

**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

---



**NGUYỄN VĂN HIỀN**

**PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG MẠNG CHUYỂN 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**

**TÓM TẮT LUẬN VĂN THẠC SĨ**

**TP. HỒ CHÍ MINH – 2021**

Luận văn được hoàn thành tại:  
**HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG**

Người hướng dẫn khoa học: **TS. TRẦN TRUNG DUY**

Phản biện 1: .....

Phản biện 2: .....

Luận văn sẽ được bảo vệ trước Hội đồng chấm luận văn thạc sĩ tại  
Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

Vào lúc: ..... giờ.....ngày.....tháng.....năm.....

Có thể tìm hiểu luận văn tại:

- Thư viện của Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

## MỞ ĐẦU

### 1. Lý do chọn đề tài

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), mạng adhoc di động (Mobile adhoc networks),... các nút mạng bị giới hạn về năng lượng, kích thước, khả năng lưu trữ và tính toán. Do đó, chuyên tiếp đường như là phương tiện không thể thiếu trong các loại hình mạng này.

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)) 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 chuyên tiếp đa chặng sử dụng kỹ thuật RF-EH từ một trạm phát sóng vô tuyến trong mạng. Hơn nữa, mô hình chuyên 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.

## 2. Mục tiêu nghiên cứu

- Đề xuất mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng RF-EH từ trạm phát sóng vô tuyến để chuyển tiếp dữ liệu. Hơn nữa, truyền thông cộng tác tăng cường được áp dụng tại mỗi chặng để nâng cao hiệu năng của mạng.
- Đánh giá xác suất dừng toàn trình và/hoặc thông lượng toàn trình của mô hình đề xuất trên kênh fading Rayleigh để thấy được những ưu điểm nổi bật của mô hình đề xuất.
- Mô hình đề xuất đạt được hiệu năng xác suất dừng (OP) tốt hơn mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường.

## 3. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu

### a) Đối tượng nghiên cứu:

#### **Đối tượng 1:** Mạng chuyển tiếp đa chặng

Từ sự mô tả mô hình hệ thống ở trên, đối tượng đầu tiên mà đề tài nghiên cứu đó là mạng chuyển tiếp đa chặng. Mạng chuyển tiếp đa chặng sẽ là mô hình mạng phổ biến trong tương lai gần (ví dụ mạng cảm biến, mạng IoT, mạng ad-hoc, v.v.), trong đó, các nút mạng bị giới hạn về kích thước, về năng lượng, về khả năng lưu trữ và tính toán. Do đó, để truyền thông ở khoảng cách xa, chuyển tiếp hay chuyển tiếp đa chặng là một giải pháp hiệu quả và đầy tiềm năng.

#### **Đối tượng 2:** Thu thập năng lượng sóng vô tuyến

Do các nút mạng 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.

#### **Đối tượng 3:** Truyền thông cộng tác tăng cường trên mỗi chặng

Để nâng cao độ tin cậy cho việc truyền dữ liệu trên mỗi chặng, truyền thông cộng tác tăng cường được sử dụng trên mỗi chặng.

**Đối tượng 4:** So sánh hiệu năng với mô hình chuyển tiếp thông thường. Mục tiêu chính của đề tài là nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu khi so sánh với mô hình chuyển tiếp đa chặng truyền thống.

**b) Phạm vi nghiên cứu:**

Các phạm vi nghiên cứu của đề tài là:

- Nghiên cứu mạng chuyển tiếp đa chặng giải mã chuyển tiếp (DF: Decode and Forward) hoạt động trên kênh fading Rayleigh
- Nghiên cứu kỹ thuật thu thập năng lượng sóng vô tuyến: các nút mạng thu thập năng lượng từ trạm phát sóng vô tuyến để truyền dữ liệu
- Nghiên cứu kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường áp dụng tại mỗi chặng
- Đánh giá hiệu năng xác suất dừng hoặc thông lượng toàn trình của mô hình đề xuất.

**4. Phương pháp nghiên cứu:**

- Khảo sát các nghiên cứu liên quan và đánh giá ưu và nhược điểm của các phương pháp này.
- Dựa trên mô hình toán để đánh giá hiệu năng của mô hình đề xuất.
- Sử dụng mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng tính chính xác của các biểu thức toán học.

