được áp dụng để nâng cao hiệu quả truyền dữ liệu từ nguồn đến đích.

1.5.2. Các nghiên cứu liên quan

Theo sự hiểu biết tốt nhất của Học viên, chưa có công bố nào nghiên cứu về mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng trong hệ thống thu thập năng lượng sóng vô tuyến.

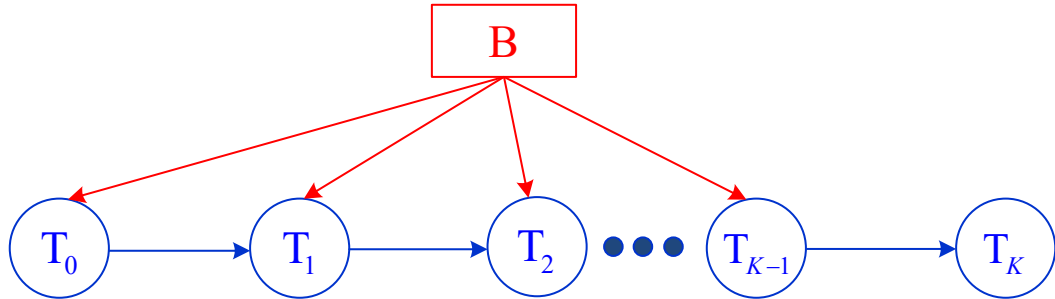
Trong bài báo [8], [19] và luận văn [22], các tác giả sử dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng để nâng cao hiệu năng cho mạng truyền thông vô tuyến thông thường. Tuy nhiên, các tài liệu này không nghiên cứu kỹ thuật thu thập năng lượng sóng vô tuyến, cụ thể các thiết bị phát có thể sử dụng mức công suất tối đa để truyền dữ liệu. Khác với các công trình [8], [19] và luận văn [22], đề tài nghiên cứu kỹ thuật thu thập năng lượng mà trong đó các nút phát phải thu thập năng lượng một nguồn vô tuyến cố định, và sử dụng năng lượng này để truyền dữ liệu.

Các công trình [21] và [23] nghiên cứu mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng RF-EH từ trạm phát sóng (Power Beacon). Tuy nhiên, các tác giả của các công trình này chưa đề xuất mô hình chuyển tiếp cộng tác để nâng cao hiệu năng cho hệ thống. Cụ thể hơn, các mô hình trong [21] và [23] xem xét sự truyền dữ liệu trực tiếp trên mỗi chặng. Tuy nhiên, khi sự truyền dữ liệu trên một chặng nào đó không thành công thì dữ liệu của nguồn không thể đến đích được. Do đó, đề tài này đề xuất áp dụng kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng để nâng cao độ tin cậy của việc chuyển tiếp dữ liệu trên mỗi chặng, và vì thế cũng nâng cao xác suất dữ liệu đạt đến đích thành công.

Công trình [17] và luận văn [24] đề xuất mô hình chuyển tiếp đa chặng cộng tác cho các mạng chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật RF-EH từ trạm phát sóng. Khác với các đề tài này, các công trình [17] và [24] nghiên cứu kỹ thuật chuyển tiếp cộng tác giữa các nút trên một tuyến giữa nguồn và đích. Tuy nhiên, mô hình chuyển tiếp cộng tác này rất phức tạp do các nút trên tuyến phải đồng bộ chặt chẽ với nhau. Do đó, mô hình được đề xuất trong luận văn sẽ dễ dàng thực thi trong thực tế bởi chỉ yêu cầu sự đồng bộ trong việc phối hợp truyền dữ liệu trên mỗi chặng.

CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH HỆ THỐNG

2.1. Mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường (MH-DT)

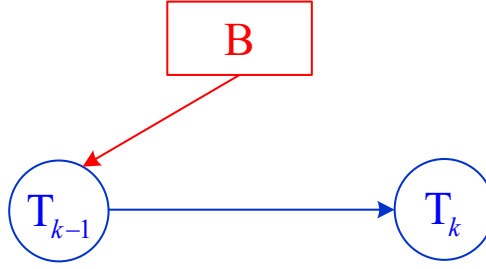


Hình 2. 1: Mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường sử dụng nguồn năng lượng sóng vô tuyến.

Hình 2.1 mô tả mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường (MH-DT: Multi-Hop scheme using Direct Transmission), trong đó nguồn T_0 gửi dữ liệu của mình đến đích T_K thông qua sự giúp đỡ của các nút chuyển tiếp trung gian, ký hiệu: T_1 , T_2 , ..., T_{K-1} . Sự thiết lập tuyến giữa nguồn và đích được thực hiện tại lớp mạng theo các giao thức phổ biến chẳng hạn như AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) [25], DSR (Dynamic Source Routing) [26]. Giả sử rằng $K \geq 1$, bởi vì nút nguồn T_0 không thể trực tiếp gửi tiếp gửi dữ liệu đến đích T_K do khoảng cách xa và do bởi giới hạn công suất phát. Tất cả các nút trong mạng đều chỉ có một ăng ten và hoạt động ở chế độ bán song công (half-duplex). Do đó, việc truyền dữ liệu giữa nguồn và đích được thực hiện thông qua K khe thời gian trực giao, theo kỹ thuật đa truy nhập phân chia theo thời gian (TDMA).

Bởi vì các nút trong mạng bị giới hạn về mặt năng lượng, hệ thống triển khai một trạm phát vô tuyến B trong mạng để cung cấp năng lượng vô tuyến cho các nút mạng. Để tránh nhiễu đồng kênh giữa việc truyền dữ liệu và truyền năng lượng, tần số sử dụng cho việc thu thập năng lượng sóng vô tuyến sẽ khác với các tần số truyền dữ liệu được sử dụng trong hệ thống.

Giả sử tổng thời gian cho việc truyền một dữ liệu giữa nguồn và đích là L . Vì vậy, thời gian được phân bổ cho mỗi khe thời gian là $\tau = L / K$. Xét việc truyền dữ liệu ở khe thời gian thứ k ($k = 1, 2, \dots, K$) như được mô tả trong Hình 2.2, trong đó nút T_{k-1} thu thập năng lượng vô tuyến từ nút B, và sử dụng nguồn năng lượng này để phát dữ liệu của nguồn đến nút T_k .

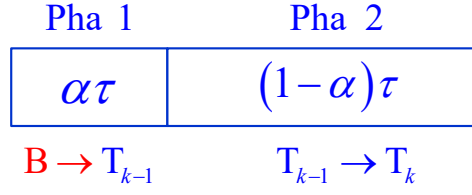


Hình 2. 2: Sự truyền dữ liệu ở khe thời gian thứ k trong mô hình MH-DT.

Do tổng thời gian được phân bổ trong khe thời gian thứ k là τ , một phần thời gian $\alpha\tau$ được dùng để T_{k-1} thu thập năng lượng từ trạm B, và khoảng thời gian còn lại $(1 - \alpha)\tau$ được dùng để nút T_{k-1} gửi dữ liệu đến nút T_k (xem Hình 2.3 bên dưới). Tương tự như công thức (1.9), năng lượng mà nút T_{k-1} thu thập được trong khoảng thời gian $\alpha\tau$ được tính như sau:

$$Q_{T_{k-1}} = \eta\alpha\tau P_B |h_{BT_{k-1}}|^2, \quad (2.1)$$

trong đó, η là hiệu suất chuyển đổi năng lượng, α ($0 < \alpha < 1$) là hệ số phân bổ thời gian (là một thông số hệ thống được thiết kế trước), P_B là công suất phát của nguồn năng lượng B, $h_{BT_{k-1}}$ là hệ số kênh fading giữa hai nút B và T_{k-1} , và $|h_{BT_{k-1}}|^2$ là độ lợi kênh tương ứng.



Hình 2. 3: Hai pha trong khe thời gian thứ k trong mô hình MH-DT: (Pha 1) T_{k-1} thu thập năng lượng từ B ; và (Pha 2) T_{k-1} gửi dữ liệu đến T_k .

Giả sử nút T_{k-1} sử dụng toàn bộ năng lượng thu thập được để truyền dữ liệu đến T_k công suất phát trung bình của nút T_{k-1} được tính như sau:

$$\begin{aligned} P_{T_{k-1}} &= \frac{Q_{T_{k-1}}}{(1-\alpha)\tau} = \frac{\eta\alpha\tau P_B |h_{BT_{k-1}}|^2}{(1-\alpha)\tau} \\ &= \mu P_B \varphi_{BT_{k-1}}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

với $\varphi_{BT_{k-1}} = |h_{BT_{k-1}}|^2$ và

$$\mu = \frac{\eta\alpha}{1-\alpha}. \quad (2.3)$$

Xét pha 2 (pha truyền dữ liệu), tín hiệu nhận được tại nút T_k là:

$$y_{T_k} = \sqrt{Q_{T_{k-1}}} h_{T_{k-1}T_k} x_{T_0} + n_{T_k}, \quad (2.4)$$

với x_{T_0} là dữ liệu của nút nguồn, $h_{T_{k-1}T_k}$ là hệ số kênh fading giữa hai nút T_{k-1} và T_k , và n_{T_k} là nhiễu AWGN với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai σ_0^2 (giả sử tất cả các nhiễu AWGN trong luận văn đều có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai σ_0^2).

Từ công thức (2.4), tỷ số SNR đạt được là:

$$\gamma_{T_{k-1}T_k} = \frac{Q_{T_{k-1}} |h_{T_{k-1}T_k}|^2}{\sigma_0^2} = \frac{Q_{T_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}}{\sigma_0^2}, \quad (2.5)$$

với $\varphi_{T_{k-1}T_k} = |h_{T_{k-1}T_k}|^2$ là độ lợi kênh.

Thay công thức (2.2) vào công thức (2.5), ta đạt công thức (2.6) như sau:

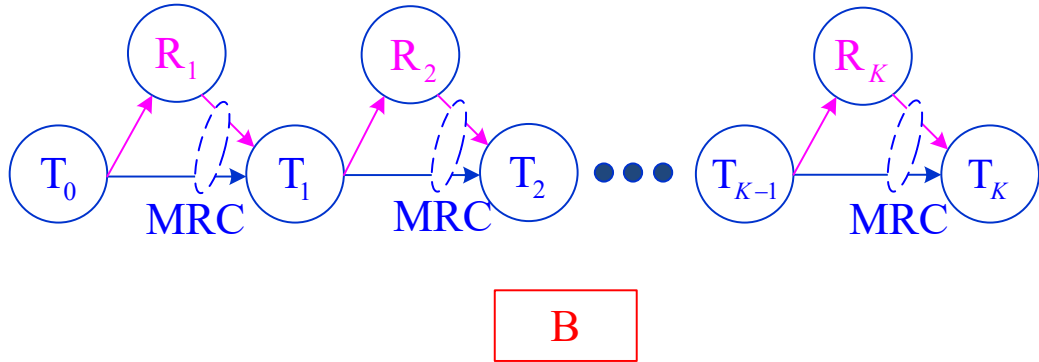
$$\gamma_{T_{k-1}T_k} = \frac{\mu P_B \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}}{\sigma_0^2} = \mu_1 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}, \quad (2.6)$$

với $\Delta = P_B / \sigma_0^2$. là tỷ số giữa công suất phát của nguồn B và công suất của nhiễu AWGN, còn được gọi là tỷ số SNR phát (transmit SNR).

