

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG MẠNG CHUYỂN TIẾP LAI GHÉP VỆ TINH-TRẠM MẶT ĐẤT HAI CHIỀU SỬ DỤNG MÃ FOUNTAIN VÀ CHỌN LỰA TRẠM CHUYỂN TIẾP

Nguyễn Văn Toàn^{*#}, Đặng Thế Hùng[#], Trần Trung Duy⁺, Lê Chu Khản⁺, Phạm Ngọc Sơn^{*}

^{*} Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật Thành Phố Hồ Chí Minh

[#] Đại Học Thông Tin Liên Lạc, Nha Trang, Khánh Hòa

⁺ Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông, Cơ Sở tại Thành Phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Bài báo này đề xuất mô hình chuyển tiếp lai ghép vệ tinh-trạm mặt đất hai chiều, trong đó một người dùng mặt đất và một vệ tinh muốn trao đổi dữ liệu với nhau thông qua sự hỗ trợ của các trạm chuyển tiếp mặt đất. Sử dụng mã Fountain là hướng nghiên cứu mới đối với hệ thống HSTRNs, trong đó người dùng mặt đất và vệ tinh sẽ liên tục gửi các gói mã hóa đến nhau. Để khôi phục thông tin gốc, người dùng mặt đất và vệ tinh phải nhận đủ một số lượng gói mã hóa được quy định. Bài báo áp dụng mô hình chuyển tiếp hai chiều 03 pha, trong đó trạm chuyển tiếp mặt đất sẽ XOR các gói mã hóa nhận được từ người dùng và vệ tinh trong 02 pha đầu, và gửi gói đã XOR đến người dùng và vệ tinh trong khe thời gian thứ 03. Để nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu từ người dùng đến các trạm chuyển tiếp, chúng tôi áp dụng kỹ thuật chọn lựa trạm mặt đất tốt nhất. Bài báo đưa ra các công thức đánh giá chính xác xác suất dừng tại người dùng và vệ tinh, cũng như xác suất dừng hệ thống. Hơn nữa, mô phỏng Monte Carlo cũng được thực hiện để kiểm chứng các công thức toán học. Các kết quả cho thấy mô hình đề xuất đạt được hiệu năng cao hơn mô hình chuyển tiếp thông thường, sử dụng 04 khe thời gian.

Từ khóa: Mạng chuyển tiếp lai ghép vệ tinh-trạm mặt đất, chuyển tiếp hai chiều, chọn lựa nút chuyển tiếp, xác suất dừng.

I. GIỚI THIỆU

Trong thời gian gần đây, thông tin vệ tinh [1]-[3] nhận được sự quan tâm đặc biệt của các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước. Với khả năng cung cấp kết nối tốc độ cao ở khắp mọi nơi, truyền thông vệ tinh sẽ là một lĩnh vực đầy tiềm năng trong tương lai gần. Thông tin vệ tinh sử dụng các vệ tinh làm thiết bị chuyển tiếp dữ liệu cho các thiết bị mặt đất [4]. Thông thường, các trạm mặt đất sẽ được triển khai để kết nối với vệ tinh, cũng như để chuyển tiếp dữ liệu từ vệ tinh đến những người dùng mặt đất. Mô hình này có tên gọi là chuyển tiếp lai ghép vệ tinh-trạm mặt đất (HSTRN: Hybrid Satellite-Terrestrial Relay Network).

Tác giả liên hệ: Trần Trung Duy,

Email: duytt@ptit.edu.vn

Đến tòa soạn: 12/2022, chỉnh sửa: 02/2023, chấp nhận đăng:

03/2023.

Cho đến nay, các mô hình HSTRN đã được áp dụng và nghiên cứu trong nhiều ứng dụng khác nhau. Các công trình [5]-[7] đề xuất mô hình HSTRN với sự xuất hiện của các nút nghe lén. Để nâng cao hiệu năng bảo mật, các tác giả trong [5]-[7] đã áp dụng kỹ thuật chọn lựa trạm chuyển tiếp để tăng cường chất lượng kênh dữ liệu. Các công trình [8]-[9] đánh giá hiệu năng mạng HSTRN trong môi trường vô tuyến nhận thức (CR: Cognitive Radio), trong đó các nút thứ cấp như vệ tinh và trạm mặt đất phải hiệu chỉnh công suất phát để thỏa mãn ràng buộc về mức can nhiễu tối đa mà mạng sơ cấp đưa ra. Để nâng cao hiệu năng cho mạng HSTRN thứ cấp, các giải pháp hiệu quả như MIMO (Multi-Input Multi-Output) [10] và chọn lựa người dùng (User Selection) [11] đã được đề xuất và phân tích. Các tác giả trong [12]-[13] áp dụng kỹ thuật đa truy nhập phi trực giao (NOMA: Non-Orthogonal Multiple Access) cho mạng CR HSTRN để nâng cao tốc độ dữ liệu. Hơn nữa, công trình [12] xem xét sự xuất hiện của nút nghe lén trong mạng, và đánh giá hiệu năng của mô hình thông qua xác suất dừng (OP: Outage Probability) tại nút thu hợp pháp và xác suất chặn (Intercept Probability) tại nút nghe lén. Công trình [13] áp dụng kỹ thuật chuyển tiếp song công (Full-duplex Relaying) để nâng cao tốc độ dữ liệu, khi so sánh với kỹ thuật chuyển tiếp bán song công (Half-duplex).

Chuyển tiếp hai chiều (TWR: Two-Way Relaying) [14] là một kỹ thuật hiệu quả, trong đó hai nút nguồn trao đổi dữ liệu với nhau thông qua sự giúp đỡ của một hoặc nhiều nút chuyển tiếp chung. Mô hình chuyển tiếp hai chiều thông thường [15] sẽ sử dụng 04 khe thời gian trực giao, và do đó tốc độ dữ liệu đạt được là 02/04 (02 dữ liệu trên 04 khe thời gian). Để nâng cao tốc độ dữ liệu cho mạng TWR, các tác giả trong [16]-[17] sử dụng kỹ thuật mã hóa mạng số (DNC: Digital Network Coding). Sử dụng DNC, hai nút nguồn sẽ gửi dữ liệu đến nút chuyển tiếp chung trong 02 pha đầu, sau đó nút chuyển tiếp chung sẽ XOR các dữ liệu lại và gửi dữ liệu đã XOR đến cả hai nút nguồn trong pha thứ ba. Nhờ tiết kiệm được 01 khe thời gian truyền, tốc độ dữ liệu của mạng TWR sử dụng DNC là 02/03 (02 dữ liệu trên 03 khe thời gian). Các công trình [18]-[19] nghiên cứu kỹ thuật mã hóa mạng tương tự (ANC: Analog Network Coding) để đạt được tốc độ dữ liệu 02/02. Thật vậy, hai nút nguồn cùng lúc gửi tín hiệu đến

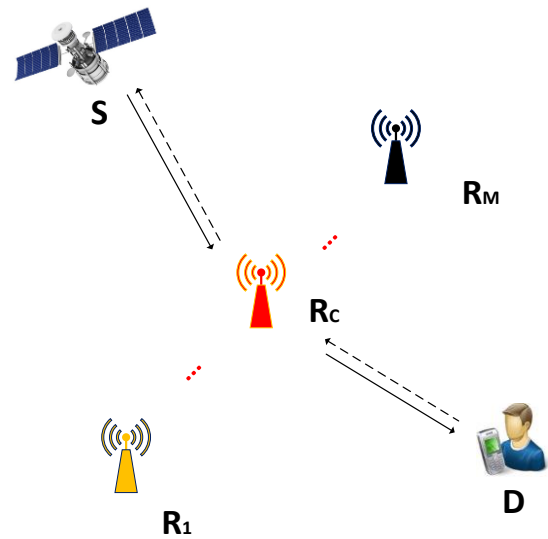
nút chuyển tiếp chung trong pha đầu, và nút chuyển tiếp sẽ khuếch đại tín hiệu nhận được, trước khi gửi đến cả hai nút nguồn trong pha thứ hai. Tuy vậy, xử lý tín hiệu phức tạp, đặc biệt là việc loại bỏ nhiễu trong tín hiệu nhận được tại các nút nguồn, là nhược điểm chính của mô hình TWR sử dụng kỹ thuật ANC này.