**5. Cấu trúc nội dung luận văn**

CHƯƠNG 1: LÝ THUYẾT TỔNG QUAN

CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH HỆ THỐNG

CHƯƠNG 3: PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG

CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ LÝ THUYẾT

## CHƯƠNG 1: LÝ THUYẾT TỔNG QUAN

*Tóm tắt:* Chương này giới thiệu những kiến thức cơ bản liên quan đến luận văn đó là những khái niệm cơ bản về mạng vô tuyến chuyển tiếp, truyền thông công tác, chuyển tiếp đa chặng và thu thập năng lượng sóng vô tuyến.

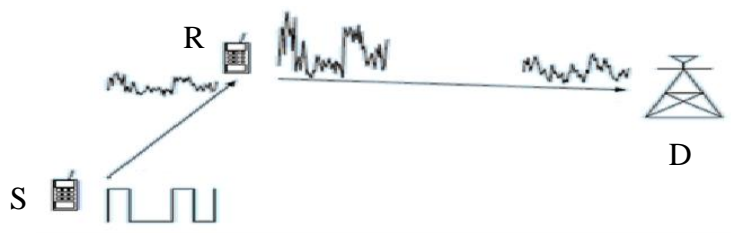
### 1.1. Giới thiệu về mạng vô tuyến chuyển tiếp

#### 1.1.1. Khái niệm về mạng chuyển tiếp

Mạng chuyển tiếp là sự kết hợp của các liên kết ngắn 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). Nút chuyển tiếp có thể sử dụng kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp (Amplify-and-Forward - AF) hoặc kỹ thuật giải mã chuyển tiếp (Decode-and-Forward - DF).

#### 1.1.2. Kỹ thuật khuếch đại chuyển tiếp

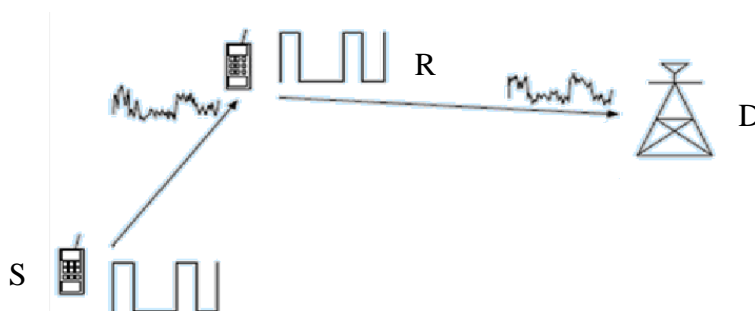


**Hình 1. 1: Kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp AF.**

Khuếch đại và chuyển tiếp hay còn gọi chuyển tiếp tương tự (analog relaying) 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.

### 1.1.3. Kỹ thuật giải mã chuyển tiếp

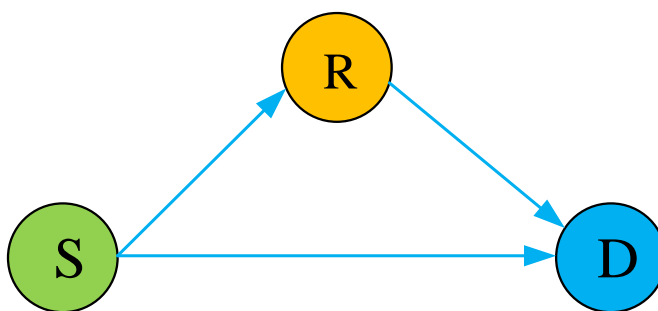
Kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp DF còn gọi là chuyển tiếp số (Digital Relaying). Thuật toán giải mã và chuyển tiếp được mô tả ngắn gọn như sau: trong khoảng thời gian thứ nhất, nút nguồn phát tín hiệu của nó đến nút đích và nút chuyển tiếp. Trong khoảng thời gian thứ hai, nút chuyển tiếp thực hiện giải 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.

