

NGHIÊN CỨU MẠNG CHUYỂN TIẾP ĐA CHẶNG THU THẬP NĂNG LƯỢNG SỬ DỤNG TRUYỀN THÔNG CỘNG TÁC TĂNG CƯỜNG VÀ CHỌN LỰA NÚT ĐƠN TRÌNH

Ngô Hoàng Ân^{**}, Nguyễn Văn Hiền⁺, Đỗ Văn Việt Em⁺, Nguyễn Trung Hiếu⁺

^{*} Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh (IUH)

[#] Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP. Hồ Chí Minh (HUFI)

⁺ Học Viện Công nghệ Bưu Chính Viễn Thông

Tóm tắt— Công trình này đề xuất mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng nguồn năng lượng vô tuyến và truyền thông cộng tác tại mỗi chặng. Trong mô hình đề xuất, các nút phát phải thu thập năng lượng từ các trạm phát sóng vô tuyến và sử dụng nguồn năng lượng này để truyền dữ liệu. Đề nâng cao hiệu năng cho mô hình đề xuất, công trình này áp dụng truyền thông cộng tác tăng cường trên mỗi chặng. Hơn nữa, kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình tổng quát cũng sẽ được nghiên cứu. Chúng tôi đưa ra các công thức dạng tường minh đánh giá chính xác suất dừng toàn trình cho mô hình đề xuất trên kênh fading Rayleigh. Đồng thời, chúng tôi thực hiện mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng các công thức đưa ra.

Từ khóa—Thu thập năng lượng sóng vô tuyến, truyền thông cộng tác tăng cường, chuyển tiếp đa chặng, chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình, xác suất dừng.

I. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, sự phát triển của mạng IoTs (Internet of Things)/WSNs (Wireless Sensor Networks) đã thu hút rất nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước. Các vấn đề được đặc biệt quan tâm là nâng cao tốc độ truyền dữ liệu, mở rộng vùng phủ sóng, và bài toán hiệu quả năng lượng. Mạng IoTs/WSNs được dự báo sẽ sử dụng thiết bị với mật độ dày đặc, dùng dải băng tần cao hứa hẹn đạt được tốc độ truyền dữ liệu lên đến hàng chục Gbps. Tuy nhiên, một vấn đề được đặc biệt lưu tâm, đó là việc sử dụng dải tần số cao sẽ dẫn đến việc tín hiệu bị suy giảm nghiêm trọng. Điều này sẽ làm cho khoảng cách truyền trực tiếp từ nguồn tới đích sẽ bị giới hạn. Để giải quyết vấn đề mở rộng vùng phủ đồng thời nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu, các tác giả trong các công trình [1-4] đã nghiên cứu kỹ thuật chuyển tiếp đa chặng (multi-hop relay) sử dụng các nút trung gian chuyển tiếp dữ liệu ở khoảng giữa nút nguồn và nút đích. Nút chuyển tiếp có thể sử dụng kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp (AF: Amplify and Forward) [5, 6] hoặc kỹ thuật giải mã chuyển tiếp (DF: Decode and Forward) [7, 8]. Trong kỹ thuật DF,

nút chuyển tiếp sẽ tiếp nhận tín hiệu từ nút nguồn hoặc nút chuyển tiếp ở chặng trước, thực hiện giải mã tín hiệu (loại bỏ nhiễu), sau đó thực hiện mã hóa lại rồi gửi tín hiệu đến nút kế tiếp. Thủ tục DF giúp nâng cao độ tin cậy cho quá trình truyền dữ liệu trong mạng vì nhiễu được loại bỏ ngay sau mỗi chặng. Tuy nhiên, thủ tục này được thực hiện tương đối phức tạp tại nút chuyển tiếp và một khi số lượng nút chuyển tiếp tăng lên với số lượng lớn sẽ gây ra độ trễ đáng kể cho hệ thống. Ngược lại, nút chuyển tiếp trong kỹ thuật AF chỉ đơn giản khuếch đại tín hiệu nhận được từ nguồn rồi chuyển đến nút liền kề. Với kỹ thuật AF, tín hiệu được khuếch đại tại các nút chuyển tiếp để bù vào sự suy giảm của tín hiệu sau mỗi chặng nên khoảng cách truyền dẫn từ nguồn tới đích sẽ được mở rộng. Mặc dù kỹ thuật AF thực hiện nhanh gọn nhưng với kỹ thuật này, nút chuyển tiếp sẽ thực hiện khuếch đại cả tín hiệu mong muốn cùng với nhiễu kênh truyền, do vậy các loại nhiễu không mong muốn cũng được tăng cường và chuyển đến nút đích. Khi đó, nút đích đòi hỏi phải có độ nhạy thu lớn và cần sử dụng các kỹ thuật loại bỏ nhiễu, cũng như tăng độ lợi phân tập thu. Trong mạng chuyển tiếp đa chặng, các loại nhiễu, mà trong đó phải nói đến nhiễu đồng kênh (Co-channel Interference) và fading kênh truyền (như fading Rayleigh) có ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng tín hiệu thu cũng như hiệu năng toàn tuyến của mạng. Đề nâng cao hiệu năng cho mạng chuyển tiếp đa chặng dưới sự ảnh hưởng của fading kênh truyền, các tác giả trong các công trình [9, 10] đề xuất kỹ thuật chọn lựa tuyến có tỷ số SNR (Signal-to-Noise Ratio) hoặc SINR (Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio) tức thời toàn trình tốt nhất. Tuy nhiên, đạt được các giá trị SNR và SINR toàn trình là một bài toán quá phức tạp. Hơn nữa, khi số tuyến giữa nguồn và đích lớn, mô hình chọn tuyến tốt nhất trong [9, 10] tiêu tốn quá nhiều năng lượng, đồng thời thời gian trễ lớn nên việc thực thi càng khó khả thi. Nhóm các công trình [11-14] đề xuất phương án chọn lựa nút chuyển tiếp tốt nhất tại mỗi chặng, trong đó các nút gần nhau hình thành những cụm nút (cluster). Việc chọn lựa nút chuyển tiếp tại mỗi chặng sẽ nâng cao sự tin cậy của việc truyền dữ liệu từ nguồn đến đích. Nhóm các công trình [15, 16] áp dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng cho mạng chuyển tiếp đa chặng. Việc sử dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng đơn giản hơn việc sử

Tác giả liên hệ: Ngô Hoàng Ân,

Email: anhnh@hufi.edu.vn

Đến tòa soạn: 12/2022, chỉnh sửa: 2/2023, chấp nhận đăng: 3/2023.

dụng truyền thông cộng tác trên tuyến như trong [9, 10] hay việc tổ chức mạng dưới dạng cụm như trong [11-14]. Thật vậy, công trình [15] sử dụng nút chuyển tiếp ở ngoài tuyến để thực hiện kỹ thuật truyền thông cộng tác, trong khi công trình [16] áp dụng kỹ thuật thông cộng tác tăng cường (Incremental Cooperative Communication) tại mỗi chặng nhằm đơn giản hóa việc thực hiện, cũng như nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần. Khác với các mô hình chuyển tiếp sử dụng nút chuyển tiếp như đã đề cập ở trên, các công trình [17-19] nghiên cứu mô hình chuyển tiếp sử dụng bề mặt phản xạ thông minh tự cấu hình (RIS: Reconfigurable Intelligent Surface). RIS sử dụng các phần tử thông minh để hiệu chỉnh tối ưu biên độ và góc pha nhằm đạt được SNR tối đa tại thiết bị thu. Công trình [17] xem xét tác động của nhiễu đồng kênh (CCI: co-channel interference) lên hiệu năng của mạng chuyển tiếp với sự hỗ trợ RIS. Tác giả trong [18] nghiên cứu mạng truyền thông gói tin ngắn (Short Packet Communications) sử dụng RIS, trong môi trường vô tuyến nhận thức dạng nền (Underlay Cognitive Radio). Các tác giả trong [19] nghiên cứu mô hình chuyển tiếp đa chặng kết hợp giữa RIS và các nút chuyển tiếp AF. Ngoài hai kỹ thuật chuyển tiếp kể trên, công nghệ chuyển tiếp sử dụng quang vô tuyến (FSO: Free-Space Optical) hoặc kết hợp giữa FSO và vô tuyến [20] cũng đang là những công nghệ đầy tiềm năng trong tương lai gần.