Gần đây, mạng HSTRN hai chiều đang nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu. Trong công trình [20], các tác giả đề xuất mô hình HSTRN hai chiều sử dụng ANC. Hơn nữa, các tác giả của [20] cũng nghiên cứu sự ảnh hưởng của khiếm khuyết phần cứng lên hiệu năng xác suất dừng và thông lượng mạng. Tương tự [20], các tác giả trong [21]-[22] cũng nghiên cứu mô hình HSTRN hai chiều sử dụng ANC. Điểm mới trong [21]-[22] đó là các tác giả đề xuất những kỹ thuật chọn lựa trạm mặt đất để nâng cao hiệu năng mạng. Công trình [23] đề xuất mô hình HSTRN hai chiều sử dụng DNC và thu thập năng lượng sóng vô tuyến (Radio-Frequency Energy Harvesting). Các tác giả trong tài liệu [24] nghiên cứu hiệu năng bảo mật cho mô hình HSTRN hai chiều sử dụng DNC, với sự xuất hiện của nút nghe lén.

Khác với các công trình liên quan [20]-[24], bài báo này nghiên cứu mạng chuyển tiếp HSTRN hai chiều sử dụng mã Fountain. Trong mô hình đề xuất, người dùng mặt đất và vệ tinh muốn trao đổi dữ liệu với nhau thông qua sự hỗ trợ của các trạm chuyển tiếp mặt đất. Sử dụng mã Fountain [25]-[27], người dùng mặt đất và vệ tinh sẽ liên tục trao đổi các gói mã hóa với nhau sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp hai chiều 03 pha (DNC). Để nâng cao độ tin cậy của việc truyền dữ liệu từ người dùng mặt đất đến các trạm chuyển tiếp, chúng tôi áp dụng kỹ thuật chọn lựa trạm mặt đất tốt nhất. Khác với [21]-[22], kỹ thuật chọn lựa trong bài báo này là kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình (PRS: Partial relay selection), trong khi [21]-[22] nghiên cứu kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp toàn trình (FRS: Full Relay Selection). Thật vậy, PRS giúp đơn giản hóa việc triển khai trong thực tế, và giảm đáng kể thời gian trễ khi so sánh với FRS. Chúng tôi đưa ra các biểu thức toán học đánh giá xác suất dừng (OP) tại vệ tinh và tại người dùng cũng như xác suất dừng hệ thống (SOP: System Outage Probability) cho mô hình đề xuất. Hơn nữa, mô phỏng Monte Carlo cũng được thực hiện để kiểm chứng các biểu thức OP và SOP đưa ra trong bài báo. Các kết quả đạt được cho thấy rằng mô hình đề xuất đạt được hiệu năng tốt hơn mô hình HSTRN hai chiều thông thường sử dụng 04 pha truyền. Hơn nữa, số lần truyền các gói mã hóa và số trạm chuyển tiếp mặt đất cũng ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng của mô hình đề xuất.

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 OP và SOP bằng các biểu thức toán học. Phần IV cung cấp các kết quả mô phỏng và lý thuyết. Cuối cùng, các kết luận được đưa ra trong phần V.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



Hình 1. Mô hình HSTRN hai chiều đề xuất.

Hình 1 trình bày mô hình HSTRN hai chiều sử dụng mã Fountain, trong đó, vệ tinh S và người dùng D muốn trao đổi dữ liệu với nhau. Do bị che khuất nên S và D không thể trực tiếp truyền dữ liệu cho nhau. Vì vậy, một trong các trạm chuyển tiếp mặt đất sẽ được chọn để hỗ trợ việc trao đổi thông tin này. Ta giả sử có tất cả M trạm chuyển tiếp mặt đất, được ký hiệu là R_1, R_2, \dots, R_M . Cũng giả sử rằng tất cả các thiết bị đều trang bị 01 ăngten, và sự truyền dữ liệu được thực hiện qua các khe thời gian trực giao.

Ta đặt tên cho mô hình đề xuất là TWR-3P (Two-Way Relaying scheme with 03 Phases). Sử dụng mã Fountain, các thiết bị S và D chia thông tin gốc của mình thành các gói nhỏ, và sử dụng các gói nhỏ này để tạo thành các gói mã hóa [25]-[27]. Kế tiếp, S và D sẽ trao đổi từng gói mã hóa với nhau, thông qua sự hỗ trợ của các trạm R. Hơn nữa, một trong các trạm mặt đất sẽ được chọn (ký hiệu trạm được chọn là R_c) để chuyển tiếp các gói mã hóa. Một chu trình chuyển tiếp 01 gói mã hóa từ S đến D, và từ D đến S, sẽ diễn ra trong 03 khe (pha) thời gian trực giao. Trong hai pha đầu, S và D sẽ gửi gói mã hóa của mình (ký hiệu là p_S và p_D) đến R_c . Nếu R_c nhận thành công (giải mã không bị lỗi) cả p_S và p_D , R_c tiến hành XOR các gói mã hóa này lại: $p_R = p_S \oplus p_D$, và sẽ gửi p_R đến S và D ở pha thứ ba. Khi đã đạt được p_R , S (D) sẽ thu được gói mã hóa mong muốn p_D (p_S) bằng cách thực hiện phép XOR giữa p_R và gói mã hóa của chính chúng, cụ thể $p_S \oplus p_R = p_D$ ($p_D \oplus p_R = p_S$). Như đã phân tích trong [25]-[27], S (D) có thể khôi phục được thông tin gốc của D (S) nếu S (D) nhận được ít nhất H_D (H_S) gói mã hóa p_S (p_D). Do ràng buộc về thời gian trễ, S chỉ có thể truyền tối đa $N_{\max,S}$ lần gói mã hóa đến D, và D chỉ có thể truyền tối đa $N_{\max,D}$ lần gói mã hóa đến S. Sau khi sự trao đổi các gói mã hóa kết thúc, nếu S (D) không thể nhận được ít nhất H_D (H_S) gói

mã hóa thì S (D) sẽ không thể khôi phục được thông tin gốc của D (S), hay nói cách khác, D (S) bị dừng.

Lưu ý 1: Trong bài báo này, chúng tôi chỉ tập trung vào quá trình chuyển tiếp hai chiều, và do đó, ta có thể giả sử rằng $H_D = H_S = H$ và $N_{\max,S} = N_{\max,D} = N_{\max}$. Thật vậy, ví dụ $N_{\max,S} > N_{\max,D}$, thì sau khi S và D truyền hết $N_{\max,D}$ lần, lúc này chỉ còn S tiếp tục gửi các gói mã hóa đến D. Trong trường hợp này thì sự truyền các gói mã hóa từ S đến D chỉ là sự truyền 01 chiều.

