

PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG MẠNG KHUẾCH ĐẠI CHUYỂN TIẾP ĐA CHẶNG ĐA ĐƯỜNG VỚI SỰ TÁC ĐỘNG ĐỒNG THỜI CỦA NHIỀU ĐỒNG KÊNH VÀ PHẦN CỨNG KHÔNG HOÀN HẢO

Phạm Minh Quang*, Nguyễn Thanh Bình*

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

Tóm tắt: Bài báo này nghiên cứu hiệu năng của mạng chuyển tiếp đa chặng đa đường (Multi-hop Multi-path) sử dụng kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp (AF: Amplify-and-Forward) dưới sự ảnh hưởng của giao thoa đồng kênh (CCI: Co-Channel Interference) và phần cứng không hoàn hảo (HI: Hardware Imperfection). Bài báo nghiên cứu hiệu năng của ba phương pháp chọn đường (path selection) được đặt tên là RAND, SHORT và BEST. Trong phương pháp RAND, một đường ngẫu nhiên sẽ được chọn để truyền dữ liệu từ nguồn đến đích. Trong phương pháp SHORT, đường ngắn nhất (có số chặng thấp nhất) sẽ được chọn. Trong phương pháp BEST, đường tốt nhất sẽ là đường có dung lượng kênh toàn trình tức thời lớn nhất trong tất cả các đường sẵn có giữa nguồn và đích. Để đánh giá hiệu năng của ba phương pháp này, chúng tôi đầu tiên đưa ra biểu thức tính tỷ số tín hiệu trên giao thoa và nhiễu toàn trình (e2e SINR: end-to-end Signal-to Interference-plus-Noise Ratio). Sau đó, xác suất dừng toàn trình (e2e OP: end-to-end outage probability) trên kênh truyền fading Rayleigh của 03 phương pháp RAND, SHORT và BEST sẽ được đánh giá bằng các biểu thức dạng đóng cận dưới (lower-bound closed-form expressions). Cuối cùng, mô phỏng Monte Carlo sẽ được thực hiện để kiểm chứng công thức đưa ra, để so sánh hiệu năng giữa các phương pháp, cũng như để thấy được sự ảnh hưởng của các tham số hệ thống lên hiệu năng mạng.

Từ khóa: Chuyển tiếp đa chặng đa đường, khuếch đại và chuyển tiếp, giao thoa đồng kênh, phần cứng không hoàn hảo, xác suất dừng.

I. MỞ ĐẦU

Ngày nay, mạng thông tin vô tuyến mang lại vô số ứng dụng tiện ích cho người dùng. Đồng thời với sự phát triển đó là yêu cầu chất lượng dịch vụ ngày càng cao và vùng phủ sóng rộng hơn. Kỹ thuật chuyển tiếp là một kỹ thuật hiệu quả được sử dụng để mở rộng vùng phủ sóng, nâng cao chất lượng trong việc truyền dữ liệu và độ tạo ổn định cho các mạng truyền thông vô tuyến [1]-[8]. Ngoài

ra, trong mạng cảm biến vô tuyến (WSN: Wireless Sensor Networks), mạng Internet kết nối vạn vật (IoT: Internet of Things), mạng adhoc không dây, v.v., các thiết bị có sự hạn chế lớn về công suất phát, năng lượng, định tuyến gói tin, khả năng lưu trữ và xử lý dữ liệu. Do đó, các nút mạng chuyển tiếp trong hệ thống mạng truyền thông vô tuyến này phải tự lập kế hoạch và định tuyến cho quá trình truyền và nhận dữ liệu. Với mạng chuyển tiếp đa chặng, nút chuyển tiếp thường sử dụng hai kỹ thuật chuyển tiếp cơ bản dựa vào phương pháp xử lý tín hiệu. Kỹ thuật đầu tiên là kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp AF [3]-[4], các nút chuyển tiếp sau khi nhận dữ liệu sẽ khuếch đại tín hiệu nhận được trước đó, rồi gửi tín hiệu khuếch đại đến nút tiếp theo. Kỹ thuật còn lại là kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp (DF: Decode-and-Forward) [5]-[8]: các nút chuyển tiếp nhận được dữ liệu từ nút chuyển tiếp trước đó sẽ giải mã, sau đó tiến hành mã hóa lại và gửi dữ liệu đến nút nhận tiếp theo cho đến đích cuối cùng. Ta có thể thấy rằng kỹ thuật chuyển tiếp DF phức tạp hơn AF, nhưng kỹ thuật DF đạt được hiệu năng tốt hơn, do không tích lũy nhiễu tại nút chuyển tiếp như AF. Để nâng cao hiệu năng cho các mạng chuyển tiếp hai chặng (two-hop hay dual-hop relaying networks), các kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình (PRS: Partial Relay Selection) và toàn trình (FRS: Full Relay Selection) được đề xuất (xem các tài liệu [4]-[8]). Trong kỹ thuật PRS, nút chuyển tiếp tốt nhất được chọn theo thông tin trạng thái kênh truyền tức thời (CSI: Channel State Information) giữa nguồn và các nút chuyển tiếp [4] hoặc giữa đích và các nút chuyển tiếp [5]. Trong kỹ thuật FRS, nút chuyển tiếp tốt nhất được chọn dựa vào CSI tức thời của cả hai chặng [6]-[8]. Kỹ thuật FRS phức tạp hơn kỹ thuật PRS, nhưng FRS đạt được hiệu năng toàn trình tốt hơn PRS.

Khác với các công trình [2]-[8], các tài liệu [9]-[12] nghiên cứu mạng chuyển tiếp đa chặng (Multi-hop relaying network). Các tác giả của [9] và [10] lần lượt đánh giá hiệu năng toàn trình của mạng chuyển tiếp đa chặng với các nút chuyển tiếp AF và DF. Để cải thiện hiệu năng cho mạng chuyển tiếp đa chặng trên các kênh truyền fading, các tác giả trong các công trình [11]-[12] đã đề xuất các mô hình cộng tác đa chặng (cooperative multi-hop). Khác với mô hình chuyển tiếp dữ liệu thông thường [9]-[10], các nút chuyển tiếp trong mô hình cộng tác đa chặng sẽ nhận dữ liệu từ các nút phía trước đó, kết hợp chúng lại hoặc xử lý một cách thích hợp, để nâng cao khả năng giải mã dữ liệu tại các nút chuyển tiếp. Mặc dù, các

Tác giả liên hệ: Phạm Minh Quang
Email: phamminhquang@ptithcm.edu.vn
Đến tòa soạn: 9/2020, chỉnh sửa: 10/2020, chấp nhận đăng: 10/2020

giao thức đề xuất trong [11]-[12] đạt được hiệu năng cao hơn hẳn các giao thức thông thường, tuy nhiên, các giao thức này rất khó triển khai trong thực tế vì cần sự đồng bộ giữa tất cả các nút trên một tuyến. Tài liệu [13] đề xuất một giải pháp đơn giản hơn, đó là sử dụng các nút cộng tác ở ngoài tại mỗi chặng. Tuy nhiên, nhược điểm của giao thức này đó là thời gian trễ sẽ rất lớn, do sự cộng tác tại mỗi chặng sẽ tốn nhiều hơn 01 khe thời gian. Trong các công trình [14]-[16], các tác giả đề xuất mô hình chuyên tiếp đa chặng đa đường, trong đó, đường tốt nhất sẽ được chọn để gửi dữ liệu đến đích. Tương tự như [11]-[13], các giao thức được đề xuất trong [14]-[16] cũng đạt được độ lợi phân tập và hiệu năng toàn trình cao hơn, khi so sánh với các giải pháp truyền thống.