Một trong những vấn đề cũng cần lưu ý đó là bài toán cung cấp năng lượng. Trong thời gian gần đây, kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến (RF-EH: Radio-Frequency Energy Harvesting) cũng đang thu hút sự quan tâm đặc biệt của các nhà nghiên cứu. Với kỹ thuật này, các thiết bị vô tuyến có thể thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến trong môi trường truyền dẫn. Khác với các phương pháp thu thập năng lượng khác như năng lượng mặt trời, năng lượng gió, ... 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, và 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 các tài liệu [21-25], một hoặc nhiều trạm phát sóng vô tuyến được đặt trong mạng để cung cấp năng lượng cho các thiết bị. Sau khi thu thập năng lượng, các thiết bị phát vô tuyến sẽ sử dụng nguồn năng lượng này để phát dữ liệu. Các tài liệu [26-31] đã áp dụng các kỹ thuật truyền thông cộng tác cho mạng chuyển tiếp đa chặng nhằm nâng cao hiệu năng cho mạng chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật RF-EH. Với các kết quả đạt được trong các tài liệu [26-31], một lần nữa cho ta thấy ưu điểm của truyền thông cộng tác trong việc nâng cao chất lượng và độ tin cậy của của mạng.

Công trình này đề xuất mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng nguồn năng lượng vô tuyến và truyền thông cộng tác tại mỗi chặng. Trong mô hình đề xuất, các nút phát phải thu thập năng lượng từ các trạm phát sóng vô tuyến và sử dụng nguồn năng lượng này để truyền dữ liệu. Để nâng cao hiệu năng cho mô hình đề xuất, công trình này đề xuất áp dụng truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng. Hơn nữa, kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình tổng quát cũng sẽ được nghiên cứu, ở đây nút chuyển tiếp tốt thứ “Q” sẽ được chọn khi nút chuyển tiếp tốt nhất, thứ nhì, ..., tốt

thứ “Q-1” không sẵn sàng giúp đỡ. Những đóng góp mới và điểm khác so với các công bố trước đây sẽ được tóm tắt như sau:

- Khác với các công trình [21], [23], chúng tôi áp dụng kỹ thuật truyền thông cộng tác tại mỗi chặng để nâng cao hiệu năng cho mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng nguồn năng lượng sóng vô tuyến.

- Các công trình [26], [28] và [8] nghiên cứu mô hình chuyển tiếp đa chặng trong mạng dạng cụm và đề xuất phương án chọn lựa nút chuyển tiếp tốt nhất tại mỗi chặng. Trong khi đó, công trình [6] đề xuất mô hình chuyển tiếp cộng tác trên tuyến được chọn giữa nguồn và đích. Như đã đề cập ở trên, việc sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng là điểm khác biệt chính giữa bài báo này và các nghiên cứu liên quan [26-29].

- Bài báo này được phát triển từ các công trình trước đây [30-31] của nhóm nghiên cứu. Cụ thể, công trình [30] nghiên cứu mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng nguồn năng lượng vô tuyến và truyền thông cộng tác tại mỗi chặng. Tuy nhiên, trong [30], mô hình hệ thống chỉ bao gồm 01 nguồn phát năng lượng vô tuyến và 01 nút chuyển tiếp đơn được sử dụng trên mỗi chặng. Công trình [31] tổng quát hơn công trình [30] khi đề xuất mô hình chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình (Partial Relay Selection) và truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng. Mô hình đề xuất trong bài báo này là một trường hợp tổng quát của [30] và [31]. Thật vậy, chúng tôi nghiên cứu trường hợp chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình tốt thứ “Q” và mô hình nhiều nguồn phát năng lượng vô tuyến.

- Bài báo này đưa ra các công thức dạng tường minh (closed form) đánh giá chính xác OP cho mô hình đề xuất trên kênh fading Rayleigh. Bài báo cũng đưa ra mô phỏng máy tính để kiểm chứng tính chính xác của các công thức toán học.

- Kết quả trong bài báo cho thấy các kết quả mô phỏng phù hợp với các kết quả lý thuyết. Các kết quả cũng cho thấy mô hình đề xuất đạt được hiệu năng OP tốt hơn mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường.

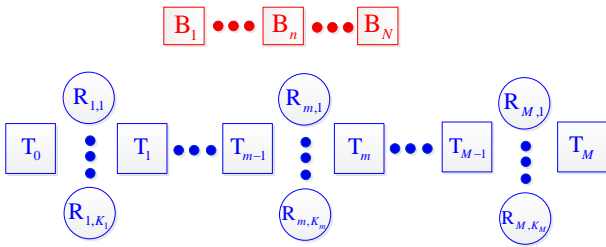
- Bài báo cũng nghiên cứu kỹ sự tác động của số chặng giữa nguồn và đích, số nguồn phát năng lượng vô tuyến, số nút chuyển tiếp tại mỗi chặng, cũng như thời gian dành cho việc thu thập năng lượng lên hiệu năng OP của mô hình đề xuất.

Phần còn lại của bài báo này được cấu trúc như sau: Phần II trình bày nguyên lý hoạt động của mô hình đề xuất, và Phần III đánh giá hiệu năng OP toàn trình trên kênh fading Rayleigh. Phần IV đưa ra các kết quả phân tích lý thuyết được kiểm chứng bằng mô phỏng Monte Carlo. Cuối cùng, các kết luận và hướng phát triển đề tài được thảo luận trong Phần V.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Hình 1 mô tả mô hình hệ thống của mô hình đề xuất, trong đó, nút nguồn (T_0) gửi dữ liệu đến nút đích (T_M) sử dụng chuyển tiếp đa chặng DF, dựa vào tuyến đã được thiết lập trước: $T_0 \rightarrow T_1 \rightarrow \dots T_{M-1} \rightarrow T_M$. Sự thiết lập tuyến này được thực hiện tại lớp mạng theo các giao thức sẵn có, ví dụ AODV (Ad-Hoc On-Demand Distance Vector) [32]. Để nâng cao độ tin cậy chuyển tiếp dữ liệu,

chuyển tiếp tăng cường được áp dụng trên mỗi chặng, sử dụng các nút chuyển tiếp bên ngoài tuyến. Ta đặt tên cho mô hình đề xuất là MHR-IR (Multi-Hop Relaying using Incremental Relaying). Ở chặng thứ m ($m=1,2,\dots,M$), giả sử có K_m nút chuyển tiếp ngoài được đặt tên là $R_{m,1}, R_{m,2}, \dots, R_{m,K_m}$. Trong K_m nút này, sử dụng kỹ thuật chọn lựa đơn trình, một nút chuyển tiếp sẽ được chọn để phối hợp với các nút T_{m-1} và T_m . Ta ký hiệu R_m là nút chuyển tiếp được chọn, ở đây, $R_m \in \{R_{m,1}, R_{m,2}, \dots, R_{m,K_m}\}$. Tất cả các nút phát sẽ phải thu thập năng lượng vô tuyến từ N trạm phát vô tuyến, được đặt tên là B_1, B_2, \dots, B_N . Để tránh nhiễu giữa các hoạt động truyền dữ liệu và thu thập năng lượng, tần số sử dụng cho việc phát năng lượng vô tuyến sẽ khác với tần số truyền dữ liệu.



Hình 1. Mô hình đề xuất.