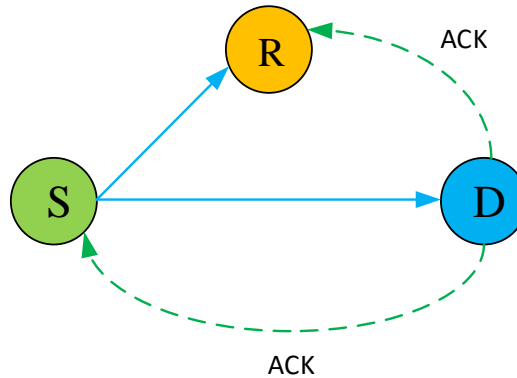
### 1.2. Giới thiệu về truyền thông cộng tác

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.



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

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.



**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.**

### 1.3. Chuyển tiếp đa chặng

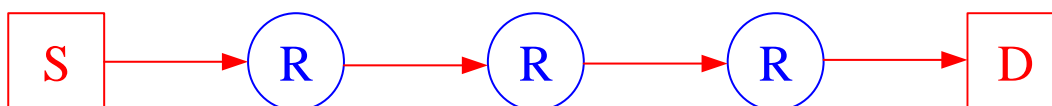
#### 1.3.1. Giới thiệu về kỹ thuật chuyển tiếp đa chặng

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), và chuyển tiếp đa chặng (Multi-hop relaying). 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).

#### 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.





**Hình 1. 5: 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**

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 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.

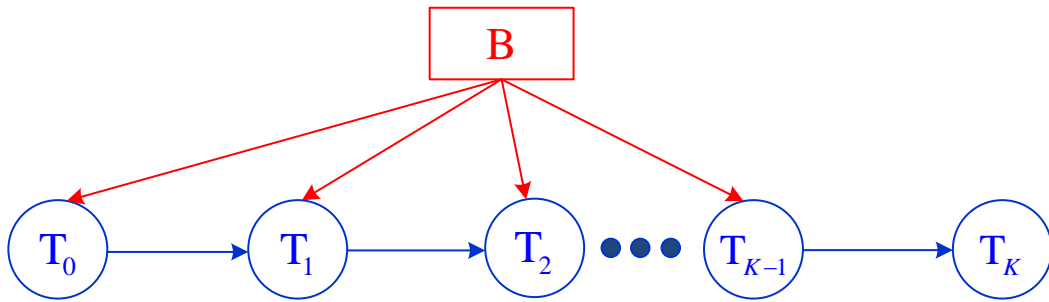


**Hình 1. 6: Thu thập năng lượng sóng vô tuyến.**

## CHƯƠNG 2: MÔ HÌNH HỆ THỐNG

**Tóm tắt:** Chương này giới thiệu ba mô hình chuyển tiếp đa chặng là Mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường (MH-DT), Mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác (MH-CC) và Mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường (MH-IR).

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

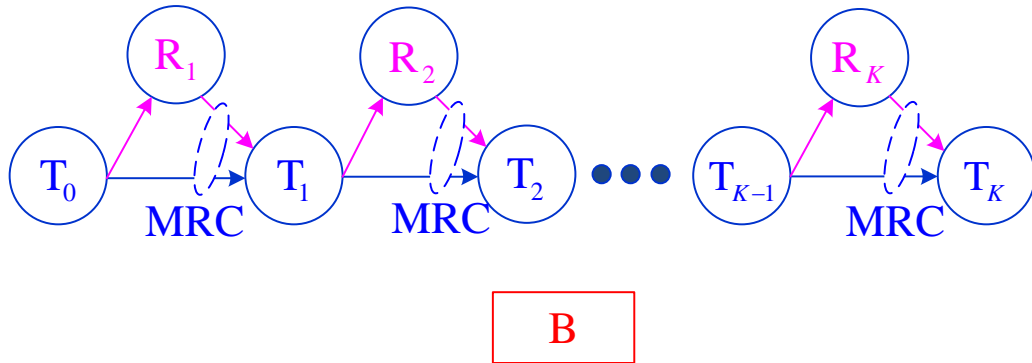


**Hình 2. 1:** Mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường sử dụng nguồn năng lượng sóng vô tuyến.

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:  $T_1, T_2, \dots, T_{K-1}$ .

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.

