

PHÂN TÍCH XÁC SUẤT DỪNG CHO MẠNG CHUYỂN TIẾP ĐA CHẶNG DẠNG CỤM SỬ DỤNG KỸ THUẬT NOMA DƯỚI SỰ TÁC ĐỘNG CỦA KHIẾM KHUYẾT PHẦN CỨNG TRÊN KÊNH NAKAGAMI-M

Phạm Minh Quang, Trần Trung Duy

Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Tại Thành Phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Trong bài báo này, chúng tôi phân tích chính xác hiệu năng xác suất dừng của mạng chuyển tiếp đa chặng dạng cụm sử dụng kỹ thuật đa truy nhập phi trực giao NOMA. Trong mô hình nghiên cứu, nút nguồn và các nút chuyển tiếp trung gian sử dụng NOMA để gửi cùng lúc 02 dữ liệu đến 02 nút đích khác nhau. Hơn nữa, để nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu tại mỗi chặng, bài báo áp dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp DF (Decode and Forward) và chọn lựa nút chuyển tiếp tốt nhất tại mỗi cụm. Trong quá trình chuyển tiếp, nếu một nút chuyển tiếp chỉ có thể giải mã thành công một dữ liệu, nút này chỉ gửi dữ liệu giải mã thành công đến nút kế tiếp. Ở chặng cuối cùng, các nút đích được trang bị nhiều anten, và sử dụng kỹ thuật kết hợp chọn lựa SC (Selection Combining) để giải mã dữ liệu. Bài báo này đưa ra công thức dạng tường minh tính xác suất dừng OP (Outage Probability) tại các nút đích trên kênh truyền Nakagami- m , dưới sự ảnh hưởng của khiếm khuyết phần cứng. Chúng tôi cũng thực hiện mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng các kết quả phân tích lý thuyết.

Từ khóa: Chuyển tiếp đa chặng, mạng cụm, đa truy nhập phi trực giao (NOMA), phần cứng không hoàn hảo, xác suất dừng.

I. MỞ ĐẦU

Ngày nay, mạng cảm biến vô tuyến WSN (Wireless Sensor Networks) ngày càng phổ biến và cung cấp nhiều tiện lợi trong các hoạt động của con người. Các đặc điểm của mạng WSN [1]-[3] bao gồm: i) khả năng tự cấu hình và truyền thông giữa các thiết bị cảm biến; ii) các thiết bị cảm biến bị giới hạn về kích thước, năng lượng, khả năng lưu trữ và xử lý; iii) sử dụng chuyển tiếp để gửi dữ liệu về các trạm xử lý trung tâm như sink, home station. Để đạt được hiệu quả năng lượng cao, mạng WSN có thể tổ chức theo dạng cụm, trong đó mỗi cụm có một nút chủ cụm đóng vai trò điều khiển trung tâm. Một trong các mô hình dạng cụm hiệu quả trong WSN là mạng LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) [4]-[7]. Các công

trình [4]-[5] cho thấy mô hình LEACH kéo dài thời gian sống (lifetime) cho mạng WSN, cũng như hiệu quả trong việc truyền thông giữa các thiết bị cảm biến. Các công trình [6]-[7] đề xuất các mô hình chuyển tiếp đa chặng trong mạng LEACH, nhằm đạt được bảo mật thông tin ở lớp vật lý.

Kỹ thuật chuyển tiếp có vai trò quan trọng trong mạng WSN, giúp mở rộng vùng phủ, tiết kiệm năng lượng cho các sensor, đạt độ tin cậy cao thông qua việc truyền dữ liệu ở các khoảng cách ngắn. Tuy nhiên, nhược điểm chính của chuyển tiếp đó là thời gian trễ lớn và tốc độ truyền dữ liệu (hay thông lượng mạng, hiệu quả sử dụng phổ tần, độ lợi ghép kênh) thấp. Thật vậy, khi số chặng giữa nguồn và đích tăng thì thời gian trễ cũng tăng theo. Nếu số chặng là M , thì tốc độ dữ liệu đạt được trong các mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường [8]-[12] là $1/M$ (một dữ liệu được gửi trên M chặng). Mặc dù, các công trình [10]-[12] đã đề xuất mô hình chuyển tiếp phân tập, chẳng hạn như MIMO, chuyển tiếp công tác đa chặng và mô hình chọn đường tốt nhất, tuy nhiên, các đề xuất này chỉ cải thiện được độ tin cậy và độ lợi phân tập, và vẫn chưa cải thiện được tốc độ dữ liệu. Kỹ thuật chuyển tiếp song công được đề xuất trong [13]-[16] giúp cải thiện tốc độ dữ liệu. Trong kỹ thuật này, nút chuyển tiếp được trang bị với 02 anten để đồng thời nhận và truyền các tín hiệu khác nhau. Do đó, chuyển tiếp song công đạt được gấp đôi tốc độ truyền dữ liệu, khi so với chuyển tiếp bán song công. Tuy nhiên, việc triển khai nhiều anten lên các thiết bị cảm biến, và việc quản lý can nhiễu trong chuyển tiếp đa chặng song công [13]-[14], [17]-[18] là một bài toán quá phức tạp cho mạng WSN.

Những năm gần đây, các nhà nghiên cứu dành sự quan tâm lớn đến kỹ thuật đa truy nhập phi trực giao NOMA. NOMA được đánh giá là một trong những kỹ thuật tiềm năng cho các mạng thông tin vô tuyến thế hệ tiếp theo. Sử dụng NOMA, máy phát có thể ghép nhiều tín hiệu khác nhau, và gửi đồng thời các tín hiệu này đến các máy thu [19]-[22]. Mỗi máy thu sẽ sử dụng kỹ thuật khử can nhiễu tuần tự SIC (Successive Interference Cancellation) để lấy được tín hiệu mong muốn. Theo đó, tín hiệu được giải mã trước là tín hiệu được phân bổ với công suất phát lớn hơn. Sau khi giải mã xong một tín hiệu, máy thu sẽ loại bỏ thành phần chứa tín hiệu này ra khỏi tín hiệu tổng nhận được, rồi tiến hành giải mã tín hiệu tiếp theo. Với cách thức này, máy phát có thể gửi nhiều dữ liệu khác

Tác giả liên hệ: Trần Trung Duy,

Email: trantrungduy@ptithcm.edu.vn

Đến tòa soạn: 04/10/2021, chỉnh sửa: 22/12/2021, chấp nhận đăng: 02/03/2022.

nhau đến các máy thu, trên cùng tần số và mã. Vì vậy, tốc độ dữ liệu khi sử dụng NOMA tăng gấp nhiều lần, khi so với các kỹ thuật đa truy nhập trực giao thông thường như TDMA và CDMA.

Trong công trình này, chúng tôi đề xuất áp dụng NOMA vào mạng chuyển tiếp đa chặng để nâng cao tốc độ dữ liệu cho mạng WSN dạng cụm hay mạng LEACH. Trong mô hình đề xuất, nút nguồn và các nút chuyển tiếp trung gian sử dụng NOMA để gửi 02 dữ liệu đồng thời đến hai nút đích. Tuy nhiên, nếu nút chuyển tiếp chỉ có thể giải mã được 01 dữ liệu thì nút này chỉ chuyển tiếp dữ liệu giải mã thành công đến chặng tiếp theo. Với mục đích nâng cao chất lượng kênh truyền tại mỗi chặng, chúng tôi đề xuất phương pháp chọn lựa nút chuyển tiếp tốt nhất tại mỗi cụm. Ở chặng cuối, các nút đích sử dụng kỹ thuật kết hợp SC để giải mã tín hiệu nhận được. Chúng tôi cũng xem xét sự ảnh hưởng của nhiễu gây ra bởi khiếm khuyết phần cứng (Hardware impairments) của các thiết bị cảm biến [23]-[27].

Cho đến nay, mô hình chuyển tiếp đa chặng trong mạng cụm và các mô hình sử dụng NOMA đã được nghiên cứu trong nhiều tài liệu. Tuy nhiên, hai hướng này chỉ được nghiên cứu một cách riêng rẽ. Cụ thể, hầu hết các nghiên cứu gần đây về mạng chuyển tiếp đa chặng dạng cụm như [6]-[7], [28]-[30] đều chưa xét đến việc áp dụng NOMA để cải thiện tốc độ dữ liệu. Mặt khác, hầu hết các nghiên cứu gần đây về NOMA trong mạng chuyển tiếp chủ yếu tập trung vào mô hình chuyển tiếp hai chặng [21], [31]-[34]. Khác với các công trình trước đây, bài báo này xét trường hợp nút nguồn cách xa các nút đích, và việc truyền dữ liệu phải thông qua nhiều chặng. Khi xem xét mạng WSN, mô hình chuyển tiếp đa chặng sẽ rất phổ biến do khoảng cách và sự giới hạn công suất phát của các thiết bị cảm biến. Hơn nữa, việc sử dụng NOMA vào mạng chuyển tiếp đa chặng sẽ nâng cao tốc độ dữ liệu cho mạng WSN.

Theo sự hiểu biết tốt nhất của chúng tôi, chỉ có các công trình [35]-[37] nghiên cứu mô hình kết hợp giữa NOMA và mạng chuyển tiếp đa chặng. Cụ thể, các tác giả trong công trình [35] đã kết hợp giữa chuyển tiếp đa chặng và NOMA, đồng thời cũng khảo sát sự ảnh hưởng của khiếm khuyết phần cứng lên hiệu năng xác suất dừng và thông lượng mạng trên kênh truyền Nakagami- m . Khác với [35], các tác giả trong tài liệu [36] nghiên cứu kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, trong đó các máy phát phải thu thập năng lượng từ một trạm phát sóng vô tuyến đặt trong mạng, và sử dụng nguồn năng lượng này để truyền dữ liệu. Hơn nữa, tài liệu [36] chỉ phân tích thông lượng của mô hình đề xuất. Tài liệu [37] cũng nghiên cứu mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng NOMA và thu thập năng lượng vô tuyến. Các tác giả của [37] cũng đề xuất phương pháp chọn lựa nút chuyển tiếp tốt nhất tại mỗi chặng để nâng cao chất lượng kênh truyền. Hơn nữa, tài liệu [37] nghiên cứu mô hình bảo mật lớp vật lý với sự xuất hiện của các nút nghe lén. Dưới đây, chúng tôi tóm tắt những điểm khác biệt chính giữa bài báo này và các công trình liên quan [35]-[37]:

- Khác với các công trình [35]-[36], chúng tôi đề xuất mô hình chuyển tiếp dữ liệu sử dụng NOMA, từ một nút nguồn đến 02 nút đích khác nhau. Thật vậy, trong các công trình [35]-[36], nút nguồn sử dụng NOMA để gửi các dữ liệu đến cùng một nút đích. Hơn nữa, mô hình của chúng tôi nghiên cứu kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp

tốt nhất tại mỗi chặng, và trang bị nhiều anten cho các nút đích nhằm nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu.