Giả sử tất cả các nút mạng chỉ có 01 ăngten, và sự truyền dữ liệu được thực thi thông qua các khe thời gian trực giao. Nếu tổng thời gian trễ cho mỗi lần truyền dữ liệu giữa nguồn T_0 và đích T_M là L , thì thời gian phân bổ cho mỗi chặng là: $\tau = L/M$. Xét chặng thứ m , ($m=1,2,\dots,M$); hoạt động thu thập năng lượng và truyền dữ liệu được thực hiện trong các pha sau. Ở pha 1 (với thời gian $\alpha\tau$), các nút T_{m-1} và R_m thu thập năng lượng từ các trạm B, ở đây $0 \leq \alpha \leq 1$ và α là hệ số đã được thiết kế trước. Để đơn giản cho việc mô tả và phân tích bài toán, ta giả sử giá trị α giống nhau ở tất cả các chặng. Ở Pha 2 (với thời gian $(1-\alpha)\tau/2$), T_{m-1} sử dụng năng lượng thu thập trong Pha 1 để gửi dữ liệu đến T_m và R_m . Sau pha 2, nếu T_m giải mã thành công dữ liệu từ T_{m-1} , nút T_m sẽ gửi thông điệp ACK để thông báo. Trong trường hợp này, sự truyền dữ liệu ở chặng thứ m này đã thành công nên T_m không cần sự giúp đỡ của R_m nữa. Nếu T_m không giải mã thành công dữ liệu ở Pha 2, nút này sẽ gửi thông báo NACK để yêu cầu sự hỗ trợ của R_m . Trong trường hợp này, nếu R_m đã giải mã thành công dữ liệu, nút R_m sẽ truyền lại dữ liệu đến T_m trong Pha 3 (với thời gian truyền $(1-\alpha)\tau/2$).

Bài báo này nghiên cứu kênh truyền fading Rayleigh giữa các nút. Xét sự truyền dữ liệu giữa máy phát X và máy thu Y, với $(X,Y) \in \{T_u, B_n, R_{m,v}\}$, với $u=0,1,\dots,M$, $n=1,2,\dots,N$, $m=1,2,\dots,M$ và $v=1,2,\dots,K_m$. Ký hiệu $\psi_{X,Y}$ là độ lợi kênh giữa X và Y, và $\psi_{X,Y}$ sẽ là biến ngẫu nhiên có phân phối mũ, với các hàm phân phối tích lũy (CDF: Cumulative Distribution Function) và hàm mật độ xác suất (PDF: Probability Density Function) lần lượt là:

$$F_{\psi_{X,Y}}(x) = 1 - \exp(-\Omega_{X,Y}x), \quad (1)$$

$$f_{\psi_{X,Y}}(x) = \Omega_{X,Y} \exp(-\Omega_{X,Y}x),$$

với $\Omega_{X,Y}$ là tham số đặc trưng và được tính như sau:

$$\Omega_{X,Y} = (d_{X,Y})^\beta, \quad (2)$$

với $d_{X,Y}$ là khoảng cách giữa X và Y, và β là hệ số suy hao đường truyền.

Giả sử các nút chuyển tiếp ở gần nhau (ví dụ ở cùng chung một cụm) và các nguồn B cũng ở gần nhau. Do đó, ta có thể viết: $d_{X,R_{m,v}} = d_{X,R_m}$, $d_{R_{m,v},Y} = d_{R_m,Y}$ và $d_{B_n,Y} = d_{B_n,Y}$, với mọi X, Y, m, n và v . Tương tự, ta có: $\Omega_{X,R_{m,v}} = \Omega_{X,R_m}$, $\Omega_{R_{m,v},Y} = \Omega_{R_m,Y}$ và $\Omega_{B_n,Y} = \Omega_{B_n,Y}$.

Tiếp đến, chúng tôi mô tả việc chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình tổng quát, ở đây nút chuyển tiếp tốt thứ Q_m - th ở chặng thứ m sẽ được chọn, với thuật toán sau:

$$R_m : \psi_{T_{m-1},R_m} = Q_m \text{th} \max_{v=1,2,\dots,M_m} (\psi_{T_{m-1},R_{m,v}}). \quad (3)$$

Trong công thức (3), nếu $Q_m=1$ tức là chặng này chọn được nút chuyển tiếp tốt nhất. Trong trường hợp nút chuyển tiếp tốt nhất không thể sẵn sàng giúp đỡ (ví dụ như hết năng lượng để hoạt động), thì nút T_{m-1} sẽ chọn nút chuyển tiếp tốt thứ hai, và lúc này $Q_m=2$. Một cách tổng quát, nút T_{m-1} sẽ chọn nút chuyển tiếp tốt thứ Q_m nếu như các nút chuyển tiếp tốt nhất, tốt nhì, v.v. tốt thứ (Q_m-1) không sẵn sàng hợp tác.

Xét Pha 1 ở chặng thứ m ; năng lượng mà T_{m-1} và R_m thu thập được lần lượt là (xem các tài liệu [28,29]):

$$E_{T_{m-1}} = \eta\alpha\tau P_B \sum_{n=1}^N \chi_{B_n, T_{m-1}}, E_{R_m} = \eta\alpha\tau P_B \sum_{n=1}^N \chi_{B_n, R_m}, \quad (4)$$

với η ($0 < \eta < 1$) là hiệu suất chuyển đổi năng lượng, và P_B là công suất phát của tất cả các nguồn năng lượng. Công thức (4) cho thấy rằng năng lượng thu thập sẽ tăng khi số lượng trạm B tăng, hiệu suất chuyển đổi năng lượng tăng và thời gian thu thập năng lượng tăng.

Từ công thức (4), ta tính được công suất phát trung bình của T_{m-1} và $R_{m,v}$ trong Pha 2 và Pha 3 lần lượt là:

$$P_{T_{m-1}} = \frac{E_{T_{m-1}}}{(1-\alpha)\tau/2} = \mu P_B X_{T,\text{sum}}, \quad (5)$$

$$P_{R_m} = \frac{E_{R_m}}{(1-\alpha)\tau/2} = \mu P_B X_{R,\text{sum}},$$

với $\mu = 2\eta\alpha/(1-\alpha)$, và

$$X_{T,\text{sum}} = \sum_{n=1}^N \chi_{B_n, T_{m-1}}, X_{R,\text{sum}} = \sum_{n=1}^N \chi_{B_n, R_m}. \quad (6)$$

Xét Pha 2, tỷ số SNR tức thời đạt được tại các nút T_m và R_m lần lượt là:

$$\gamma_{T_{m-1}, T_m} = \frac{\mu P_B X_{T, \text{sum}} \chi_{T_{m-1}, T_m}}{\sigma_0^2} = \mu \Delta X_{T, \text{sum}} \chi_{T_{m-1}, T_m}, \quad (7)$$

$$\gamma_{T_{m-1}, R_m} = \frac{\mu P_B X_{T, \text{sum}} \chi_{T_{m-1}, R_m}}{\sigma_0^2} = \mu \Delta X_{T, \text{sum}} \chi_{T_{m-1}, R_m},$$

với σ_0^2 là phương sai của nhiễu cộng tại các nút thu T_m và R_m , và $\Delta = P_B / \sigma_0^2$.