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



**Hình 2. 2: Mô hình MH-CC.**

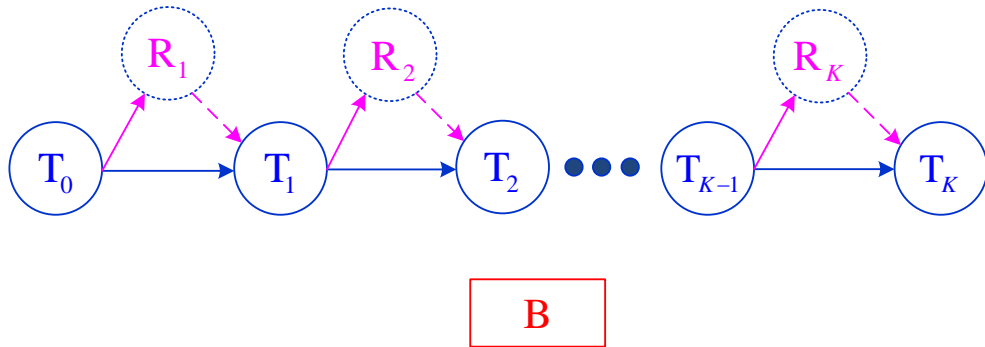
Để nâng cao hiệu quả chuyển tiếp dữ liệu tại từng chặng, truyền thông cộng tác được sử dụng tại mỗi chặng. Mô hình này có tên là MH-CC (Multi-Hop relaying using Cooperative Communication).

Hình 2.4 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.

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. 3: 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  $R_k$  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.

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 chuyển 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

*Tóm tắt:* Chương này đánh giá hiệu năng xác suất dừng OP (Outage Probability) của các mô hình nghiên cứu MH-DT, MH-IR và MH-CC trên mô hình kênh truyền fading Rayleigh.

### 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  $\varphi_{UV}$  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  $\varphi_{UV}$  được viết như sau:

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

với  $\Omega_{UV}$  là các thông số đặc trưng của  $\varphi_{UV}$ .

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:

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

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  $Z \in \{DT, IR, CC\}$ , 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:

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

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

### 3.3. OP của mô hình MH-DT

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:

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

với  $P_{1,k}^{\text{MH-IR}}$  là xác suất mà cả hai nút  $\text{T}_k$  và  $\text{R}_k$  đều không thể giải mã thành công dữ liệu nhận được từ nút  $\text{T}_{k-1}$  nên sự truyền dữ liệu bị dừng, và  $P_{2,k}^{\text{MH-IR}}$  là xác suất mà nút  $\text{T}_k$  không thể giải mã thành công dữ liệu nhận được từ nút  $\text{T}_{k-1}$  và nút chuyển tiếp  $\text{R}_k$  lại giải mã thành công, nhưng sự truyền dữ liệu từ  $\text{R}_k$  về  $\text{T}_k$  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:

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

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:

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

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:

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

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

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

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

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

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:

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

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:

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

với

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

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



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

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

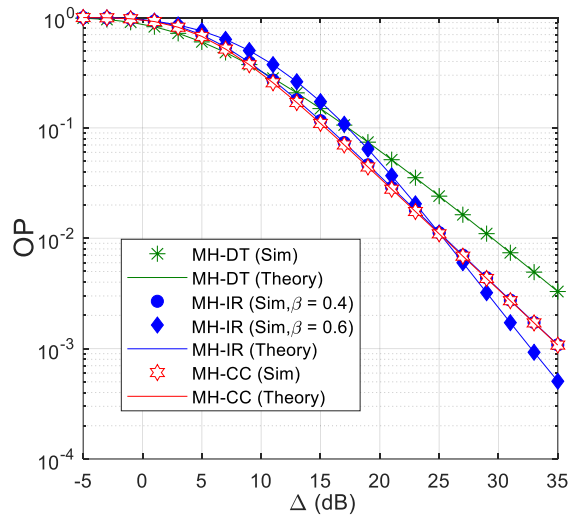
Công thức tính chính xác  $\Pr(C_{T_{k-1}R_k T_k}^{\text{MRC}} < C_{\text{th}})$  như sau:

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

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.

## CHƯƠNG 4: KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ LÝ THUYẾT

*Tóm tắt:* Chương này 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.