Ta ký hiệu P_X là công suất phát của nút X, với $X \in \{S, R_u, D\}$ và $u = 1, 2, \dots, M$. Ta có thể giả sử rằng các trạm R có công suất phát bằng nhau: $P_{R_u} = P_R$ với mọi u . Ta cũng ký hiệu h_{XY} là hệ số kênh truyền giữa máy phát X và máy thu Y, với $Y \in \{S, R_u, D\}$, và $\gamma_{XY} = |h_{XY}|^2$ là độ lợi kênh tương ứng. Giả sử rằng các hệ số kênh truyền h_{XY} không thay đổi trong một khe thời gian, nhưng thay đổi độc lập giữa các khe thời gian khác nhau.

Xét pha truyền thứ nhất, D sẽ gửi gói mã hóa ρ_D đến trạm chuyển tiếp được chọn R_c , và trạm này được chọn theo thuật toán sau:

$$R_c : \gamma_{DR_c} = \max_{u=1,2,\dots,M} (\gamma_{DR_u}). \quad (2)$$

Trong công thức (2), trạm chuyển tiếp R_c là trạm đạt được độ lợi kênh lớn nhất trong các trạm R. Như đã đề cập, kỹ thuật chọn lựa này tương tự như kỹ thuật chọn nút chuyển tiếp đơn trình (PRS) [26] khi chi thông tin trạng thái kênh truyền ở một chặng được sử dụng để chọn nút chuyển tiếp tốt nhất. Sau khi R_c được chọn, D sẽ gửi gói mã hóa của mình đến R_c , và tỷ số SNR (Signal-to-Noise Ratio) tức thời đạt được tại R_c sẽ là:

$$\varphi_{DR_c} = \frac{P_D \gamma_{DR_c}}{\sigma_{R_c}^2}, \quad (3)$$

với $\sigma_{R_c}^2$ là phương sai của nhiễu Gauss trắng cộng tính (AWGN: Additive White Gaussian Noise) tại R_c . Để đơn giản về mặt ký hiệu, ta giả sử phương sai của tất cả nhiễu AWGN tại thiết bị thu Y đều bằng σ_0^2 .

Bởi vì mô hình đề xuất sử dụng 03 pha truyền nên tốc độ dữ liệu tức thời trong Pha 1 được tính như sau:

$$C_{DR_c} = \frac{1}{3} \log_2 (1 + \varphi_{DR_c}) = \frac{1}{3} \log_2 \left(1 + \frac{P_D \gamma_{DR_c}}{\sigma_0^2} \right) \quad (4)$$

$$= \frac{1}{3} \log_2 (1 + \Delta_D \gamma_{DR_c}),$$

với $\Delta_D = P_D / \sigma_0^2$.

Giả sử tất cả các kênh truyền giữa D và các trạm R đều là kênh fading Rayleigh; độ lợi kênh γ_{DR_u} ($u = 1, 2, \dots, M$) sẽ có phân phối mũ. Vì thế, hàm mật độ xác suất (PDF: Probability Density Function) và hàm phân phối tích lũy (CDF: Cummulative Distribution Function) của γ_{DR_u} được lần lượt đưa ra như sau:

$$f_{\gamma_{DR_u}}(x) = \lambda_{DR_u} \exp(-\lambda_{DR_u} x), \quad (5)$$

$$F_{\gamma_{DR_u}}(x) = 1 - \exp(-\lambda_{DR_u} x),$$

với λ_{DR_u} là tham số đặc trưng của kênh truyền, và λ_{DR_u} bằng nghịch đảo giá trị trung bình của γ_{DR_u} , $\lambda_{DR_u} = 1 / E\{\gamma_{DR_u}\}$, ở đây $E\{Z\}$ ký hiệu giá trị trung bình của biến ngẫu nhiên Z.

Dựa vào các công thức (2) và (5), hàm CDF của γ_{DR_c} được đưa ra bằng công thức sau:

$$F_{\gamma_{DR_c}}(x) = \Pr(\gamma_{DR_c} < x) = \Pr\left(\max_{u=1,2,\dots,M} (\gamma_{DR_u}) < x\right)$$

$$= \Pr(\gamma_{DR_1} < x, \gamma_{DR_2} < x, \dots, \gamma_{DR_M} < x)$$

$$= \prod_{u=1}^M \Pr(\gamma_{DR_u} < x) \quad (6)$$

$$= \prod_{u=1}^M (1 - \exp(-\lambda_{DR_u} x)).$$

Trong trường hợp các độ lợi kênh γ_{DR_u} là đồng nhất ($\lambda_{DR_u} = \lambda_{DR}$ với mọi u), công thức (6) được viết lại dưới dạng sau:

$$F_{\gamma_{DR_c}}(x) = (1 - \exp(-\lambda_{DR} x))^M. \quad (7)$$

Xét pha truyền dữ liệu thứ hai, S gửi gói mã hóa của mình đến R_c . Tỷ số SNR tức thời và tốc độ dữ liệu tức thời đạt được ở R_c lần lượt là:

$$\varphi_{SR_c} = \frac{P_S \gamma_{SR_c}}{\sigma_0^2} = \Delta_S \gamma_{SR_c}, \quad (8)$$

$$C_{SR_c} = \frac{1}{3} \log_2 (1 + \Delta_S \gamma_{SR_c}), \quad (9)$$

với $\Delta_S = P_S / \sigma_0^2$.

Tương tự như trong các công trình [8]-[13], độ lợi kênh γ_{SR_c} có phân phối Shadowed-Rician, và hàm PDF của γ_{SR_c} được viết như sau:

$$f_{\gamma_{SR_c}}(x) = \frac{1}{2b_c} \left(\frac{2m_c b_c}{2m_c b_c + \Omega_c} \right)^{m_c} \exp\left(-\frac{x}{2b_c}\right) \quad (10)$$

$$\times {}_1F_1\left(m_c; 1; \frac{\Omega_c x}{2b_c(2m_c b_c + \Omega_c)}\right),$$

với Ω_c là công suất trung bình của đường nhìn thẳng (LOS: Line of Sight) giữa S và R_c , $2b_c$ là giá trị trung bình của thành phần đa đường giữa S và R_c , m_c là tham số đặc trưng cho kênh Nakagami, và ${}_1F_1(\cdot; \cdot; \cdot)$ là hàm confluent hypergeometric [28].

Lưu ý 2: Ta lưu ý rằng việc vệ tinh S hay người dùng D truyền gói mã hóa trước (ở Pha 1) hoặc sau (ở Pha 2) sẽ không thay đổi hiệu năng mạng. Kế tiếp, bởi vì công suất phát của D thường nhỏ hơn công suất phát của các trạm R và vệ tinh S nên việc thực hiện chọn lựa trạm chuyển tiếp trong công thức (2) sẽ nâng cao độ tin cậy cho sự truyền dữ

liệu từ D đến R_c . Điều này cũng sẽ làm giảm độ chênh lệch hiệu năng giữa S và D.

Tiếp đến, ta xét pha truyền dữ liệu thứ 3. Nếu R_c có thể giải mã thành công cả hai gói mã hóa p_S và p_D , nút này sẽ gửi gói p_R đến S và D trong Pha 3. Tuy nhiên, nếu R_c chỉ giải mã thành công p_S (hoặc p_D) thì R_c chỉ gửi p_S (hoặc p_D) đến D (hoặc S) trong Pha 03. Trong trường hợp R_c không giải mã được cả p_S và p_D thì nút này sẽ không chuyển tiếp bất cứ gói mã hóa nào trong Pha 3.