Hơn nữa, dung lượng kênh giữa hai nút T_{k-1} và T_k sẽ là:

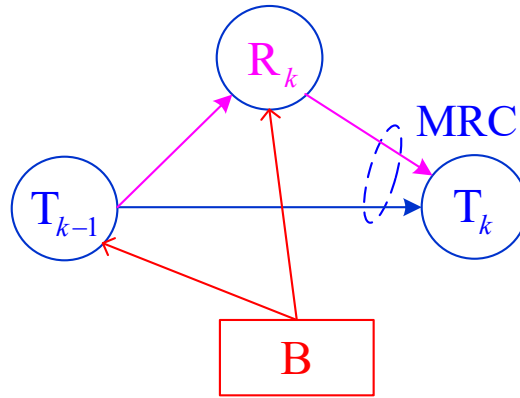
$$\begin{aligned} C_{T_{k-1}T_k}^{\text{DT}} &= (1 - \alpha) \tau \log_2 (1 + \gamma_{T_{k-1}T_k}) \\ &= (1 - \alpha) \tau \log_2 (1 + \mu_1 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}). \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2. Mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác (MH-CC)



Hình 2. 4: Mô hình MH-CC.

Để nâng cao hiệu quả chuyển tiếp dữ liệu tại từng chặng, truyền thông cộng tác được sử dụng tại mỗi chặng. Mô hình này có tên là MH-CC (Multi-Hop relaying using Cooperative Communication).



Hình 2. 5: Sự truyền dữ liệu ở chặng thứ k trong mô hình MH-CC.

Hình 2.4 vẽ mô hình MH-CC, trong đó nguồn T_0 muốn gửi dữ liệu đến đích T_K sử dụng tuyến đã được thiết lập, với $(K-1)$ nút trung gian là T_1, T_2, \dots, T_{K-1} . Mô hình MH-CC sử dụng các nút chuyển tiếp bên ngoài tuyến giữa nguồn và đích để nâng cao độ tin cậy của việc chuyển tiếp dữ liệu tại mỗi chặng. Giả sử rằng mật độ nút mạng lớn (như mạng cảm biến vô tuyến, mạng adhoc, ...) để mỗi chặng trên tuyến giữa nguồn và đích luôn có nút chuyển tiếp sẵn sàng hỗ trợ việc truyền dữ liệu.

Xét việc truyền dữ liệu ở khe thời gian thứ k ($k = 1, 2, \dots, K$) như được mô tả trong Hình 2.5, trong đó nút T_{k-1} gửi dữ liệu của nguồn đến nút T_k với sự cộng tác của nút chuyển tiếp R_k . Nút chuyển tiếp R_k cũng thu thập năng lượng từ trạm B và sử dụng năng lượng này để chuyển tiếp dữ liệu giúp nút T_{k-1} . Hơn nữa, nút T_k có thể sử dụng kỹ thuật MRC để kết hợp các dữ liệu nhận được từ T_{k-1} và T_k .

Pha 1	Pha 2	Pha 3
$\alpha\tau$	$(1-\alpha)\tau/2$	$(1-\alpha)\tau/2$
$B \rightarrow T_{k-1}$	$T_{k-1} \rightarrow T_k$	$R_k \rightarrow T_k$
$B \rightarrow R_k$	$T_{k-1} \rightarrow R_k$	

Hình 2. 6: Ba pha trong khe thời gian thứ k trong mô hình MH-CC.

Tương tự như MH-DT, thời gian được phân bổ cho mỗi khe thời gian là $\tau = L/K$. Tuy nhiên, tổng thời gian τ sẽ được phân bổ vào ba pha như trong Hình

2.6. Cụ thể, trong pha 1 (với thời gian $\alpha\tau$), các nút T_{k-1} và R_k thu thập năng lượng từ trạm B. Trong pha 2 (với thời gian $(1-\alpha)\tau/2$), nút T_{k-1} sử dụng năng lượng thu thập trong pha 1 để gửi dữ liệu đến các nút T_k và R_k . Cuối cùng, nếu nút chuyển tiếp R_k có thể giải mã thành công dữ liệu nhận được, nút này sẽ chuyển tiếp dữ liệu đến T_k trong pha 3 (với thời gian $(1-\alpha)\tau/2$). Thêm vào đó, T_k sẽ sử dụng kỹ thuật MRC để kết hợp các tín hiệu nhận được từ các nút T_{k-1} và R_k . Chú ý rằng để so sánh công bằng giữa mô hình MH-DT và MH-CC, thời gian thu thập năng lượng trong hai mô hình này cần giống nhau ($\alpha\tau$), tức hệ số α trong hai mô hình này là bằng nhau.

Tương tự công thức (2.1), năng lượng mà các nút T_{k-1} và R_k thu thập được trong pha 1 lần lượt là:

$$Q_{T_{k-1}} = \eta\alpha\tau P_B |h_{BT_{k-1}}|^2, Q_{R_k} = \eta\alpha\tau P_B |h_{BR_k}|^2, \quad (2.8)$$

trong đó, h_{BR_k} là hệ số kênh fading giữa hai nút B và R_k , và $|h_{BR_k}|^2$ là độ lợi kênh.

Do đó, công suất phát trung bình của các nút T_{k-1} và R_k trong pha 2 và 3 sẽ là:

$$P_{T_{k-1}} = \frac{Q_{T_{k-1}}}{(1-\alpha)\tau/2} = \mu_2 P_B \varphi_{BT_{k-1}}, \quad (2.9)$$

$$P_{R_k} = \frac{Q_{R_k}}{(1-\alpha)\tau/2} = \mu_2 P_B \varphi_{BR_k}, \quad (2.10)$$

với $\varphi_{BR_k} = |h_{BR_k}|^2$ là độ lợi kênh, và

$$\mu_2 = \frac{\eta\alpha\tau}{(1-\alpha)\tau/2} = \frac{2\eta\alpha}{1-\alpha}. \quad (2.11)$$

Tiếp đến pha 2, tín hiệu nhận được tại các nút T_k và R_k lần lượt là:

$$z_{T_k} = \sqrt{Q_{T_{k-1}}} h_{T_{k-1}T_k} x_{T_0} + n_{T_k}, \quad (2.12)$$

$$z_{R_k} = \sqrt{Q_{T_{k-1}}} h_{T_{k-1}R_k} x_{T_0} + n_{R_k}, \quad (2.13)$$

với $h_{T_{k-1}R_k}$ là hệ số kênh fading giữa hai nút T_{k-1} và R_k , và n_{R_k} là nhiễu AWGN tại R_k có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai σ_0^2 .

Kết hợp các công thức (2.9)-(2.13), các tỷ số SNR trên các liên kết $T_{k-1} \rightarrow T_k$ và $T_{k-1} \rightarrow R_k$ sẽ lần lượt là:

$$\gamma_{T_{k-1}T_k} = \frac{\mu_2 P_B \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}}{\sigma_0^2} = \mu_2 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}, \quad (2.14)$$

$$\gamma_{T_{k-1}R_k} = \frac{\mu_2 P_B \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}R_k}}{\sigma_0^2} = \mu_2 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}R_k}. \quad (2.15)$$

Từ các công thức (2.14) và (2.15), các dung lượng kênh tức thời của các liên kết $T_{k-1} \rightarrow T_k$ và $T_{k-1} \rightarrow R_k$ được tính như sau:

$$\begin{aligned} C_{T_{k-1}T_k}^{CC} &= \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2(1 + \gamma_{T_{k-1}T_k}) \\ &= \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2(1 + \mu_2 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}), \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} C_{T_{k-1}R_k}^{CC} &= \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2(1 + \gamma_{T_{k-1}R_k}) \\ &= \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2(1 + \mu_2 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}R_k}). \end{aligned} \quad (2.17)$$

Nếu nút chuyển tiếp R_k có thể giải mã thành công dữ liệu x_{T_0} , nút này sẽ chuyển tiếp dữ liệu đến nút T_k trong khe thời gian thứ ba. Tín hiệu nhận được tại nút T_k trong khe thời gian này sẽ là:

$$z_{T_k}^* = \sqrt{Q_{R_k}} h_{R_k T_k} x_{T_0} + n_{T_k}, \quad (2.18)$$

với $h_{R_k T_k}$ là hệ số kênh fading giữa hai nút R_k và T_k .

Thay công thức (2.10) vào công thức (2.18), tỷ số SNR của liên kết $R_k \rightarrow T_k$ được tính như sau:

$$\gamma_{R_k T_k} = \frac{\mu_2 P_B \varphi_{BR_k} \varphi_{R_k T_k}}{\sigma_0^2} = \mu_2 \Delta \varphi_{BR_k} \varphi_{R_k T_k}. \quad (2.19)$$

Bởi vì nút T_k sử dụng kỹ thuật MRC nên dung lượng kênh tức thời đạt được tại T_k được viết như sau:

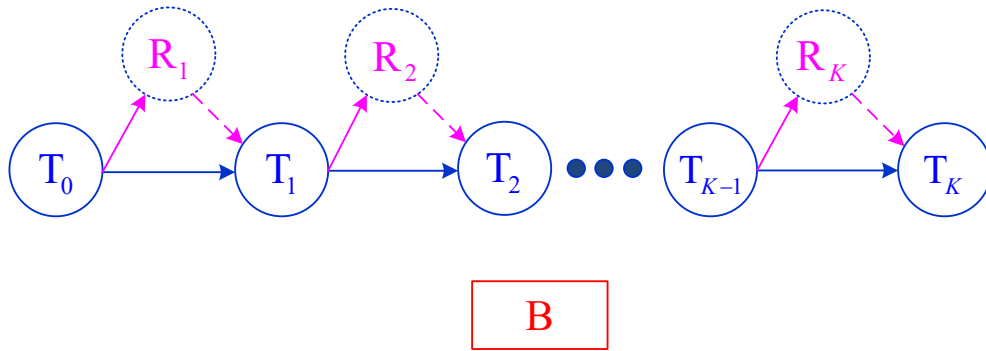
$$\begin{aligned} C_{T_{k-1}R_k T_k}^{\text{MRC}} &= \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2 \left(1 + \gamma_{T_{k-1}T_k} + \gamma_{R_k T_k} \right) \\ &= \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2 \left(1 + \mu_2 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k} + \mu_2 \Delta \varphi_{BR_k} \varphi_{R_k T_k} \right). \end{aligned} \quad (2.20)$$

Tuy nhiên, trong trường hợp mà R_k không thể giải mã thành công dữ liệu của nguồn, thì R_k sẽ không gửi dữ liệu đến T_k trong pha 3. Trong trường hợp này, nút T_k sẽ sử dụng tín hiệu nhận được từ T_{k-1} để giải mã dữ liệu nguồn (xem các công thức (2.12) và (2.16)).