Công trình này nghiên cứu mô hình chuyên tiếp đa chặng đa đường sử dụng các nút chuyên tiếp AF dưới sự tác động chung của giao thoa đồng kênh CCI và phần cứng không hoàn hảo HI. Điểm khác biệt chính giữa bài báo này và các công bố liên quan khác sẽ được trình bày cụ thể như. Trong công bố [17], nhóm tác giả khảo sát sự ảnh hưởng của HI lên hiệu năng mạng chuyên tiếp đa chặng. Tuy nhiên, các tác giả trong [17] không xét sự tác động của CCI lên hiệu năng của hệ thống. Mặc dù công bố [18] khảo sát sự tác động chung của CCI và HI, tuy nhiên chỉ mô hình đơn đường giữa nguồn và đích được xem xét trong công bố này. Các công trình [14]-[16] nghiên cứu hiệu năng các mô hình chuyên tiếp đa chặng đa đường trên kênh fading Rayleigh. Tuy nhiên các nhóm tác giả này đã không khảo sát sự tác động của HI [14]-[15] và CCI [14]-[16] lên các thông số hiệu năng hệ thống. Tài liệu [19] đề xuất mô hình chọn đường tốt nhất để giảm xác suất dừng toàn trình của hệ thống dưới sự tác động chung của CCI và HI. Theo sự hiểu biết tốt nhất của chúng tôi, hầu hết các công trình nghiên cứu về sự tác động của CCI và/hoặc HI (như [14]-[19]) đều chỉ liên quan đến giao thức chuyên tiếp DF. Đây là động lực để chúng tôi nghiên cứu mô hình chuyên tiếp sử dụng AF. Thật vậy, bài báo này được phát triển từ công trình [20] của nhóm nghiên cứu, trong đó kỹ thuật chuyên tiếp đa chặng AF được sử dụng để truyền dữ liệu từ nguồn đến đích với sự ảnh hưởng chung của fading kênh truyền, CCI và HI. Tuy nhiên, công trình [20] chỉ xét mạng đơn đường và giả sử chỉ có 01 nguồn giao thoa tác động lên các thiết bị thu. Trong bài báo này, chúng tôi nghiên cứu mô hình đa đường và đề xuất các phương pháp chọn đường khác nhau dưới sự ảnh hưởng của CCI đến từ nhiều nguồn giao thoa. Do đó, mô hình hệ thống của bài báo này là một trường hợp tổng quát của mô hình được nghiên cứu trong [20].

Tiếp đến, những đóng góp chính của bài báo sẽ được liệt kê như sau:

- Mô hình hệ thống trong bài báo có thể được áp dụng và triển khai cho các mạng thông tin vô tuyến như mạng cảm biến vô tuyến (wireless sensor networks), mạng vô tuyến ad-hoc, v.v. Trong các mạng này, thiết bị vô tuyến thường có năng lượng, khả năng lưu trữ và xử lý hạn chế. Do đó, việc truyền dữ liệu thông qua chuyên tiếp trên các chặng ngắn sẽ phù hợp, và là kỹ thuật thường xuyên được nghiên cứu áp dụng trong các công bố trước đây.
- Bài báo đề xuất mô hình chuyên tiếp đa chặng đa đường sử dụng kỹ thuật AF. Hơn nữa, sự tác động của các yếu tố môi trường trong thực tế như fading kênh truyền, CCI và HI cũng được nghiên cứu và

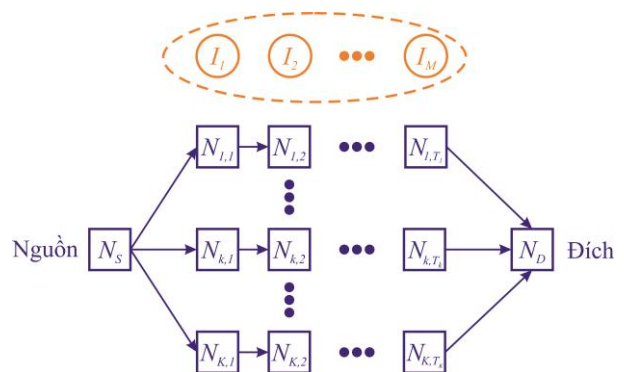
phân tích.

- Bài báo đề xuất ba phương pháp chọn đường được đặt tên là RAND, SHORT và BEST. Trong phương pháp RAND, một đường ngẫu nhiên sẽ được chọn để truyền dữ liệu đến đích. Phương pháp SHORT chọn đường ngắn nhất, trong khi phương pháp BEST sẽ chọn đường có dung lượng kênh toàn trình lớn nhất.
- Để đánh giá hiệu năng hệ thống, các biểu thức chính xác tính tỷ số tín hiệu trên giao thoa và nhiễu toàn trình ($e2e$ SINR) sẽ được xây dựng. Sau đó, chúng tôi tiến hành phân tích xác suất dừng toàn trình ($e2e$ OP) trên kênh truyền fading Rayleigh bằng các biểu thức dạng đóng cận dưới.
- Các mô phỏng Monte Carlo sẽ được thực hiện để kiểm chứng công thức đưa ra, cũng như để so sánh hiệu năng giữa các phương pháp đề xuất.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: trong phần II, mô hình hệ thống khảo sát sẽ được trình bày. Trong phần III, chúng tôi đánh giá hiệu năng của mô hình trên kênh fading Rayleigh bằng các biểu thức toán học dạng đóng cận dưới. Phần IV cung cấp các kết quả mô phỏng và phân tích lý thuyết. Cuối cùng, các kết luận và hướng phát triển của bài báo được đưa ra trong phần V.

II. MÔ HÌNH KHẢO SÁT

Hình 1 mô tả mô hình hệ thống được nghiên cứu trong bài báo. Trong mô hình này, nguồn N_s muốn gửi dữ liệu đến đích N_D . Giả sử rằng, tồn tại K đường giữa nguồn và đích, và nguồn phải chọn một trong các đường này để truyền dữ liệu của mình đến đích, do sự xuyên trực tiếp không thể thực hiện được bởi khoảng cách xa giữa chúng. Việc thiết lập các đường giữa nguồn và đích có thể được thực hiện tại lớp mạng (network layer). Tuy nhiên, để thuận tiện và đơn giản cho việc mô tả và đánh giá hoạt động của các phương pháp chọn đường, ta có thể giả sử các đường này đã được thiết lập trước đó (tương tự các công trình [14]-[16]). Giả sử rằng có T_k nút chuyên tiếp trên đường thứ k , với $k=1,2,\dots,K$, $T_k \geq 1$. Để thuận tiện cho việc mô tả hệ thống, các nút chuyên tiếp trên đường thứ k được đặt tên là $N_{k,t}$, với $t=1,2,\dots,T_k$. Cũng trong Hình 1, giả sử rằng tồn tại M nguồn giao thoa gây ra nhiễu lên các thiết bị thu trong mạng. Các nguồn giao thoa được ký hiệu là I_1, I_2, \dots, I_M . Trong trường hợp $M=0$, hệ thống sẽ không chịu tác động của CCI. Tất cả các thiết bị chỉ có 01 ăng-ten và hoạt động ở chế độ bán song công. Do đó, sự truyền dữ liệu trên đường thứ k sẽ phải thực hiện trong $T_k + 1$ khe thời gian trực giao, sử dụng phương pháp đa truy nhập phân chia theo thời gian (TDMA).



Hình 1. Mô hình hệ thống khảo sát.