Ký hiệu p_* là gói được R_c gửi trong Pha 3 ($p_* \in \{p_S, p_D, p_R\}$), ta có tốc độ dữ liệu tức thời đạt được trên các liên kết $R_c \rightarrow D$ và $R_c \rightarrow S$ lần lượt là:

$$C_{R,D} = \frac{1}{3} \log_2 \left(1 + \frac{P_R \gamma_{R,D}}{\sigma_0^2} \right) = \frac{1}{3} \log_2 (1 + \Delta_R \gamma_{R,D}), \quad (11)$$

$$C_{R,S} = \frac{1}{3} \log_2 \left(1 + \frac{P_R \gamma_{R,S}}{\sigma_0^2} \right) = \frac{1}{3} \log_2 (1 + \Delta_R \gamma_{R,S}), \quad (12)$$

với $\Delta_R = P_R / \sigma_0^2$.

Lưu ý 3: Như đã được giả sử, độ lợi kênh ở Pha 3 sẽ khác các độ lợi kênh tương ứng trong Pha 1 và Pha 2, cụ thể: $\gamma_{R,D} \neq \gamma_{DR}$ và $\gamma_{R,S} \neq \gamma_{SR}$. Tuy nhiên, hàm CDF của các độ lợi kênh $\gamma_{R,S}$ và γ_{SR} là giống nhau, và được đưa ra trong công thức (10). Xét độ lợi kênh $\gamma_{R,D}$ trong Pha 3; bởi vì kỹ thuật chọn lựa trạm chuyển tiếp không áp dụng trong pha này nên hàm CDF của $\gamma_{R,D}$ sẽ tương tự như trong công thức (5), đó là:

$$F_{\gamma_{R,D}}(x) = 1 - \exp(-\lambda_{R,D} x). \quad (13)$$

III. ĐÁNH GIÁ XÁC SUẤT DỪNG

Giả sử rằng thiết bị thu Y có thể giải mã thành công gói mã hóa gửi từ nút phát X nếu tốc độ dữ liệu tức thời C_{XY} lớn hơn một ngưỡng C_{th} cho trước. Ngược lại, nếu $C_{XY} < C_{th}$, giả sử rằng Y không thể giải mã thành công gói mã hóa. Với giả sử này, xác suất mà D nhận thành công một gói mã hóa ρ_S được tính như sau:

$$\theta_D = \Pr(C_{SR_c} \geq C_{th}) \times \Pr(C_{R,D} \geq C_{th}). \quad (14)$$

Công thức (14) có nghĩa rằng D nhận thành công ρ_S khi sự truyền dữ liệu từ S đến R_c trong Pha 2, và từ R_c đến D trong Pha 3 đều thành công.

Xét xác suất $\Pr(C_{SR_c} \geq C_{th})$ trong (14); sử dụng các công thức (8) và (9), ta có:

$$\begin{aligned} \Pr(C_{SR_c} \geq C_{th}) &= \Pr\left(\gamma_{SR_c} \geq \frac{2^{3C_{th}} - 1}{\Delta_S}\right) \\ &= 1 - F_{\gamma_{SR_c}}(\chi_S), \end{aligned} \quad (15)$$

với

$$\chi_S = \frac{2^{3C_{th}} - 1}{\Delta_S}. \quad (16)$$

Sử dụng hàm PDF của γ_{SR_c} trong công thức (10), ta tìm được hàm CDF của γ_{SR_c} , rồi thay kết quả vừa đạt được vào (15), ta có:

$$\begin{aligned} \Pr(C_{SR_c} \geq C_{th}) &= 1 - \\ &\int_0^{\chi_S} \left[\frac{1}{2b_c} \left(\frac{2m_c b_c}{2m_c b_c + \Omega_c} \right)^{m_c} \exp\left(-\frac{x}{2b_c}\right) \right. \\ &\quad \left. \times {}_1F_1\left(m_c; 1; \frac{\Omega_c x}{2b_c(2m_c b_c + \Omega_c)}\right) \right] dx. \end{aligned} \quad (17)$$

Kế tiếp, xét xác suất $\Pr(C_{R,D} \geq C_{th})$ trong công thức (14); sử dụng các công thức (5) và (11), ta có:

$$\begin{aligned} \Pr(C_{R,D} \geq C_{th}) &= \Pr\left(\gamma_{R,D} \geq \frac{2^{3C_{th}} - 1}{\Delta_D}\right) \\ &= 1 - F_{\gamma_{R,D}}(\chi_R) \\ &= \exp(-\lambda_{R,D} \chi_R), \end{aligned} \quad (18)$$

với

$$\chi_R = \frac{2^{3C_{th}} - 1}{\Delta_D}. \quad (19)$$

Thay (17)-(18) vào (14), ta được công thức tính chính xác xác suất mà D nhận thành công 01 gói mã hóa ρ_S :

$$\begin{aligned} \theta_D &= \exp(-\lambda_{R,D} \chi_R) \times \\ &\left\{ 1 - \int_0^{\chi_S} \left[\frac{1}{2b_c} \left(\frac{2m_c b_c}{2m_c b_c + \Omega_c} \right)^{m_c} \exp\left(-\frac{x}{2b_c}\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times {}_1F_1\left(m_c; 1; \frac{\Omega_c x}{2b_c(2m_c b_c + \Omega_c)}\right) \right] dx \right\}. \end{aligned} \quad (20)$$

Tương tự, xác suất mà vệ tinh S nhận thành công 01 gói mã hóa ρ_D từ D được tính như sau:

$$\theta_S = \Pr(C_{DR_c} \geq C_{th}) \times \Pr(C_{R,S} \geq C_{th}). \quad (21)$$

Với xác suất $\Pr(C_{DR_c} \geq C_{th})$ trong (21), kết hợp các công thức (3)-(4) và (6), ta có:

$$\begin{aligned} \Pr(C_{DR_c} \geq C_{th}) &= \Pr\left(\gamma_{DR_c} \geq \frac{2^{3C_{th}} - 1}{\Delta_D}\right) \\ &= 1 - F_{\gamma_{DR_c}}(\chi_D) \\ &= 1 - \prod_{u=1}^M (1 - \exp(-\lambda_{DR_u} \chi_D)), \end{aligned} \quad (22)$$

với

$$\chi_D = \frac{2^{3C_{th}} - 1}{\Delta_D}. \quad (23)$$

Đối với xác suất $\Pr(C_{R,S} \geq C_{th})$ trong (21), tương tự (14)-(16), ta có:

$$\Pr(C_{R,S} \geq C_{th}) = \Pr\left(\gamma_{R,S} \geq \frac{2^{3C_{th}} - 1}{\Delta_R}\right)$$

$$= 1 - \int_0^{\xi_R} \left[\frac{1}{2b_c} \left(\frac{2m_c b_c}{2m_c b_c + \Omega_c} \right)^{m_c} \exp\left(-\frac{x}{2b_c}\right) \right. \\ \left. \times {}_1F_1\left(m_c; 1; \frac{\Omega_c x}{2b_c(2m_c b_c + \Omega_c)}\right) \right] dx. \quad (24)$$

Thay (22) và (24) vào (21), ta có biểu thức tính chính xác xác suất mà S nhận thành công 01 gói mã hóa từ D:

$$\theta_S = \left[1 - \prod_{u=1}^M (1 - \exp(-\lambda_{DR_u} \xi_D)) \right]$$

$$\times \left\{ 1 - \int_0^{\xi_R} \left[\frac{1}{2b_c} \left(\frac{2m_c b_c}{2m_c b_c + \Omega_c} \right)^{m_c} \exp\left(-\frac{x}{2b_c}\right) \right. \right. \\ \left. \left. \times {}_1F_1\left(m_c; 1; \frac{\Omega_c x}{2b_c(2m_c b_c + \Omega_c)}\right) \right] dx \right\}. \quad (25)$$

Lưu ý 4: Tích phân trong các công thức tính θ_S và θ_D sẽ được tính bằng phương pháp số, sử dụng phần mềm Matlab. Tiếp đến, để thấy rằng xác suất mà vệ tinh S và người dùng D không thể giải mã thành công một gói mã hóa của nhau sẽ lần lượt là $1 - \theta_S$ và $1 - \theta_D$.