Nhận xét: Như đã đề cập, mô hình MH-CC sử dụng truyền thông cộng tác để nâng cao độ tin cậy của việc chuyển tiếp dữ liệu tại mỗi chặng. Tuy nhiên, việc thực hiện mô hình MH-CC sẽ phức tạp hơn nhiều khi so với mô hình MH-DT bởi vì kỹ thuật truyền thông cộng tác yêu cầu sự đồng bộ cao giữa các nút, cũng như cần nhiều thời gian và năng lượng cho việc thiết lập và đồng bộ.

2.3. Mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường (MH-IR)

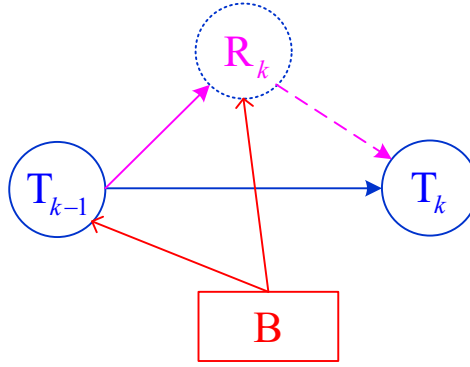
Luận văn cũng đề xuất áp dụng kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng để làm giảm độ phức tạp. Mô hình đề xuất này được đặt tên là MH-IR (Multi-hop relaying using Incremental Cooperation).



Hình 2. 7: Mô hình MH-IR.

Hình 2.7 mô tả mô hình MH-IR, và ta có thể thấy mô hình MH-IR giống mô hình MH-CC khi sử dụng các nút chuyển tiếp R để thực hiện kỹ thuật truyền thông cộng tác trên từng chặng. Điểm khác biệt chính giữa MH-IR và MH-CC là khi chất lượng kênh giữa hai nút T_{k-1} và T_k tốt thì nút R_k không cần phải chuyển tiếp dữ liệu về nút T_k nữa. Trong Hình 2.7, đường đứt nét được sử dụng để diễn đạt ý rằng các nút chuyển tiếp R có thể được sử dụng hoặc không.

Hình 2.8 mô tả nguyên lý hoạt động của kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường ở chặng thứ k . Tương tự như mô hình MH-CC, thời gian được phân bổ cho mỗi khe thời gian là $\tau = L / K$, và khoảng thời gian $\alpha\tau$ được sử dụng để các nút T_{k-1} và R_k thu thập năng lượng. Tuy nhiên, khác với MH-CC, thời gian phân bổ cho pha 2 và pha 3 được thiết kế như trong Hình 2.9. Thật vậy, thời gian truyền dữ liệu ở pha 2 là $\beta\tau$, và thời gian dành cho việc truyền dữ liệu ở pha 3 là $(1 - \alpha - \beta)\tau$. β cũng là một thông số hệ thống được thiết kế trước, với $0 < \beta < 1 - \alpha$. Để thấy rằng nếu $\beta = 1 - \alpha$, thì mô hình MH-IR trở thành mô hình MH-DT.



Hình 2. 8: Sự truyền dữ liệu ở chặng thứ k trong mô hình MH-IR.

Pha 1	Pha 2	Pha 3
$\alpha\tau$	$\beta\tau$	$(1-\alpha-\beta)\tau$
$B \rightarrow T_{k-1}$	$T_{k-1} \rightarrow T_k$	$R_k \rightarrow T_k$
$B \rightarrow R_k$	$T_{k-1} \rightarrow R_k$	

Hình 2. 9: Ba pha trong khe thời gian thứ k trong mô hình MH-IR.

Sử dụng lại công thức (2.8), năng lượng mà các nút T_{k-1} và R_k thu thập được trong pha 1 là:

$$Q_{T_{k-1}} = \eta\alpha\tau P_B |h_{BT_{k-1}}|^2, Q_{R_k} = \eta\alpha\tau P_B |h_{BR_k}|^2, \quad (2.21)$$

Do đó, công suất phát của T_{k-1} và R_k trong pha 2 và 3 lần lượt là:

$$P_{T_{k-1}} = \frac{Q_{T_{k-1}}}{\beta\tau} = \mu_3 P_B \varphi_{BT_{k-1}}, \quad (2.22)$$

$$P_{R_k} = \frac{Q_{R_k}}{(1-\alpha-\beta)\tau} = \mu_4 P_B \varphi_{BR_k}, \quad (2.23)$$

với

$$\mu_3 = \frac{\eta\alpha}{\beta}, \mu_4 = \frac{\eta\alpha}{1-\alpha-\beta}. \quad (2.24)$$

Tương tự các công thức (2.12) - (2.15), các tỷ số SNR trên các liên kết $T_{k-1} \rightarrow T_k$ và $T_{k-1} \rightarrow R_k$ lần lượt là:

$$\gamma_{T_{k-1}T_k} = \mu_3 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}, \quad (2.25)$$

$$\gamma_{T_{k-1}R_k} = \mu_3 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}R_k}. \quad (2.26)$$

Do đó, dung lượng kênh tức thời trên các liên kết $T_{k-1} \rightarrow T_k$ và $T_{k-1} \rightarrow R_k$ là

$$\begin{aligned} C_{T_{k-1}T_k}^{\text{IR}} &= \beta \tau \log_2(1 + \gamma_{T_{k-1}T_k}) \\ &= \beta \tau \log_2(1 + \mu_3 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k}), \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} C_{T_{k-1}R_k}^{\text{IR}} &= \beta \tau \log_2(1 + \gamma_{T_{k-1}R_k}) \\ &= \beta \tau \log_2(1 + \mu_3 \Delta \varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}R_k}). \end{aligned} \quad (2.28)$$

Trong MH-IR, nếu nút T_k có thể giải mã thành công dữ liệu nhận được từ nút T_{k-1} , nút T_k sẽ gửi thông điệp ACK đến các nút T_{k-1} và R_k để thông báo. Trong trường hợp này, nút T_k sẽ mã hóa lại dữ liệu và gửi dữ liệu đến chặng kế tiếp mà không cần sự trợ giúp từ nút R_k .

Trong trường hợp nút T_k không thể giải mã được dữ liệu từ nút T_{k-1} trong pha 2, nút T_k sẽ phản hồi bằng thông điệp NACK để yêu cầu sự giúp đỡ từ nút chuyển tiếp R_k . Trong trường hợp này, nếu nút R_k giải mã thành công dữ liệu nhận được từ nút T_{k-1} trong pha 2, nút R_k sẽ mã hóa lại dữ liệu và gửi đến T_k trong pha 3. Sử dụng công thức (2.23), tương tự các công thức (2.18)-(2.19), tỷ số SNR đạt được là

$$\gamma_{R_k T_k} = \mu_4 \Delta \varphi_{BR_k} \varphi_{R_k T_k}. \quad (2.29)$$

Và dung lượng kênh tức thời trên liên kết $R_k \rightarrow T_k$ là:

$$\begin{aligned} C_{R_k T_k}^{\text{IR}} &= (1 - \alpha - \beta) \tau \log_2(1 + \gamma_{R_k T_k}) \\ &= (1 - \alpha - \beta) \tau \log_2(1 + \mu_4 \Delta \varphi_{BR_k} \varphi_{R_k T_k}). \end{aligned} \quad (2.30)$$

Nhận xét: Mô hình MH-IR vẫn đạt được độ lợi phân tập từ việc thực hiện kỹ thuật truyền thông cộng tác tại mỗi chặng. Tuy nhiên, mô hình MH-IR đơn giản hơn mô hình MH-CC. Hơn nữa, truyền thông cộng tác tăng cường cũng tiết kiệm công suất phát cho nút chuyên tiếp, cũng như giảm độ phức tạp khi sử dụng kỹ thuật kết hợp MRC như trong MH-CC.

CHƯƠNG 3: PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG

Chương 3 đánh giá hiệu năng xác suất dừng OP (Outage Probability) của các mô hình nghiên cứu MH-DT, MH-IR và MH-CC. Trước tiên, luận văn giới thiệu về mô hình kênh truyền được sử dụng.

3.1. Mô hình kênh truyền

Giả sử rằng, kênh truyền giữa hai nút bất kỳ là kênh fading Rayleigh nên các độ lợi kênh truyền φ_{UV} có phân phối mũ (exponential distribution), với

$U, V \in \{T_k, R_k, B\} (k = 0, 1, \dots, K)$. Do đó, hàm CDF (Cumulative Distribution Function) của φ_{UV} được viết như sau:

$$F_{\varphi_{UV}}(x) = 1 - \exp(-\Omega_{UV}x), \quad x \geq 0 \quad (3.1)$$

với Ω_{UV} là các thông số đặc trưng của φ_{UV} .

Như được đề cập trong các tài liệu [17]-[20], tham số Ω_{UV} được biểu diễn bằng một hàm theo khoảng cách giữa hai nút U và V như sau:

$$\Omega_{UV} = (d_{UV})^{PL}, \quad (3.2)$$

với d_{UV} là khoảng cách vật lý giữa U và V, PL là hệ số suy hao đường truyền có giá trị từ 2 đến 8 tùy thuộc vào tính chất môi trường truyền.

Từ công thức (3.1), hàm PDF (Probability Density Function) được đưa ra như trong công thức (3.3):

$$f_{\varphi_{UV}}(x) = \Omega_{UV} \exp(-\Omega_{UV}x). \quad (3.3)$$

3.2. Định nghĩa xác suất dừng

Xác suất dừng được định nghĩa là xác suất mà dung lượng kênh tức thời đạt được giữa nút phát U và nút thu V nhỏ hơn một ngưỡng xác định trước, cụ thể:

$C_{UV} < C_{th}$, với $C_{th} > 0$ là ngưỡng dừng, $U, V \in \{T_k, R_k, B\}$.

Ngược lại, nếu $C_{UV} \geq C_{th}$, ta có thể giả sử rằng nút thu V có thể giải mã thành công dữ liệu nhận được từ nút phát U.

Tiếp theo, xác suất mà sự truyền dữ liệu trong mô hình MH-Z thành công được đưa ra bằng công thức sau:

$$P_{\text{Success}}^{\text{MH-Z}} = \prod_{k=1}^K P_{\text{Success},k}^{\text{MH-Z}}, \quad (3.4)$$

với $Z \in \{\text{DT}, \text{IR}, \text{CC}\}$, và $P_{\text{Success},k}^{\text{MH-Z}}$ là xác suất mà sự truyền dữ liệu ở chặng thứ k thành công. Công thức (3.4) có nghĩa rằng để dữ liệu của nút nguồn đến đích thành công thì sự truyền trên tất cả các chặng đều phải thành công.

Do đó, xác suất dừng của MH-Z được đưa ra bằng công thức sau:

$$\begin{aligned} OP_{\text{MH-Z}} &= 1 - P_{\text{Success}}^{\text{MH-Z}} = 1 - \prod_{k=1}^K P_{\text{Success},k}^{\text{MH-Z}} \\ &= 1 - \prod_{k=1}^K (1 - OP_k^{\text{MH-Z}}), \end{aligned} \quad (3.5)$$

với $OP_k^{\text{MH-Z}}$ là xác suất dừng ở chặng thứ k trong mô hình MH-Z.