Do đó, dung lượng kênh tức thời trên các liên kết $T_{m-1} \rightarrow T_m$ và $T_{m-1} \rightarrow R_m$ sẽ lần lượt là:

$$C_{T_{m-1}, T_m} = \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2(1 + \gamma_{T_{m-1}, T_m}), \quad (8)$$

$$C_{T_{m-1}, R_m} = \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2(1 + \gamma_{T_{m-1}, R_m}),$$

Xét trường hợp nút chuyển tiếp R_m được sử dụng; dung lượng kênh tức thời của liên kết $R_m \rightarrow T_m$ trong Pha 3 được tính như sau:

$$C_{R_m, T_m} = \frac{(1-\alpha)\tau}{2} \log_2(1 + \gamma_{R_m, T_m}), \quad (9)$$

với

$$\gamma_{R_m, T_m} = \frac{\mu P_B X_{R, \text{sum}} \chi_{R_m, T_m}}{\sigma_0^2} = \mu \Delta X_{R, \text{sum}} \chi_{R_m, T_m}. \quad (10)$$

III. PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG

Xét sự truyền dữ liệu ở chặng thứ m ; xác suất dừng trên chặng này được tính như sau:

$$\text{OP}_m = \underbrace{\Pr(C_{T_{m-1}, T_m} < C_{\text{th}}, C_{T_{m-1}, R_m} < C_{\text{th}})}_{\text{OP}_{m,1}} + \underbrace{\Pr(C_{T_{m-1}, T_m} < C_{\text{th}}, C_{T_{m-1}, R_m} \geq C_{\text{th}}, C_{R_m, T_m} < C_{\text{th}})}_{\text{OP}_{m,2}}. \quad (11)$$

Trong (11), C_{th} là ngưỡng dừng xác định trước, và khi dung lượng kênh đạt được lớn hơn C_{th} thì thiết bị thu sẽ giải mã thành công dữ liệu nhận được. Ngược lại, giả sử rằng thiết bị thu không thể giải mã được dữ liệu (hay liên kết bị dừng). Do đó, $\text{OP}_{m,1}$ là xác suất mà T_m và R_m đều không thể giải mã thành công dữ liệu nhận được từ T_{m-1} ở Pha 2 nên sự truyền dữ liệu trên chặng này bị dừng. Cũng trong (11), $\text{OP}_{m,2}$ là xác suất mà T_m không giải mã thành công trong Pha 2 nhưng R_m lại thành công, tuy nhiên sự truyền dữ liệu giữa R_m và T_m trong Pha 3 lại không thành công.

Xét $\text{OP}_{m,1}$ trong công thức (11); sử dụng công thức (7), ta có thể viết:

$$\text{OP}_{m,1} = \Pr(X_{T, \text{sum}} \chi_{T_{m-1}, T_m} < \rho_{\text{th}}, X_{T, \text{sum}} \chi_{T_{m-1}, R_m} < \rho_{\text{th}}), \quad (12)$$

với

$$\rho_{\text{th}} = \frac{2^{2C_{\text{th}}}}{\mu \Delta} - 1.$$

Tiếp tục thực hiện biến đổi công thức (12), ta có thể viết:

$$\text{OP}_{m,1} = \int_0^{+\infty} F_{\chi_{T_{m-1}, T_m}} \left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x} \right) F_{\chi_{T_{m-1}, R_m}} \left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x} \right) f_{X_{T, \text{sum}}}(x) dx. \quad (13)$$

Sử dụng công thức (1), hàm CDF $F_{\chi_{T_{m-1}, T_m}} \left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x} \right)$ trong (13) được viết như sau:

$$F_{\chi_{T_{m-1}, T_m}} \left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x} \right) = 1 - \exp \left(- \frac{\Omega_{T_{m-1}, T_m} \rho_{\text{th}}}{x} \right). \quad (14)$$

Đối với hàm CDF $F_{\chi_{T_{m-1}, R_m}} \left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x} \right)$ trong (13), sử dụng thống kê cho biến ngẫu nhiên lớn thứ Q_m trong tài liệu [33], ta có:

$$F_{\chi_{T_{m-1}, R_m}} \left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x} \right) = \sum_{j=1}^{Q_m} C_{K_m}^{j-1} \left(1 - \exp \left(- \frac{\Omega_{T_{m-1}, R_m} \rho_{\text{th}}}{x} \right) \right)^{K_m - j + 1} \times \exp \left(- \frac{(j-1)\Omega_{T_{m-1}, R_m} \rho_{\text{th}}}{x} \right) = 1 + \sum_{j=1}^{Q_m} \sum_{q=0, q+j \neq 1}^{K_m - j + 1} (-1)^q C_{K_m}^{j-1} C_{K_m - j + 1}^q \times \exp \left(- \frac{(j+q-1)\Omega_{T_{m-1}, R_m} \rho_{\text{th}}}{x} \right). \quad (15)$$

Tiếp đến, bởi vì $X_{T, \text{sum}}$ là tổng của N biến ngẫu nhiên có phân phối mũ độc lập và đồng nhất, sử dụng kết quả đưa ra trong tài liệu [34], ta có hàm PDF của $X_{T, \text{sum}}$ như:

$$f_{X_{T, \text{sum}}}(x) = \frac{(\Omega_{B, T_{m-1}})^N}{(N-1)!} x^{N-1} \exp(-\Omega_{B, T_{m-1}} x). \quad (16)$$

Thay các công thức (14)-(16) vào (13), sử dụng công thức (3.471.9) trong [35] để tính các tích phân; ta đạt được công thức dạng tường minh chính xác của $\text{OP}_{m,1}$ như sau:

$$\text{OP}_{m,1} = 1 - \frac{2}{(N-1)!} (\theta_1)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_1}) + \sum_{j=1}^{Q_m} \sum_{q=0, q+j \neq 1}^{K_m - j + 1} (-1)^q \frac{2C_{K_m}^{j-1} C_{K_m - j + 1}^q}{(N-1)!} (\theta_2)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_2}) - \sum_{j=1}^{Q_m} \sum_{q=0, q+j \neq 1}^{K_m - j + 1} (-1)^q \frac{2C_{K_m}^{j-1} C_{K_m - j + 1}^q}{(N-1)!} (\theta_3)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_3}), \quad (17)$$

với $K_N(\cdot)$ là hàm Bessel biến đổi loại 2, bậc N [35], và

$$\theta_1 = \Omega_{B, T_{m-1}} \Omega_{T_{m-1}, T_m} \rho_{\text{th}}, \theta_2 = (j+q-1) \Omega_{B, T_{m-1}} \Omega_{T_{m-1}, R_m} \rho_{\text{th}},$$

$$\theta_3 = \Omega_{B, T_{m-1}} \left((j+q-1) \Omega_{T_{m-1}, R_m} + \Omega_{T_{m-1}, T_m} \right) \rho_{\text{th}}.$$

Xét $\text{OP}_{m,2}$ trong (11), ta có thể viết lại xác suất này dưới dạng sau:

$$\text{OP}_{m,2} = \underbrace{\Pr(X_{T, \text{sum}} \chi_{T_{m-1}, T_m} < \rho_{\text{th}}, X_{T, \text{sum}} \chi_{T_{m-1}, R_m} \geq \rho_{\text{th}})}_{I_1} \times \Pr(X_{R, \text{sum}} \chi_{R_m, T_m} < \rho_{\text{th}}). \quad (18)$$

Để tính I_1 trong công thức (18), ta có lưu ý sau:

$$\begin{aligned}
 & I_1 + \text{OP}_{m,1} \\
 &= \Pr\left(X_{T,\text{sum}} \mathcal{X}_{T_{m-1},T_m} < \rho_{\text{th}}, X_{T,\text{sum}} \mathcal{X}_{T_{m-1},R_m} \geq \rho_{\text{th}}\right) \\
 &+ \Pr\left(X_{T,\text{sum}} \mathcal{X}_{T_{m-1},T_m} < \rho_{\text{th}}, X_{T,\text{sum}} \mathcal{X}_{T_{m-1},R_m} < \rho_{\text{th}}\right) \quad (19) \\
 &= \Pr\left(X_{T,\text{sum}} \mathcal{X}_{T_{m-1},T_m} < \rho_{\text{th}}\right) \\
 &= \int_0^{+\infty} F_{\mathcal{X}_{T_{m-1},T_m}}\left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x}\right) f_{X_{T,\text{sum}}}(x) dx.
 \end{aligned}$$

Tiếp đến, thay hàm CDF $F_{\mathcal{X}_{T_{m-1},T_m}}\left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x}\right)$ và hàm PDF $f_{X_{T,\text{sum}}}(x)$ vào công thức (19), và sử dụng [35, công thức (3.471.9)] để tính tích phân; cuối cùng, ta đạt được

$$I_1 + \text{OP}_{m,1} = 1 - \frac{2}{(N-1)!} (\theta_1)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_1}). \quad (20)$$