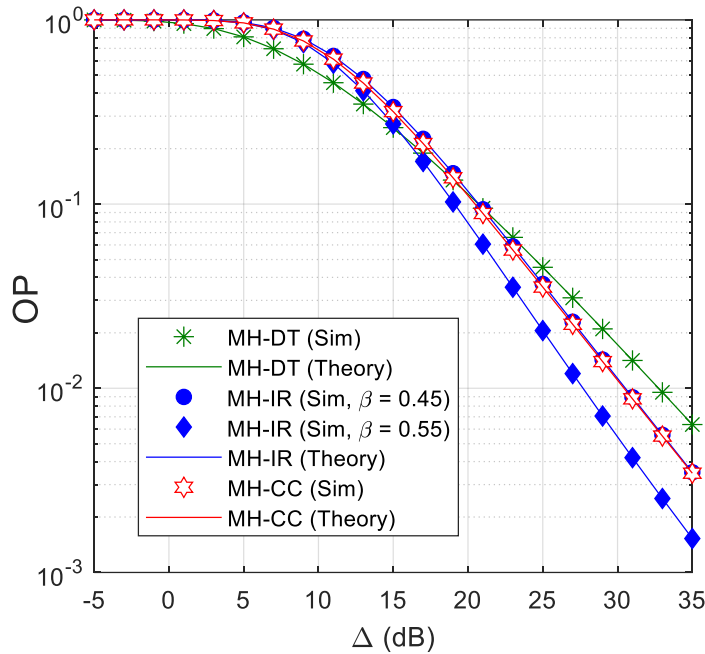
**Hình 4. 1:** Xác suất dừng vẽ theo  $\Delta$  (dB) khi  $K = 3$  và  $\alpha = 0.2$ .

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  $\Delta$  (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 ( $\alpha = 0.2$ ).

### Nhận xét:

Hình 4.1 cho thấy OP của mô hình MH-IR và MH-CC cao hơn mô hình MH-DT khi giá trị  $\Delta$  thấp. Điều này cho thấy việc sử dụng kỹ thuật truyền thông cộng tác sẽ không hiệu quả khi  $\Delta$  thấp. Khi giá trị của  $\Delta$  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  $\Delta$  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  $\beta$  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  $\Delta$  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.

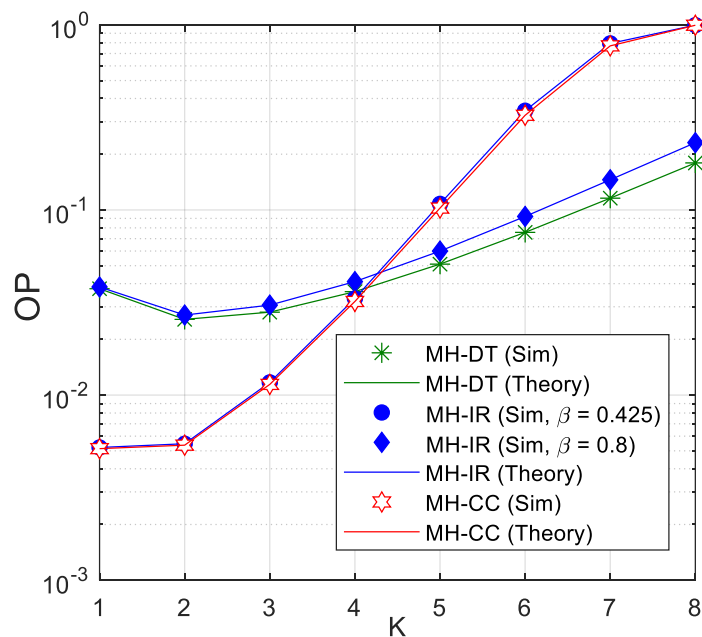


**Hình 4. 2: Xác suất dừng vẽ theo  $\Delta$  (dB) khi  $K = 4$  và  $\alpha = 0.1$ .**

Hình 4.2 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo tỷ số SNR phát  $\Delta$  (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 ( $\alpha = 0.1$ ).

**Nhận xét:**

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  $\Delta$  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  $\Delta$  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  $\beta$  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.