Xét xác suất dừng (OP) tại vệ tinh S; S sẽ không thể khôi phục thông tin gốc của người dùng D nếu như S không thể nhận được thành công ít nhất H gói mã hóa từ D sau N_{max} lần trao đổi giữa chúng. Nếu ta ký hiệu r_S là số gói mã hóa nhận được tại S sau khi kết thúc sự truyền dữ liệu, thì OP tại S được tính bằng công thức sau:

$$OP_S = \sum_{r_S=0}^{H-1} C_{N_{max}}^{r_S} (\theta_S)^{r_S} (1 - \theta_S)^{N_{max} - r_S}. \quad (26)$$

Lập luận tương tự, OP tại D sẽ là:

$$OP_D = \sum_{r_D=0}^{H-1} C_{N_{max}}^{r_D} (\theta_D)^{r_D} (1 - \theta_D)^{N_{max} - r_D}. \quad (27)$$

Tiếp đến, ta xét đến xác suất dừng hệ thống SOP, được định nghĩa là xác suất mà tồn tại một trong hai thiết bị S và D không thể khôi phục được thông tin gốc mong muốn. Thật vậy, SOP của mô hình đề xuất được viết như sau:

$$SOP_{TWR-3P} = 1 - (1 - OP_S)(1 - OP_D). \quad (28)$$

Trong (28), $(1 - OP_S)(1 - OP_D)$ là xác suất mà cả S và D đều khôi phục thành công dữ liệu gốc của nhau.

Mô hình chuyển tiếp 04 pha (TWR-4P)

Để thấy được ưu điểm của mô hình đề xuất, chúng tôi sẽ so sánh hiệu năng của TWR-3P với mô hình chuyển tiếp hai chiều thông thường sử dụng 04 pha. Mô hình tham khảo này được đặt tên TWR-4P (Two-Way Relaying scheme with 04 Phases). Cụ thể, mô hình TWR-4P không sử dụng kỹ thuật DNC nên D sẽ gửi ρ_D đến S thông qua hai pha, bao gồm Pha 1: $D \rightarrow R_c$ và Pha 2: $R_c \rightarrow S$, trong đó R_c là trạm được chọn như trong công thức (2). Ở chiều ngược lại, S sẽ gửi gói mã hóa của mình đến D, cũng thông qua 02 Pha, bao gồm Pha 3: $S \rightarrow R_c$ và Pha 4: $R_c \rightarrow D$.

Bởi vì mô hình TWR-4P sử dụng 04 khe thời gian để trao đổi các gói mã hóa, tốc độ truyền tức thời giữa thiết bị phát X và thiết bị thu Y trong 01 pha được tính bằng công thức sau:

$$C_{XY} = \frac{1}{4} \log_2 \left(1 + \frac{P_X \gamma_{XY}}{\sigma_Y^2} \right) = \frac{1}{4} \log_2 (1 + \Delta_X \gamma_{XY}). \quad (29)$$

với $X, Y \in \{S, D, R_c\}$.

Tương tự như mô hình TWR-3P, xác suất mà D nhận thành công 01 gói mã hóa từ S, được tính tương tự như công thức (20):

$$\omega_D = \exp(-\lambda_{R,D} \xi_R) \times$$

$$\left\{ 1 - \int_0^{\xi_S} \left[\frac{1}{2b_c} \left(\frac{2m_c b_c}{2m_c b_c + \Omega_c} \right)^{m_c} \exp\left(-\frac{x}{2b_c}\right) \right. \right. \\ \left. \left. \times {}_1F_1\left(m_c; 1; \frac{\Omega_c x}{2b_c(2m_c b_c + \Omega_c)}\right) \right] dx \right\}, \quad (30)$$

với

$$\xi_S = \frac{2^{4C_{th}} - 1}{\Delta_S}, \quad \xi_R = \frac{2^{4C_{th}} - 1}{\Delta_R}. \quad (31)$$

Tiếp đến, xác suất mà S nhận thành công 01 gói mã hóa từ D, được tính tương tự như công thức (25):

$$\omega_S = \left[1 - \prod_{u=1}^M (1 - \exp(-\lambda_{DR_u} \xi_D)) \right]$$

$$\times \left\{ 1 - \int_0^{\xi_R} \left[\frac{1}{2b_c} \left(\frac{2m_c b_c}{2m_c b_c + \Omega_c} \right)^{m_c} \exp\left(-\frac{x}{2b_c}\right) \right. \right. \\ \left. \left. \times {}_1F_1\left(m_c; 1; \frac{\Omega_c x}{2b_c(2m_c b_c + \Omega_c)}\right) \right] dx \right\}, \quad (32)$$

với

$$\xi_D = \frac{2^{4C_{th}} - 1}{\Delta_D}. \quad (33)$$

Tương tự các công thức (26)-(28), OP tại vệ tinh S, tại người dùng D và xác suất dừng hệ thống trong mô hình TWR-4P lần lượt được đưa ra như sau:

$$OP_S = \sum_{r_S=0}^{H-1} C_{N_{max}}^{r_S} (\omega_S)^{r_S} (1 - \omega_S)^{N_{max} - r_S}, \quad (34)$$

$$OP_D = \sum_{r_D=0}^{H-1} C_{N_{max}}^{r_D} (\omega_D)^{r_D} (1 - \omega_D)^{N_{max} - r_D}, \quad (35)$$

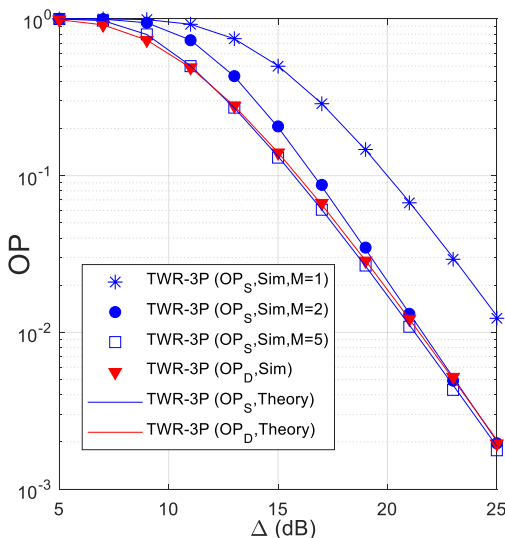
$$SOP_{TWR-4P} = 1 - (1 - OP_S)(1 - OP_D). \quad (36)$$

IV. KẾT QUẢ MÔ PHÒNG

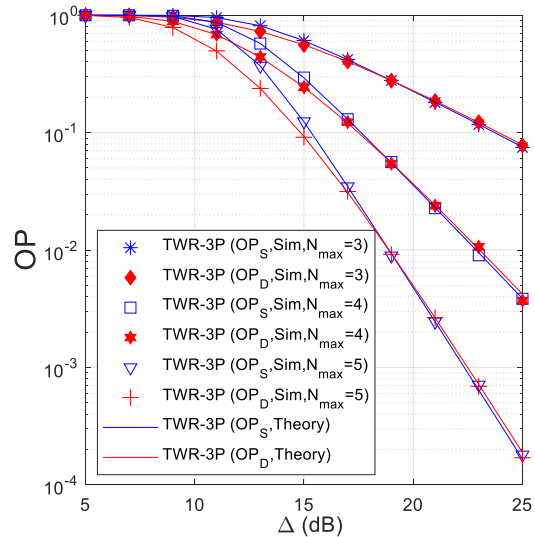
Trong mục này, chúng tôi trình bày kết quả mô phỏng và lý thuyết bằng Matlab để kiểm chứng tính chính xác của các công thức tính OP và SOP. Trong mỗi mô phỏng, chúng tôi mô phỏng kênh truyền fading Rayleigh giữa các thiết bị trên mặt đất và kênh truyền Shadowed-Rician giữa vệ tinh và trạm mặt đất. Kế tiếp, chúng tôi đưa vào các tham số hệ thống vào chương trình mô phỏng để đếm số lần dừng tại các thiết bị. Giá trị xác suất dừng mô phỏng được tính bằng số lần dừng chia cho tổng số phép thử. Để các kết quả mô phỏng (Sim) hội tụ về các kết quả lý thuyết (Theory), chúng tôi đã thực hiện 10^6 phép thử cho mỗi kết quả.