Bây giờ, kết hợp các công thức (17) và (20), ta có:

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \sum_{j=1}^{Q_m} \sum_{q=0, q+j \neq 1}^{K_m-j+1} (-1)^{q+1} \frac{2C_{K_m}^{j-1} C_{K_m-j+1}^q}{(N-1)!} (\theta_2)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_2}) \\
 &- \sum_{j=1}^{Q_m} \sum_{q=0, q+j \neq 1}^{K_m-j+1} (-1)^{q+1} \frac{2C_{K_m}^{j-1} C_{K_m-j+1}^q}{(N-1)!} (\theta_3)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_3}). \quad (21)
 \end{aligned}$$

Một cách tương tự, ta có thể tính xác suất $\Pr\left(X_{R,\text{sum}} \mathcal{X}_{R_m,T_m} < \rho_{\text{th}}\right)$ trong (18) như sau:

$$\begin{aligned}
 & \Pr\left(X_{R,\text{sum}} \mathcal{X}_{R_m,T_m} < \rho_{\text{th}}\right) \\
 &= \int_0^{+\infty} F_{\mathcal{X}_{R_m,T_m}}\left(\frac{\rho_{\text{th}}}{x}\right) f_{X_{R,\text{sum}}}(x) dx \quad (22) \\
 &= 1 - \frac{2}{(N-1)!} (\theta_4)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_4}),
 \end{aligned}$$

với $\theta_4 = \Omega_{B,R_m} \Omega_{R_m,T_m} \rho_{\text{th}}$, và hàm PDF $f_{X_{R,\text{sum}}}(x)$ là:

$$f_{X_{R,\text{sum}}}(x) = \frac{(\Omega_{B,R_m})^N}{(N-1)!} x^{N-1} \exp(-\Omega_{B,R_m} x). \quad (23)$$

Kết hợp tất cả các công thức (11), (17), (18), (21) và (22) lại, ta có được công thức tính chính xác xác suất dừng ở chặng thứ m của mô hình đề xuất. Hơn nữa, do sự độc lập của các chặng nên xác suất dừng toàn trình của mô hình MHR-IR được tính bằng công thức sau:

$$\text{OP}_{\text{MHR-IR}} = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - \text{OP}_m). \quad (24)$$

Trong (24), $\prod_{m=1}^M (1 - \text{OP}_m)$ là xác suất mà sự truyền dữ liệu trên tất cả các chặng đều thành công.

So sánh với các mô hình liên quan, bài báo này sẽ so sánh MHR-IR với mô hình chuyển tiếp đa chặng không sử dụng truyền thông cộng tác (hay chỉ sử dụng truyền trực tiếp ở các chặng). Mô hình này có tên gọi là MHR-DT: Multi-Hop Relaying using Direct Transmission. Để sự so sánh được công bằng, trong MHR-DT, sự truyền trên mỗi chặng vẫn có thời gian là $\tau = L/K$, và ở chặng thứ m , khoảng thời gian $\alpha\tau$ được dùng để T_{m-1} thu thập năng lượng, và T_{m-1} sẽ sử dụng toàn bộ thời gian còn lại $(1-\alpha)\tau$ để truyền dữ liệu đến T_m . Do đó, năng lượng thu thập tại T_{m-1} và công suất phát của T_{m-1} lần lượt là:

$$E_{T_{m-1}}^* = \eta\alpha\tau P_B \sum_{n=1}^N \mathcal{X}_{B_n, T_{m-1}}, \quad (25)$$

$$P_{T_{m-1}}^* = \frac{E_{T_{m-1}}^*}{(1-\alpha)\tau} = \omega P_B X_{T,\text{sum}}, \quad (26)$$

với $\omega = \frac{\eta\alpha}{1-\alpha}$. Do đó, dung lượng kênh tức thời trên liên kết $T_{m-1} \rightarrow T_m$ trong MHR-DT sẽ là:

$$C_{T_{m-1},T_m}^* = (1-\alpha)\tau \log_2(1 + \omega P_B X_{T,\text{sum}} \mathcal{X}_{T_{m-1},T_m}). \quad (27)$$

Tương tự như trên, xác suất dừng ở chặng thứ m trong MHR-DT được tính như sau:

$$\begin{aligned}
 \text{OP}_m^* &= \Pr\left(C_{T_{m-1},T_m}^* < C_{\text{th}}\right) = \int_0^{+\infty} F_{\mathcal{X}_{T_{m-1},T_m}}\left(\frac{\sigma_{\text{th}}}{x}\right) f_{X_{T,\text{sum}}}(x) dx \\
 &= 1 - \frac{2}{(N-1)!} (\theta_0)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_0}), \quad (28)
 \end{aligned}$$

với $\theta_0 = \Omega_{B,T_{m-1}} \Omega_{T_{m-1},T_m} \sigma_{\text{th}}$ và

$$\sigma_{\text{th}} = \frac{C_{\text{th}}}{\omega\Delta}.$$

Từ công thức (28), ta có công thức tính xác suất dừng toàn trình của MHR-DT như bên dưới:

$$\begin{aligned}
 \text{OP}_{\text{MHR-DT}} &= 1 - \prod_{m=1}^M (1 - \text{OP}_m^*) \\
 &= 1 - \prod_{m=1}^M \left[\frac{2}{(N-1)!} (\theta_0)^{\frac{N}{2}} K_N(2\sqrt{\theta_0}) \right]. \quad (29)
 \end{aligned}$$

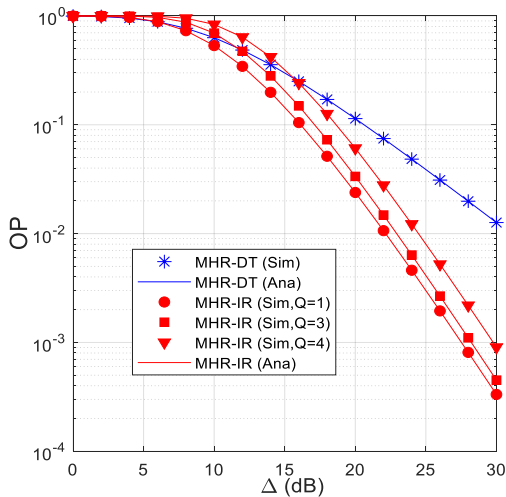
IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ LÝ THUYẾT

Trong phần này, chúng tôi thực hiện mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng các công thức tính OP toàn trình, cũng như so sánh hiệu năng của MHR-IR và MHR-DT. Các kết quả mô phỏng (ký hiệu Sim) và lý thuyết (ký hiệu Ana) đều được thực hiện trên phần mềm MATLAB. Trong mô phỏng Monte Carlo, kênh truyền fading Rayleigh giữa các nút mạng được tạo ra bằng hàm Matlab sau: $h = \text{randn}(1,1) + j*\text{randn}(1,1)$, và h sẽ là hệ số kênh fading Rayleigh. Hơn nữa, $5*10^6$ phép thử được thực hiện để các kết quả mô phỏng hội tụ về các kết quả phân tích. Như có thể quan sát trong các hình vẽ bên dưới, sai số giữa mô phỏng và lý thuyết là rất nhỏ, điều này kiểm chứng tính chính xác của mô phỏng và lý thuyết.