A. Sự truyền dữ liệu trên đường thứ k

Giả sử rằng nguồn N_S chọn đường thứ k để truyền dữ liệu đến đích. Trong khe thời gian thứ nhất, nguồn N_S gửi dữ liệu đến nút chuyển tiếp $N_{k,1}$. Nút $N_{k,1}$ sẽ khuếch đại tín hiệu nhận được, và gửi đến nút $N_{k,2}$ trong khe thời gian thứ hai. Tiến trình này tiếp tục được thực hiện cho đến khi nút chuyển tiếp N_{k,T_k} khuếch đại tín hiệu nhận được từ nút N_{k,T_k-1} , và gửi tín hiệu này đến đích N_D trong khe thời gian cuối cùng.

Xét tín hiệu nhận được tại $N_{k,1}$ trong khe thời gian thứ nhất; dưới sự tác động chung của CCI và HI, ta thể viết:

$$y_{N_{k,1}} = \sqrt{P_{N_S}} h_{N_S, N_{k,1}} (x_S + \eta_{N_S, N_{k,1}}) + \sum_{m=1}^M \sqrt{Q_{I_m}} g_{I_m, N_{k,1}} x_{I_m} + \mu_{N_{k,1}}, \quad (1)$$

trong đó, P_{N_S} là công suất phát của nguồn N_S , Q_{I_m} là công suất phát của nguồn giao thoa I_m , x_S là dữ liệu nguồn N_S , x_{I_m} là dữ liệu của nguồn giao thoa I_m , $h_{N_S, N_{k,1}}$ là hệ số kênh fading Rayleigh giữa N_S và $N_{k,1}$, $g_{I_m, N_{k,1}}$ là hệ số kênh fading Rayleigh giữa I_m và $N_{k,1}$, $\eta_{N_S, N_{k,1}}$ là nhiễu gây ra do HI tại nút phát N_S và nút thu $N_{k,1}$, $\mu_{N_{k,1}}$ là nhiễu Gauss trắng cộng tính tại $N_{k,1}$.

Để đơn giản cho việc trình bày các công thức, ta có thể giả sử công suất phát của tất cả các nút bao gồm nguồn N_S và tất cả các nút chuyển tiếp đều bằng nhau và bằng P : $P_{N_S} = P_{N_{k,t}} = P(\forall k, t)$. Cũng vậy, ta có thể giả sử rằng công suất phát của các nguồn giao thoa là giống nhau: $Q_{I_m} = Q(\forall m)$. Tương tự như công trình [6], [19], [21]-[22], $\eta_{N_S, N_{k,1}}$ là một biến ngẫu nhiên có phân phối Gauss, có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai là κ^2 . κ^2 là hằng số mô tả mức khiếm khuyết phần cứng tổng cộng tại thiết bị phát và thiết bị thu. Ta cũng có thể giả sử rằng các nút $N_{k,t}$ có cùng cấu trúc phần cứng, và do đó mức khiếm khuyết phần cứng trên tất cả các liên kết $N_{k,t} - N_{k,t+1}$ đều bằng κ^2 . Đối với nhiễu Gauss trắng cộng tính, ta cũng giả sử rằng phương sai của nhiễu này tại tất cả các thiết bị thu đều như nhau và bằng σ_0^2 .

Từ công thức (1), ta có thể xây dựng biểu thức tính $SINR$ tức thời đạt được tại nút $N_{k,1}$ như sau:

$$\omega_{k,1} = \frac{P |h_{N_S, N_{k,1}}|^2}{\kappa^2 P |h_{N_S, N_{k,1}}|^2 + Q \sum_{m=1}^M |g_{I_m, N_{k,1}}|^2 + \sigma_0^2} = \frac{\Delta \gamma_{k,1}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{k,1} + \Psi \sum_{m=1}^M \varphi_{m,k,1} + 1}. \quad (2)$$

Trong công thức (2), $\gamma_{k,1} = |h_{N_S, N_{k,1}}|^2$ và $\varphi_{m,k,1} = |g_{I_m, N_{k,1}}|^2$ là các độ lợi kênh, $\Delta = P/\sigma_0^2$ và $\Psi = Q/\sigma_0^2$ là tỷ số giữa các công suất phát và nhiễu cộng.

Sau khi nhận $y_{N_{k,1}}$ từ nguồn, nút $N_{k,1}$ sẽ khuếch đại tín hiệu này và chuyển tiếp tín hiệu khuếch đại đến nút $N_{k,2}$. Tương tự như công thức (5) trong tài liệu [20], tín hiệu nhận được tại $N_{k,2}$ sẽ được viết như sau:

$$y_{N_{k,2}} = h_{N_{k,1}, N_{k,2}} (G_{k,1} y_{N_{k,1}} + \eta_{N_{k,1}, N_{k,2}}) + \sum_{m=1}^M \sqrt{Q} g_{I_m, N_{k,2}} x_{I_m} + \mu_{N_{k,2}}, \quad (3)$$

trong đó, $h_{N_{k,1}, N_{k,2}}$ là hệ số kênh fading Rayleigh giữa $N_{k,1}$ và $N_{k,2}$, $g_{I_m, N_{k,2}}$ là hệ số kênh fading Rayleigh giữa I_m và $N_{k,2}$, $\eta_{N_{k,1}, N_{k,2}}$ là nhiễu gây ra do HI tại nút phát $N_{k,1}$ và nút thu $N_{k,2}$, $\mu_{N_{k,2}}$ là nhiễu Gauss trắng cộng tính tại $N_{k,2}$, $G_{k,1}$ là hệ số khuếch đại mà nút $N_{k,1}$ sử dụng. Tương tự công thức (4) của tài liệu [20], hệ số khuếch đại $G_{k,1}$ được tính như sau:

$$G_{k,1}^2 = \frac{P}{P \gamma_{k,1} (1 + \kappa^2) + \sum_{m=1}^M Q \varphi_{m,k,1} + \sigma_0^2}. \quad (4)$$

Hơn thế nữa, phương sai của $\eta_{N_{k,1}, N_{k,2}}$ trong công thức (3) có thể được tính (tương tự như [20] và [22]):

$$\begin{aligned} \text{Var} \{ \eta_{N_{k,1}, N_{k,2}} \} &= \kappa^2 G_{k,1}^2 E \{ |y_{N_{k,1}}|^2 \} \\ &= \kappa^2 G_{k,1}^2 \left(P \gamma_{k,1} (1 + \kappa^2) + \sum_{m=1}^M Q \varphi_{m,k,1} + \sigma_0^2 \right) \\ &= \kappa^2 P, \end{aligned} \quad (5)$$

với $E \{ \cdot \}$ là toán tử kỳ vọng toán học.

Kết hợp các công thức (3), (4) và (5), ta đạt được $SINR$ tại $N_{k,2}$ như sau:

$$\chi_{N_{k,2}} = \frac{\omega_{k,1} \omega_{k,2}}{\omega_{k,1} + \omega_{k,2} + 1}, \quad (6)$$

với $\omega_{k,1}$ được đưa ra trong công thức (2), và $\omega_{k,2}$ được tính tương tự $\omega_{k,1}$ như bên dưới:

$$\omega_{k,2} = \frac{\Delta \gamma_{k,2}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{k,2} + \Psi \sum_{m=1}^M \varphi_{m,k,2} + 1}, \quad (7)$$

ở đây, $\gamma_{k,2} = |h_{N_{k,1}, N_{k,2}}|^2$, $\varphi_{m,k,2} = |g_{I_m, N_{k,2}}|^2$.