- Khác với công trình [37], các nút đích trong bài báo này được trang bị nhiều anten và sử dụng kỹ thuật kết hợp SC. Hơn nữa, chúng tôi phân tích hiệu năng của mô hình đề xuất trên kênh truyền tổng quát Nakagami- m , với sự ảnh hưởng của khiếm khuyết phần cứng. Thật vậy, công trình [28] chỉ xem xét kênh fading Rayleigh và đã không đánh giá sự tác động của phần cứng không hoàn hảo lên chất lượng dịch vụ của mô hình.

- Cuối cùng, điểm khác biệt chính giữa bài báo này và các công trình kể trên đó là việc đánh giá xác suất dừng tại các nút đích. Cụ thể, các tác giả của [35]-[37] chưa quan tâm đến các điều kiện ràng buộc khi giải mã các tín hiệu tại mỗi chặng. Như đã đề cập ở trên, bài báo này xét đến trường hợp một nút chuyển tiếp chỉ giải mã thành công một tín hiệu, và chỉ chuyển tiếp tín hiệu đến chặng kế tiếp.

Tiếp đến, chúng tôi sẽ tóm tắt những đóng góp chính của bài báo này như sau:

- Đầu tiên, chúng tôi đề xuất mô hình áp dụng NOMA vào mạng chuyển tiếp đa chặng dạng cụm để đạt được tốc độ dữ liệu tăng gấp đôi, khi so với mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường (không sử dụng NOMA). Hơn nữa, kỹ thuật chuyển tiếp DF được sử dụng tại mỗi chặng để loại bỏ nhiễu cộng tại các nút chuyển tiếp, cũng như tránh được sự tích lũy nhiễu trong kỹ thuật chuyển tiếp AF.

- Thứ hai, chúng tôi đề xuất phương pháp chọn lựa nút chuyển tiếp tốt nhất tại mỗi cụm (dựa vào độ lợi kênh tức thời giữa các cụm liên kề), và kỹ thuật kết hợp chọn lựa SC tại các nút đích để nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu trên tất cả các chặng.

- Thứ ba, chúng tôi khảo sát sự ảnh hưởng của nhiễu gây ra do khiếm khuyết phần cứng lên hiệu năng của mô hình đề xuất. Thật vậy, bài báo này nghiên cứu về mạng WSN, trong đó, phần cứng của các thiết bị cảm biến thường rẻ tiền và chịu tác động đáng kể của nhiễu gây ra do sự không cân bằng I/Q, nhiễu pha, bộ khuếch đại không tuyến tính, v.v. [23]-[27]. Như đã được trình bày trong các công bố [23]-[25] của nhóm tác giả E. Bjornson, nhiều do phần cứng không hoàn hảo được mô hình hóa theo phân phối Gauss vì đến từ sự tác động tổng hợp của những khiếm khuyết phần cứng khác nhau trong thiết bị và khiếm khuyết phần cứng ở máy phát và máy thu là độc lập thống kê. Giá trị của mức khiếm khuyết phần cứng thường nằm trong khoảng [0, 0.03].

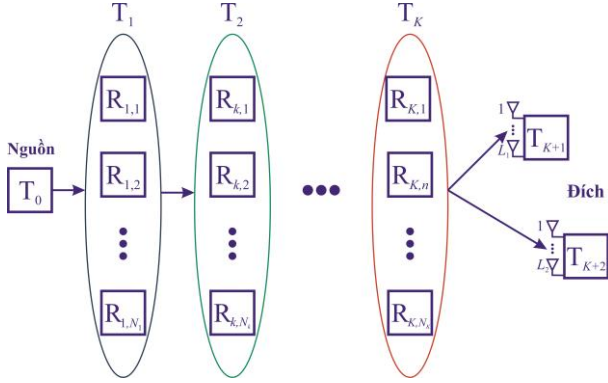
- Kế tiếp, chúng tôi đưa ra biểu thức dạng tường minh tính chính xác xác suất dừng OP tại các nút đích trên kênh truyền Nakagami- m . Các biểu thức xác suất dừng đều được kiểm chứng sự chính xác thông qua mô phỏng Monte Carlo.

- Cuối cùng, chúng tôi phân tích sự ảnh hưởng của các thông số hệ thống lên hiệu năng xác suất dừng của mô hình đề xuất, cũng như đưa ra các giải pháp thiết kế và tối ưu hiệu năng.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: phần II trình bày nguyên lý hoạt động của mô hình đề xuất. Phần III đánh giá chính xác xác suất dừng của mô hình đề xuất dưới sự ảnh hưởng của khiếm khuyết phần cứng trên kênh truyền Nakagami- m . Phần IV đưa ra các kết quả mô

phòng Monte Carlo nhằm kiểm chứng các phân tích lý thuyết đạt được. Cuối cùng, phần V đưa ra các kết luận, các giải pháp thiết kế, tối ưu mô hình và hướng phát triển của bài báo.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



HÌNH 1. MÔ HÌNH HỆ THỐNG.

Như mô tả trong Hình 1, nguồn T_0 muốn gửi cùng lúc hai dữ liệu x_1 và x_2 , lần lượt đến hai nút đích T_{K+1} và T_{K+2} . Do khoảng cách xa, nguồn T_0 không thể trực tiếp gửi dữ liệu đến hai đích T_{K+1} và T_{K+2} , mà phải thông qua các nút chuyển tiếp trung gian nằm trong các cụm. Không mất tính tổng quát, ta giả sử có tất cả K cụm trung gian, và cụm thứ k có N_k thành viên, ký hiệu là $R_{k,n}$, với $K \geq 1$, $N_k \geq 2$, $k = 1, 2, \dots, K$, $n = 1, 2, \dots, N_k$. Ở mỗi cụm, một trong các nút cụm sẽ được chọn để nhận dữ liệu và chuyển tiếp dữ liệu đến chặng tiếp theo. Ta ký hiệu nút được chọn ở cụm thứ k là T_k như trong Hình 1. Giả sử nút nguồn và các nút cụm chỉ có 01 ăngten và hoạt động ở chế độ bán song công. Ngược lại, các nút đích T_{K+1} và T_{K+2} được trang bị với L_1 và L_2 ăngten, và sử dụng bộ kết hợp SC để giải mã tín hiệu nhận được từ nút cụm được chọn T_k . Sự truyền dữ liệu giữa nguồn và các nút đích được thực hiện thông qua $(K+1)$ khe thời gian trực giao.

Xét sự truyền dữ liệu giữa nút phát X và nút thu Y, với $X, Y \in \{R_{k,n}, T_k\}$, $k = 1, \dots, K$, $n = 1, 2, \dots, N_k$ (nút Y không phải là một trong hai nút đích). Nếu nút X sử dụng NOMA, nút này sẽ kết hợp hai dữ liệu x_1 và x_2 như sau:

$$x_+ = \sqrt{a_1 P} x_1 + \sqrt{a_2 P} x_2. \quad (1)$$

Trong công thức (1), P là công suất phát của nút X, và giả sử rằng tất cả các nút phát đều có cùng công suất phát P . Cũng trong công thức (1), a_1 và a_2 lần lượt là các hệ số phân bổ công suất đối với các tín hiệu x_1 và x_2 . Không mất tính tổng quát, giả sử tín hiệu x_1 là tín hiệu được ưu tiên, và ta có: $0 < a_2 < a_1 < 1$, $a_1 + a_2 = 1$. Dưới sự ảnh hưởng của phân cứng không hoàn hảo, tín hiệu nhận được tại Y là:

$$\begin{aligned} y &= h_{XY} x_+ + v_{XY} + n_Y \\ &= \sqrt{a_1 P} h_{XY} x_1 + \sqrt{a_2 P} h_{XY} x_2 + v_{XY} + n_Y. \end{aligned} \quad (2)$$

Trong công thức (2), v là nhiễu gây ra do phân cứng

không hoàn hảo. Tương tự như trong các tài liệu [23]-[27], v_{XY} có phân phối Gauss với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai $\kappa_{XY}^2 P |h_{XY}|^2$, với κ_{XY}^2 là tổng mức khiếm khuyết phần cứng tại X và Y. n_Y trong (2) là nhiễu Gauss có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai là σ_Y^2 . Để đơn giản về mặt trình bày, ta giả sử κ_{XY}^2 và σ_Y^2 giống nhau trên tất cả các liên kết X-Y, và được ký hiệu là $\kappa_{XY}^2 \equiv \kappa^2$ và $\sigma_Y^2 \equiv \sigma_0^2$. Ta cũng ký hiệu độ lợi kênh $|h_{XY}|^2$ như sau: $\gamma_{XY} = |h_{XY}|^2$.

Trên kênh fading Nakagami- m , hàm mật độ xác suất (PDF) và hàm phân phối tích lũy (CDF) của γ_{XY} lần lượt được viết ra như sau: (xem tài liệu [35])

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{XY}}(x) &= \frac{(\Omega_{XY})^{m_{XY}}}{(m_{XY}-1)!} x^{m_{XY}-1} \exp(-\Omega_{XY} x), \\ F_{\gamma_{XY}}(x) &= \frac{\gamma(m_{XY}, \Omega_{XY} x)}{\Gamma(m_{XY})}, \end{aligned} \quad (3)$$

với $\Gamma(\cdot)$ là hàm Gamma và $\gamma(\cdot, \cdot)$ là hàm Gamma không hoàn thành [38].

Trong công thức (3), m_{XY} là hệ số Nakagami- m , và m_{XY} nhận giá trị nguyên dương. $\Omega_{XY} = m_{XY} d_{XY}^\beta$, với d_{XY} là khoảng cách giữa X và Y, và β là hệ số suy hao đường truyền [39].

Theo nguyên lý hoạt động của NOMA, máy thu sẽ giải mã dữ liệu x_1 , sau đó loại bỏ thành phần $\sqrt{a_1 P} h_{XY} x_1$ ra khỏi tín hiệu nhận được để giải mã dữ liệu x_2 . Do đó, tỷ số SNR (Signal-to-Noise Ratio) đạt được theo x_1 và x_2 lần lượt là:

$$\phi_{XY, x_1}^{\text{NOMA}} = \frac{a_1 P \gamma_{XY}}{(a_2 + \kappa^2) P \gamma_{XY} + \sigma_0^2} = \frac{a_1 \Delta \gamma_{XY}}{(a_2 + \kappa^2) \Delta \gamma_{XY} + 1}, \quad (4)$$

$$\phi_{XY, x_2}^{\text{NOMA}} = \frac{a_2 P \gamma_{XY}}{\kappa^2 P \gamma_{XY} + \sigma_0^2} = \frac{a_2 \Delta \gamma_{XY}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{XY} + 1}, \quad (5)$$

với $\Delta = P/\sigma_0^2$.