Môi trường mô phỏng là mặt phẳng hai chiều Oxy, trong đó các nút T_m được đặt ở vị trí $(m/M, 0)$, các nút R_m được đặt ở $((2m-1)/(2M), 0)$, và các trạm phát năng lượng B_n cố định ở $(0.5, 1)$, với $m=0, 1, \dots, M$, $n=0, 1, \dots, N$. Từ việc sắp xếp này, ta thấy khoảng cách giữa nguồn T_0 và đích T_M luôn bằng 1, khoảng cách giữa hai nút kề nhau T_{m-1} và T_m bằng $1/M$ với mọi m , và R_m cũng cách đều T_{m-1} và T_m . Trong các mô phỏng, ta cố định hệ số suy hao đường truyền bằng 3 ($\beta = 3$), tổng thời gian trễ bằng 1 ($L=1$), hiệu suất chuyển đổi công suất bằng

0.5 ($\eta = 0.5$), và ngưỡng dừng bằng 1 ($C_{th} = 1$). Hơn nữa, để dễ dàng cho việc khảo sát sự tác động của số nút chuyển tiếp và việc chọn lựa nút chuyển tiếp tại mỗi chặng lên hiệu năng của các mô hình, ta giả sử số nút chuyển tiếp tại mỗi chặng đều bằng nhau ($K_m = K, \forall m$), và các chặng đều chọn lựa nút chuyển tiếp tốt nhất thứ Q giống nhau ($Q_m = Q, \forall m$).

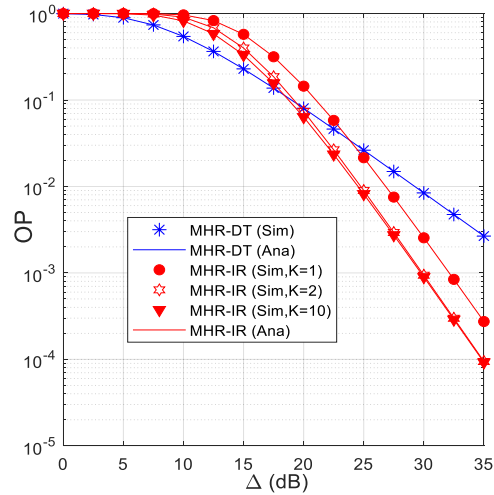
Hình 2 biểu diễn xác suất dừng của các mô hình MHR-DT và MHR-IR theo tỷ số SNR phát Δ (dB) khi số chặng giữa nguồn và đích được cố định bằng 3 ($M=3$), hệ số phân chia thời gian cho pha thu thập năng lượng tại mỗi chặng bằng 0.2 ($\alpha = 0.2$), và số nút chuyển tiếp tại mỗi chặng bằng 5 ($K=5$). Đầu tiên, ta thấy rằng OP của cả hai mô hình đều giảm khi Δ tăng, do công suất phát của các nguồn phát năng lượng B tăng (hay công suất phát của các nút phát T_{m-1} và R_m tăng). Ta cũng thấy rằng OP của MHR-IR lớn hơn MHR-DT khi giá trị Δ thấp. Điều này chứng tỏ việc sử dụng truyền thông cộng tác sẽ không hiệu quả khi mức công suất phát của các nút thấp. Khi giá trị của Δ lớn, MHR-IR đạt giá trị OP thấp hơn MHR-DT. Ta cũng thấy rằng OP của MHR-IR giảm nhanh hơn mô hình MHR-DT khi Δ tăng ở miền giá trị trung bình và cao. Điều này chứng tỏ MHR-IR đạt được độ lợi phân tập cao hơn do sử dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng. Hình 2 cũng cho thấy rằng việc chọn được nút chuyển tiếp tốt nhất ở mỗi chặng ($Q=1$) sẽ giúp MHR-IR đạt được hiệu năng OP tốt nhất. Ngược lại, OP của MHR-IR tăng lên khi nút chuyển tiếp tốt thứ 2 ($Q=2$) hoặc nút chuyển tiếp tốt thứ 4 ($Q=4$) được chọn. Cuối cùng, ta thấy rằng các kết quả mô phỏng (Sim) và lý thuyết (Ana) trùng với nhau, điều này kiểm chứng sự chính xác của các công thức tính xác suất dừng được đưa ra trong bài báo.



Hình 2. OP vẽ theo Δ (dB) khi $\alpha = 0.2, M = 3, K = 5$ và $N = 2$.

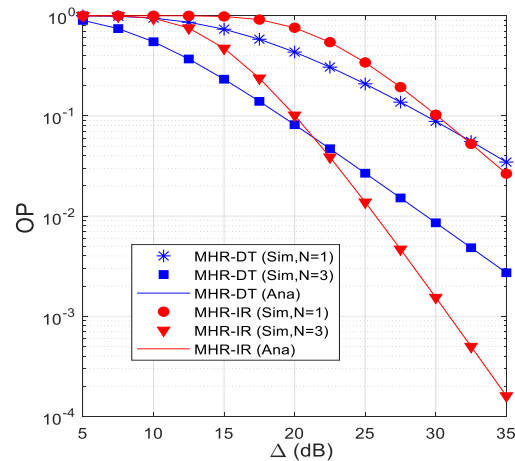
Hình 3 vẽ OP của các mô hình MHR-DT và MHR-IR theo Δ (dB) với $\alpha = 0.25, M = 4, N = 3$ và $Q = 1$. Tương tự như Hình 2, OP của MHR-IR thấp hơn OP của MHR-DT khi Δ đủ lớn, và mô hình đề xuất đạt độ lợi phân tập cao hơn MHR-DT. Trong Hình 3, ta lưu ý rằng $K = 1$ tương ứng với trường hợp không sử dụng kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp ở mỗi chặng, và khi $K = 2$ và $K = 10$ thì nút chuyển tiếp tốt nhất sẽ được chọn ở mỗi chặng ($Q = 1$

). Mặc dù, khi kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp được sử dụng thì OP của MHR-IR giảm mạnh, tuy nhiên OP trong hai trường hợp $K = 2$ và $K = 10$ lại không thay đổi đáng kể. Đó là vì phương pháp chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình chỉ đảm bảo chất lượng cho liên kết giữa T_{m-1} và R_m nhưng lại không đảm bảo được chất lượng cho liên kết giữa R_m và T_m . Một lần nữa, các kết quả mô phỏng kiểm chứng sự chính xác của các kết quả lý thuyết.



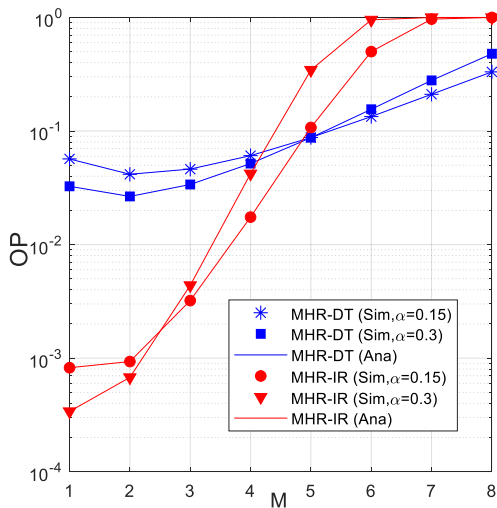
Hình 3. OP vẽ theo Δ (dB) khi $\alpha = 0.25, M = 4, N = 3$ và $Q = 1$.

Hình 4 vẽ OP của MHR-DT và MHR-IR theo Δ (dB) với $\alpha = 0.3, M = 4, K = 6$ và $Q = 2$. Trong Hình 4, số lượng nguồn phát năng lượng N sẽ bằng 1 và 3. Như ta có thể dự đoán, OP của cả hai mô hình MHR-DT và MHR-IR giảm mạnh khi tăng giá trị N từ 1 lên 3. Đó là vì càng có nhiều nguồn phát năng lượng thì năng lượng thu thập ở các nút càng lớn, dẫn đến công suất phát của các nút càng cao. Tuy nhiên, tăng số trạm B cũng tăng chi phí và giá thành khi triển khai hệ thống. Do đó, số trạm N , cũng như vị trí của các trạm B thông thường đã được thiết kế trước và hầu như là cố định trong quá trình triển khai mạng. Ta cũng quan sát từ Hình 4 rằng khi $N = 1$ thì hiệu năng của mô hình MHR-IR rất thấp. Điều này sẽ được giải thích trong Hình 5 bên dưới.