Tương tự, nút $N_{k,2}$ sẽ khuếch đại tín hiệu nhận được $y_{N_{k,2}}$ và gửi đến nút tiếp theo. Sử dụng phương pháp quy nạp toán học, ta có thể đưa ra công thức tính $SINR$ tại đích N_D như sau:

$$\chi_{N_D, k} = \frac{\prod_{t=1}^{T_k+1} \omega_{k,t}}{\prod_{t=1}^{T_k+1} (1 + \omega_{k,t}) - \prod_{t=1}^{T_k+1} \omega_{k,t}}. \quad (8)$$

Trong công thức (8), $\omega_{k,t}$ được xác định như sau:

$$\begin{aligned}\omega_{k,t} &= \frac{P |h_{N_{k,t-1}, N_{k,t}}|^2}{\kappa^2 P |h_{N_{k,t-1}, N_{k,t}}|^2 + Q \sum_{m=1}^M |g_{I_m, N_{k,t}}|^2 + \sigma^2} \\ &= \frac{\Delta \gamma_{k,t}}{\kappa^2 \Delta \gamma_{k,t} + \Psi \sum_{m=1}^M \varphi_{m,k,t} + 1},\end{aligned}\quad (9)$$

ở đây, $h_{N_{k,t-1}, N_{k,t}}$ là hệ số kênh fading Rayleigh giữa $N_{k,t-1}$ và $N_{k,t}$, $g_{I_m, N_{k,t}}$ là hệ số kênh fading Rayleigh giữa I_m và $N_{k,t}$, $\gamma_{k,t} = |h_{N_{k,t-1}, N_{k,t}}|^2$ và $\varphi_{m,k,t} = |g_{I_m, N_{k,t}}|^2$ là các độ lợi kênh tương ứng. Ta cũng chú ý rằng $N_{k,0} \equiv N_s$ và $N_{k, T_k+1} \equiv N_D$.

Tiếp đến, dung lượng kênh toàn trình tức thời đạt được trên đường thứ k được viết ra như sau:

$$C_k = \frac{1}{T_k + 1} \log_2 (1 + \chi_{N_D, k}). \quad (10)$$

Trong công thức (10), hệ số $1/(T_k + 1)$ xuất hiện do sự truyền dữ liệu được thực hiện trên $T_k + 1$ khe thời gian trực giao.

B. Các phương pháp chọn đường

Như đã đề cập ở trên, 03 phương pháp chọn đường sẽ được nghiên cứu và so sánh. Trong phương pháp RAND, nguồn sẽ chọn ngẫu nhiên một đường để truyền dữ liệu đến đích. Việc thực hiện phương pháp RAND là đơn giản, khi giữa nguồn và đích chỉ cần tồn tại ít nhất 01 đường. Hơn thế nữa, giao thức RAND có thể đạt được cân bằng tải cho các nút chuyên tiếp khi các đường có thể lần lượt được sử dụng để truyền dữ liệu (tránh việc một đường nào đó luôn được chọn).

Đối với phương pháp SHORT, nguồn sẽ chọn đường ngắn nhất trong các đường sẵn có để truyền dữ liệu. Thật vậy, đường ngắn nhất sẽ có thời gian trễ ngắn nhất nên có thể nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần cho hệ thống. Về mặt toán học, ta có thể viết phương pháp SHORT như sau:

$$a = \arg \min_{k=1,2,\dots,K} (1 + T_k). \quad (11)$$

Công thức (11) có nghĩa rằng nguồn sẽ chọn đường thứ a để truyền dữ liệu, với điều kiện khi số chặng $1 + T_a$ đạt giá trị nhỏ nhất.

Trong thực tế, nếu có nhiều hơn 01 đường có số chặng ngắn nhất, ví dụ: có 03 đường giữa nguồn và đích, trong đó số chặng của đường thứ nhất và đường thứ ba là 04, và số chặng của đường thứ hai là 05. Trong trường hợp này, nguồn N_s trong phương pháp SHORT sẽ ngẫu nhiên chọn đường thứ nhất hoặc đường thứ ba để gửi dữ liệu đến đích. Do đó, nếu tất cả các đường giữa nguồn và đích đều có số chặng bằng nhau, thì hai phương pháp SHORT và RAND sẽ giống nhau.

Tiếp đến, ta xét phương pháp BEST, trong đó, đường tốt nhất phải là đường có dung lượng kênh tức thời toàn trình lớn nhất. Thật vậy, đường được chọn trong phương pháp BEST sẽ là:

$$b = \arg \max_{k=1,2,\dots,K} (C_k). \quad (12)$$

Tuy nhiên, việc triển khai phương pháp BEST sẽ phức tạp nhất, bởi phương pháp này yêu cầu tất cả các nút phải ước lượng chính xác hệ số kênh truyền của kênh dữ liệu và cả kênh giao thoa. Hơn thế nữa, các nút phải gửi các thông tin kênh truyền về nút nguồn để nút này chọn được đường tốt nhất. Điều này có thể tiêu tốn nhiều thời gian và năng lượng của các nút trong mạng.

III. ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

A. Mô hình kênh truyền

Giả sử rằng tất cả các kênh truyền giữa các nút là kênh fading Rayleigh. Ta cũng giả sử rằng các kênh truyền là kênh fading chậm (slow fading), do đó các hệ số kênh truyền được giả sử là không thay đổi trong suốt mỗi chu trình truyền dữ liệu giữa nguồn và đích. Bởi vì biên độ của các kênh truyền có phân phối Rayleigh, các độ lợi kênh $\gamma_{k,t}$ và $\varphi_{m,k,t}$ đều có phân phối mũ (exponential distribution). Thật vậy, hàm phân phối tích lũy (CDF: Cumulative Distribution Function) của $\gamma_{k,t}$ và $\varphi_{m,k,t}$ lần lượt được viết như sau:

$$\begin{aligned}F_{\gamma_{k,t}}(x) &= 1 - \exp(-\lambda_{k,t} x), \\ F_{\varphi_{m,k,t}}(x) &= 1 - \exp(-\Omega_{m,k,t} x),\end{aligned}\quad (13)$$

trong đó, các tham số đặc trưng $\lambda_{k,t}$ và $\Omega_{m,k,t}$ sẽ được biểu diễn như trong [3]-[5]:

$$\begin{aligned}\lambda_{k,t} &= 1/E\{\gamma_{k,t}\} = d_{N_{k,t-1}, N_{k,t}}^\beta, \\ \Omega_{m,k,t} &= 1/E\{\varphi_{m,k,t}\} = d_{I_m, N_{k,t}}^\beta,\end{aligned}\quad (14)$$

với $d_{N_{k,t-1}, N_{k,t}}$ là khoảng cách giữa hai nút $N_{k,t-1}$ và $N_{k,t}$, $d_{I_m, N_{k,t}}$ là khoảng cách giữa hai nút I_m và $N_{k,t}$, và β là hệ số suy hao đường truyền.

Từ công thức (13), ta đạt được các hàm PDF tương ứng như sau:

$$\begin{aligned}f_{\gamma_{k,t}}(x) &= \lambda_{k,t} \exp(-\lambda_{k,t} x), \\ f_{\varphi_{m,k,t}}(x) &= \Omega_{m,k,t} \exp(-\Omega_{m,k,t} x).\end{aligned}\quad (15)$$

B. Xác suất dừng (OP) của đường thứ k

Xác suất dừng của đường thứ k được viết như sau:

$$OP_k = \Pr(C_k < C_{th}), \quad (16)$$

với C_{th} là một ngưỡng dừng.