Bây giờ, ta xét đến trường hợp nút phát X không sử dụng NOMA (ví dụ nút X chỉ có gửi dữ liệu x_1); nút X sẽ sử dụng toàn bộ công suất phát P để gửi x_1 đến Y. Tín hiệu nhận được tại Y trong trường hợp này là:

$$z = \sqrt{P} h_{XY} x_1 + v_{XY} + n_Y. \quad (6)$$

Do đó, tỷ số SNR đạt được trong công thức (6) là:

$$\phi_{XY}^{\text{Non-NOMA}} = \frac{P \gamma_{XY}}{\kappa^2 P \gamma_{XY} + \sigma_0^2} = \frac{\Delta \gamma_{XY}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{XY} + 1}. \quad (7)$$

Xét sự truyền dữ liệu ở chặng thứ k , $1 \leq k \leq K$; trong đó nút T_{k-1} sẽ gửi dữ liệu đến nút T_k . Nhắc lại rằng T_{k-1} là nút được chọn ở cụm thứ $(k-1)$ và T_k là nút được chọn ở cụm thứ k . Tương tự, nút T_k được chọn dựa vào độ lợi kênh giữa nút T_{k-1} và các nút thuộc cụm thứ k , để

mà độ lợi kênh đạt được giữa T_{k-1} và T_k là lớn nhất. Thật vậy, ta có thể viết:

$$T_k : \gamma_{T_{k-1}T_k} = \max_{n=1,2,\dots,N_k} (\gamma_{T_{k-1}R_{k,n}}). \quad (8)$$

Sử dụng hàm CDF trong công thức (3), ta đạt được hàm CDF của $\gamma_{T_{k-1}T_k}$ như sau:

$$F_{\gamma_{T_{k-1}T_k}}(x) = \Pr\left(\max_{n=1,2,\dots,N_k} (\gamma_{T_{k-1}R_{k,n}}) < x\right) \\ = \left[\frac{\gamma(m_{T_{k-1}T_k}, \Omega_{T_{k-1}T_k}, x)}{\Gamma(m_{T_{k-1}T_k})}\right]^{N_k}. \quad (9)$$

Trong công thức (9), để đơn giản cho việc ký hiệu, ta giả sử rằng $m_{T_{k-1}R_{k,n}} = m_{T_{k-1}T_k}, \forall k, n$. Hơn nữa, bởi vì các nút trong một cụm là rất gần nhau, vì vậy khoảng cách giữa nút T_{k-1} đến các nút của cụm thứ k là gần như tương đương, cụ thể $d_{T_{k-1}R_{k,n}} \approx d_{T_{k-1}T_k} (\forall k, n)$. Do đó, ta có:

$$\Omega_{T_{k-1}R_{k,n}} = \Omega_{T_{k-1}T_k}, \forall k, n. \quad (10)$$

Nếu T_{k-1} đã đạt được cả hai dữ liệu x_1 và x_2 ở chặng trước đó, T_{k-1} sẽ sử dụng NOMA để gửi đồng thời x_1 và x_2 đến T_k . Sử dụng các kết quả đạt được trong các công thức (4) và (5), ta viết ra các công thức SNR dùng để giải mã x_1 và x_2 lần lượt là:

$$\phi_{T_{k-1}T_k, x_1}^{\text{NOMA}} = \frac{a_1 \Delta \gamma_{T_{k-1}T_k}}{(a_2 + \kappa^2) \Delta \gamma_{T_{k-1}T_k} + 1}, \quad (11)$$

$$\phi_{T_{k-1}T_k, x_2}^{\text{NOMA}} = \frac{a_2 \Delta \gamma_{T_{k-1}T_k}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{T_{k-1}T_k} + 1}. \quad (12)$$

Hơn nữa, nếu nút T_k giải mã được cả hai dữ liệu x_1 và x_2 , nút này sẽ sử dụng NOMA để gửi hai dữ liệu này đến chặng kế tiếp. Nếu nút T_k chỉ có thể giải mã x_1 mà không thể giải mã x_2 , nút T_k chỉ gửi x_1 đến chặng tiếp theo. Tuy nhiên, nếu T_k không thể giải mã cả x_1 (cũng sẽ không giải mã được x_2), thì x_1 và x_2 sẽ không được gửi đến chặng kế tiếp.

Tiếp theo, xét trường hợp nút T_{k-1} chỉ nhận được dữ liệu x_1 trước đó. Trong trường hợp này, sử dụng công thức (7), tỷ số SNR đạt được tại T_k để giải mã x_1 sẽ là:

$$\phi_{T_{k-1}T_k}^{\text{Non-NOMA}} = \frac{\Delta \gamma_{T_{k-1}T_k}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{T_{k-1}T_k} + 1}. \quad (13)$$

Xét chặng cuối cùng, nút T_K sẽ gửi dữ liệu đến các đích T_{K+1} và T_{K+2} . Thật vậy, nếu T_K đã đạt được cả x_1 và x_2 , nút này sẽ sử dụng NOMA để gửi đồng thời hai dữ liệu này đến T_{K+1} và T_{K+2} . Tương tự như (2), tín hiệu nhận được tại ăngten thu thứ u của T_{K+1} và ăngten thu thứ v của T_{K+2} lần lượt là

$$z_{T_{K+1},u} = \sqrt{a_1 P} h_{T_K T_{K+1}}^{(u)} x_1 + \sqrt{a_2 P} h_{T_K T_{K+1}}^{(u)} x_2 + v_{T_K T_{K+1}} + n_{T_{K+1}}, \quad (14)$$

$$z_{T_{K+2},v} = \sqrt{a_1 P} h_{T_K T_{K+2}}^{(v)} x_1 + \sqrt{a_2 P} h_{T_K T_{K+2}}^{(v)} x_2 + v_{T_K T_{K+2}} + n_{T_{K+2}}, \quad (15)$$

với $h_{T_K T_{K+1}}^{(u)}$ và $h_{T_K T_{K+2}}^{(v)}$ là hệ số kênh truyền Nakagami- m giữa T_K và ăngten thứ u của T_{K+1} , và giữa T_K và ăngten thứ v của T_{K+2} , $u=1,2,\dots,L_1$, $v=1,2,\dots,L_2$.

Bởi vì đích T_{K+1} sẽ trực tiếp giải mã dữ liệu x_1 mong muốn, tương tự như (4) và (11), tỷ số SNR nhận được trên ăngten thứ u của nút đích T_{K+1} sẽ là:

$$\phi_{T_K T_{K+1}, x_1}^{\text{NOMA},u} = \frac{a_1 \Delta \gamma_{T_K T_{K+1}}^{(u)}}{(a_2 + \kappa^2) \Delta \gamma_{T_K T_{K+1}}^{(u)} + 1}, \quad (16)$$

với $\gamma_{T_K T_{K+1}}^{(u)} = |h_{T_K T_{K+1}}^{(u)}|^2$.

Sử dụng kỹ thuật kết hợp chọn lựa (SC), đích T_{K+1} sẽ chọn ăngten đạt được SNR lớn nhất để giải mã dữ liệu. Do đó, tỷ số SNR đạt được tại T_{K+1} sẽ là:

$$\phi_{T_K T_{K+1}, x_1}^{\text{NOMA,SC}} = \max_{u=1,2,\dots,L_1} (\phi_{T_K T_{K+1}, x_1}^{\text{NOMA},u}) \\ = \frac{a_1 \Delta \gamma_{T_K T_{K+1}}^{\max}}{(a_2 + \kappa^2) \Delta \gamma_{T_K T_{K+1}}^{\max} + 1}, \quad (17)$$

với $\gamma_{T_K T_{K+1}}^{\max} = \max_{u=1,2,\dots,L_1} (\gamma_{T_K T_{K+1}}^{(u)})$. Tương tự như (9), hàm CDF của $\gamma_{T_K T_{K+1}}^{\max}$ được viết ra dưới dạng sau:

$$F_{\gamma_{T_K T_{K+1}}^{\max}}(x) = \left[\frac{\gamma(m_{T_K T_{K+1}}, \Omega_{T_K T_{K+1}}, x)}{\Gamma(m_{T_K T_{K+1}})}\right]^{L_1}. \quad (18)$$

Đối với đích T_{K+2} , nút này phải giải mã dữ liệu x_1 trước, sau đó tiến hành SIC để giải mã x_2 . Một lần nữa, sử dụng các công thức (4) và (5), ta có được các tỷ số SNR tại ăngten thứ v của nút đích T_{K+2} , khi giải mã x_1 và x_2 ; lần lượt là:

$$\phi_{T_K T_{K+2}, x_1}^{\text{NOMA},v} = \frac{a_1 \Delta \gamma_{T_K T_{K+2}}^{(v)}}{(a_2 + \kappa^2) \Delta \gamma_{T_K T_{K+2}}^{(v)} + 1}, \quad (19)$$

$$\phi_{T_K T_{K+2}, x_2}^{\text{NOMA},v} = \frac{a_2 \Delta \gamma_{T_K T_{K+2}}^{(v)}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{T_K T_{K+2}}^{(v)} + 1}, \quad (20)$$

với $\gamma_{T_K T_{K+2}}^{(v)} = |h_{T_K T_{K+2}}^{(v)}|^2$.