3.3. OP của mô hình MH-DT

Sử dụng công thức (2.7), xác suất dừng ở chặng thứ k trong mô hình MH-DT được tính như sau:

$$OP_k^{\text{MH-DT}} = \Pr(C_{T_{k-1}T_k}^{\text{DT}} < C_{th}) = \Pr(\varphi_{BT_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k} < \rho_{1,th}), \quad (3.6)$$

với

$$\rho_{1,th} = \frac{2^{\frac{C_{th}}{(1-\alpha)\tau}} - 1}{\mu_1 \Delta}. \quad (3.7)$$

Từ công thức (3.6), ta có:

$$\text{OP}_k^{\text{MH-DT}} = \int_0^{+\infty} F_{\varphi_{\text{BT}_{k-1}}} \left(\frac{\rho_{1,\text{th}}}{x} \right) f_{\varphi_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}}(x) dx. \quad (3.8)$$

Sử dụng các hàm CDF và PDF đã đưa ra trong các công thức (3.1) và (3.3), ta có:

$$F_{\varphi_{\text{BT}_{k-1}}} \left(\frac{\rho_{1,\text{th}}}{x} \right) = 1 - \exp \left(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} \frac{\rho_{1,\text{th}}}{x} \right), \quad (3.9)$$

$$f_{\varphi_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}}(x) = \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \exp \left(-\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} x \right). \quad (3.10)$$

Thay các công thức (3.9) và (3.10) vào công thức (3.8), ta được:

$$\begin{aligned} \text{OP}_k^{\text{MH-DT}} &= \int_0^{+\infty} \left[1 - \exp \left(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} \frac{\rho_{1,\text{th}}}{x} \right) \right] \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \exp \left(-\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} x \right) dx \\ &= 1 - \int_0^{+\infty} \exp \left(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} \frac{\rho_{1,\text{th}}}{x} \right) \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \exp \left(-\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} x \right) dx. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Sử dụng công thức (3.324.1) trong tài liệu [27] để tính tích phân trong công thức (3.11), ta đạt được:

$$\text{OP}_k^{\text{MH-DT}} = 1 - 2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}} \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \rho_{1,\text{th}}} K_1 \left(2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}} \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \rho_{1,\text{th}}} \right), \quad (3.12)$$

với $K_1(\cdot)$ là hàm Bessel biến đổi loại 2, bậc 1 [27].

Thay công thức (3.12) vào công thức (3.5), ta có được công thức tính chính xác xác suất dừng của mô hình MH-DT như sau:

$$\text{OP}_{\text{MH-DT}} = 1 - \prod_{k=1}^K \left[2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}} \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \rho_{1,\text{th}}} K_1 \left(2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}} \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \rho_{1,\text{th}}} \right) \right]. \quad (3.13)$$

3.4. OP của mô hình MH-IR

Xác suất dừng ở chặng thứ k trong MH-IR được đưa ra như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP}_k^{\text{MH-IR}} &= \underbrace{\Pr\left(C_{T_{k-1}T_k}^{\text{IR}} < C_{\text{th}}, C_{T_{k-1}R_k}^{\text{IR}} < C_{\text{th}}\right)}_{P_{1,k}^{\text{MH-IR}}} \\ &+ \underbrace{\Pr\left(C_{T_{k-1}T_k}^{\text{IR}} < C_{\text{th}}, C_{T_{k-1}R_k}^{\text{IR}} \geq C_{\text{th}}, C_{R_kT_k}^{\text{IR}} < C_{\text{th}}\right)}_{P_{2,k}^{\text{MH-IR}}}, \end{aligned} \quad (3.14)$$

với $P_{1,k}^{\text{MH-IR}}$ là xác suất mà cả hai nút T_k và R_k đều không thể giải mã thành công dữ liệu nhận được từ nút T_{k-1} nên sự truyền dữ liệu bị dừng, và $P_{2,k}^{\text{MH-IR}}$ là xác suất mà nút T_k không thể giải mã thành công dữ liệu nhận được từ nút T_{k-1} và nút chuyển tiếp R_k lại giải mã thành công, nhưng sự truyền dữ liệu từ R_k về T_k lại không thành công nên sự truyền dữ liệu trong trường hợp này cũng bị dừng.

Đầu tiên, ta xét xác suất $P_{1,k}^{\text{MH-IR}}$, sử dụng các công thức (2.27) và (2.28), ta viết lại $P_{1,k}^{\text{MH-IR}}$ dưới dạng sau:

$$P_{1,k}^{\text{MH-IR}} = \Pr\left(\varphi_{\text{BT}_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}T_k} < \rho_{3,\text{th}}, \varphi_{\text{BT}_{k-1}} \varphi_{T_{k-1}R_k} < \rho_{3,\text{th}}\right), \quad (3.15)$$

với

$$\rho_{3,\text{th}} = \frac{2^{\frac{C_{\text{th}}}{\beta\tau}} - 1}{\mu_3 \Delta} \quad (3.16)$$

Tiếp tục thực hiện biến đổi công thức (3.15), ta có:

$$P_{1,k}^{\text{MH-IR}} = \int_0^{+\infty} F_{\varphi_{T_{k-1}T_k}}\left(\frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right) F_{\varphi_{T_{k-1}R_k}}\left(\frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right) f_{\varphi_{\text{BT}_{k-1}}}(x) dx, \quad (3.17)$$

Sử dụng các hàm CDF và PDF đã đưa ra trong các công thức (3.1) và (3.3), các hàm CDF và PDF trong công thức (3.17) được đưa ra như sau:

$$F_{\varphi_{T_{k-1}T_k}}\left(\frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right) = 1 - \exp\left(-\Omega_{T_{k-1}T_k} \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right), \quad (3.18)$$

$$F_{\varphi_{T_{k-1}R_k}}\left(\frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right) = 1 - \exp\left(-\Omega_{T_{k-1}R_k} \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right), \quad (3.19)$$

$$f_{\varphi_{\text{BT}_{k-1}}}(x) = \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \exp(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} x), \quad (3.20)$$

Thay các công thức (3.18)-(3.20) vào công thức (3.17), ta đạt được:

$$\begin{aligned} P_{1,k}^{\text{MH-IR}} &= \int_0^{+\infty} \left[\frac{1 - \exp\left(-\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right) - \exp\left(-\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k} \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right)}{1 + \exp\left(-(\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} + \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}) \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right)} \right] \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \exp(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} x) dx \\ &= 1 - \int_0^{+\infty} \exp\left(-\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right) \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \exp(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} x) dx \\ &\quad - \int_0^{+\infty} \exp\left(-\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k} \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right) \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \exp(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} x) dx \\ &\quad + \int_0^{+\infty} \exp\left(-(\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} + \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}) \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x}\right) \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \exp(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} x) dx. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Sử dụng công thức (3.324.1) trong tài liệu [27] để tính các tích phân trong công thức (3.21), ta đạt được công thức (3.22) như sau:

$$\begin{aligned} P_{1,k}^{\text{MH-IR}} &= 1 - 2\sqrt{\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}} K_1\left(2\sqrt{\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}}\right) \\ &\quad - 2\sqrt{\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k} \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}} K_1\left(2\sqrt{\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k} \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}}\right) \\ &\quad + 2\sqrt{(\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} + \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}) \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}} K_1\left(2\sqrt{(\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} + \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}) \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}}\right). \end{aligned} \quad (3.22)$$

Tiếp theo, ta xét xác suất $P_{2,k}^{\text{MH-IR}}$, sử dụng các công thức (2.27), (2.28) và (2.30), ta viết lại $P_{2,k}^{\text{MH-IR}}$ dưới dạng sau:

$$\begin{aligned} P_{2,k}^{\text{MH-IR}} &= \Pr\left(C_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}^{\text{IR}} < C_{\text{th}}, C_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}^{\text{IR}} \geq C_{\text{th}}\right) \times \Pr\left(C_{\text{R}_k\text{T}_k}^{\text{IR}} < C_{\text{th}}\right) \\ &= \Pr\left(\varphi_{\text{BT}_{k-1}} \varphi_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} < \rho_{3,\text{th}}, \varphi_{\text{BT}_{k-1}} \varphi_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k} \geq \rho_{3,\text{th}}\right) \times \Pr\left(\varphi_{\text{BR}_k} \varphi_{\text{R}_k\text{T}_k} < \rho_{4,\text{th}}\right), \end{aligned} \quad (3.23)$$

với

$$\rho_{4,\text{th}} = \frac{2^{\frac{C_{\text{th}}}{(1-\alpha-\beta)\tau}} - 1}{\mu_4 \Delta}. \quad (3.24)$$

Tương tự như phép biến đổi trong công thức (3.17), ta có thể viết:

$$\begin{aligned} P_{2,k}^{\text{MH-IR}} &= \int_0^{+\infty} F_{\varphi_{T_{k-1}T_k}} \left(\frac{\rho_{3,\text{th}}}{x} \right) \left[1 - F_{\varphi_{T_{k-1}R_k}} \left(\frac{\rho_{3,\text{th}}}{x} \right) \right] f_{\varphi_{BT_{k-1}}} (x) dx \\ &\times \int_0^{+\infty} F_{\varphi_{R_k T_k}} \left(\frac{\rho_{4,\text{th}}}{x} \right) f_{\varphi_{BR_k}} (x) dx \\ &= \int_0^{+\infty} \left[\exp \left(-\Omega_{T_{k-1}R_k} \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x} \right) - \exp \left(-(\Omega_{T_{k-1}T_k} + \Omega_{T_{k-1}R_k}) \frac{\rho_{3,\text{th}}}{x} \right) \right] \Omega_{BT_{k-1}} \exp(-\Omega_{BT_{k-1}} x) dx \\ &\times \int_0^{+\infty} \left[1 - \exp \left(-\Omega_{R_k T_k} \frac{\rho_{4,\text{th}}}{x} \right) \right] \Omega_{BR_k} \exp(-\Omega_{BR_k} x) dx \\ &= \left[\begin{aligned} &2\sqrt{\Omega_{T_{k-1}R_k} \Omega_{BT_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}} K_1 \left(2\sqrt{\Omega_{T_{k-1}R_k} \Omega_{BT_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}} \right) \\ &- 2\sqrt{(\Omega_{T_{k-1}T_k} + \Omega_{T_{k-1}R_k}) \Omega_{BT_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}} K_1 \left(2\sqrt{(\Omega_{T_{k-1}T_k} + \Omega_{T_{k-1}R_k}) \Omega_{BT_{k-1}} \rho_{3,\text{th}}} \right) \end{aligned} \right] \\ &\times \left[1 - 2\sqrt{\Omega_{R_k T_k} \Omega_{BR_k} \rho_{4,\text{th}}} K_1 \left(2\sqrt{\Omega_{R_k T_k} \Omega_{BR_k} \rho_{4,\text{th}}} \right) \right]. \end{aligned} \quad (3.25)$$

Thay các công thức (3.22) và (3.25) vào (3.14), ta được công thức tính chính xác xác suất $\text{OP}_k^{\text{MH-IR}}$, và sau đó, thay $\text{OP}_k^{\text{MH-IR}}$ vào công thức (3.5), ta được biểu thức tính chính xác xác suất dừng của mô hình MH-IR.