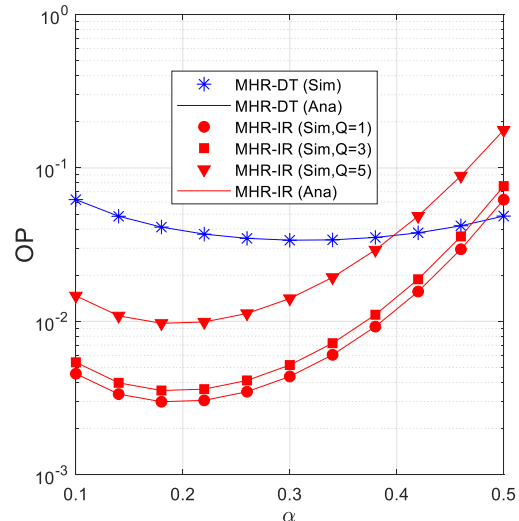
Hình 4. OP vẽ theo Δ (dB) khi $\alpha = 0.3, M = 4, K = 6$ và $Q = 2$.

Hình 5 vẽ OP của MHR-DT và MHR-CC theo số chặng (M) giữa nguồn và đích khi $\Delta=25$ (dB), $Q=1, N=2$ và $K=6$. Quan sát từ Hình 5, ta thấy giá trị OP của tất cả các mô hình đều rất lớn khi số chặng lớn. Đây cũng chính là nguyên nhân tại sao OP của MHR-IR trong Hình 4 ở trên là rất lớn. Ta có thể giải thích điều này như sau: khi M lớn thì thời gian truyền trên mỗi chặng sẽ giảm, dẫn đến OP tại mỗi chặng tăng, và do đó sẽ làm tăng OP toàn trình của các mô hình. Hình 5 cũng cho thấy MHR-IR đạt được giá trị OP thấp hơn mô hình MHR-DT khi số chặng M có giá trị từ 1 đến 4, hay nói cách khác MHR-IR chỉ tốt hơn MHR-DT khi số chặng giữa nguồn và đích không quá lớn. Thật vậy, khi số chặng quá lớn thì thời gian truyền ở các Pha 2 và 3 ở mỗi chặng trong MHR-IR sẽ rất thấp. Do đó, truyền thông cộng tác ở mỗi chặng sẽ không hiệu quả hơn việc truyền trực tiếp. Hình 5 cũng cho thấy hệ số phân chia thời gian α tác động đáng kể lên giá trị OP của các mô hình. Trong MHR-DT, OP khi $\alpha=0.15$ sẽ thấp hơn trường hợp $\alpha=0.3$ nếu số chặng lớn hơn 5. Tương tự, trong MHR-IR, OP khi $\alpha=0.15$ sẽ thấp hơn trường hợp $\alpha=0.3$ nếu số chặng lớn hơn 2. Vì vậy, tùy thuộc vào số chặng giữa nguồn và đích, ta có thể thiết kế giá trị α thích hợp để giảm xác suất dừng cho mô hình đề xuất.



Hình 5. OP vẽ theo M khi $\Delta=25$ (dB), $Q=1, N=2$ và $K=6$.

Hình 6 vẽ OP của các mô hình MHR-DT và MHR-IR theo hệ số phân chia thời gian α với $\Delta=25$ (dB), $M=3, N=2$ và $K=6$. Quan sát từ Hình 6, ta thấy rằng hệ số α tác động đáng kể lên giá trị OP toàn trình của các mô hình. Thật vậy, khi α thấp thì năng lượng thu thập được tại các nút phát cũng thấp, dẫn đến công suất phát thấp, và xác suất dừng của các mô hình lớn. Tuy nhiên, khi α quá lớn thì thời gian dành cho việc truyền dữ liệu lại thấp, và điều này cũng dẫn đến xác suất dừng của các mô hình tăng. Như được quan sát trong Hình 6, ta thấy tồn tại giá trị của α để xác suất dừng của các mô hình MHR-DT và MHR-IR đạt giá trị thấp nhất. Ví dụ OP của MHR-DT thấp nhất khi $\alpha=0.3$, và OP của MHR-IR thấp nhất khi $\alpha=0.18$ với tất cả các giá trị của Q . Một lần nữa, Hình 6 cho ta thấy MHR-IR đạt giá trị OP càng thấp khi chọn được nút chuyển tiếp tốt (Q nhỏ).



Hình 6. OP vẽ theo α khi $\Delta=25$ (dB), $M=3, N=2$ và $K=6$.

V. KẾT LUẬN

Các kết quả đạt được trong bài báo cho thấy mô hình đề xuất MHR-IR đạt được hiệu năng OP tốt hơn mô hình chuyển tiếp thông thường MHR-DT khi công suất phát đủ lớn, và với số chặng không quá lớn. Mặt khác, MHR-IR cũng đạt được độ lợi phân tập cao hơn MHR-DT. Để nâng cao hiệu năng cho mô hình đề xuất, ta cần tăng số nút chuyển tiếp, tăng số trạm phát năng lượng vô tuyến và cần chọn nút chuyển tiếp tốt nhất ở mỗi chặng. Hơn nữa, các thông số hệ thống khác như số chặng và hệ số phân chia thời gian cũng cần được thiết kế tối ưu.

Trong tương lai, chúng tôi sẽ phát triển mô hình trong bài báo sử dụng các thiết bị thu phát nhiều anten và phân tích hiệu năng của mô hình trên các kênh truyền fading tổng quát như kênh fading Rician, Nakagami- m .

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Thành Phố Hồ Chí Minh với mã số đề tài 11-HV-2022-RD_ĐT2.

REFERENCES

- [1] M. O. Hasna and M. Alouini, "Outage probability of multihop transmission over Nakagami fading channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 5, pp. 216-218, 2003.
- [2] H. Chen, "Performance-Energy Tradeoffs for Decentralized Estimation in a Multihop Sensor Network," *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 8, pp. 1304-1310, 2010.
- [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, 2012.
- [4] M. R. Bhatnagar, "On the Capacity of Decode-and-Forward Relaying over Rician Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 1100-1103, 2013.
- [5] T. T. Duy and H.-Y. Kong, "Performance Analysis of Incremental Amplify-and-Forward Relaying Protocols with Nth Best Partial Relay Selection Under Interference