Giống như đích T_{K+1} , đích T_{K+2} cũng áp dụng kỹ thuật kết hợp SC, và tỷ số SNR đối với các tín hiệu x_1 và x_2 cũng được tính như sau:

$$\phi_{T_K T_{K+2}, x_1}^{\text{NOMA,SC}} = \frac{a_1 \Delta \gamma_{T_K T_{K+2}}^{\max}}{(a_2 + \kappa^2) \Delta \gamma_{T_K T_{K+2}}^{\max} + 1}, \quad (21)$$

$$\phi_{T_K T_{K+2}, x_2}^{\text{NOMA,SC}} = \frac{a_2 \Delta \gamma_{T_K T_{K+2}}^{\max}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{T_K T_{K+2}}^{\max} + 1}, \quad (22)$$

với $\gamma_{T_K T_{K+2}}^{\max} = \max_{v=1,2,\dots,L_2} (\gamma_{T_K T_{K+2}}^{(v)})$. Tương tự, hàm CDF của $\gamma_{T_K T_{K+2}}^{\max}$ sẽ là:

$$F_{\gamma_{T_k T_{K+2}}^{\max}}(x) = \left[\frac{\gamma(m_{T_k T_{K+2}}, \Omega_{T_k T_{K+2}} x)}{\Gamma(m_{T_k T_{K+2}})} \right]^{L_2}. \quad (23)$$

Ta xét đến trường hợp thứ hai, khi nút T_k chỉ giải mã được dữ liệu x_1 từ nút T_{K-1} . Do đó, nút T_k chỉ gửi x_1 đến đích T_{K+1} , và trong trường hợp này, đích T_{K+2} sẽ không nhận được dữ liệu mong muốn. Tương tự, tỷ số SNR đạt được tại T_{K+1} để giải mã dữ liệu x_1 , sau khi thực hiện kỹ thuật kết hợp chọn lựa, sẽ là:

$$\varphi_{T_k T_{K+1}}^{\text{Non-NOMA,SC}} = \frac{\Delta \gamma_{T_k T_{K+1}}^{\max}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{T_k T_{K+1}}^{\max} + 1}. \quad (24)$$

Tiếp đến, ta xây dựng công thức tính dung lượng kênh tức thời đạt được ở các chặng. Bởi vì sự truyền dữ liệu giữa nút nguồn và các nút đích được thực hiện qua $(K+1)$ khe thời gian trực giao, dung lượng kênh đạt được giữa hai nút cụm liên kề T_{k-1} và T_k ($k=1,2,\dots,K$) được tính như sau:

$$C_{T_{k-1} T_k}^Q = \frac{1}{K+1} \log_2(1 + \varphi_{T_{k-1} T_k}^Q), \quad (25)$$

$Q \in \{\text{NOMA, Non-NOMA}\}$.

Ở chặng cuối cùng, dung lượng kênh tức thời đạt được tại T_{K+1} và T_{K+2} lần lượt là:

$$C_{T_k T_{K+1}}^{\text{Q,SC}} = \frac{1}{K+1} \log_2(1 + \varphi_{T_k T_{K+1}}^{\text{Q,SC}}), \quad (26)$$

$$C_{T_k T_{K+2}}^{\text{NOMA,SC}} = \frac{1}{K+1} \log_2(1 + \varphi_{T_k T_{K+2}}^{\text{NOMA,SC}}), \quad (27)$$

với $i=1,2$.

III. ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

Trong bài báo này, chúng tôi đánh giá xác suất dừng (OP) tại cả hai nút đích. Đầu tiên, giả sử rằng dữ liệu có thể giải mã thành công nếu như dung lượng kênh tức thời lớn hơn một ngưỡng xác định, ký hiệu C_{th} . Ngược lại, nếu dung lượng kênh tức thời nhỏ hơn C_{th} , thì dữ liệu sẽ không thể giải mã đúng hay thiết bị thu sẽ bị dừng.

Thật vậy, xác suất mà nút cụm T_k ($k=1,2,\dots,K$) giải mã thành công cả x_1 và x_2 từ T_{k-1} được đưa ra như sau:

$$\begin{aligned} \theta_{k,x_1,x_2} &= \Pr(C_{T_{k-1} T_k}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_{k-1} T_k}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}) \\ &= \Pr\left(\frac{a_1 \Delta \gamma_{T_{k-1} T_k}}{(a_2 + \kappa^2) \Delta \gamma_{T_{k-1} T_k} + 1} \geq \rho_{\text{th}}, \frac{a_2 \Delta \gamma_{T_{k-1} T_k}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{T_{k-1} T_k} + 1} \geq \rho_{\text{th}}\right), \end{aligned} \quad (28)$$

với

$$\rho_{\text{th}} = 2^{\wedge}((K+1)C_{\text{th}}) - 1. \quad (29)$$

Từ công thức (28), ta thấy nếu $a_1 - (a_2 + \kappa^2) \rho_{\text{th}} \leq 0$ hoặc $a_2 - \kappa^2 \rho_{\text{th}} \leq 0$ thì $\theta_{k,x_1,x_2} = 0$. Do đó, các hệ số phân chia công suất a_1 và a_2 cần được thiết kế, để mà:

$$\begin{cases} a_1 - (a_2 + \kappa^2) \rho_{\text{th}} > 0 \\ a_2 - \kappa^2 \rho_{\text{th}} > 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{(1 + \kappa^2) \rho_{\text{th}}}{1 + \rho_{\text{th}}} < a_1 < 1 - \kappa^2 \rho_{\text{th}} \\ a_2 = 1 - a_1 \end{cases} \quad (30)$$

Trong công thức (30), ta cần có điều kiện:

$$\kappa^2 < \frac{1}{\rho_{\text{th}}^2 + 2\rho_{\text{th}}}. \quad (31)$$

Giả sử các điều kiện trong (30) và (31) thỏa mãn, ta viết lại công thức (28) dưới dạng sau:

$$\begin{aligned} \theta_{k,x_1,x_2} &= \Pr\left(\gamma_{T_{k-1} T_k} \geq \frac{\rho_{\text{th}}}{(a_1 - (a_2 + \kappa^2) \rho_{\text{th}}) \Delta}, \right. \\ &\quad \left. \gamma_{T_{k-1} T_k} \geq \frac{\rho_{\text{th}}}{(a_2 - \kappa^2 \rho_{\text{th}}) \Delta}\right) \\ &= \Pr(\gamma_{T_{k-1} T_k} \geq \max(\omega_1, \omega_2)) \\ &= 1 - F_{\gamma_{T_{k-1} T_k}}(\max(\omega_1, \omega_2)), \end{aligned} \quad (32)$$

với

$$\omega_1 = \frac{\rho_{\text{th}}}{(a_1 - (a_2 + \kappa^2) \rho_{\text{th}}) \Delta}, \omega_2 = \frac{\rho_{\text{th}}}{(a_2 - \kappa^2 \rho_{\text{th}}) \Delta}. \quad (33)$$

Như đã thảo luận trong [40], giá trị của a_1 phải đủ lớn khi so với giá trị a_2 (để SNR của x_1 ở các chặng đủ lớn). Vì vậy, tương tự như [40], ta có thiết kế sau:

$$a_1 > \frac{1 + \rho_{\text{th}}}{2 + \rho_{\text{th}}} \text{ or } \omega_1 < \omega_2. \quad (34)$$

Do đó, ta viết lại công thức (32) dưới dạng:

$$\theta_{k,x_1,x_2}^{\text{NOMA}} = 1 - F_{\gamma_{T_{k-1} T_k}}(\omega_2). \quad (35)$$

Thay CDF trong (9) vào trong (35), ta được công thức tính chính xác của $\theta_{k,x_1,x_2}^{\text{NOMA}}$.

Tiếp theo, ta xét xác suất nút T_k giải mã thành công x_1 nhưng không thể giải mã được x_2 từ nút T_{k-1} . Tương tự, ta tính được:

$$\begin{aligned} \theta_{k,x_1,x_2}^{\text{NOMA}} &= \Pr(C_{T_{k-1} T_k}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_{k-1} T_k}^{\text{NOMA}} < C_{\text{th}}) \\ &= F_{\gamma_{T_{k-1} T_k}}(\omega_2) - F_{\gamma_{T_{k-1} T_k}}(\omega_1). \end{aligned} \quad (36)$$

Tương tự, xác suất nút T_k không giải mã được x_1 được tính như sau:

$$\begin{aligned} \theta_{k,x_1}^{\text{NOMA}} &= \Pr(C_{T_{k-1} T_k}^{\text{NOMA}} < C_{\text{th}}) \\ &= F_{\gamma_{T_{k-1} T_k}}(\omega_1). \end{aligned} \quad (37)$$

Trong trường hợp nút T_{k-1} chỉ gửi dữ liệu x_1 đến nút T_k , sử dụng công thức (13), xác suất T_k giải mã không thành công dữ liệu x_1 sẽ là:

$$\begin{aligned}\theta_{k,x_1}^{\text{Non-NOMA}} &= \Pr\left(C_{T_{k-1}T_k}^{\text{Non-NOMA}} < C_{\text{th}}\right) \\ &= \Pr\left(\gamma_{T_{k-1}T_k} < \frac{\rho_{\text{th}}}{(1-\kappa^2\rho_{\text{th}})\Delta}\right) \\ &= F_{\gamma_{T_{k-1}T_k}}(\omega_3),\end{aligned}\quad (38)$$

với

$$\omega_3 = \frac{\rho_{\text{th}}}{(1-\kappa^2\rho_{\text{th}})\Delta}.\quad (39)$$

Do đó, xác suất nút T_k giải mã thành công dữ liệu x_1 trong trường hợp này là:

$$\theta_{k,x_1}^{\text{Non-NOMA}} = 1 - F_{\gamma_{T_{k-1}T_k}}(\omega_3).\quad (40)$$

Bây giờ, xét sự truyền dữ liệu ở chặng cuối cùng; trong trường hợp T_K sử dụng NOMA để gửi cùng lúc 02 dữ liệu x_1 và x_2 đến các nút đích, xác suất dừng tại đích T_{K+1} và T_{K+2} lần lượt là:

$$\begin{aligned}\theta_{K+1,x_1}^{\text{NOMA}} &= \Pr\left(C_{T_K T_{K+1}}^{\text{NOMA,SC}} < C_{\text{th}}\right) = \Pr\left(\gamma_{T_K T_{K+1}}^{\text{max}} < \omega_1\right) \\ &= F_{\gamma_{T_K T_{K+1}}^{\text{max}}}(\omega_1),\end{aligned}\quad (41)$$

$$\begin{aligned}\theta_{K+1,x_2}^{\text{NOMA}} &= \Pr\left(C_{T_K T_{K+2},x_1}^{\text{NOMA,SC}} < C_{\text{th}}\right) \\ &+ \Pr\left(C_{T_K T_{K+2},x_1}^{\text{NOMA,SC}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_K T_{K+2},x_2}^{\text{NOMA,SC}} < C_{\text{th}}\right) \\ &= \Pr\left(C_{T_K T_{K+2},x_2}^{\text{NOMA,SC}} < C_{\text{th}}\right) = \Pr\left(\gamma_{T_K T_{K+2}}^{\text{max}} < \omega_2\right) \\ &= F_{\gamma_{T_K T_{K+2}}^{\text{max}}}(\omega_2).\end{aligned}\quad (42)$$

Lần lượt thay các hàm CDF trong công thức (18) và (23) vào trong (40) và (41), ta đạt được các biểu thức chính xác cho $\theta_{K+1,x_1}^{\text{NOMA}}$ và $\theta_{K+1,x_2}^{\text{NOMA}}$.