3.5. OP của mô hình MH-CC

Tương tự như công thức (3.14), xác suất dừng ở chặng thứ k trong mô hình MH-CC được viết dưới dạng sau:

$$\begin{aligned} \text{OP}_k^{\text{MH-CC}} &= \Pr \left(\underbrace{C_{T_{k-1}T_k}^{\text{CC}} < C_{\text{th}}, C_{T_{k-1}R_k}^{\text{CC}} < C_{\text{th}}}_{Q_{1,k}^{\text{MH-CC}}} \right) \\ &+ \Pr \left(C_{T_{k-1}R_k}^{\text{CC}} \geq C_{\text{th}} \right) \times \Pr \left(C_{T_{k-1}R_k T_k}^{\text{MRC}} < C_{\text{th}} \right). \end{aligned} \quad (3.26)$$

Trong công thức (3.26), $Q_{1,k}^{\text{MH-CC}}$ (giống như $P_{1,k}^{\text{MH-IR}}$ trong công thức (3.14)-(3.15)), là xác suất mà cả hai nút T_k và R_k đều không giải mã thành công dữ liệu nhận được từ T_{k-1} trong pha 2. Sử dụng các công thức (2.16) - (2.17), ta viết lại $Q_{1,k}^{\text{MH-CC}}$ như sau:

$$Q_{1,k}^{\text{MH-CC}} = \Pr\left(\varphi_{\text{BT}_{k-1}}\varphi_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} < \rho_{2,\text{th}}, \varphi_{\text{BT}_{k-1}}\varphi_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k} < \rho_{2,\text{th}}\right), \quad (3.27)$$

với

$$\rho_{2,\text{th}} = \frac{2^{\frac{2C_{\text{th}}}{(1-\alpha)\tau}} - 1}{\mu_2\Delta}. \quad (3.28)$$

Tương tự như cách tính $P_{1,k}^{\text{MH-IR}}$ như trong các bước biến đổi từ công thức (3.17) đến công thức (3.22), ta cũng có:

$$\begin{aligned} Q_{1,k}^{\text{MH-CC}} &= 1 - 2\sqrt{\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\rho_{2,\text{th}}} K_1\left(2\sqrt{\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\rho_{2,\text{th}}}\right) \\ &\quad - 2\sqrt{\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\rho_{2,\text{th}}} K_1\left(2\sqrt{\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\rho_{2,\text{th}}}\right) \\ &\quad + 2\sqrt{(\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} + \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k})\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\rho_{2,\text{th}}} K_1\left(2\sqrt{(\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} + \Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k})\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\rho_{2,\text{th}}}\right). \end{aligned} \quad (3.29)$$

Trong công thức (3.26), $\Pr(C_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}^{\text{CC}} \geq C_{\text{th}})$ là xác suất mà nút chuyển tiếp R_k có thể giải mã thành công dữ liệu nhận được từ nút T_{k-1} . Sử dụng công thức (2.17), ta tính được xác suất $\Pr(C_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}^{\text{CC}} \geq C_{\text{th}})$ như sau:

$$\begin{aligned} \Pr(C_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}^{\text{CC}} \geq C_{\text{th}}) &= \Pr\left(\varphi_{\text{BT}_{k-1}}\varphi_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k} \geq \rho_{2,\text{th}}\right) \\ &= \int_0^{+\infty} \left[1 - F_{\varphi_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}}\left(\frac{\rho_{2,\text{th}}}{x}\right)\right] f_{\varphi_{\text{BT}_{k-1}}}(x) dx \\ &= \int_0^{+\infty} \exp\left(-\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k} \frac{\rho_{2,\text{th}}}{x}\right) \Omega_{\text{BT}_{k-1}} \exp(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}} x) dx \\ &= 2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}\rho_{2,\text{th}}} K_1\left(2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\Omega_{\text{T}_{k-1}\text{R}_k}\rho_{2,\text{th}}}\right). \end{aligned} \quad (3.30)$$

Cuối cùng, ta xét đến xác suất $\Pr(C_{T_{k-1}R_kT_k}^{\text{MRC}} < C_{\text{th}})$ trong công thức (3.26); sử dụng công thức (3.20), ta đạt được:

$$\begin{aligned}\Pr(C_{T_{k-1}R_kT_k}^{\text{MRC}} < C_{\text{th}}) &= \Pr(\varphi_{\text{BT}_{k-1}}\varphi_{T_{k-1}T_k} + \varphi_{\text{BR}_k}\varphi_{R_kT_k} < \rho_{2,\text{th}}) \\ &= \Pr(T_1 + T_2 < \rho_{2,\text{th}}) \\ &= \int_0^{\rho_{2,\text{th}}} F_{T_1}(\rho_{2,\text{th}} - x) f_{T_2}(x) dx,\end{aligned}\quad (3.31)$$

với $T_1 = \varphi_{\text{BT}_{k-1}}\varphi_{T_{k-1}T_k}$ và $T_2 = \varphi_{\text{BR}_k}\varphi_{R_kT_k}$.

Để tính xác suất trong công thức (3.31), ta đầu tiên cần tìm hàm CDF của biến ngẫu nhiên T_1 và hàm PDF của biến ngẫu nhiên T_2 . Thật vậy, hàm CDF của biến ngẫu nhiên T_1 được tính như sau:

$$\begin{aligned}F_{T_1}(x) &= \Pr(\varphi_{\text{BT}_{k-1}}\varphi_{T_{k-1}T_k} < x) \\ &= \int_0^{+\infty} F_{\varphi_{\text{BT}_{k-1}}}\left(\frac{x}{y}\right) f_{\varphi_{T_{k-1}T_k}}(y) dy \\ &= \int_0^{+\infty} \left[1 - \exp\left(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\frac{x}{y}\right)\right] \Omega_{T_{k-1}T_k} \exp(-\Omega_{T_{k-1}T_k}y) dy \\ &= 1 - \int_0^{+\infty} \Omega_{T_{k-1}T_k} \exp\left(-\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\frac{x}{y}\right) \exp(-\Omega_{T_{k-1}T_k}y) dy \\ &= 1 - 2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\Omega_{T_{k-1}T_k}} x K_1\left(2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\Omega_{T_{k-1}T_k}} x\right).\end{aligned}\quad (3.32)$$

Do đó, ta đạt được hàm CDF $F_{T_1}(\rho_{2,\text{th}} - x)$ trong công thức (3.31) như sau:

$$F_{T_1}(\rho_{2,\text{th}} - x) = 1 - 2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\Omega_{T_{k-1}T_k}}(\rho_{2,\text{th}} - x) K_1\left(2\sqrt{\Omega_{\text{BT}_{k-1}}\Omega_{T_{k-1}T_k}}(\rho_{2,\text{th}} - x)\right). \quad (3.33)$$

Tương tự như (3.32), hàm CDF của biến ngẫu nhiên T_2 sẽ là:

$$\begin{aligned}F_{T_2}(x) &= \Pr(\varphi_{\text{BR}_k}\varphi_{R_kT_k} < x) \\ &= 1 - 2\sqrt{\Omega_{\text{BR}_k}\Omega_{R_kT_k}} x K_1\left(2\sqrt{\Omega_{\text{BR}_k}\Omega_{R_kT_k}} x\right).\end{aligned}\quad (3.34)$$

Lấy đạo hàm theo x , ta được hàm PDF của biến ngẫu nhiên T_2 như sau:

$$\begin{aligned}
f_{T_2}(x) &= \Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k} \left(K_0 \left(2\sqrt{\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k} x} \right) + K_2 \left(2\sqrt{\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k} x} \right) \right) \\
&\quad - \sqrt{\frac{\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k}}{x}} K_1 \left(2\sqrt{\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k} x} \right).
\end{aligned} \tag{3.35}$$

Thay các công thức (3.33) và (3.35) vào công thức (3.31), ta đạt được công thức tính chính xác $\Pr(C_{T_{k-1}R_k T_k}^{MRC} < C_{th})$ như sau:

$$\begin{aligned}
&\Pr(C_{T_{k-1}R_k T_k}^{MRC} < C_{th}) = \\
&1 - \int_0^{\rho_{2,th}} \left\{ \begin{aligned} &2\sqrt{\Omega_{BT_{k-1}} \Omega_{T_{k-1}T_k}} (\rho_{2,th} - x) K_1 \left(2\sqrt{\Omega_{BT_{k-1}} \Omega_{T_{k-1}T_k}} (\rho_{2,th} - x) \right) \\ &\times \left[\begin{aligned} &\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k} \left(K_0 \left(2\sqrt{\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k} x} \right) + K_2 \left(2\sqrt{\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k} x} \right) \right) \\ &-\sqrt{\frac{\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k}}{x}} K_1 \left(2\sqrt{\Omega_{BR_k} \Omega_{R_k T_k} x} \right) \end{aligned} \right] \end{aligned} \right\}. \tag{3.36}
\end{aligned}$$

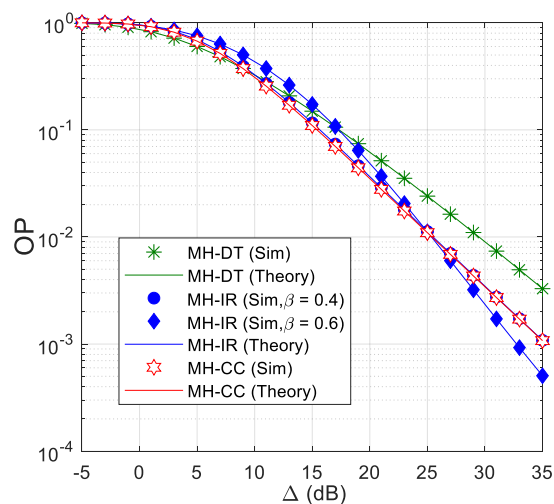
Bởi vì tích phân trong công thức (3.36) không tìm ra được dạng tường minh nên luận văn sẽ sử dụng phần mềm MATLAB để tính toán số học tích phân này.

Thay các công thức (3.29), (3.30) và (3.36) vào công thức (3.26), ta được công thức tính chính xác xác suất OP_k^{MH-CC} . Sau đó, thay OP_k^{MH-CC} vào công thức (3.5), ta được biểu thức tính chính xác xác suất dừng của mô hình MH-CC.

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ LÝ THUYẾT

Chương 4 thực hiện các kết quả mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng các kết quả phân tích đưa ra trong Chương 3, cũng như so sánh hiệu năng xác suất dừng của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC. Các kết quả mô phỏng (ký hiệu Sim) và các kết quả lý thuyết (ký hiệu Theory) đều được thực hiện trên phần mềm MATLAB.