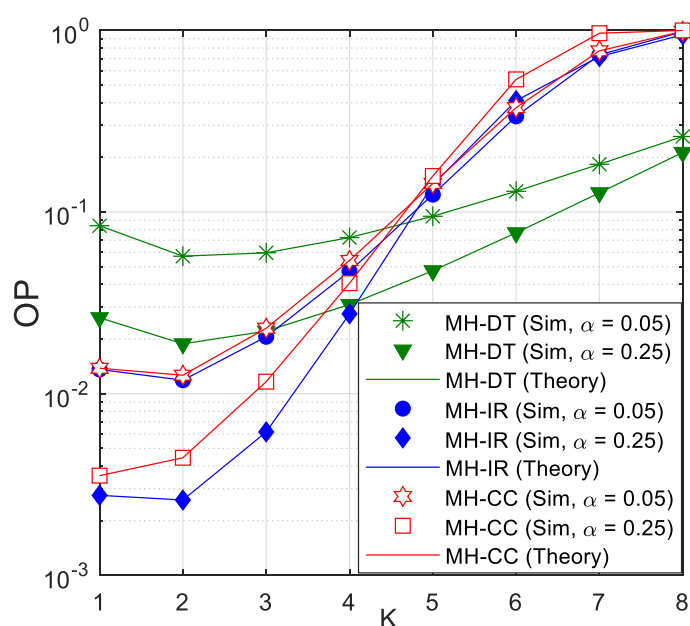
**Hình 4.3:** Xác suất dừng vẽ theo  $K$  khi  $\Delta = 25$  dB và  $\alpha = 0.15$ .

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  $\alpha = 0.15$ .

#### Nhận xét:

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  $\beta$  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.



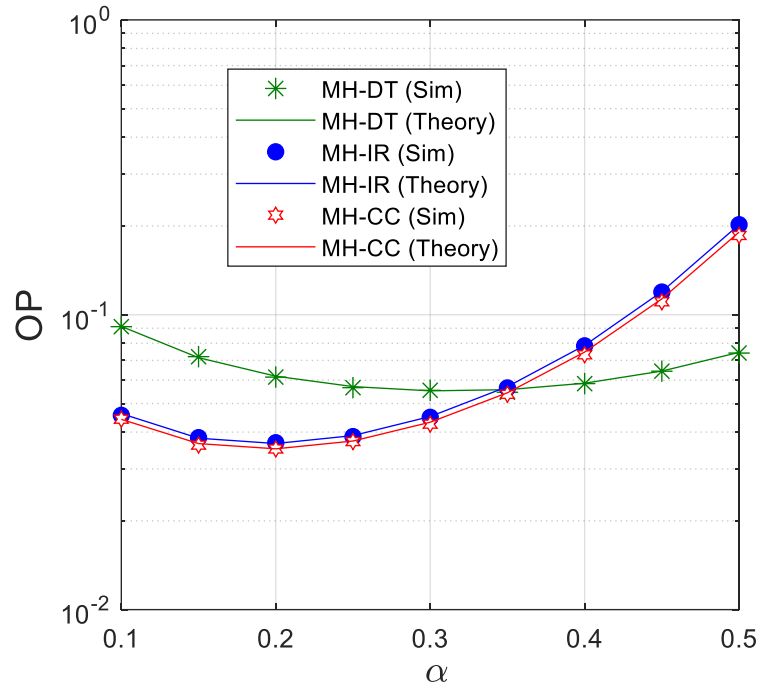
**Hình 4. 4:** Xác suất dừng vẽ theo  $K$  khi  $\Delta = 25$  dB và  $\beta = 0.5$ .

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  $\beta = 0.5$ .

#### Nhận xét:

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  $\alpha$  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  $\beta$  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.