Trong trường hợp nút T_K chỉ gửi dữ liệu x_1 đến đích T_{K+1} , xác suất dừng tại đích T_{K+1} trong trường hợp này được tính như sau:

$$\begin{aligned}\theta_{K+1,x_1}^{\text{Non-NOMA}} &= \Pr\left(C_{T_K T_{K+1}}^{\text{Non-NOMA,SC}} < C_{\text{th}}\right) \\ &= \Pr\left(\gamma_{T_K T_{K+1}}^{\text{max}} < \omega_3\right) \\ &= F_{\gamma_{T_K T_{K+1}}^{\text{max}}}(\omega_3).\end{aligned}\quad (43)$$

A.1 Xác suất dừng tại đích T_{K+1}

Trước hết, việc truyền dữ liệu đến đích T_{K+1} sẽ không thành công (hay bị dừng) nếu sự truyền dữ liệu trên bất kỳ chặng nào đó không thành công. Gọi u là chặng mà sự truyền dữ liệu x_1 trên chặng đó không thành công, $u=1,2,\dots,K+1$. Hơn nữa, sự truyền dữ liệu x_1 ở $(u-1)$ chặng trước đó phải thành công. Ta cũng nhận thấy rằng sự truyền dữ liệu x_1 tại mỗi chặng cũng liên quan đến sự truyền của dữ liệu x_2 . Theo đó, nếu x_2 được giải mã thành công ở chặng liền trước đó, thì ở chặng u này, nút phát phải sử dụng kỹ thuật NOMA để gửi cả hai dữ liệu đến nút kế tiếp. Ngược lại, nếu ở chặng liền trước đó, chỉ có dữ liệu x_1 được giải mã thành công, thì nút phát ở

chặng thứ u này dùng tất cả công suất phát để gửi dữ liệu x_1 đến nút kế tiếp.

Gọi w là chặng mà ở đó sự giải mã dữ liệu x_2 không thành công, $w=1,2,\dots,u$. Thật vậy, nếu $w=u$, tức là cả hai dữ liệu x_1 và x_2 đều được giải mã thành công ở $(u-1)$ chặng trước đó. Trong trường hợp $w < u$, cả hai dữ liệu x_1 và x_2 đều được giải mã thành công từ chặng thứ nhất đến chặng thứ $(w-1)$, và từ chặng thứ $(w+1)$ đến chặng thứ u , chỉ có dữ liệu x_1 được gửi.

Theo các phân tích trên, xác suất dừng tại đích T_{K+1} được xây dựng như sau:

$$\begin{aligned}\text{OP}_{T_{K+1}} &= \Pr\left(C_{T_0 T_1, x_1}^{\text{NOMA}} < C_{\text{th}}\right) \\ &= \left[\sum_{w=1}^{u-1} \left(\prod_{t=1}^{w-1} \Pr\left(C_{T_{t-1} T_t, x_1}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_{t-1} T_t, x_2}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}\right) \right) \right. \\ &\quad \left. \times \Pr\left(C_{T_{w-1} T_w, x_1}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_{w-1} T_w, x_2}^{\text{NOMA}} < C_{\text{th}}\right) \right] \\ &+ \sum_{u=2}^K \left[\prod_{r=w+1}^{u-1} \Pr\left(C_{T_{r-1} T_r, x_1}^{\text{Non-NOMA}} \geq C_{\text{th}}\right) \Pr\left(C_{T_{r-1} T_r, x_1}^{\text{Non-NOMA}} < C_{\text{th}}\right) \right. \\ &\quad \left. + \prod_{q=1}^{u-1} \left(\Pr\left(C_{T_{q-1} T_q, x_1}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_{q-1} T_q, x_2}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}\right) \right) \right. \\ &\quad \left. \times \Pr\left(C_{T_{u-1} T_u, x_1}^{\text{NOMA}} < C_{\text{th}}\right) \right] \\ &+ \sum_{w=1}^K \left[\prod_{t=1}^{w-1} \Pr\left(C_{T_{t-1} T_t, x_1}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_{t-1} T_t, x_2}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}\right) \right. \\ &\quad \left. \times \Pr\left(C_{T_{w-1} T_w, x_1}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_{w-1} T_w, x_2}^{\text{NOMA}} < C_{\text{th}}\right) \right] \\ &\quad \times \left(\prod_{r=w+1}^K \Pr\left(C_{T_{r-1} T_r, x_1}^{\text{Non-NOMA}} \geq C_{\text{th}}\right) \right) \Pr\left(C_{T_K T_{K+1}, x_1}^{\text{Non-NOMA,SC}} < C_{\text{th}}\right) \\ &+ \prod_{q=1}^K \left(\Pr\left(C_{T_{q-1} T_q, x_1}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}, C_{T_{q-1} T_q, x_2}^{\text{NOMA}} \geq C_{\text{th}}\right) \right) \\ &\quad \times \Pr\left(C_{T_K T_{K+1}, x_1}^{\text{NOMA,SC}} < C_{\text{th}}\right).\end{aligned}\quad (44)$$

Sử dụng các kết quả đạt được từ (35), (36), (37), (39)-(42), xác suất dừng tại đích T_{K+1} được tính chính xác theo công thức sau:

$$\begin{aligned}\text{OP}_{T_{K+1}} &= \theta_{1,x_1}^{\text{NOMA}} \\ &+ \sum_{u=2}^K \left[\sum_{w=1}^{u-1} \left(\prod_{t=1}^{w-1} \theta_{t,x_1,x_2}^{\text{NOMA}} \right) \theta_{w,x_1,x_2}^{\text{NOMA}} \left(\prod_{r=w+1}^{u-1} \theta_{r,x_1}^{\text{Non-NOMA}} \right) \theta_{u,x_1}^{\text{Non-NOMA}} \right] \\ &\quad + \left[\prod_{q=1}^{u-1} \theta_{q,x_1,x_2}^{\text{NOMA}} \right] \theta_{u,x_1}^{\text{NOMA}} \\ &+ \sum_{w=1}^K \left(\prod_{t=1}^{w-1} \theta_{t,x_1,x_2}^{\text{NOMA}} \right) \theta_{w,x_1,x_2}^{\text{NOMA}} \left(\prod_{r=w+1}^K \theta_{r,x_1}^{\text{Non-NOMA}} \right) \theta_{K+1,x_1}^{\text{Non-NOMA}} \\ &\quad + \left(\prod_{q=1}^K \theta_{q,x_1,x_2}^{\text{NOMA}} \right) \theta_{K+1,x_1}^{\text{NOMA}}.\end{aligned}\quad (45)$$

A.2 Xác suất dừng tại đích T_{K+2}

Ta có thể quan sát rằng, dữ liệu x_2 không thể đến đích T_{K+2} nếu sự truyền ở chặng thứ u không thành công, $u=1,2,\dots,K+1$. Hơn nữa, dữ liệu x_2 bị rơi ở chặng thứ u , điều này có nghĩa sự giải mã dữ liệu x_2 ở $(u-1)$ chặng trước đó phải thành công, và sự giải mã dữ liệu x_1 ở $(u-1)$ chặng trước đó cũng phải thành công.

Xét sự dừng của dữ liệu x_2 ở chặng thứ u , ta thấy rằng xác suất dừng sẽ bằng tổng xác suất dừng của hai trường hợp: i) nút T_u không thể giải mã được x_1 và vì vậy, T_u cũng không giải mã được x_2 , ii) nút T_u giải mã được x_1 nhưng không giải mã được x_2 .

Từ những lập luận trên, xác suất dừng tại đích T_{K+2} được xây dựng như trong công thức (46) bên dưới:

$$\begin{aligned} OP_{T_{K+2}} &= \Pr(C_{T_0T_1}^{NOMA} < C_{th}) + \Pr(C_{T_0T_1}^{NOMA} \geq C_{th}, C_{T_0T_1T_2}^{NOMA} < C_{th}) \\ &+ \sum_{u=2}^K \left[\left(\prod_{w=1}^{u-1} \Pr(C_{T_{w-1}T_w}^{NOMA} \geq C_{th}, C_{T_{w-1}T_w}^{NOMA} \geq C_{th}) \right) \right. \\ &\quad \left. \times \left(\Pr(C_{T_{u-1}T_u}^{NOMA} < C_{th}) + \Pr(C_{T_{u-1}T_u}^{NOMA} \geq C_{th}, C_{T_{u-1}T_u}^{NOMA} < C_{th}) \right) \right] \\ &+ \left(\prod_{w=1}^K \Pr(C_{T_w}^{NOMA} \geq C_{th}, C_{T_w}^{NOMA} \geq C_{th}) \right) \\ &\times \left(\Pr(C_{T_K T_{K+2}}^{NOMA,SC} < C_{th}) + \Pr(C_{T_K T_{K+2}}^{NOMA,SC} \geq C_{th}, C_{T_K T_{K+2}}^{NOMA,SC} < C_{th}) \right). \end{aligned} \quad (46)$$

Sử dụng các kết quả đạt được từ (35), (36), (37), (39)-(42), xác suất dừng tại đích T_{K+2} được tính chính xác theo công thức sau:

$$\begin{aligned} OP_{T_{K+2}} &= \theta_{1,x_1}^{NOMA} + \theta_{1,x_2}^{NOMA} \\ &+ \sum_{u=2}^K \left[\left(\prod_{w=1}^{u-1} \theta_{w,x_1}^{NOMA} \right) \left(\theta_{u,x_1}^{NOMA} + \theta_{u,x_2}^{NOMA} \right) \right] \\ &+ \left(\prod_{w=1}^K \theta_{w,x_1}^{NOMA} \right) \left(\theta_{K+1,x_1}^{NOMA} + \theta_{K+1,x_2}^{NOMA} \right). \end{aligned} \quad (47)$$