Các Hình vẽ cho thấy các kết quả mô phỏng và lý thuyết hội tụ về nhau. Đối với kênh Shadowed-Rician giữa S và các trạm R, bộ tham số của kênh truyền này được thiết lập như trong tài liệu [21]: $m_u = 5$, $b_u = 0.251$ và $\Omega_u = 0.279$, với mọi $u = 1, 2, \dots, M$. Tiếp đến, tham số kênh truyền giữa các trạm mặt đất và người dùng D được cố định bằng 1: $\lambda_{R,D} = 1$ với mọi u , phương sai của tất cả nhiễu AWGN đều bằng 1 ($\sigma_0^2 = 1$), và tỷ lệ công suất phát giữa các nút được cố định như sau: $P_R = 2P_D = 1/5P_S$ hay $\Delta_R = 2\Delta_D = 1/5\Delta_S \square \Delta$. Chúng ta cũng lưu ý rằng các biểu thức đưa ra trong bài báo có thể áp dụng cho tất cả các giá trị thực tế của các tham số hệ thống.

Hình 2 vẽ xác suất dừng (OP) tại S và D của mô hình đề xuất TWR-3P theo Δ (dB) với các giá trị khác nhau của số trạm mặt đất (M), với tốc độ ngưỡng: $C_{th} = 0.75$, số gói mã hóa cần thiết để khôi phục thông tin gốc: $H = 4$, và số lần truyền các gói mã hóa tối đa của S và D là $N_{max} = 5$. Hình 2 cho thấy giá trị OP giảm khi Δ tăng bởi vì công suất phát của tất cả các nút đều tăng. Ta cũng thấy rằng OP tại vệ tinh S giảm khi số trạm mặt đất tăng. Thật vậy, so với trường hợp $M=1$, OP_S giảm mạnh khi $M=2$ và $M=5$. Tuy nhiên, sự chênh lệch giá trị OP trong hai trường hợp $M=2$ và $M=5$ là không lớn, đặc biệt ở những miền giá trị Δ lớn. Đó là vì kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp đơn trình mặc dù nâng cao chất lượng của kênh truyền giữa D và R, tuy nhiên lại không thể nâng cao chất lượng kênh giữa R và S. Hình 2 cũng cho ta thấy rằng với $M=1$ thì OP tại D thấp hơn nhiều khi so OP tại S, và khi $M=5$ thì giá trị OP tại S và D khá tương đồng. Do đó, kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp không những làm giảm xác suất dừng tại S, mà còn có thể đạt được sự cân bằng hiệu năng cho S và D.

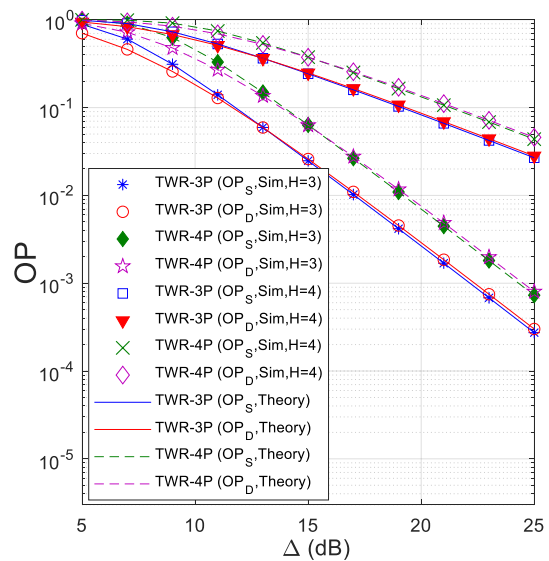


Hình 2. OP của S và D trong TWR-3P vẽ theo Δ (dB) khi $C_{th} = 0.75$, $H = 4$, $N_{max} = 5$.



Hình 3. OP của S và D trong TWR-3P vẽ theo Δ (dB) khi $C_{th} = 1$, $H = 3$, $M = 3$.

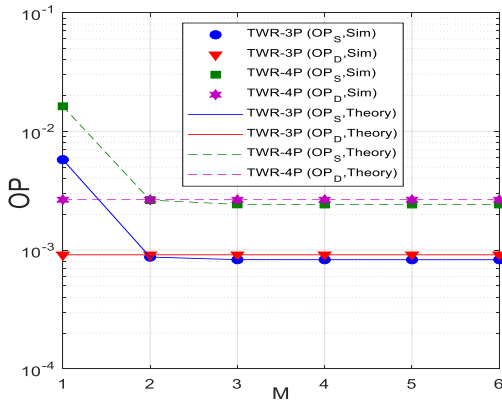
Hình 3 vẽ OP_S và OP_D của mô hình TWR-3P theo Δ (dB) với các giá trị khác nhau của N_{max} và với $C_{th} = 1$, $H = 3$ và $M = 3$. Như ta có thể quan sát từ Hình 3, độ chênh lệch giá trị xác suất dừng tại S và D là khá nhỏ khi giá trị của Δ từ 15dB đến 25dB. Hình 3 cũng cho ta thấy OP tại S và D giảm mạnh khi N_{max} tăng. Thật vậy, khi các nút phát S và D được phép truyền nhiều lần hơn thì xác suất mà D và S nhận đủ H gói mã hóa để khôi phục thông tin gốc của nhau sẽ tăng, và điều này làm giảm xác suất dừng tại các nút này. Tuy nhiên, ta cũng cần lưu ý rằng tăng số lần truyền cũng sẽ tăng thời gian trễ, và vì thế giá trị N_{max} cần được thiết kế một cách thích hợp. Ta xét một ví dụ, giả sử rằng $\Delta = 25$ (dB) và chất lượng dịch vụ yêu cầu của hệ thống là $OP_S \leq 0.01$ và $OP_D \leq 0.01$, dựa vào kết quả từ Hình 3, ta sẽ thiết kế $N_{max} = 4$ là tốt nhất.



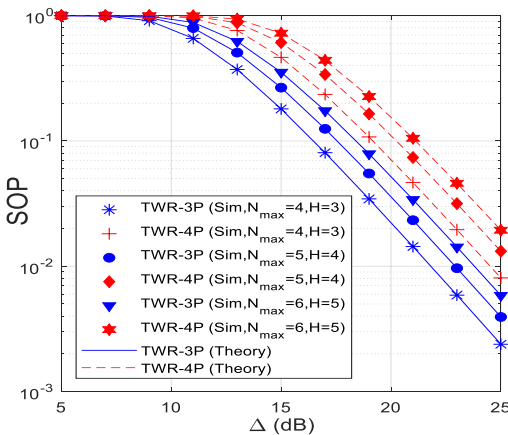
Hình 4. OP của S và D trong TWR-3P và TWR-4P vẽ theo Δ (dB) khi $C_{th} = 0.5$, $M = 3$, $N_{max} = 4$.