Thay các công thức (8) và (10) vào trong (16), ta có:

$$\begin{aligned}OP_k &= \Pr(\chi_{N_D, k} < \rho_k) \\ &= \Pr\left(\frac{\prod_{t=1}^{T_k+1} \omega_{k,t}}{\prod_{t=1}^{T_k+1} (1 + \omega_{k,t}) - \prod_{t=1}^{T_k+1} \omega_{k,t}} < \rho_k\right).\end{aligned}\quad (17)$$

với

$$\rho_k = 2^{\wedge}((1 + T_k) C_{th}) - 1. \quad (18)$$

Bởi vì ta không thể đạt được một biểu thức dạng tường minh cho xác suất trong công thức (17), do đó bài báo chỉ

đưa ra công thức tính xấp xỉ. Thật vậy, tỷ số SINR toàn trình $\chi_{N_D,k}$ sẽ được chặn trên như trong [20] và [23]:

$$\chi_{N_D,k} \leq \min_{t=1,2,\dots,T_k+1} (\omega_{k,t}). \quad (19)$$

Vì vậy, xác suất dừng toàn trình của đường thứ k sẽ được chặn dưới như sau:

$$OP_k \geq \Pr\left(\min_{t=1,2,\dots,T_k+1} (\omega_{k,t}) < \rho_k\right). \quad (20)$$

Kết hợp các công thức (9) và (20), ta có thể viết:

$$\Pr\left(\min_{t=1,2,\dots,T_k+1} (\omega_{k,t}) < \rho_k\right) = 1 - \prod_{t=1}^{T_k+1} \left[1 - \Pr\left(\omega_{k,t} < \rho_k\right)\right] \\ = 1 - \prod_{t=1}^{T_k+1} \left[1 - \Pr\left(\frac{\Delta\gamma_{k,t}}{\underbrace{\kappa^2\Delta\gamma_{k,t} + \Psi \sum_{m=1}^M \varphi_{m,k,t} + 1}_{J_{k,t}}} < \rho_k\right)\right]. \quad (21)$$

Xét xác suất $J_{k,t}$ trong công thức (21), sử dụng các hàm CDF và PDF đạt được trong (13) và (15), ta có:

$$J_{k,t} = \Pr\left((1 - \kappa^2\rho_k)\Delta\gamma_{k,t} < \rho_k + \Psi\rho_k \sum_{m=1}^M \varphi_{m,k,t}\right). \quad (22)$$

Quan sát từ công thức (22), ta thấy rằng xác suất sẽ luôn bằng 1 nếu $1 - \kappa^2\rho_k \leq 0$. Trong trường hợp $1 - \kappa^2\rho_k > 0$, ta viết tiếp (22) dưới dạng sau:

$$J_{k,t} = \Pr\left(\gamma_{k,t} < \theta_{k,t,1} + \theta_{k,t,2} \sum_{m=1}^M \varphi_{m,k,t}\right) \\ = \int_0^{+\infty} \dots \int_0^{+\infty} \left[F_{\gamma_{k,t}}\left(\theta_{k,t,1} + \theta_{k,t,2} \sum_{m=1}^M x_m\right) \prod_{m=1}^M f_{\varphi_{m,k,t}}(x_m) \right. \\ \left. \times \prod_{m=1}^M dx_m \right], \quad (23)$$

với

$$\theta_{k,t,1} = \frac{\rho_k}{(1 - \kappa^2\rho_k)\Delta}, \theta_{k,t,2} = \frac{\rho_k\Psi}{(1 - \kappa^2\rho_k)\Delta}. \quad (24)$$

Thay hàm CDF $F_{\gamma_{k,t}}(\cdot)$ trong (13) và các hàm PDF $f_{\varphi_{m,k,t}}(\cdot)$ trong (15) vào trong công thức (23), sau một số phép tính tích phân, ta đạt được kết quả sau:

$$J_{k,t} = 1 - \exp(-\lambda_{k,t}\theta_{k,t,1}) \prod_{m=1}^M \frac{\Omega_{m,k,t}}{\Omega_{m,k,t} + \lambda_{k,t}\theta_{k,t,2}}. \quad (25)$$

Kết hợp các công thức (20), (21) và (25), ta đạt được một biểu thức dạng đóng cận dưới cho xác suất dừng toàn trình của đường thứ k như sau:

$$OP_k \geq 1 - \prod_{t=1}^{T_k+1} \left[\exp(-\lambda_{k,t}\theta_{k,t,1}) \prod_{m=1}^M \frac{\Omega_{m,k,t}}{\Omega_{m,k,t} + \lambda_{k,t}\theta_{k,t,2}} \right]. \quad (26)$$

C. Phân tích sự ảnh hưởng của HI

Để thấy rõ sự tác động của HI, từ các công thức (8) và (9), ta viết lại $\chi_{N_D,k}$ dưới dạng sau:

$$\chi_{N_D,k} = \frac{1}{\prod_{t=1}^{T_k+1} (1 + \omega_{k,t}) - 1} \\ = \frac{1}{\prod_{t=1}^{T_k+1} \left(1 + \kappa^2 + \frac{\Psi}{\Delta} \sum_{m=1}^M \frac{\varphi_{m,k,t}}{\gamma_{k,t}} + \frac{1}{\Delta\gamma_{k,t}}\right) - 1}. \quad (27)$$

Nhìn vào công thức (27), ta thấy rằng hiệu năng của mạng khuếch đại chuyển tiếp đa chặng sẽ giảm khi mức khiếm khuyết phần cứng (κ^2) tăng. Hơn thế nữa, nhiễu phần cứng còn tích lũy theo từng chặng, và do đó tỷ số SINR của đường thứ k sẽ không thể vượt qua giới hạn trên sau:

$$\chi_{N_D,k} \leq \frac{1}{\prod_{t=1}^{T_k+1} (1 + \kappa^2) - 1} = \frac{1}{(1 + \kappa^2)^{T_k+1} - 1}. \quad (28)$$

Từ công thức (28), ta dễ dàng suy ra rằng, sự truyền dữ liệu trên đường thứ k sẽ luôn bị dừng ($OP_k = 1$), nếu như:

$$\frac{1}{(1 + \kappa^2)^{T_k+1} - 1} \leq \rho_k, \quad (29)$$

Do đó, ta có thể định nghĩa mức suy giảm phần cứng tới hạn khi truyền chuyển tiếp dữ liệu trên một tuyến có $T_k + 1$ chặng như sau:

$$\kappa_{\max,k}^2 = \left(\frac{1 + \rho_k}{\rho_k}\right)^{\frac{1}{T_k+1}} - 1. \quad (30)$$

Cụ thể hơn, mức suy giảm phần cứng tới hạn $\kappa_{\max,k}^2$ là mức suy hao phần cứng mà nếu vượt qua giá trị này, sự truyền dữ liệu trên đường thứ k sẽ luôn luôn bị dừng. Cho nên, để tất cả các đường đều có thể được sử dụng để truyền dữ liệu thì mức suy hao phần cứng cần phải thỏa mãn công thức sau:

$$\kappa^2 < \min_{k=1,2,\dots,K} (\kappa_{\max,k}^2). \quad (31)$$

Cũng từ công thức (29), ta xét một bài toán khác như sau: với mức suy giảm phần cứng cố định cho trước là $\kappa^2 > 0$, để quá trình truyền và nhận dữ liệu giữa nguồn và đích luôn diễn ra, từ công thức (18) và (29), số chặng giữa nguồn và đích phải thỏa mãn điều kiện sau:

$$\frac{1}{(1 + \kappa^2)^{T_k+1} - 1} > \rho_k \\ \Leftrightarrow \left((1 + \kappa^2)^{T_k+1} - 1\right) \left(2^{(1+T_k)C_{th}} - 1\right) < 1. \quad (32)$$

D. Xác suất dừng (OP) của các phương pháp chọn đường

Trong mục này, xác suất dừng của các phương pháp nghiên cứu sẽ được phân tích. Đầu tiên, ta giả sử rằng điều kiện trong công thức (31) thỏa mãn, và do đó, tất cả các đường đều có thể được chọn để gửi dữ liệu.