IV. KẾT QUẢ

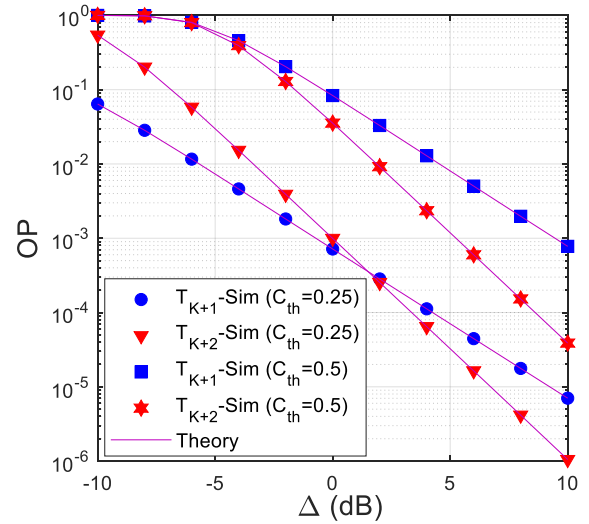
Trong phần IV này, các kết quả mô phỏng Monte Carlo sẽ được thực hiện để kiểm chứng các công thức xác suất dừng $OP_{T_{K+1}}$ và $OP_{T_{K+2}}$ (xem (45) và (47)). Trong các mô phỏng Monte Carlo, chúng tôi thực hiện từ 10^6 đến 10^7 phép thử để các kết quả mô phỏng hội tụ về các kết quả lý thuyết. Cụ thể, trong mỗi phép thử, độ lợi kênh Nakagami- m giữa hai nút X và Y , $X, Y \in \{R_{k,n}, T_k\}$, $k=1, \dots, K$, $n=1, 2, \dots, N_k$, được mô phỏng như sau:

$$\gamma_{XY} = \text{gamrnd}(m_{XY}, 1/d_{XY}^\beta / m_{XY}), \quad (48)$$

trong đó, $\text{gamrnd}()$ là một hàm Matlab tạo ra một biến ngẫu nhiên có phân phối Gamma. Ta cũng xét mặt phẳng không gian hai chiều Oxy, trong đó nút nguồn T_0 được cố định tại vị trí (1,0), nút đích T_{K+1} được cố định tại vị trí (1,0) và nút đích T_{K+2} được cố định ở vị trí (1, 0.1). Tất cả các nút trong cụm thứ k , $k=1, 2, \dots, K$, có vị trí gần nhau với tọa độ là $\left(\frac{k}{K+1}, 0\right)$. Trong tất cả các kết

quả, hệ số suy hao đường truyền (β) được cố định bằng 3, các kết quả mô phỏng Monte Carlo được ký hiệu bằng Sim, và các kết quả phân tích lý thuyết được ký hiệu bằng Theory. Tất cả các kết quả đã cho thấy rằng kết quả mô phỏng và lý thuyết trùng với nhau, và điều này kiểm chứng tính đúng đắn của các công thức (45) và (47).

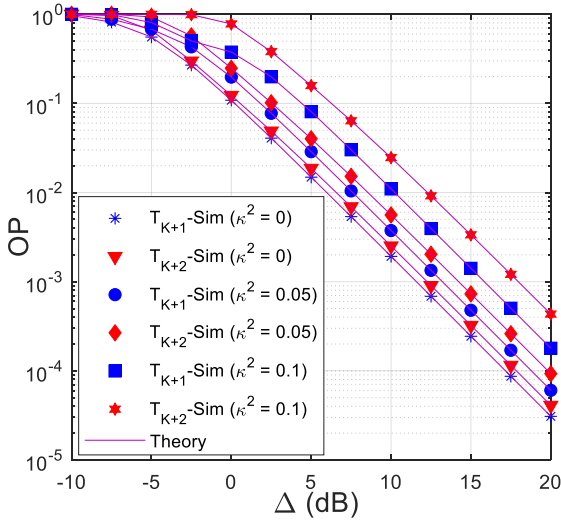
Hình 2 vẽ xác suất dừng (OP) tại hai nút đích T_{K+1} và T_{K+2} theo Δ (dB). Trong Hình 2, số cụm trung gian (K) bằng 3, và số nút trong mỗi cụm lần lượt là $N_1=2$, $N_2=4$ và $N_3=3$. Hệ số kênh Nakagami- m tại các chặng được thiết lập như sau: $m_{T_0T_1}=1.5$, $m_{T_1T_2}=2$ và $m_{T_2T_3}=1.75$, và hệ số kênh Nakagami- m giữa T_K và hai nút đích lần lượt là $m_{T_K T_{K+1}}=1$ và $m_{T_K T_{K+2}}=1.5$. Số ăng ten tại các nút đích lần lượt là $L_1=2$, $L_2=3$, hệ số phân bố công suất a_1 bằng 0.8, và mức khiếm khuyết phần cứng κ^2 bằng 0.01. Hình 2 cho ta thấy xác suất dừng tại cả hai nút đích giảm khi giá trị Δ tăng (bởi vì công suất phát của các nút tăng khi Δ tăng). Hình 2 cũng cho thấy xác suất dừng OP tại cả hai đích giảm mạnh khi ngưỡng dừng C_{th} giảm từ 0.5 xuống 0.25. Đặc biệt hơn, khi $C_{th}=0.5$, xác suất dừng tại đích T_{K+2} thấp hơn xác suất dừng tại đích T_{K+1} . Mặt khác, khi $C_{th}=0.25$, xác suất dừng của đích T_{K+2} sẽ thấp hơn của đích T_{K+1} khi Δ lớn hơn 2 dB. Nguyên nhân là vì số ăng ten tại đích T_{K+2} lớn hơn số ăng ten tại đích T_{K+1} , vì thế đích T_{K+2} đạt được độ lợi phân tập lớn hơn và OP của đích T_{K+2} sẽ giảm nhanh hơn khi Δ tăng. Một nguyên nhân khác, đó là kênh truyền giữa T_K và T_{K+2} tốt hơn giữa T_K và T_{K+1} , cụ thể hệ số kênh truyền lần lượt là $m_{T_K T_{K+2}}=1.5$ và $m_{T_K T_{K+1}}=1$, tương ứng.



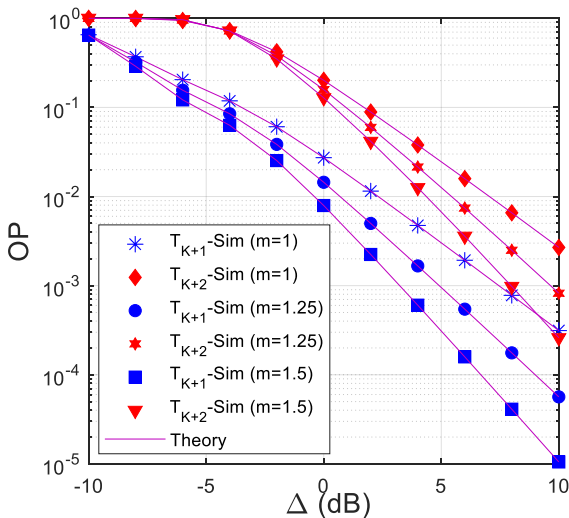
Hình 2. Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) với $K=3$, $N_k \in \{2, 4, 3\}$, $m_{T_{k-1}T_k} \in \{1.5, 2, 1.75\}$, $m_{T_K T_{K+1}}=1$, $m_{T_K T_{K+2}}=1.5$, $L_1=2$, $L_2=3$, $a_1=0.8$ và $\kappa^2=0.01$.

Hình 3 biểu xác suất dừng (OP) tại hai nút đích T_{K+1} và T_{K+2} theo Δ (dB) với các giá trị khác nhau của mức khiếm khuyết phần cứng κ^2 . Các thông số còn lại được đưa ra bên dưới Hình 3. Hình 3 cho thấy xác suất dừng OP tại các nút đích giảm khi mức suy hao phần cứng κ^2 giảm. Ta cũng lưu ý rằng khi $\kappa^2=0$, phần cứng của các thiết bị là hoàn hảo. Khác với Hình 2, OP của nút đích T_{K+1} luôn nhỏ hơn OP của nút đích T_{K+2} . Hơn nữa, khi

giá trị của Δ lớn, OP của cả hai nút đích song song với nhau. Điều này có nghĩa rằng độ lợi phân tập đạt được tại các nút đích là bằng nhau. Cũng trong Hình 3, số nút trong cụm thứ hai là được thiết lập bằng 1, và vì thế sự truyền dữ liệu ở chặng này có độ lợi phân tập thấp nhất. Theo giao thức giải mã và chuyển tiếp DF, độ lợi phân tập thấp nhất tại các chặng sẽ là độ lợi phân tập toàn trình. Đây là lý do tại sao các đường OP có cùng độ dốc khi Δ lớn. Hơn nữa, bởi vì dữ liệu của đích T_{K+1} được ưu tiên giải mã trước, và được phân bổ với công suất phát lớn hơn, nên OP tại T_{K+1} thấp hơn tại T_{K+2} .



Hình 3. Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) với $K=2$, $N_k \in \{3,1\}$, $m_{T_{k-1}T_k} \in \{2.3,1.8\}$, $m_{T_k T_{k+1}} = 1.5$, $m_{T_k T_{k+2}} = 2$, $L_1 = 2$, $L_2 = 3$, $a_1 = 0.75$ và $C_{th} = 0.5$.

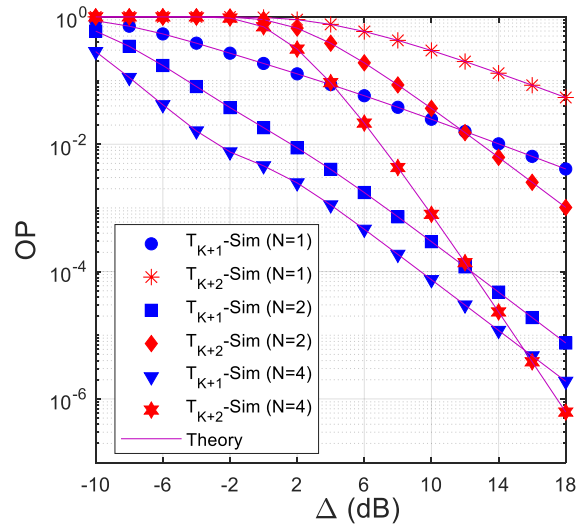


Hình 4. Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) với $K=2$, $N_k \in \{4,4\}$, $\kappa^2 = 0.03$, $L_1 = 2$, $L_2 = 2$, $a_1 = 0.8$ và $C_{th} = 0.5$.

Để mô tả sự tác động của hệ số kênh Nakagami- m lên giá trị OP, trong Hình 4, ta giả sử tất cả các hệ số kênh đều bằng nhau: $m_{T_{k-1}T_k} = m_{T_k T_{k+1}} = m_{T_k T_{k+2}} = m \forall k$. Ta có thể thấy giá trị m ảnh hưởng đáng kể đến chất lượng dịch

vụ của mạng, đó là giá trị của OP ở các nút đích giảm mạnh khi giá trị của m tăng. Ở đây, chúng tôi lưu ý rằng khi $m=1$ thì hệ thống hoạt động trên kênh fading Rayleigh, và OP trên kênh truyền này là lớn nhất. Hình 4 cũng cho ta thấy đích T_{K+1} luôn đạt giá trị OP nhỏ hơn đích T_{K+2} nếu các thông số như số lượng ăng ten và hệ số kênh Nakagami- m là giống nhau.