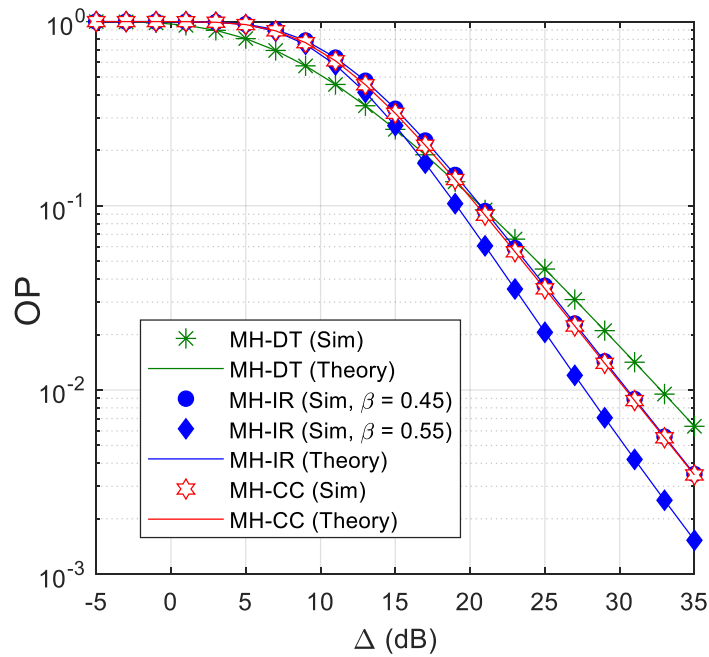
Trong môi trường mô phỏng, ta đặt các nút nằm trong mặt phẳng hai chiều Oxy, trong đó các nút T_k có tọa độ là $(k/K, 0)$, các nút chuyển tiếp R_u có tọa độ là $((2u-1)/(2K), 0)$, và trạm phát năng lượng B được cố định ở vị trí $(0.5, 0.5)$, với $k = 0, 1, \dots, K, u = 1, \dots, K$. Với các vị trí này, nút nguồn T_0 luôn cố định ở gốc tọa độ $(0, 0)$, và nút đích T_K được cố định ở vị trí $(1, 0)$. Cho nên, khoảng cách giữa nguồn và đích luôn bằng 1 trong tất cả các mô phỏng. Đối với các nút chuyển tiếp R_k , nút này được đặt chính giữa giữa hai nút T_{k-1} và T_k . Cũng trong các mô phỏng, ta cố định hệ số suy hao đường truyền bằng 3 ($PL = 3$), tổng thời gian bằng 1 ($L = 1$), hiệu suất chuyển đổi công suất bằng 1 ($\eta = 1$), và ngưỡng dừng bằng 1 ($C_{th} = 1$).



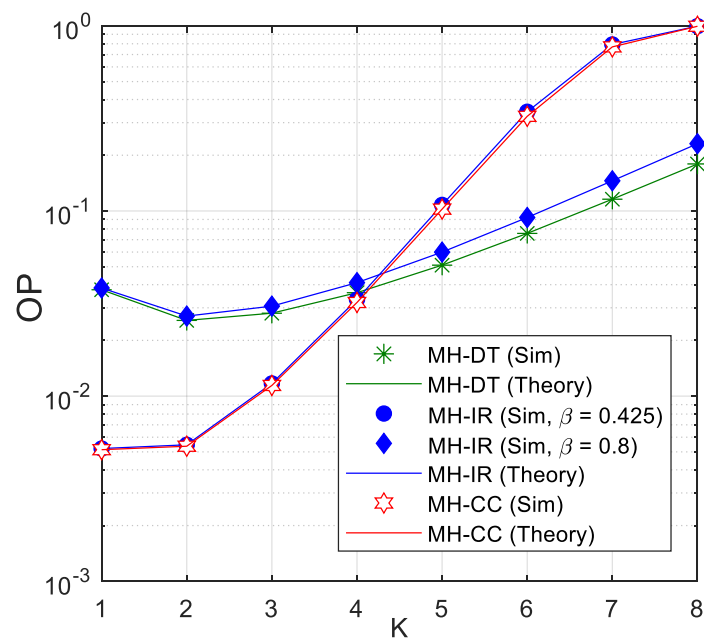
Hình 4. 1: Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) khi $K = 3$ và $\alpha = 0.2$.

Hình 4.1 biểu diễn xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo tỷ số SNR phát Δ (dB) khi số chặng giữa nguồn và đích bằng 3 ($K = 3$) và hệ số phân chia thời gian cho pha thu thập năng lượng bằng 0.2 ($\alpha = 0.2$). Hình 4.1 cho thấy OP của mô hình MH-IR và MH-CC cao hơn mô hình MH-DT khi giá trị Δ thấp. Điều này cho thấy việc sử dụng kỹ thuật truyền thông cộng tác sẽ không hiệu quả khi Δ thấp. Khi giá trị của Δ đủ lớn, các mô hình MH-IR và MH-CC đạt giá trị OP thấp hơn mô hình MH-DT. Ta cũng thấy rằng OP của mô hình MH-IR và MH-CC giảm nhanh hơn mô hình MH-DT khi Δ tăng. Điều này chứng tỏ rằng các mô hình MH-IR và MH-CC đạt được độ lợi phân tập cao hơn do sử dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng. Hình 4.1 cũng cho ta thấy giá trị của hệ số β trong MH-IR cũng ảnh hưởng đáng kể lên giá trị OP. Khi $\beta = 0.4 = (1 - \alpha) / 2$, tức là hai mô hình MH-CC và MH-IR phân bổ thời gian đều cho hai pha truyền dữ liệu, nên MH-CC đạt được giá trị OP thấp hơn mô hình MH-IR bởi kỹ thuật MRC được sử dụng tại mỗi chặng. Tuy nhiên, sự chênh lệch giá trị OP trong trường hợp này là không đáng kể. Trong trường hợp $\beta = 0.6$, ta quan sát rằng mô hình MH-IR đạt được giá trị OP thấp hơn mô hình MH-CC khi Δ lớn hơn 27 dB. Cuối cùng, ta quan sát được rằng các kết quả mô phỏng (Sim) và lý thuyết (Theory) trùng với nhau, điều này kiểm chứng sự chính xác của các công thức tính xác suất dừng được đưa ra trong Chương 3.

Hình 4.2 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo tỷ số SNR phát Δ (dB) khi số chặng giữa nguồn và đích bằng 4 ($K = 4$) và hệ số phân chia thời gian cho pha thu thập năng lượng bằng 0.1 ($\alpha = 0.1$). Tương tự như Hình 4.1, ta cũng thấy rằng các mô hình sử dụng truyền thông cộng tác sẽ đạt được hiệu năng xác suất dừng tốt hơn mô hình MH-DT khi Δ đủ lớn. Trong Hình 4.2, OP của mô hình MH-IR và MH-CC thấp hơn mô hình MH-DT khi giá trị của Δ vào khoảng 20 dB với $\beta = 0.45 = (1 - \alpha) / 2$. Khi giá trị $\beta = 0.55$, ta quan sát rằng OP của mô hình MH-IR sẽ thấp hơn MH-CC. Điều này cho thấy rằng việc thiết kế giá trị β phù hợp sẽ nâng cao đáng kể hiệu năng của mô hình MH-IR. Một lần nữa, Hình 4.2 cho thấy được các kết quả mô phỏng và lý thuyết kiểm chứng lẫn nhau.



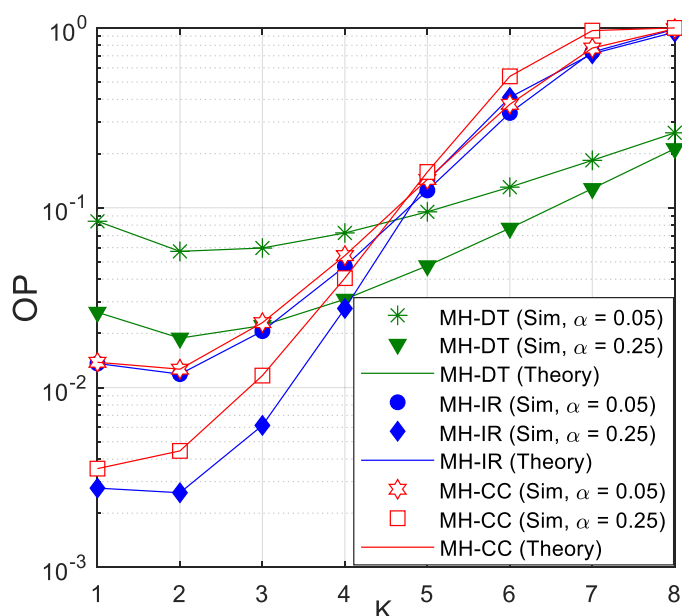
Hình 4. 2: Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) khi $K = 4$ và $\alpha = 0.1$.



Hình 4. 3: Xác suất dừng vẽ theo K khi $\Delta = 25$ dB và $\alpha = 0.15$.

Hình 4.3 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo số chặng (K) giữa nguồn và đích khi $\Delta = 25$ dB và $\alpha = 0.15$. Quan sát từ Hình 4.3, ta thấy rằng giá trị OP của tất cả các mô hình đều cao khi số chặng lớn. Nguyên

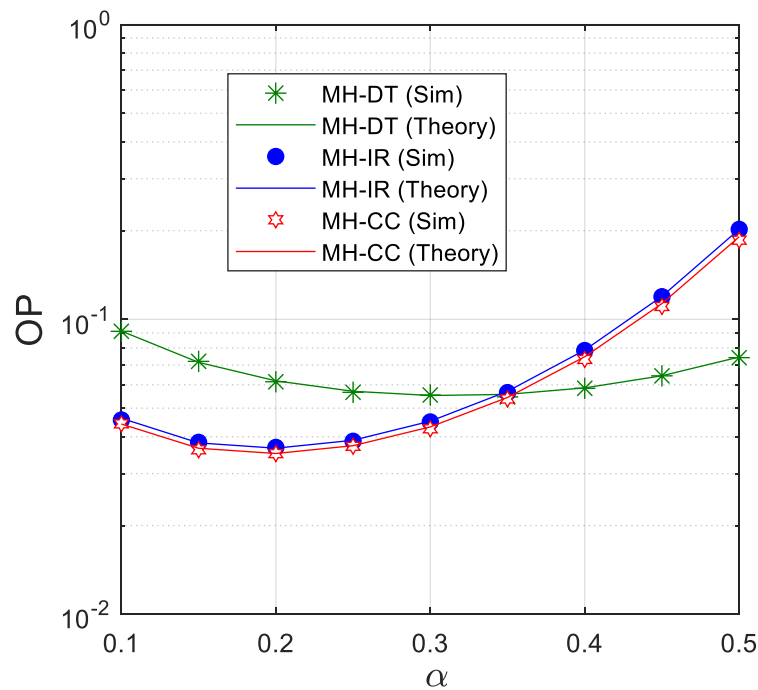
nhân là vì khi số chặng càng lớn thì thời gian truyền trong mỗi khe thời gian sẽ giảm, dẫn đến xác suất dừng tại mỗi chặng tăng, và do đó sẽ làm tăng xác suất dừng của các mô hình. Hình 4.3 cũng cho thấy mô hình MH-IR và MH-CC trong trường hợp $\beta = (1 - \alpha) / 2 = 0.425$ đạt được giá trị OP thấp hơn mô hình MH-DT khi số chặng K có giá trị từ 1 đến 4. Điều này có thể được giải thích như sau: khi số chặng là quá lớn thì thời gian truyền ở các pha 2 và 3 ở mỗi chặng trong các mô hình MH-IR và MH-CC sẽ rất thấp. Do đó, truyền thông cộng tác ở mỗi chặng sẽ không hiệu quả. Trong Hình 4.3, khi giá trị β lớn ($\beta = 0.8$), ta thấy rằng OP của mô hình MH-IR là cao, thậm chí cao hơn cả mô hình MH-DT với tất cả giá trị của số chặng. Đó là vì khi $\beta = 0.8$ thì thời gian truyền cho pha 3 ở mỗi chặng trong mô hình MH-IR là rất thấp ($1 - \alpha - \beta = 0.05$), và do đó không phát huy được lợi thế của việc truyền lại dữ liệu từ các nút chuyển tiếp R.