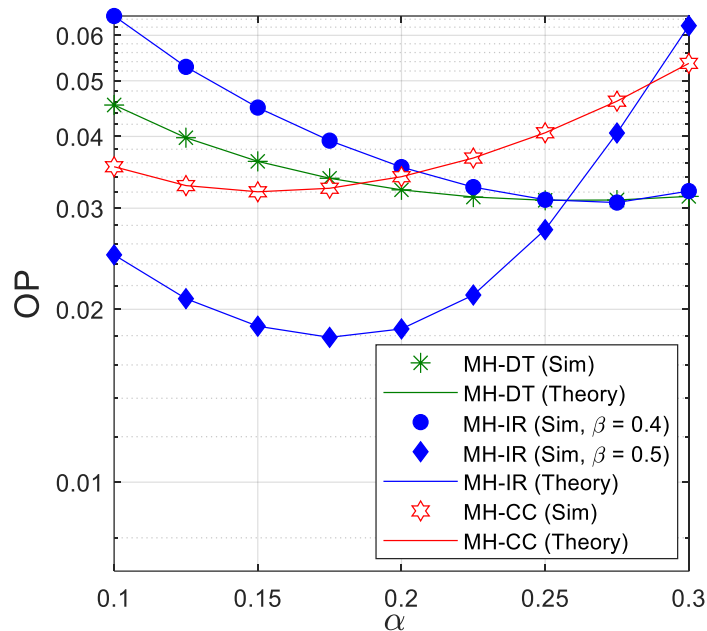
**Hình 4. 5:** Xác suất dừng vẽ theo  $\alpha$  khi  $\Delta = 20$  dB,  $K = 3$  và  $\beta = (1 - \alpha) / 2$ .

Hình 4.5 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo giá trị  $\alpha$  khi  $\Delta = 20$  dB và  $K = 3$ . Hơn nữa, hệ số  $\beta$  trong mô hình MH-IR được thiết kế bởi  $\beta = (1 - \alpha) / 2$ .

#### **Nhận xét:**

Quan sát từ Hình 4.5, ta thấy rằng hệ số  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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  $\alpha$  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.



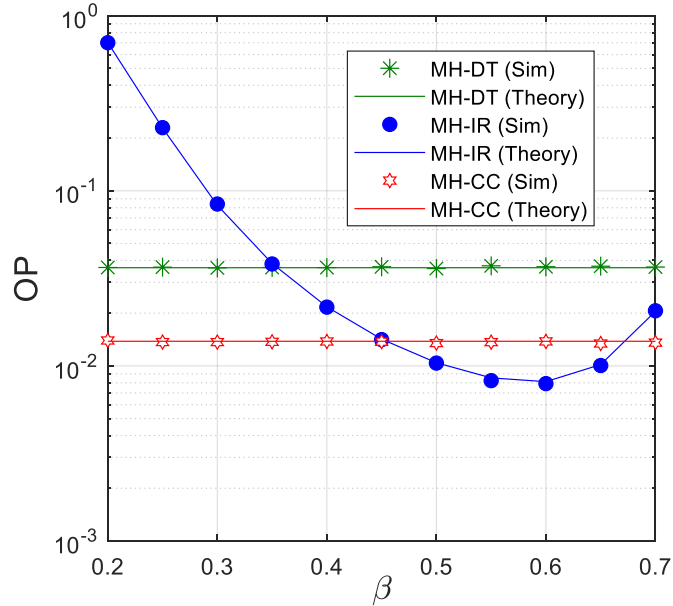
**Hình 4. 6:** Xác suất dừng vẽ theo  $\alpha$  khi  $\Delta = 25$  dB và  $K = 4$ .

Hình 4.6 vẽ xác suất dừng OP của các mô hình MH-DT, MH-IR và MH-CC theo giá trị  $\alpha$  khi  $\Delta = 25$  dB và  $K = 4$ .

#### **Nhận xét:**

Tương tự như Hình 4.5, ta thấy rằng tồn tại giá trị của  $\alpha$  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  $\beta$  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  $\beta$  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  $\beta$ , ta cũng thấy giá trị tối ưu của  $\alpha$  để OP của mô hình MH-IR cũng thay đổi. Điều này có nghĩa rằng ta cần thiết kế đồng thời các giá trị  $\alpha$  và  $\beta$  để mô hình MH-IR đạt hiệu năng tốt nhất.



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

#### **Nhận xét:**

Bởi vì OP của các mô hình MH-DT và MH-CC không phụ thuộc vào giá trị  $\beta$  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  $\beta$  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

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  $\beta$  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  $\alpha$  ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng xác suất dừng. Các kết quả cũng cho thấy rằng giá trị của  $\alpha$  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  $\alpha$  và  $\beta$  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.