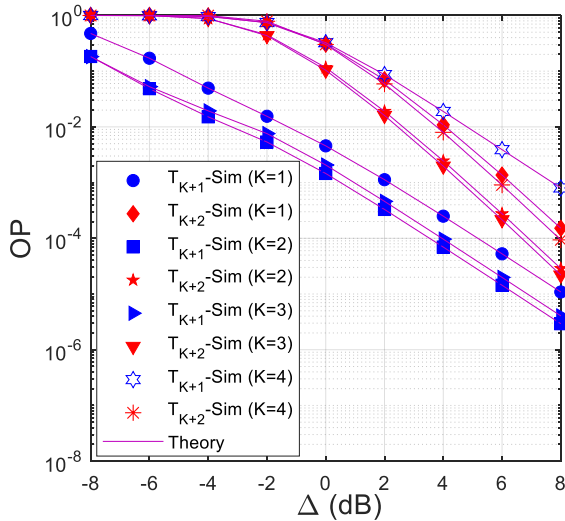
Trong Hình 5, tất cả các kênh truyền đều là kênh fading Rayleigh $m_{T_{k-1}T_k} = m_{T_k T_{k+1}} = m_{T_k T_{k+2}} = 1(\forall k)$, và số lượng nút trong mỗi cụm đều bằng nhau: $N_k = N(\forall k)$. Như ta có thể thấy, OP tại các nút đích sẽ giảm khi số lượng nút trong mỗi cụm tăng. Trong Hình 5, mặc dù số lượng ăng ten tại nút đích T_{K+2} gấp đôi số lượng ăng ten tại T_{K+1} ($L_2 = 2L_1 = 4$), tuy nhiên OP tại đích T_{K+2} là rất lớn bởi hệ số phân chia công suất a_1 được thiết lập bằng 0.9 ($a_2 = 0.1$). Thật vậy, khi a_1 càng lớn thì a_2 càng nhỏ, và điều này có nghĩa rằng mức công suất phân bổ cho tín hiệu của T_{K+2} giảm, dẫn đến OP tại T_{K+2} tăng. Ta có thể thấy rằng OP tại đích T_{K+2} hầu như bằng 1 khi Δ nằm trong khoảng từ -10dB đến -2 dB. Tuy nhiên, khi giá trị Δ lớn, OP tại đích T_{K+2} sẽ giảm nhanh hơn OP tại đích T_{K+1} bởi vì đích T_{K+2} được trang bị nhiều ăng ten hơn. Điều này cũng có nghĩa rằng đích T_{K+2} đạt được độ lợi phân tập lớn hơn đích T_{K+1} .



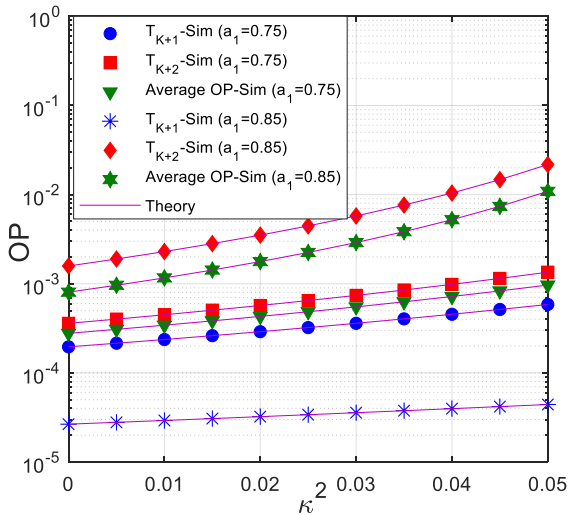
Hình 5. Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) với $K=3$, $m_{T_{k-1}T_k} = m_{T_k T_{k+1}} = m_{T_k T_{k+2}} = 1(\forall k)$, $\kappa^2 = 0.02$, $L_1 = 2$, $L_2 = 4$, $a_1 = 0.9$ và $C_{th} = 0.5$.

Hình 6 khảo sát sự ảnh hưởng của số chặng (hay số cụm trung gian) lên giá trị OP tại hai nút đích. Để thấy rõ sự tác động của số chặng, các tham số hệ thống được cố định như sau: $m_{T_{k-1}T_k} = m_{T_k T_{k+1}} = m_{T_k T_{k+2}} = 1.75$, và $N_k = 3(\forall k)$. Trước khi bàn luận các kết quả, ta có nhận xét rằng khi số chặng lớn thì khoảng cách giữa các cụm kề nhau sẽ ngắn và kênh truyền giữa các cụm kề nhau sẽ tốt hơn. Tuy nhiên, khi số chặng càng lớn thì thời gian truyền dành cho mỗi khe thời gian lại giảm theo tỷ lệ $1/(K+1)$, nên tốc độ truyền dữ liệu cũng giảm theo. Do

đó, khi quan sát OP của đích T_{K+1} , ta có thể thấy khi $K=2$ thì giá trị xác suất dừng thấp nhất, và khi $K=4$, OP lại rất lớn. Kết quả này cho thấy việc sử dụng chuyển tiếp có thể nâng cao hiệu năng cho hệ thống. Tuy nhiên, khi số chặng quá lớn thì chuyển tiếp sẽ không còn hiệu quả nữa. Tiếp đến, quan sát nút đích T_{K+2} , ta thấy rằng OP đạt giá trị thấp nhất với $K=3$, và lớn nhất với $K=1$.



Hình 6. Xác suất dừng vẽ theo Δ (dB) với $m_{T_{k-1}T_k} = m_{T_k T_{k+1}} = m_{T_k T_{k+2}} = 1.75 (\forall k)$, $N_k = 3 (\forall k)$, $\kappa^2 = 0.02$, $L_1 = 2$, $L_2 = 4$, $a_1 = 0.85$ và $C_{th} = 0.5$.

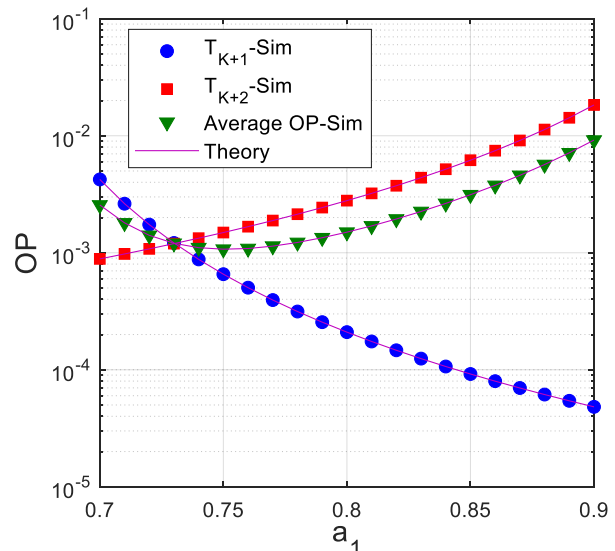


Hình 7. Xác suất dừng vẽ theo κ^2 với $\Delta = 7.5$ (dB), $K = 2$, $m_{T_{k-1}T_k} = m_{T_k T_{k+1}} = m_{T_k T_{k+2}} = 1 (\forall k)$, $N_k = 2 (\forall k)$, $L_1 = 2$, $L_2 = 2$ và $C_{th} = 0.5$.

Hình 7 đánh giá sự ảnh hưởng của mức khiếm khuyết phản cứng (κ^2) lên giá trị OP tại T_{K+1} và T_{K+2} . Như quan sát, ta thấy rằng xác suất dừng tăng khi κ^2 tăng. Ngoài ra, Hình 7 cũng xem xét hai trường hợp: $a_1 = 0.75$ và $a_1 = 0.85$. Ta thấy OP tại đích T_{K+1} trong trường hợp $a_1 = 0.75$ lớn hơn trong trường hợp $a_1 = 0.85$. Tuy

nhiên, OP tại đích T_{K+2} khi $a_1 = 0.75$ lại nhỏ hơn trường hợp $a_1 = 0.85$. Do đó, ta cũng thấy rằng khi $a_1 = 0.75$, độ chênh lệch giá trị OP tại các nút đích T_{K+1} và T_{K+2} thấp hơn, khi so với trường hợp $a_1 = 0.85$. Ta cũng lưu ý rằng độ chênh lệch hiệu năng giữa hai nút đích nên càng nhỏ càng tốt. Hơn nữa, Hình 7 cũng thể hiện giá trị xác suất dừng trung bình (average OP) của hai nút đích trong cả hai trường hợp $a_1 = 0.75$ và $a_1 = 0.85$. Như ta đã thấy, giá trị OP trung bình của hai nút đích khi $a_1 = 0.75$ nhỏ hơn rất nhiều, khi so sánh với trường hợp $a_1 = 0.85$.

Để thấy rõ hơn sự tác động của hệ số phân bổ công suất a_1 và a_2 lên xác suất dừng OP của các nút đích, Hình 8 biểu diễn OP như một hàm của a_1 . Ta có thể thấy rằng OP của nút đích T_{K+1} sẽ giảm khi a_1 tăng, bởi vì tín hiệu của T_{K+1} được phân bổ với công suất lớn hơn. Ở chiều ngược lại, OP của nút đích T_{K+2} tăng khi a_1 tăng. Quan sát từ Hình 8, ta thấy rằng giá trị của a_1 càng lớn thì độ lệch hiệu năng giữa hai nút đích cũng lớn theo. Trong Hình 8, OP của hai đích T_{K+1} và T_{K+2} gần nhau nhất khi $a_1 = 0.73$. Hơn nữa, giá trị OP trung bình thấp nhất khi $a_1 = 0.75$.



Hình 8. Xác suất dừng vẽ theo a_1 với $\Delta = 5$ (dB), $K = 2$, $m_{T_{k-1}T_k} = m_{T_k T_{k+1}} = m_{T_k T_{k+2}} = 1.5 (\forall k)$, $N_k = 4 (\forall k)$, $L_1 = 2$, $L_2 = 2$, $\kappa^2 = 0$ và $C_{th} = 0.5$.