Hình 4 vẽ xác suất dừng tại S và D của các mô hình TWR-3P và TWR-4P theo Δ (dB) với các giá trị khác nhau của H và với $C_{th} = 0.5$, $M = 3$ và $N_{max} = 4$. Như ta có thể quan sát, giá trị OP_S và OP_D của mô hình TWR-3P thấp hơn các giá trị tương ứng trong mô hình TWR-4P. Nguyên nhân là vì mô hình đề xuất chỉ sử dụng 03 khe thời gian, do đó tốc độ dữ liệu ở mỗi khe thời gian trong mô hình đề xuất lớn hơn trong mô hình TWR-4P. Hình 4 cũng cho ta thấy khi N_{max} cố định thì giảm giá trị của H sẽ nâng cao hiệu năng của các mô hình. Thật vậy, trong Hình 4, OP_S và OP_D của TWR-3P và TWR-4P giảm mạnh khi giảm H từ 4 xuống 3.

Hình 5 so sánh OP_S và OP_D của các mô hình TWR-3P và TWR-4P với các giá trị khác nhau của M , và với $C_{th} = 0.6$, $H = 4$ và $N_{max} = 5$. Tương tự như Hình 4, xác suất dừng tại S và D trong mô hình đề xuất thấp hơn các giá trị tương ứng trong mô hình TWR-4P. Hình 5 cho ta thấy rõ ràng khi kỹ thuật chọn lựa đơn trình không được sử dụng ($M=1$), thì OP_S trong cả hai mô hình đều lớn hơn rất nhiều OP_D . Khi $M=2$, ta thấy OP_S và OP_D trong hai mô hình gần như tương đồng với nhau, và khi $M \geq 3$, OP_S sẽ thấp hơn một chút khi so với OP_D .



Hình 5. OP của S và D trong TWR-3P và TWR-4P vẽ theo M khi $C_{th} = 0.6$, $H = 4$, $N_{max} = 5$, $\Delta = 25$ (dB).



Hình 6. SOP của TWR-3P và TWR-4P vẽ theo $\Delta = 25$ (dB) khi $C_{th} = 0.75$, $M = 3$.

Hình 6 so sánh xác suất dừng hệ thống (SOP) của hai mô hình TWR-3P và TWR-4P với $C_{th} = 0.75$, $M = 3$ và các giá trị khác nhau của N_{max} và H . Bởi vì mô hình đề xuất TWR-3P đạt giá trị OP tại D và S thấp hơn mô hình TWR-4P nên SOP của TWR-3P cũng thấp hơn SOP của TWR-4P. Trong Hình 6, các cặp giá trị (N_{max}, H) thay đổi và cũng ảnh hưởng đáng kể lên SOP của các mô hình. Như ta có thể thấy, cả hai mô hình TWR-3P và TWR-4P đều đạt giá trị SOP thấp nhất khi $(N_{max}, H) = (4, 3)$.

V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã đánh giá hiệu năng OP và SOP cho mạng HSTRN hai chiều sử dụng mã Fountain. Bài báo cũng đã đề xuất phương án chọn lựa trạm chuyển tiếp mặt đất để nâng cao hiệu năng mạng, cũng như nâng cao sự cân bằng hiệu năng tại vệ tinh và người dùng mặt đất. Các kết quả mô phỏng đã kiểm chứng các kết quả phân tích lý thuyết để chứng minh mô hình đề xuất đạt được hiệu năng tốt hơn mô hình chuyên tiếp hai chiều thông thường sử dụng 04 pha truyền. Bài báo đưa ra mô hình đề xuất nên để nâng cao hiệu năng ta có thể tăng số lần truyền các gói mã hóa và tăng số trạm chuyển tiếp mặt đất. Trong tương lai, chúng tôi sẽ tiếp tục phát triển mô hình trong bài báo với kỹ thuật chọn lựa nút chuyển tiếp toàn trình để nâng cao hiệu năng cho mô hình.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Thành Phố Hồ Chí Minh với mã số đề tài 05-HV-2022-RD_VT2.

REFERENCES

- [1] P. Wood, "Mobile Satellite Services for Travellers," IEEE Communications Magazine, vol. 29, no. 11, pp. 32-35, Nov. 1991.
- [2] B. Evans, M. Werner, E. Lutz, M. Bousquet, G.E. Corazza, G. Maral and R. Rumeau, "Integration of Satellite and Terrestrial Systems in Future Multimedia Communications," IEEE Wireless Communications, vol. 12, no. 5, pp. 72-80, Oct. 2005.
- [3] S. Chen, S. Sun and S. Kang, "System Integration Of Terrestrial Mobile Communication and Satellite Communication —the Trends, Challenges and Key Technologies in B5G and 6G," China Communications, vol. 17, no. 12, pp. 156-171, Dec. 2020.
- [4] K. Guo, D. Guo, Y. Huang, X. Wang and B. Zhang, "Performance Analysis of a Dual-Hop Satellite Relay Network with Hardware Impairments," in Proc. of 25th Wireless and Optical Communication Conference (WOCC), Chengdu, China, pp. 1 - 5, May 2016.
- [5] Q. Huang, M. Lin, K. An, J. Ouyang and W. Zhu, "Secrecy Performance of Hybrid Satellite-Terrestrial Relay Networks in the Presence of Multiple Eavesdroppers," IET Communications, vol. 12, no. 1, pp. 26-34, Jan. 2018.
- [6] W. Cao, Y. Zou, Z. Yang and J. Zhu, "Relay Selection for Improving Physical-Layer Security in Hybrid Satellite-Terrestrial Relay Networks," IEEE Access, vol. 6, pp. 65275-65285, Oct. 2018.