Xét phương pháp RAND; bởi vì xác suất mà các đường được chọn là bằng nhau và bằng $1/K$, nên xác suất dừng của phương pháp RAND bằng trung bình cộng xác

suất dừng của tất cả các đường giữa nguồn và đích. Cụ thể,

$$OP_{\text{RAND}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K OP_k. \quad (33)$$

Kết hợp (26) và (33), ta đạt được công thức dạng đóng cận dưới của OP_{RAND} như sau:

$$OP_{\text{RAND}} \geq 1 - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \left\{ \prod_{t=1}^{T_k+1} \left[\exp(-\lambda_{k,t} \theta_{k,t,1}) \prod_{m=1}^M \frac{\Omega_{m,k,t}}{\Omega_{m,k,t} + \lambda_{k,t} \theta_{k,t,2}} \right] \right\}. \quad (34)$$

Đối với phương pháp SHORT, xác suất dừng toàn trình của phương này được viết như sau:

$$OP_{\text{SHORT}} = OP_a \geq 1 - \prod_{t=1}^{T_a+1} \left[\exp(-\lambda_{a,t} \theta_{a,t,1}) \prod_{m=1}^M \frac{\Omega_{m,a,t}}{\Omega_{m,a,t} + \lambda_{a,t} \theta_{a,t,2}} \right]. \quad (35)$$

Đối với phương pháp BEST, đầu tiên, ta có:

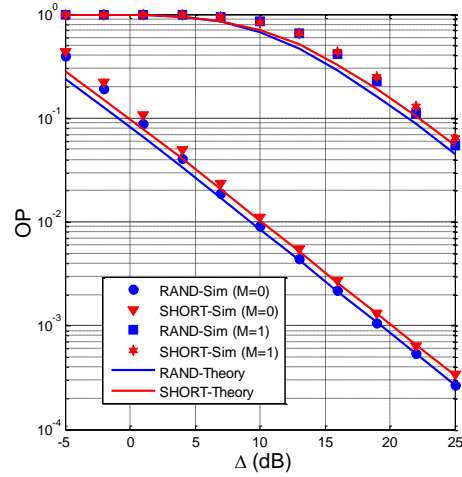
$$OP_{\text{BEST}} = \Pr(C_b < C_{\text{th}}) = \Pr\left(\max_{k=1,2,\dots,K} (C_k) < C_{\text{th}}\right) = \prod_{k=1}^K \Pr(C_k < C_{\text{th}}) = \prod_{k=1}^K OP_k. \quad (36)$$

Công thức (36) có nghĩa rằng xác suất dừng của phương pháp BEST bằng tích xác suất dừng của tất cả các đường sẵn có giữa nguồn và đích. Sử dụng công thức (26), ta đạt được công thức (37) như sau:

$$OP_{\text{BEST}} \geq \prod_{k=1}^K \left\{ 1 - \prod_{t=1}^{T_k+1} \left[\exp(-\lambda_{k,t} \theta_{k,t,1}) \prod_{m=1}^M \frac{\Omega_{m,k,t}}{\Omega_{m,k,t} + \lambda_{k,t} \theta_{k,t,2}} \right] \right\}. \quad (37)$$

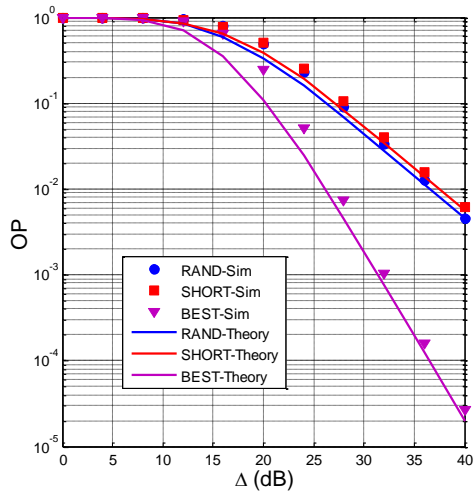
IV. KẾT QUẢ

Trong mục này, các kết quả mô phỏng Monte Carlo sẽ được thực hiện để kiểm chứng công thức xác suất dừng toàn trình của các mô hình RAND, SHORT và BEST. Môi trường mô phỏng là hệ trục tọa độ Oxy, trong đó nguồn N_s được cố định ở góc tọa độ (0,0), đích N_D có vị trí là (1,0), và nút $N_{k,t}$ được đặt ở vị trí $(t/(T_k+1), 0)$, với $k=1,2,\dots,K$, $t=1,2,\dots,T_k$. Với các vị trí này, khoảng cách giữa nguồn và đích được cố định bằng 1, và khoảng cách giữa hai nút kề nhau trên đường thứ k là $1/(T_k+1)$. Đề tập trung vào sự tác động của CCI và HI lên xác suất dừng hệ thống, trong tất cả các kết quả mô phỏng và lý thuyết, ta giả sử rằng các nguồn giao thoa I_m được cố định ở vị trí (0.5,-0.5), hệ số suy hao đường truyền β cố định bằng 3 và phương sai của nhiễu cộng (σ^2) bằng 1. Trong các hình vẽ, các kết quả mô phỏng được ký hiệu là Sim (Simulation) và các kết quả lý thuyết được ký hiệu là Theory. Số phép thử được sử dụng để thực hiện mô phỏng Monte Carlo là từ $5 \cdot 10^5$ đến $5 \cdot 10^6$.



Hình 2. Xác suất dừng toàn trình vẽ theo Δ (dB) với $\Psi=15$ dB, $K=3$, $T_k \in \{1,2,2\}$, $\kappa^2=0$ và $C_{\text{th}}=0.25$.

Hình 2 vẽ xác suất dừng toàn trình của phương pháp RAND và SHORT theo Δ (dB). Trong Hình 2, số đường giữa nguồn và đích là 3 ($K=3$), và số nút chuyển tiếp của 03 đường này là 1, 2 và 2, ($T_1=1, T_2=2, T_3=2$). Cũng trong mô phỏng này, các thiết bị được giả sử là hoàn hảo $\kappa^2=0$, ngưỡng dừng được cố định bằng 0.25 ($C_{\text{th}}=0.25$), và $\Psi=15$ dB. Như có thể quan sát trong Hình 2, xác suất dừng OP của hai phương pháp RAND và SHORT giảm khi Δ tăng. Đó là vì khi Δ tăng, công suất phát của các nút tăng nên hiệu năng OP giảm. Kế tiếp, chúng ta có thể thấy rằng OP của cả hai mô hình trong trường hợp không có CCI ($M=0$) thấp hơn rất nhiều trong trường hợp có CCI ($M=1$). Hơn nữa, trong Hình 2, phương pháp RAND đạt được giá trị OP thấp hơn phương pháp SHORT. Tuy nhiên, độ chênh lệch hiệu năng là không lớn trong cả hai trường hợp $M=0$ và $M=1$. Quan sát ở các giá trị Δ lớn, ta thấy rằng đường OP của cả hai mô hình song song với nhau, điều này chứng tỏ rằng hai phương pháp RAND và SHORT có độ lợi phân tập bằng nhau. Chúng ta cũng lưu ý rằng các giá trị mô phỏng (Sim) chính là các giá trị OP chính xác của hai phương pháp RAND và SHORT, trong khi đó các giá trị lý thuyết chỉ là các giá trị cận dưới của hiệu năng xác suất dừng. Hình 2 cũng cho thấy rằng khi $M=0$, giá trị OP mô phỏng sẽ hội tụ về giá trị OP lý thuyết khi Δ đủ lớn. Tuy nhiên, các giá trị OP mô phỏng và lý thuyết không hội tụ về nhau khi có sự xuất hiện của nguồn giao thoa. Hơn nữa, khi $M=1$, xác suất dừng của cả hai phương pháp RAND và SHORT đều rất lớn, đặc biệt xác suất dừng hầu như bằng 1 với các giá trị Δ từ -5 dB đến 5 dB.