Hình 4. 4: Xác suất dừng vẽ theo K khi $\Delta = 25$ dB và $\beta = 0.5$.

Hình 4.4 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo số chặng (K) khi $\Delta = 25$ dB và $\beta = 0.5$. Tương tự như Hình 4.3, xác suất dừng của tất cả các mô hình tăng nhanh khi số chặng tăng. Ta cũng thấy rằng khi $\alpha = 0.05$

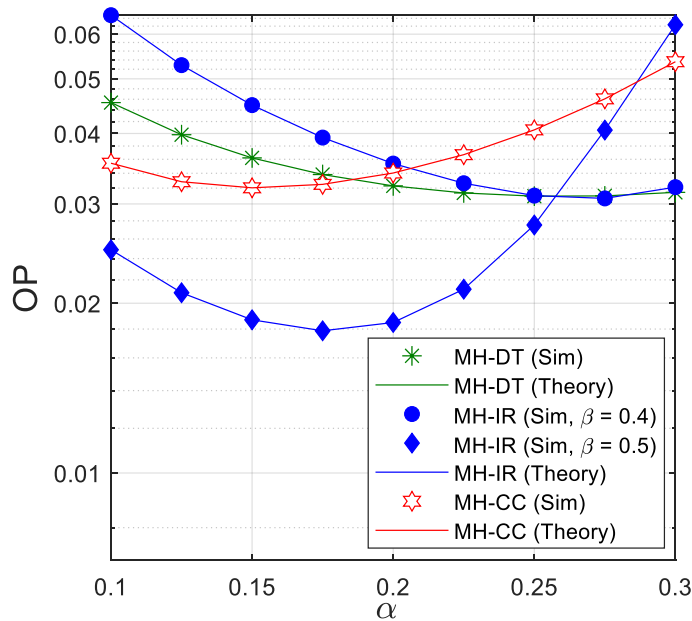
, OP của tất cả các mô hình đều lớn hơn khi so sánh với trường hợp $\alpha = 0.25$. Nguyên nhân là vì khi giá trị α quá nhỏ thì năng lượng thu thập được tại các nút phát sẽ bị hạn chế, điều này dẫn đến xác suất dừng của các mô hình tăng. Trong Hình 4.4, hệ số β được cố định bằng 0.5, và như ta có thể thấy mô hình MH-IR đạt giá trị OP thấp hơn mô hình MH-CC.



Hình 4. 5: Xác suất dừng vẽ theo α khi $\Delta = 20$ dB, $K = 3$ và $\beta = (1 - \alpha) / 2$.

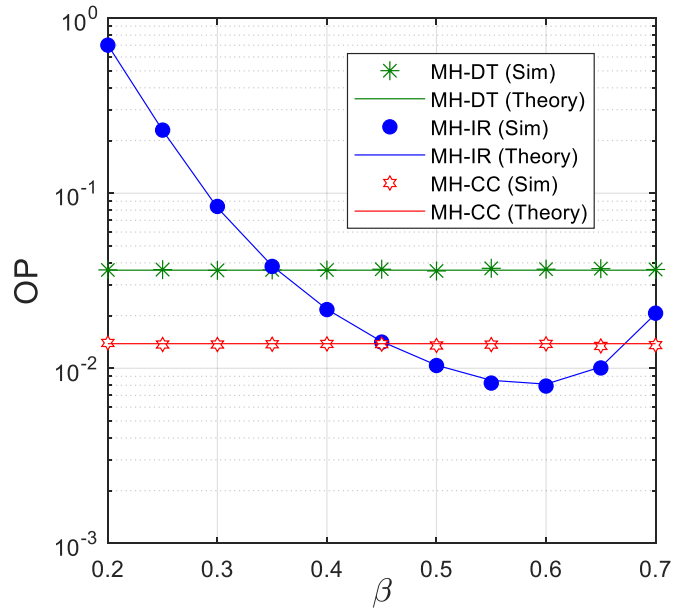
Hình 4.5 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo giá trị α khi $\Delta = 20$ dB và $K = 3$. Hơn nữa, hệ số β trong mô hình MH-IR được thiết kế bởi $\beta = (1 - \alpha) / 2$. Quan sát từ Hình 4.5, ta thấy rằng hệ số α có tác động đáng kể lên giá trị OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC. Thật vậy, khi giá trị α quá nhỏ thì năng lượng thu thập được tại các nút phát thấp, dẫn đến công suất phát của các nút thấp và xác suất dừng của các mô hình lớn. Tuy nhiên, khi giá trị của α quá lớn thì thời gian dành cho việc truyền dữ liệu sẽ thấp, và cũng dẫn đến xác suất dừng của các mô hình lớn. Như được quan sát trong Hình 4.5, ta thấy rằng tồn tại giá trị của α để OP của mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC đạt giá trị thấp

nhất. Cụ thể, OP của mô hình MH-DT nhỏ nhất khi $\alpha = 0.35$, OP của mô hình MH-IR nhỏ nhất khi $\alpha = 0.2$ và OP của mô hình MH-CC nhỏ nhất khi $\alpha = 0.2$. Ta cũng thấy rằng các mô hình MH-CC và MH-IR đạt được giá trị OP thấp hơn MH-DT khi giá trị của α nhỏ hơn 0.35. Cuối cùng, như đã đề cập trong các hình vẽ bên trên, khi $\beta = (1 - \alpha) / 2$, OP của MH-CC luôn thấp hơn OP của mô hình MH-DT.



Hình 4. 6: Xác suất dừng vẽ theo α khi $\Delta = 25$ dB và $K = 4$.

Hình 4.6 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo giá trị α khi $\Delta = 25$ dB và $K = 4$. Tương tự như Hình 4.5, ta thấy rằng tồn tại giá trị của α để xác suất dừng của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC đạt giá trị nhỏ nhất. Trong Hình 4.6, giá trị β trong mô hình MH-IR được cố định bằng 0.4 và 0.5. Một lần nữa, ta có thể thấy rằng việc thiết kế giá trị β là rất quan trọng. Thật vậy, khi $\beta = 0.4$, OP của MH-IR là rất lớn và lớn hơn OP của MH-DT. Ngược lại, khi $\beta = 0.5$, OP của MH-IR là thấp nhất trong tất cả các mô hình. Hơn nữa, khi thay đổi giá trị β , ta cũng thấy giá trị tối ưu của α để OP của mô hình MH-IR cũng thay đổi. Điều này có nghĩa rằng ta cần thiết kế đồng thời các giá trị α và β để mô hình MH-IR đạt hiệu năng tốt nhất.



Hình 4. 7: Xác suất dừng vẽ theo β khi $\Delta = 25$ dB, $K = 3$ và $\alpha = 0.1$.

Hình 4.7 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo giá trị β khi $\Delta = 25$ dB, $K = 3$ và $\alpha = 0.1$. Bởi vì OP của các mô hình MH-DT và MH-CC không phụ thuộc vào giá trị β nên ta có thể quan sát trên hình vẽ OP của các mô hình này là các đường thẳng. Quan sát OP của mô hình MH-IR, ta có thể thấy rằng việc thiết kế giá trị của β phù hợp sẽ giúp mô hình MH-IR đạt được giá trị xác suất dừng tối ưu. Thật vậy, trong Hình 4.7, khi $\beta = 0.6$ thì OP của mô hình MH-IR đạt giá trị thấp nhất.

KẾT LUẬN

Các kết quả đạt được

Luận văn đã nghiên cứu các mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng nguồn năng lượng sóng vô tuyến từ một trạm phát đặt trong mạng. Để nâng cao hiệu năng xác suất dừng, luận văn cũng đã đề xuất triển khai kỹ thuật truyền thông cộng tác tại mỗi chặng để nâng cao sự ổn định của việc chuyển tiếp dữ liệu. Hơn thế nữa, truyền thông cộng tác tăng cường cũng được đề xuất để làm giảm độ phức tạp trong việc xử lý tín hiệu, đồng thời cũng nâng cao hiệu năng cho mạng. Luận văn cũng đã đánh giá chính xác xác suất dừng (OP) của các mô hình MH-DT, MH-CC và MH-IR bằng toán học và mô phỏng Monte Carlo. Các kết quả thu được trong luận văn và những đề xuất thiết kế mạng được tóm tắt như sau:

- Trong điều kiện giới hạn về thời gian trễ, các mô hình chuyển tiếp đa chặng chỉ hoạt động tốt khi số chặng không quá lớn. Hơn nữa, các mô hình MH-IR và MH-CC đạt được hiệu năng OP tốt hơn mô hình MH-DT với số chặng nhỏ và công suất phát đủ lớn.
- Khi thời gian phân bố trong các pha trên mỗi chặng là giống nhau, mô hình MH-CC đạt được giá trị OP thấp hơn mô hình MH-IR. Tuy nhiên, độ chênh lệch giá trị OP của hai mô hình này là không lớn. Hơn nữa, nếu hệ số β được thiết kế phù hợp, mô hình MH-IR sẽ đạt được giá trị OP thấp hơn mô hình MH-CC.
- Hệ số phân chia thời gian cho pha thu thập năng lượng α ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng xác suất dừng. Các kết quả cũng cho thấy rằng giá trị của α cần được thiết kế một cách tối ưu để đạt được hiệu năng OP thấp nhất cho các mô hình MH-DT, MH-CC và MH-IR.
- Trong mô hình MH-IR, các hệ số phân chia thời gian α và β cần được thiết kế đồng thời để tối ưu hiệu năng xác suất dừng cho mô hình.

Hướng phát triển đề tài

Luận văn có thể phát triển theo các hướng sau:

- Xem xét các kênh truyền tổng quát hơn như kênh fading Nakagami-m hay kênh fading Rician, v.v.
- Xem xét môi trường vô tuyến nhận thức, trong đó công suất phát của các nút phát bị ràng buộc theo mức giao thoa tối đa quy định bởi các nút sơ cấp.
- Xem xét mô hình chuyển tiếp đa chặng với các nút chuyển tiếp có nhiều anten, sử dụng các kỹ thuật phân tập phát và thu.