- [7] V. Bankey and P. K. Upadhyay, "Physical Layer Security of Multiuser Multirelay Hybrid Satellite-Terrestrial Relay Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 3, pp. 2488-2501, Mar. 2019.
- [8] Z. Li, F. Xiao, S. Wang, T. Pei and J. Li, "Achievable Rate Maximization for Cognitive Hybrid Satellite-Terrestrial Networks With AF-Relays," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 2, pp. 304-313, Feb. 2018.
- [9] K. Guo, K. An, B. Zhang, Y. Huang and G. Zheng, "Outage Analysis of Cognitive Hybrid Satellite-Terrestrial Networks With Hardware Impairments and Multi-Primary Users," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 5, pp. 816-819, Oct. 2018.
- [10] K. An, J. Ouyang, M. Lin and T. Liang, "Outage Analysis of Multi-Antenna Cognitive Hybrid Satellite-Terrestrial Relay Networks With Beamforming," *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 7, pp. 1157-1160, July 2015.
- [11] V. Singh, S. Solanki and P. K. Upadhyay, "Cognitive Relaying Cooperation in Satellite-Terrestrial Systems With Multiuser Diversity," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 65539-65547, Oct. 2018.
- [12] H. -N. Nguyen, et al., "Reliable and Secure Transmission in Multiple Antennas Hybrid Satellite-Terrestrial Cognitive Networks Relying on NOMA," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 215044-215056, Dec. 2020.
- [13] V. Singh and P. K. Upadhyay, "Exploiting FD/HD Cooperative-NOMA in Underlay Cognitive Hybrid Satellite-Terrestrial Networks," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 8, no. 1, pp. 246-262, Mar. 2022.
- [14] P. Popovski and H. Yomo, "Physical Network Coding in Two-Way Wireless Relay Channels," in *Proc. of 2007 IEEE International Conference on Communications*, 2007, pp. 707-712.
- [15] T. T. Duy and H.Y. Kong, "Exact Outage Probability of Cognitive Two-Way Relaying Scheme with Opportunistic Relay Selection under Interference Constraint," *IET Communications*, vol. 6, no. 16, pp. 2750-2759, Nov. 2012.
- [16] Y. Li, R. H. Y. Louie and B. Vucetic, "Relay Selection With Network Coding in Two-Way Relay Channels," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 9, pp. 4489-4499, Nov. 2010.
- [17] P. N. Son and H. Y. Kong, "Exact outage probability of two-way decode-and-forward scheme with opportunistic relay selection under physical layer security," *Wireless Personal Communications*, vol. 77, no. 04, pp. 2889-2917, Aug. 2014.
- [18] L. Song, G. Hong, B. Jiao, M. Debbah, "Joint Relay Selection and Analog Network Coding Using Differential Modulation in Two-Way Relay Channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2932 – 2939, Jul. 2010.
- [19] L.T. Tu, and H. M. Tiep, "Cooperative spectrum-sharing with two-way AF relaying in the presence of direct communications," *EAI Endorsed Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 5, no. 14, pp. 1-9, Jun. 2018.
- [20] K. Guo, B. Zhang, Y. Huang and D. Guo, "Performance Analysis of Two-Way Satellite Terrestrial Relay Networks With Hardware Impairments," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 6, no. 4, pp. 430-433, Aug. 2017.
- [21] K Guo, K An, B Zhang, D Guo, "Performance analysis of two-way satellite multi-terrestrial relay networks with hardware impairments," *Sensors MDPI*, vol. 18, no. 5, (1574), May 2018.
- [22] W. Zeng, J. Zhang, D. W. K. Ng, B. Ai and Z. Zhong, "Two-Way Hybrid Terrestrial-Satellite Relaying Systems: Performance Analysis and Relay Selection," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 68, no. 7, pp. 7011-7023, Jul. 2019.
- [23] Z. Li, M. Yang, G. Wang, "Performance Analysis of Two-Way Satellite-Terrestrial Relay Network with SWIPT," *Sensors*, vol. 21, no. 13, (4303), Jun. 2021.
- [24] D. Yang, B. Ren, H. Li, X. Wang, K. Guo, "Secrecy performance of two-way integrated satellite terrestrial relay networks with multiple users," *Electronics Letters*, vol. 58, no. 16, pp. 636-638, 2022.
- [25] T. T. Duy, L. C. Khan, N. T. Binh, N. L. Nhat "Intercept Probability Analysis of Cooperative Cognitive Networks Using Fountain Codes and Cooperative Jamming," *EAI Transactions on Industrial Networks and Intelligent Systems*, vol. 8, no. 26, pp. 1-9, Apr. 2021.
- [26] H. D. Hung, T. T. Duy, P. N. Son, L. T. Thuong and M. Voznak, "Security-Reliability Trade-off Analysis for Rateless Codes-Based Relaying Protocols Using NOMA, Cooperative Jamming and Partial Relay Selection," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 131087-131108, Sept. 2021.
- [27] T. L. Thanh, N. N. Tan, T. T. Duy, T. T. Phuong, M. Voznak, A. I. Aravanis, "Broadcasting in Cognitive Radio Networks: A Fountain Codes Approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 10, pp. 11289-11294, Oct. 2022.
- [28] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, "Table of Intergals," Series, and Products. 7th ed. Academic Press, 2007.

PERFORMANCE EVALUATION OF TWO-WAY HYBRID SATELLITE-TERRESTRIAL RELAYING NETWORKS USING FOUNTAIN CODES AND RELAY SELECTION

Abstract: This paper proposes a two-way hybrid satellite-terrestrial relay network, where a ground user and a satellite exchange their data with each other via help of terrestrial stations. Using Fountain codes, the user and the satellite send Fountain packets to each other. In addition, to recover the original data, they have to collect sufficient number of Fountain packets. This paper applies digital network coding scheme, where the terrestrial stations will XOR the encoded packets received from the user and the satellite at the first two phases. Then, at the third phase, the terrestrial stations will broadcast the XOR-ed packet to the user and the satellite. To enhance reliability of the data transmission, we consider a station selection method. We derive exact expressions of outage probability at the user and the satellite as well as system outage probability, and then perform Monte-Carlo simulations to verify the derived expressions. The obtained results showed that the proposed scheme outperforms the corresponding two-way hybrid satellite-terrestrial relay one using 04 phases.

Keywords: Hybrid satellite-terrestrial relay networks, two-way relaying, relay selection, outage probability.



Nguyễn Văn Toàn nhận bằng kỹ sư Viễn thông tại Đại học Thông tin Liên lạc, Nha Trang, Khánh Hoà vào năm 2007, nhận bằng Thạc Sỹ Kỹ thuật Viễn thông tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông cơ sở tại TP. Hồ Chí Minh vào năm 2013. Th.S. Nguyễn Văn Toàn hiện đang công tác tại Đại học Thông Tin Liên Lạc và là NCS tại Khoa Điện – Điện Tử, Trường Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TP. Hồ Chí Minh (HCMUTE). Hướng nghiên cứu đang quan tâm bao

gồm: thông tin vô tuyến, thông tin vệ tinh, Mã Fountain.

Email: toannv.ncs@hcmute.edu.vn



Đặng Thế Hùng nhận bằng kỹ sư Viễn thông tại Trường Đại học Thông tin Liên lạc (TCU), Nha Trang, Khánh Hoà vào năm 2006, nhận bằng Thạc Sĩ Kỹ Thuật Viễn Thông tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông cơ sở tại TP. Hồ Chí Minh vào năm 2013 và nhận bằng Tiến sĩ Kỹ thuật điện tử vào năm 2021 tại Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội. TS. Đặng Thế Hùng hiện đang công tác tại Khoa Vô tuyến điện, Trường Đại học Thông tin Liên lạc (TCU). Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: truyền thông cộng tác, vô tuyến nhận thức, bảo mật lớp vật lý, Mã Fountain.

Email: danghung8384@gmail.com

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. PGS. 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: duytt@ptit.edu.vn hoặc trantrungduy@ptithcm.edu.vn



Lê Chu Khấn nhận bằng cử nhân tại Trường Đại Học Sư Phạm Kỹ Thuật TP. Hồ Chí Minh vào năm 1996, và bằng thạc sĩ vào năm 2004 tại Đại Học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh. ThS. Lê Chu Khấn 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 vệ tinh, vô tuyến nhận thức, phân tích hiệu năng mạng vô tuyến, bảo mật trong mạng thông tin vô tuyến.

Email: lckhan@ptithcm.edu.vn



Phạm Ngọc Sơn tốt nghiệp Tiến sĩ chuyên ngành Điện tử - Viễn thông tại Đại học Ulsan, Hàn Quốc vào năm 2015. Hiện nay, TS. Sơn là giảng viên của Bộ Môn Kỹ Thuật Máy Tính Viễn Thông, Khoa Điện – Điện Tử, Trường Trường Đại học Sư Phạm Kỹ Thuật TP. Hồ Chí Minh (HCMUTE). Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: vô tuyến nhận thức, truyền thông hợp tác, bảo mật lớp vật lý, thu hoạch năng lượng vô tuyến, đa truy cập không trực giao, mật phân xạ thông minh và truyền thông gói tin ngắn.

Email: sonpndtvt@hcmute.edu.vn