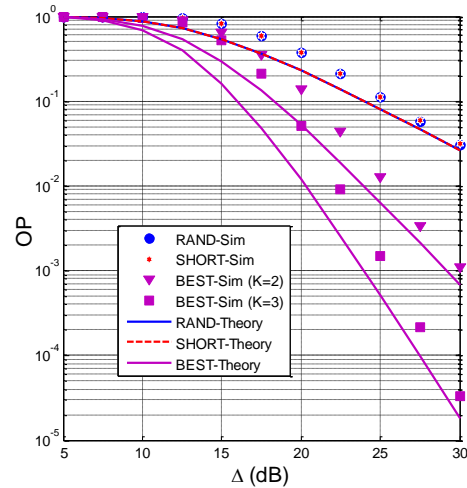
Hình 3. Xác suất dừng toàn trình vẽ theo Δ (dB) với $\Psi = 20$ dB, $K = 2$, $T_k \in \{1, 3\}$, $\kappa^2 = 0.01$, $M = 1$ và $C_{th} = 0.25$.

Hình 3 so sánh hiệu năng OP của cả 03 phương pháp nghiên cứu khi $\Psi = 20$ dB, $K = 2$, $T_k \in \{1, 3\}$, $\kappa^2 = 0.01$, $M = 1$ và $C_{th} = 0.25$. Như ta có thể thấy, mô hình BEST đạt được giá trị OP thấp hơn rất nhiều khi so sánh với 02 mô hình còn lại. Nguyên nhân là vì mô hình BEST lựa chọn đường dựa vào dung lượng kênh toàn trình tức thời, trong khi phương pháp RAND và SHORT không quan tâm đến chất lượng kênh truyền. Tương tự như Hình 2, Hình 3 cũng cho thấy rằng giá trị OP của phương pháp RAND và SHORT là khá lớn (lớn hơn 0.01) khi có sự xuất hiện của nguồn nhiễu ($M = 1$).

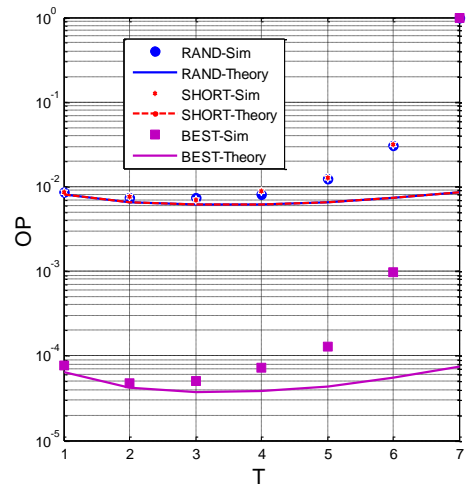
Quan sát từ hình vẽ, ta cũng thấy rằng độ dốc của OP trong phương pháp chọn đường BEST lớn hơn các phương pháp còn lại. Đó là vì phương pháp BEST chọn đường có dung lượng kênh toàn trình lớn nhất trong các đường sẵn có, và vì vậy, BEST đạt được độ lợi phân tập cao hơn hai phương pháp RAND và SHORT. Trong Hình 2 và Hình 3, ta cũng thấy rằng việc chọn đường ngắn nhất không hiệu quả trong môi trường có sự tác động chung của CCI và HI. Như chúng ta có thể thấy, OP của phương pháp chọn đường SHORT lớn hơn OP của phương pháp chọn đường RAND trong cả hai Hình 2 và 3.

Trong Hình 4, OP của 03 phương pháp nghiên cứu được vẽ theo Δ (dB) khi $\Psi = 15$ dB, $\kappa^2 = 0.01$, $M = 2$ và $C_{th} = 0.25$. Hơn nữa, giả sử rằng tất cả các đường đều có số nút chuyển tiếp bằng nhau và bằng 2, tức là $T_k = 2(\forall k)$. Như đã đề cập ở trên, trong trường hợp này, hiệu năng của hai mô hình RAND và SHORT là tương đương nhau và Hình 4 đã minh chứng điều này. Cũng trong Hình 4, ta xét hai trường hợp: số đường (K) giữa nguồn và đích bằng 2 và bằng 3. Bởi vì hai mô hình RAND và SHORT không phụ thuộc vào số đường giữa nguồn và đích nên OP của cả hai mô hình này không thay đổi khi K thay đổi. Tuy nhiên, giá trị OP của phương pháp BEST lại giảm đáng kể khi K tăng từ 2 lên 3. Như đã chứng minh trong công thức (36), OP của phương pháp BEST sẽ bằng tích OP của các đường, và do đó, khi số đường tăng thì OP của phương pháp này sẽ giảm. Hơn nữa, độ dốc của đường OP trong phương pháp BEST với $K = 3$ lớn hơn độ dốc với $K = 2$. Điều này có thể được giải

thích rằng phương pháp BEST đạt được độ lợi phân tập cao hơn khi tồn tại nhiều đường hơn giữa nguồn và đích.



Hình 4. Xác suất dừng toàn trình vẽ theo Δ (dB) với $\Psi = 15$ dB, $T_k = 2(\forall k)$, $\kappa^2 = 0.01$, $M = 2$ và $C_{th} = 0.25$.



Hình 5. Xác suất dừng toàn trình vẽ theo T với $\Delta = 15$ dB, $K = 2$, $\kappa^2 = 0.01$, $M = 0$ và $C_{th} = 0.5$.

Hình 5 nghiên cứu sự ảnh hưởng của số chặng lên hiệu năng của các phương pháp nghiên cứu. Trong mô phỏng này, ta giả sử có 02 tuyến giữa nguồn và đích ($K = 2$), và không có sự ảnh hưởng của CCI ($M = 0$). Hơn nữa, giả sử rằng tất cả các tuyến đều có số chặng bằng nhau và bằng T : $T_k = T(\forall k)$. Vì vậy, giá trị OP của mô hình RAND và SHORT sẽ giống nhau như được thể hiện trong hình vẽ này. Các thông số khác được thiết lập trong Hình 5 là $\Delta = 15$ dB, $C_{th} = 0.5$ và $\kappa^2 = 0.01$. Với các giá trị $C_{th} = 0.5$ và $\kappa^2 = 0.01$, dựa vào công thức (32), ta có:

$$(1.001^{T+1} - 1) \left(2^{(1+T)0.5} - 1 \right) < 1. \quad (38)$$

Giải bất đẳng thức (38), ta có $T \leq 6$. Và đây là lý do tại sao trong Hình 5, khi $T = 7$ thì OP của cả 03 mô hình RAND, SHORT và BEST đều bằng 1. Cũng trong Hình 5, ta cũng thấy rằng số chặng cũng tác động đáng kể lên hiệu năng OP toàn trình. Trong hình vẽ này, ta cũng thấy rằng, tồn tại giá trị của T để xác suất dừng của các mô hình đạt

giá trị nhỏ nhất. Cụ thể, khi $T = 2$ (số chặng bằng 3) thì OP của các phương pháp đạt giá trị nhỏ nhất (quan sát kết quả mô phỏng). Điều này có thể được giải thích như sau: khi $T = 1$, khoảng cách giữa nguồn và các nút chuyển tiếp lớn, và do đó chất lượng của các kênh truyền xấu (về mặt trung bình), dẫn đến OP lớn. Tuy nhiên, khi T quá lớn thì dung lượng kênh lại giảm mạnh bởi hệ số $1/(T+1)$, do đó OP của các mô hình cũng lớn. Cuối cùng, ta cũng có thể quan sát từ Hình 5 rằng, độ lệch giữa kết quả mô phỏng và lý thuyết là lớn khi số chặng tăng.

I. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu hiệu năng xác suất dừng toàn trình cho 03 phương pháp RAND, SHORT và BEST dưới sự tác động của fading kênh truyền, sự xuất hiện của CCI và nhiễu gây ra do HI. Với sự xuất hiện của CCI, hiệu năng của các mô hình RAND và SHORT giảm mạnh. Các kết quả cũng cho thấy rằng mô hình BEST có thể đạt được hiệu năng tốt hơn rất nhiều khi so sánh với 02 mô hình còn lại. Hơn thế nữa, đối với kỹ thuật chuyển tiếp AF, nhiều phần cứng sẽ tích lũy theo mỗi chặng và tác động tiêu cực đến hiệu năng dừng toàn trình. Để nâng cao hiệu năng hệ thống, các thiết bị cần được trang bị với phần cứng tốt hơn (giảm mức suy hao phần cứng), đồng thời số chặng giữa nguồn và đích cũng cần được thiết kế thích hợp.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Tại Thành Phố Hồ Chí Minh với mã số đề tài 04-HV-2020-RD_VT2.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. Pabst, et al., "Relay-Based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 9, pp. 80-89, Sept. 2004.
- [2] J. N. Laneman, G. W. Wornell, "Distributed Space Time Coded Protocols for Exploiting Cooperative Diversity in Wireless Networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 10, pp. 2415-2425, Nov. 2003.
- [3] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, 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.
- [4] 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, Aug. 2013.
- [5] T. D. Hieu, T. T. Duy, S. G. Choi, "Secrecy Performance of a Generalized Partial Relay Selection Protocol in Underlay Cognitive Networks," *International Journal of Communication Systems*, vol. 31, no. 17, pp. 1-17, 2018.
- [6] T. T. Duy, et al., "Proactive Relay Selection with Joint Impact of Hardware Impairment and Co-channel Interference," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 5, pp. 1594-1606, May 2015.
- [7] K. Tourki, H. Yang, M. Alouini, "Accurate Outage Analysis of Incremental Decode-and-Forward Opportunistic Relaying," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 4, pp. 1021-1025, Apr. 2011.
- [8] K. Tourki, K. A. Qaraqe, M. Alouini, "Outage Analysis for Underlay Cognitive Networks Using Incremental Regenerative Relaying," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 2, pp. 721-734, Feb. 2013.
- [9] M. O. Hasna, M.-S. Alouini, "Outage Probability of Multihop Transmission over Nakagami Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 5, pp. 216-218, May 2003.
- [10] C. Conne, I. Kim, "Outage Probability of Multi-hop Amplify-and-Forward Relay Systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9, no. 3, pp. 1139-1149, March 2010.
- [11] A. E. Khandani, J. Abounadi, E. Modiano and L. Zheng, "Cooperative Routing in Static Wireless Networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 11, pp. 2185-2192, Nov. 2007.
- [12] P. T. Tin, et. al., "Secrecy Performance Enhancement for Underlay Cognitive Radio Networks Employing Cooperative Multi-hop Transmission With and Without Presence of Hardware Impairments," *Entropy*, vol. 21, no. 2, 217, Feb. 2019.
- [13] T. T. Duy, et. al., "Mô hình truyền đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường trong vô tuyến nhận thức dạng nền," *Hội thảo Quốc gia 2014 về điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin (ECIT2014)*, pp. 238-243, Nha Trang, Viet Nam, 09/2014.
- [14] M. R. Bhatnagar, "Performance Analysis of a Path Selection Scheme in Multi-Hop Decode-and-Forward Protocol," *IEEE Communications Letters*, vol. 16, no. 12, pp. 1980-1983, Dec. 2012.
- [15] M. R. Bhatnagar, R. K. Mallik, 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, Apr. 2016.
- [16] T. D. Hieu, T. T. Duy, and B.-S. Kim, "Performance Enhancement for Multihop Harvest-to-Transmit WSNs with Path-Selection Methods in Presence of Eavesdroppers and Hardware Noises," *IEEE Sensors Journal*, vol. 18, no. 12, pp. 5173-5186, Jun. 2018.
- [17] P. M. Quang, T. T. Duy, and V. N. Q. Bảo, "Khảo Sát Sự Ảnh Hưởng Của Phần Cứng Không Hoàn Hảo Lên Mạng Chuyên Tiếp Đa Chặng Trong Các Môi Trường Fading Khác Nhau," *Hội Thảo Quốc Gia 2015 về Điện Tử, Truyền Thông và Công Nghệ Thông Tin (ECIT 2015)*, TPHCM, Vietnam, 2015, pp. 471-476, 12/2015.
- [18] T. T. Duy, C. N. Trang, V. N. Q. Bao, T. Hanh, "Joint impact of hardware impairment and co-channel interference on multi-hop relaying," in *Proc. of 2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, pp. 88-92, 2015.
- [19] P. T. D. Ngoc, T. T. Duy, K. Ho-Van, N. T. Binh, "Performance Evaluation of Best Path Selection Protocol in Multi-hop Relaying Networks under Joint Impact of Co-channel Interference and Hardware Impairments," *Journal of Science and Technology: Issue on Information and Communications Technology*, vol. 4, pp. 33-38, Aug. 2018.
- [20] B. Q. Duc, D. T. Hung, T. T. Duy, N. T. Binh, "Phân Tích Hiệu Năng Mạng Khuếch Đại Chuyên Tiếp Đa Chặng Dưới Sự Ảnh Hưởng Chung Của Nhiều Đồng Kênh Và Nhiễu Phần Cứng," *Hội thảo Quốc gia lần thứ XXII về điện tử, Truyền thông và Công nghệ Thông tin (REV-ECIT 2019)*, pp. 247-252, Hà Nội, Việt Nam, 12/2019.

- [21] M. Matthaiou, A. Papadogiannis, E. Bjornson, M. Debbah, "Two-way Relaying Under the Presence of Relay Transceiver Hardware Impairments," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 1136–1139, Jun. 2013.
- [22] E. Bjornson, M. Matthaiou, 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.
- [23] T. Soithong, V. A. Aalo, G. P. Efthymoglou, C. Chayawan, "Performance of Multihop Relay Systems with Co-Channel Interference in Rayleigh Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 836 – 838, Aug. 2011.



Nguyễn Thanh Bình, Nhận bằng Tiến sĩ vào năm 1995. TS. Nguyễn Thanh Bình hiện đang công tác tại Khoa Kỹ thuật điện tử 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: Kỹ thuật phát thanh, truyền hình, xử lý tín hiệu và truyền thông.

Email: binhnt@ptithcm.edu.vn

PERFORMANCE EVALUATION OF MULTI-HOP MULTI-PATH AMPLIFY-AND-FORWARD RELAYING NETWORKS UNDER JOINT IMPACT OF CO-CHANNEL INTERFERENCE AND HARDWARE IMPAIRMENTS

Abstract: In this paper, we evaluate performance of multi-hop multi-path amplify-and-forward (AF) relaying networks under joint impact of co-channel interference and hardware impairments. We propose three efficient path selection methods named RAND, SHORT and BEST. In the RAND method, a random path is selected to transmit data from the source to the destination, while the SHORT one chooses the path having the lowest number of hops for the data transmission. In the BEST method, the selected path is the path, which obtains the highest end-to-end (e2e) channel capacity. For performance evaluation, we first derive exact expressions of e2e Signal-to Interference-plus-Noise Ratio (*SINR*). Then, lower-bound closed-form expressions of the e2e outage probability (*OP*) of the proposed methods over Rayleigh fading channel are derived. Finally, Monte Carlo simulations are performed for verifying the derived formulas, comparing the RAND, SHORT and BEST performance, and showing effect of the important system parameters on the e2e *OP*.

Keywords: multi-hop and multi-path, Amplify-and-forward, co-channel interference, hardware impairment, 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