Công bố khoa học

Trong quá trình thực hiện luận văn, Học viên đã công bố các công trình khoa học như sau:

TT	Tên công trình	Thể loại	Năm công bố	Nơi công bố
1	Performance Comparison Between NOMA and OMA Relaying Protocols in Multi-Hop Networks over Nakagami-m Fading Channels under Impact of Hardware Impairments	Bài báo Hội nghị Quốc Tế, https://ieeexplore.ieee.org/document/8958678	2019	IEEE/ACM 23rd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications
2	Nghiên cứu hiệu năng bảo mật mạng vô tuyến nhận thức dạng nền	Báo cáo tạp chí quốc gia	2020	Journal of Science and Technology on

	cộng tác sử dụng mã Fountain	http://jstic.ptit.edu.vn/index.php/jstic/article/view/371		Information and Communications
--	------------------------------	---	--	--------------------------------

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Y. Yang, H. Hu, J. Xu and G. Mao, "Relay technologies for WiMax and LTE-advanced mobile systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 10, pp. 100-105, Oct. 2009.
- [2] T. T. Duy, P. T. D. Ngoc, T. T. Phuong, "Performance Enhancement for Multihop Cognitive DF and AF Relaying Protocols under Joint Impact of Interference and Hardware Noises: NOMA for Primary Network and Best-Path Selection for Secondary Network," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2021, ID 8861725, pp. 1-15, Apr. 2021.
- [3] S. Chu, "Performance of Amplify-and-Forward Cooperative Diversity Networks with Generalized Selection Combining over Nakagami-m Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 5, pp. 634-637, May 2012.
- [4] M. D. Selvaraj and S. R., "Performance of Hybrid Selection and Switch-and-Stay Combining With Decode-and-Forward Relaying," *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 2233-2236, Dec. 2014.
- [5] 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, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [6] D. T. Hung, T. T. Duy, T. T. Phuong, D. Q. Trinh, T. Hanh, "Performance Comparison between Fountain Codes-Based Secure MIMO Protocols with and without Using Non-Orthogonal Multiple Access," *Entropy MDPI*, vol. 21, no. 10, (928), Oct. 2019.
- [7] T. T. Duy, H. N. Vu, T. T. Truc, H. Y. Kong, "Minimum-Energy Cooperative Routing with Equal Gain Combining in Static Wireless Networks," *KICS Winter Conference, Korea*, pp. 206-207, 01/2011.
- [8] B. An, T. T. Duy and H.Y. Kong, "A Cooperative Transmission Strategy using Entropy-based Relay Selection in Mobile Ad-hoc Wireless Sensor Networks with

Rayleigh Fading Environments," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 3, no. 2, pp.147-162, Feb. 2009.

[9] N. T. Anh, T. T. Duy, H. D. Hung, H. D. Hai, N. C. Minh, "Reliability-Security Analysis for Harvest-to-Jam based Multi-hop LEACH Networks under Impact of Hardware Noises," *The 2019 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2019)* , Hanoi, Viet Nam, pp. 174-178 , Oct. 2019.

[10] P. T. Tin, D. T. Hung, N. N. Tan, T. T. Duy, M. Voznak, "Secrecy Performance Enhancement for Underlay Cognitive Radio Networks Employing Cooperative Multi-hop Transmission With and Without Presence of Hardware Impairments," *Entropy MDPI*, vol. 21, no. 2, (217), Feb. 2019.

[11] X. Jiang, C. Zhong, Z. Zhang and G. K. Karagiannidis, "Power Beacon Assisted Wiretap Channels With Jamming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 12, pp. 8353-8367, Dec. 2016.

[12] N. P. Le, "Throughput Analysis of Power-Beacon-Assisted Energy Harvesting Wireless Systems Over Non-Identical Nakagami- $\{m\}$ Fading Channels," in *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 840-843, April 2018.

[13] T. -H. Vu and S. Kim, "Performance Evaluation of Power-Beacon-Assisted Wireless-Powered NOMA IoT-Based Systems," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 14, pp. 11655-11665, July 2021.

[14] W. Xu, W. Chen, Y. Fan, Z. Zhang and X. Shi, "Spectrum efficiency maximization for cooperative power beacon-enabled wireless powered communication networks," *China Communications*, vol. 18, no. 12, pp. 230-251, Dec. 2021.

[15] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian, and E. Cayici, "A survey on sensor networks," *IEEE Commun. Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, 2002.

[16] P. T. Tin, D. T. Hung, N. N. Tan, T. T. Duy, M. Voznak, "Secrecy Performance Enhancement for Underlay Cognitive Radio Networks Employing Cooperative

Multi-hop Transmission With and Without Presence of Hardware Impairments," Entropy MDPI, vol. 21, no. 2, (217), Feb. 2019.

[17] P. M. Nam, T. T. Duy, P. V. Ca, P. N. Son, N. H. An, "Outage Performance of Power Beacon-Aided Multi-Hop Cooperative Cognitive Radio Protocol Under Constraint of Interference and Hardware Noises," Electronics MDPI, vol. 9, no. 6, pp. 1-19, Jun. 2020.

[18] T. T. Duy, T.V. Hieu, T.L. Thanh, P.T.D. Ngoc, V.N.Q. Bao, "Mô hình truyền đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường trong vô tuyến nhận thức dạng nền," Hội thảo Quốc gia 2014 về điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin (ECIT2014), pp. 238-243, Nha Trang, Viet Nam, 09/2014.

[19] T. T. Duy and V.N.Q. Bao, "Performance Analysis of Cooperative-based Multi-hop Transmission Protocols in Underlay Cognitive Radio with Hardware Impairment," VNU Journal of Computer Science and Communication Engineering, vol. 31, no. 2, pp. 15-28, 2015.

[20] P. M. Quang, T. T. Duy and V. N. Q. Bao, "Energy Harvesting-based Spectrum Access Model in Overlay Cognitive Radio," Proc. of ATC 2015, Ho Chi Minh city, Viet Nam, pp. 231 - 236, Oct. 2015.

[21] C. Xu, M. Zheng, W. Liang, H. Yu and Y. C. Liang, "Outage Performance of Underlay Multihop Cognitive Relay Networks With Energy Harvesting," IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 6, pp. 1148 – 1151, 2016.

[22] Trần Văn Hiếu "Đánh giá hiệu năng của giao thức truyền đa chặng cộng tác trong vô tuyến nhận thức dạng nền," Luận Văn Cao Học, Học viện Công nghệ BCVT cơ sở tại TP. HCM, 2014.

[23] D. T. Hung, T. T. Duy, D. Q. Trinh, V. N. Q. Bao and T. Hanh "Security-Reliability Analysis of Power Beacon-Assisted Multi-hop Relaying Networks Exploiting Fountain Codes with Hardware Imperfection," The 2018 International

Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2018) , HCM city, Viet Nam, pp. 354 - 359, Oct. 2018.

[24] Nguyễn Quang Khải, “"Nâng Cao Hiệu Năng Toàn Trình Cho Mạng Chuyển Tiếp Đa Chặng Thu Thập Năng Lượng Sóng Vô Tuyến Bằng Giải Pháp Định Tuyến Cộng Tác," Luận Văn Cao Học, Học viện Công nghệ BCVT cơ sở tại TP. HCM, 2018.

[25] C. E. Perkins and E. M. Royer, “Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing,” in Proc. of WMCSA99, pp. 90-100, Feb. 1999.

[26] B. Johnson and D. A. Maltz, “Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks,” Mobile Computing, vol. 353, pp.153-181, Kluwer Academic Publishers, 1996.

[27] I. Gradshteyn, I. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*, New York, USA, 2007 (Academic Press (7th ed.)).

BẢN CAM ĐOAN

Tôi cam đoan đã thực hiện việc kiểm tra mức độ tương đồng nội dung luận văn thông qua phần mềm DoIT một cách trung thực và đạt kết quả mức độ tương đồng 8% toàn bộ nội dung luận văn. Bản luận văn kiểm tra qua phần mềm DoIT là bản cứng luận văn đã nộp để bảo vệ trước hội đồng. Nếu sai tôi xin chịu các hình thức kỷ luật theo quy định hiện hành của Học viện.

Tp. HCM, ngày 10 tháng 12 năm 2021

HỌC VIÊN CAO HỌC

NGUYỄN VĂN HIỀN



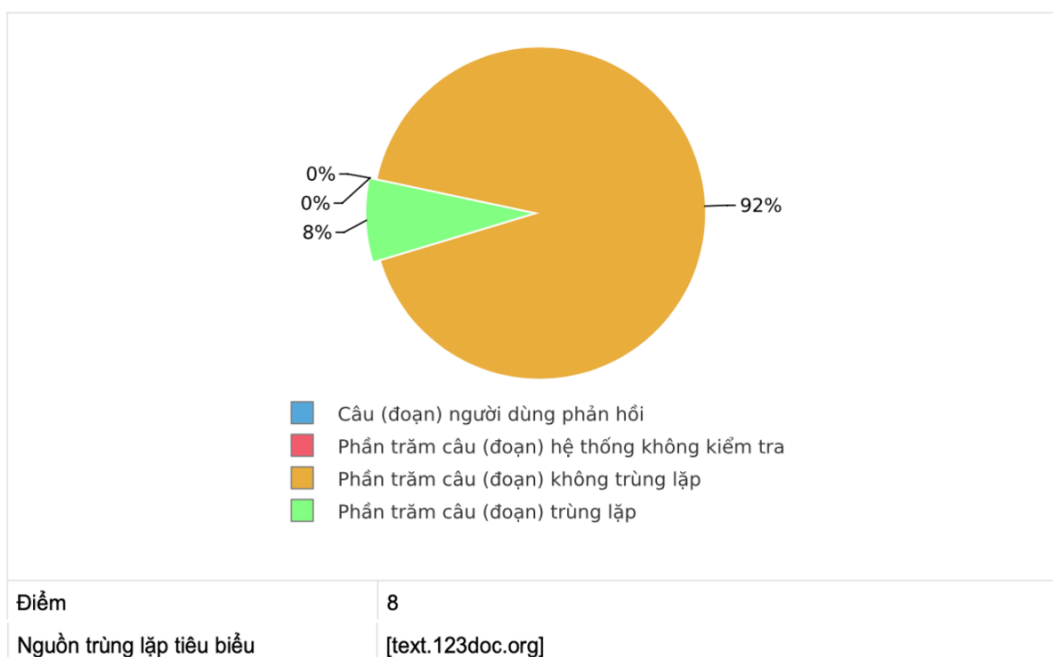
Hệ thống hỗ trợ nâng cao chất lượng tài liệu

KẾT QUẢ KIỂM TRA TRÙNG LẬP TÀI LIỆU

THÔNG TIN TÀI LIỆU

Tác giả	Nguyễn Văn Hiền
Tên tài liệu	PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG MẠNG CHUYÊN TIẾP ĐA CHẶNG SỬ DỤNG NGUỒN NĂNG LƯỢNG SỐNG VÔ TUYẾN VÀ KỸ THUẬT TRUYỀN THÔNG CỘNG TÁC TĂNG CƯỜNG TRÊN MỖI CHẶNG
Thời gian kiểm tra	10-12-2021, 04:41:48
Thời gian tạo báo cáo	10-12-2021, 04:42:47

KẾT QUẢ KIỂM TRA TRÙNG LẬP



HỌC VIÊN

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC

NGUYỄN VĂN HIỀN

TS. TRẦN TRUNG DUY