- Constraint," *Wireless Personal Communications*, vol. 71, no. 4, pp. 2741-2757, 2013.
- [6] T. N. Nguyen, T. T. Duy, P. T. Tran, M. Voznak, X. Li, and V. Poor, "Partial and Full Relay Selection Algorithms for AF Multi-Relay Full-Duplex Networks with Self-Energy Recycling in Non-identically Distributed Fading Channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1-1, 2022.
- [7] T. T. Duy, P. T. D. Ngoc, and 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, pp. ID 8861725, 1-15, 2021.
- [8] P. T. Tin, N. T. Luan, T. N. Nguyen, M. Tran, and T. T. Duy, "Throughput enhancement for multi-hop decode-and-forward protocol using interference cancellation with hardware imperfection," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, no. 8, pp. 5837-5849, 2022.
- [9] M. R. Bhatnagar, R. K. Mallik, and O. Tirkkonen, "Performance Evaluation of Best-Path Selection in a Multihop Decode-and-Forward Cooperative System," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 4, pp. 2722-2728, 2016.
- [10] M. R. Bhatnagar, "Performance analysis of max-min path selection scheme in multi-hop DF cooperative system over Nakagami-m channels," in *2014 International Conference on Signal Processing and Communications (SPCOM)*, 22-25 July 2014 2014, pp. 1-6.
- [11] H. K. Boddapati, M. R. Bhatnagar, and S. Prakriya, "Performance Analysis of Cluster-Based Multi-Hop Underlay CRNs Using Max-Link-Selection Protocol," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 4, no. 1, pp. 15-29, 2018.
- [12] H. K. Boddapati, M. R. Bhatnagar, and S. Prakriya, "Performance of Incremental Relaying Protocols for Cooperative Multihop CRNs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 7, pp. 6006-6022, 2018.
- [13] P. Nam, T. Trung Duy, and P. Ca, "Performance of cluster-based cognitive multihop networks under joint impact of hardware noises and non-identical primary co-channel interference," *Telkommunikation (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, pp. 49-59, 02/01 2019.
- [14] C. T. Dung, T. M. Hoang, N. N. Thang, M. Tran, and P. T. Tran, "Secrecy performance of multi-user multi-hop cluster-based network with joint relay and jammer selection under imperfect channel state information," *Performance Evaluation*, vol. 147, p. 102193, 2021/05/01/ 2021.
- [15] B. An, T. Trung Duy, and H. 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, pp. 147-162, 04/24 2009.
- [16] 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*, 01/01 2015.
- [17] L. Yang, P. Li, Y. Yang, S. Li, I. Trigui, and R. Ma, "Performance Analysis of RIS-Aided Networks With Co-Channel Interference," *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 1, pp. 49-53, 2022.
- [18] P. N. Son, T. T. Duy, P. V. Tuan, and H. V. Phuoc, "Short Packet Communication in Underlay Cognitive Network Assisted by Intelligent Reflecting Surface," *ETRI Journal*, vol. 45, no. 1, pp. 28-44, Feb. 2023.
- [19] S. Arzykulov, G. Nauryzbayev, A. Celik, and A. M. Eltawil, "RIS-Assisted Full-Duplex Relay Systems," *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 5729-5740, 2022.
- [20] T. V. Nguyen, H. D. Le, N. T. Dang, and A. T. Pham, "On the Design of Rate Adaptation for Relay-Assisted Satellite Hybrid FSO/RF Systems," *IEEE Photonics Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 1-11, 2022.
- [21] C. Xu, M. Zheng, W. Liang, H. Yu, and Y. Liang, "Outage Performance of Underlay Multihop Cognitive Relay Networks With Energy Harvesting," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 1148-1151, 2016.
- [22] 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, 2016.
- [23] C. Xu, M. Zheng, W. Liang, H. Yu, and Y. C. Liang, "End-to-End Throughput Maximization for Underlay Multi-Hop Cognitive Radio Networks With RF Energy Harvesting," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 3561-3572, 2017.
- [24] N. P. Le, "Throughput Analysis of Power-Beacon-Assisted Energy Harvesting Wireless Systems Over Non-Identical Nakagami-m Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 840-843, 2018.
- [25] T. H. Vu and S. Kim, "Performance Evaluation of Power-Beacon-Assisted Wireless-Powered NOMA IoT-Based Systems," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 14, pp. 11655-11665, 2021.
- [26] T. V. Nguyen, T. Do, V. N. Q. Bao, D. B. d. Costa, and B. An, "On the Performance of Multihop Cognitive Wireless Powered D2D Communications in WSNs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 3, pp. 2684-2699, 2020.
- [27] P. M. Nam, T. T. Duy, P. V. Ca, P. N. Son, and N. H. An, "Outage Performance of Power Beacon-Aided Multi-Hop Cooperative Cognitive Radio Protocol Under Constraint of Interference and Hardware Noises," *Electronics*, vol. 9, no. 6, 2020.
- [28] T. V. Nguyen, V. D. Nguyen, D. B. d. Costa, and B. An, "Short-Packet Communications in Multi-Hop WPINs: Performance Analysis and Deep Learning Design," in *2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 7-11 Dec. 2021 2021, pp. 1-6.
- [29] T. V. Nguyen, V. D. Nguyen, D. B. d. Costa, T. Huynh-The, R. Q. Hu, and B. An, "Short-Packet Communications in Multihop Networks With WET: Performance Analysis and Deep Learning-Aided Optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 439-456, 2023.
- [30] N. T. Huân, N. H. Ân, N. V. Hiền, P. Q. Hợp, and V. T. Tý, "Xác suất dừng mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng thu thập năng lượng vô tuyến và truyền thông cộng tác tại mỗi chặng," presented at the Ứng dụng công nghệ thông minh trong công nghiệp 4.0, Thành phố thông minh và phát triển bền vững, ĐH Thủ Dầu Một, Bình Dương, 14-15/7/2022, 2022.
- [31] N. T. Huan, T. T. Duy, L. T. Tu, N. Q. Sang, Q. H. Ta, and P. V. Tuan, "Incremental Cooperation Based Multi-hop Relaying Scheme With Fountain Codes, Wirelessly Energy Harvesting and Partial Relay Selection," in *2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 20-22 Oct. 2022 2022, pp. 338-343.
- [32] C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing," in *Proceedings WMCSA 99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 25-26 Feb. 1999 1999, pp. 90-100.
- [33] P. Son, H. Kong, and A. Anpalagan, "Exact outage analysis of a decode-and-forward cooperative communication network with Nth best energy harvesting relay selection," *Annals of Telecommunications*, vol. 71, 04/05 2016.
- [34] S. V. Amari and R. B. Misra, "Closed-form expressions for distribution of sum of exponential random variables," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 46, no. 4, pp. 519-522, 1997.

[35] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*. Academic press, 2014.

ENERGY HARVESTING AIDED MULTI-HOP RELAYING NETWORKS USING INCREMENTAL COOPERATION AND PARTIAL RELAY SELECTION

Abstract: This paper proposes a multi-hop relaying scheme using wirelessly energy harvesting and cooperative communication at each hop. In the proposed scheme, all the transmitters have to harvest wireless energy emitted by power beacon stations, and then use the harvested energy to transmit data. To enhance performance for the proposed scheme, the incremental cooperation at each hop using partial relay selection. Moreover, we investigate a generalized case, where the “ Q -th” best relay is selected at each hop. We derive exact closed-form expressions of end-to-end outage probability for the proposed scheme over Rayleigh fading channel. We also provide Monte Carlo simulations to verify the derived expressions.

Keywords—Radio frequency energy harvesting, incremental cooperative communication, multi-hop relaying, partial relay selection, outage probability.



Nguyễn Trung Hiếu, Nhận học vị Tiến sĩ năm 2018. Hiện nay đang công tác tại Khoa Kỹ thuật điện tử 1, Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông. Lĩnh vực nghiên cứu: Lý thuyết thông tin, mã hóa, hệ thống nhúng và IoT, thiết kế điện tử.
Email: hieunt@ptit.edu.vn



Ngô Hoàng Ân nhận học vị Thạc sĩ kỹ thuật tại Trường Đại học Bách Khoa TP.HCM năm 2011. Hiện nay, ông đang công tác tại Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm Tp.HCM (HUPI) và nghiên cứu sinh tại Trường Đại học công nghiệp Tp.HCM (IUH). Các lĩnh vực nghiên cứu: đường truyền thông công tác, mạng chuyển tiếp đa chặng, thu hoạch năng lượng sóng vô tuyến, bảo mật lớp vật

lý,...

Email: anh@hufi.edu.vn



Nguyễn Văn Hiền nhận học vị Thạc sĩ Kỹ thuật Viễn thông tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông năm 2022. Hiện nay, ông đang công tác tại Khoa Viễn thông 2 - Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông cơ sở tại Tp. HCM. Các lĩnh vực nghiên cứu: truyền thông công tác, mạng chuyển tiếp đa chặng, thu hoạch năng lượng sóng vô tuyến, bảo mật

lớp vật lý,...

Email: hiennv@ptit.edu.vn



Đỗ Văn Việt Em hiện đang là giảng viên Bộ môn Thông Tin Quang, thuộc Khoa Viễn Thông 2, Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông cơ sở tại TP. Hồ Chí Minh. Hướng nghiên cứu đang quan tâm bao gồm: thông tin quang và mạng IoT.
Email: dvvem@ptithcm.edu.vn
Website: <https://ft.ptithcm.edu.vn/>