V. KẾT LUẬN

Bài báo này đã đề xuất và đánh giá chính xác xác suất dừng tại các nút đích trong mạng chuyển tiếp đa chặng dạng cụm sử dụng NOMA. Các kết quả cho thấy sự tác động đáng kể của khiếm khuyết phản cứng và số chặng lên giá trị OP. Hiệu năng của mô hình đề xuất sẽ tốt hơn khi kênh truyền giữa các nút tốt hơn, số lượng nút chuyển tiếp tại các cụm nhiều hơn, và số anten tại các nút đích cao hơn. Các kết quả cũng cho thấy hệ số phân bổ công suất cũng có tác động đáng kể lên hiệu năng OP tại các nút đích. Việc phân bổ công suất hợp lý sẽ đảm bảo sự công bằng hiệu năng tại các nút đích, cũng như giảm xác

suất dừng trung bình. Trong tương lai, chúng tôi sẽ phát triển bài báo này theo hướng phân tích các hiệu năng khác như tỷ lệ lỗi bit, dung lượng kênh trung bình, cho mô hình tổng quát có nhiều nút đích.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công Nghệ Bruu Chính Viễn Thông Cơ Sở Tại Thành Phố Hồ Chí Minh với mã số đề tài 02-HV-2021-RD_VT2.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Han, H. Xu, T. Q. Duong, J. Jiang, and T. Hara, "Localization Algorithms of Wireless Sensor Networks: A Survey," *Telecommunication Systems*, vol. 52, no. 4, pp. 2419-2436, Apr. 2013.
- [2] G. Han, J. Jiang, C. Zhang, T. Q. Duong, M. Guizani and G. K. Karagiannidis, "A Survey on Mobile Anchor Node Assisted Localization in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 2220-2243, third quarter 2016.
- [3] H. Yetgin, K. T. K. Cheung, M. El-Hajjar and L. Hanzo, "A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no. 2, pp. 828 - 854, Jan. 2017.
- [4] S. K. Singh, P. Kumar and J. P. Singh, "A Survey on Successors of LEACH Protocol," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 4298 – 4328, Feb. 2017.
- [5] Hassan El Alami and Abdellah Najid, "ECH: An Enhanced Clustering Hierarchy Approach to Maximize Lifetime of Wireless Sensor Networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107142-107153, Aug. 2019.
- [6] H. D. Hung, T. T. Duy, M. Voznak, "Secrecy Outage Performance of Multi-hop LEACH Networks using Power Beacon Aided Cooperative Jamming with Jammer Selection Methods," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 124, ID 153357, pp. 1-25, Sept. 2020.
- [7] N. T. Anh, N. C. Minh, T. T. Duy, T. Hanh and H. D. Hai, "Reliability-Security Analysis for Harvest-to-Jam based Multi-hop Cluster MIMO Networks Using Cooperative Jamming Methods Under Impact of Hardware Impairments," *EAI Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 28, pp. 1-14, Sept. 2021.
- [8] G. Farhadi and N. C. Beaulieu, "On the Performance Of Amplify-and-Forward Cooperative Systems With Fixed Gain Relays," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 5, pp. 1851-1856, May 2008.
- [9] H. V. Khuong and P. C. Sofotasios, "Exact bit-error-rate analysis of underlay decode-and-forward multi-hop cognitive networks with estimation errors," *IET Communications*, vol. 7, no. 18, pp. 2122-2132, Dec. 2013.
- [10] F. S. Al-Qahtani, R. M. Radaydeh, S. Hessien, T. Q. Duong and H. Alnuweiri, "Underlay Cognitive Multihop MIMO Networks With and Without Receive Interference Cancellation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 4, pp. 1477-1493, April 2017.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] X. Qin, H. Zeng, X. Yuan, B. Jalaian, Y. T. Hou, W. Lou, and S. F. Midkiff, "Impact of Full Duplex Scheduling on End-to-End Throughput in Multi-hop Wireless Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 16, no. 1, pp. 158-171, Jan. 2017.
- [14] F. Tian, X. Chen, K. W. S. Liu, X. Yuan and Z. Yang, "On Full Duplex Scheduling For Energy Efficiency Maximization in Multi-hop Wireless Networks," *IEEE Access* vol. 6, no. 1, pp. 2604–2614, Dec. 2017.
- [15] P. N. Son and T. T. Duy, "Performance Analysis of Underlay Cooperative Cognitive Full-duplex Networks with Energy-Harvesting Relay," *Computer Communications*, vol. 122, pp. 9-19, Jun. 2018.
- [16] K. Choi, "Capacity Gain of Full Duplex Self-Backhauling and Opportunistic Full Duplex Self-Backhauling," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 3, pp. 2272-2282, Mar. 2021.
- [17] S. Atapattu, N. Ross, Y. Jing, Y. He and J. S. Evans, "Physical-Layer Security in Full-Duplex Multi-Hop Multi-User Wireless Network With Relay Selection," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 2, pp. 1216-1232, Feb. 2019.
- [18] W. Chang and C. Wu, "High-Speed Concurrent Transmission Scheme for Full Duplex Multi-Hop Relay Assisted mmWave WPAN Networks," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 162192-162205, 2019.
- [19] X. Liang, Y. Wu, D. W. K. Ng, Y. Zuo, S. Jin, and H. Zhu, "Outage Performance for Cooperative NOMA Transmission with an AF Relay," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 11, pp. 2428-2431, Nov. 2017.
- [20] X. Yue, Y. Liu, S. Kang, and A. Nallanathan, "Performance Analysis of NOMA With Fixed Gain Relaying Over Nakagami-m Fading Channels," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5445-5454, 2017.
- [21] V. L. Nguyen, H. D. Binh, T. D. Dung and Y. Lee, "Enhancing Physical Layer Security for Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access Networks with Artificial Noise," *EAI Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 6, no. 20, pp. 1–11, 2019.
- [22] K. Cao, B. Wang, H. Ding, L. Lv, J. Tian and F. Gong, "On the Security Enhancement of Uplink NOMA Systems With Jammer Selection," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 9, pp. 5747–5763, Sept. 2020.
- [23] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, "Hardware Impairments in Large-Scale MISO Systems: Energy Efficiency, Estimation, and Capacity Limits," in *proc. of Digital Signal Processing (DSP)*, 2013 18th International Conference on, 2013, pp. 1-6.
- [24] E. Bjornson, M. Matthaiou, and M. Debbah, "A New Look at Dual-Hop Relaying: Performance Limits with Hardware Impairments," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 11, pp. 4512-4525, Nov. 2013.
- [25] E. Bjornson, J. Hoydis, M. Kountouris, and M. Debbah, "Massive MIMO Systems With Non-Ideal Hardware: Energy Efficiency, Estimation, and Capacity Limits," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, no. 11, pp. 7112-7139, Nov. 2014.
- [26] Y. Xu, H. Xie and R. Q. Hu, "Max-Min Beamforming Design for Heterogeneous Networks With Hardware Impairments," *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 4, pp. 1328-1332, Apr. 2021.
- [27] S. A. Mohajeran and G. A. Hodtani, "Power Allocation for Wireless Sensor Networks in the Presence of Non-Gaussian Noise and Hardware Impairments Using Distance-Related Bounds," *IEEE Sensors Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 1-4, Apr. 2021
- [28] H. K. Boddapati, M. R. Bhatnagar, 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, Mar. 2018.

- [29] H. K. Boddapati, M. R. Bhatnagar, S. Prakriya, "Performance of Incremental Relaying Protocols for Cooperative Multihop CRNs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 7, pp. 6006 - 6022, Jul. 2018.
- [30] 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, ID: 102193, May 2021.
- [31] P. Padidar, P. Ho, Y. Ji and W. Duan, "A Deep Study on Layered Multi-Relay Non-Orthogonal Amplify-Forward Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 1, pp. 354-366, Jan. 2020.
- [32] A. Rauniyar, P. E. Engelstad and O. N. Østerbø, "On the Performance of Bidirectional NOMA-SWIPT Enabled IoT Relay Networks," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 2, pp. 2299-2315, Jan. 2021.
- [33] P. N. Son, T. T. Duy, "A New Approach for Two-Way Relaying Networks: Improving Performance by Successive Interference Cancellation, Digital Network Coding and Opportunistic Relay Selection," *Wireless Networks*, vol. 26, no. 2, pp. 1315-1329, Feb. 2020.
- [34] M. Shen, Z. Huang, X. Lei and L. Fan, "BER Analysis of NOMA With Max-Min Relay Selection," *China Communications*, vol. 18, no. 7, pp. 172-182, Jul. 2021.
- [35] P. T. Tin, N. V. Hien, M. Voznak and L. Sevcik, "Performance Comparison Between NOMA and OMA Relaying Protocols in Multi-Hop Networks over Nakagami- m Fading Channels under Impact of Hardware Impairments," in *Proc. of 2019 IEEE/ACM 23rd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT)*, 2019, pp. 1-4.
- [36] P. T. Tin, P. M. Nam, T. T. Duy, T. T. Phuong, N. K. Tam and M. Voznak, "Throughput Analysis of Power Beacon-Aided Multi-hop Relaying Networks Employing Non-Orthogonal Multiple Access With Hardware Impairments," in *Proc. of the 5th International Conference on Advanced Engineering – Theory and Applications*, Ostrava, Czech Republic, 2018.
- [37] V. N. Vo, C. So-In, D. Tran and H. Tran, "Optimal System Performance in Multihop Energy Harvesting WSNs Using Cooperative NOMA and Friendly Jammers," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 125494–125510, 2019.
- [38] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik. *Table of integrals, series, and products*. Academic press, 2014.
- [39] 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.
- [40] 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.

OUTAGE PERFORMANCE ANALYSIS FOR MULTI-HOP CLUSTER NETWORKS USING NOMA UNDER IMPACT OF HARDWARE IMPERFECTION OVER NAKAGAMI-M FADING CHANNELS

Abstract: In this paper, we analyze outage probability of cluster-based multi-hop relaying networks using Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA). In the proposed protocol, the source and relay nodes use NOMA to send two data to two intended destinations at the same time. For enhancing reliability of the data transmission at each hop; decode-and-forward technique and relay selection are employed. In addition, the destinations are equipped with multiple antennas, and employ selection combining (SC) to decode the received signals at the last hop. This paper exactly evaluates OP at the destinations over Nakagami- m fading channels, under impact of hardware impairments. This paper also performs Monte-Carlo simulation to verify the theoretical results.

Keywords: multi-hop relaying, cluster network, non-orthogonal multiple access, hardware impairments, outage probability.



Phạm Minh Quang nhận bằng cử nhân và bằng thạc sĩ tại Trường Đại Học Khoa Học Tự Nhiên, Đại Học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh vào năm 2007 và năm 2012. ThS. Quang hiện đang công tác tại Khoa Viễn thông 2 thuộc Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông cơ sở tại TP. Hồ Chí Minh. Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: thông tin vô tuyến, kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, phân tích hiệu năng mạng vô tuyến
Email:phamminhquang@ptithcm.edu.vn



Trần Trung Duy nhận bằng Kỹ sư tại Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh vào năm 2007, và bằng Tiến sĩ vào năm 2013 tại Đại học Ulsan, Hàn Quốc. TS. Trần Trung Duy hiện đang công tác tại Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông cơ sở tại TP. Hồ Chí Minh. Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: truyền thông cộng tác, vô tuyến nhận thức, NOMA, Mã Fountain.
Email:trantrungduy@ptithcm.edu.vn