

# ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CÁC MÔ HÌNH CHUYỂN TIẾP ĐA CHẶNG THU THẬP NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN SỬ DỤNG MÃ FOUNTAIN TRÊN KÊNH FADING WEIBULL

Ngô Hoàng Ân<sup>#</sup>, Nguyễn Quang Sang<sup>\*</sup>, Từ Lâm Thanh<sup>@</sup>, Trần Trung Duy<sup>§</sup>, Tân Hạnh<sup>§</sup>

<sup>\*</sup> Trường Đại học Công nghiệp TP. Hồ Chí Minh

<sup>#</sup> Trường Đại học Công thương TP. Hồ Chí Minh

<sup>\*</sup>Nhóm nghiên cứu khoa học và công nghệ ứng dụng cho sự phát triển bền vững, Trường Đại học Giao thông vận tải Thành phố Hồ Chí Minh

<sup>@</sup>Nhóm nghiên cứu xử lý tín hiệu và truyền thông, Khoa Điện – Điện tử, Trường Đại Học Tôn Đức Thắng

<sup>§</sup>Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông, cơ sở tại TP. Hồ Chí Minh

**Tóm tắt**— Công trình này so sánh hiệu năng của hai mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng nguồn năng lượng vô tuyến và sử dụng mã Fountain. Trong mô hình đầu tiên, nút nguồn liên tục gửi các gói mã hóa đến nút đích, thông qua các nút chuyển tiếp nằm trên tuyến giữa nguồn và đích. Khác với mô hình đầu tiên, trong mô hình thứ hai, dữ liệu nguồn sẽ được chuyển tiếp theo từng chặng từ nguồn đến đích, sử dụng mã Fountain. Hơn nữa, tất cả các nút phát trong hai mô hình này đều phải thu thập năng lượng vô tuyến từ một trạm được lắp đặt trong mạng. Công trình này đánh giá chính xác suất dừng toàn trình và tổng số lần truyền trung bình trên một lần truyền thành công của hai mô hình đề xuất trên kênh fading Weibull và kiểm chứng các công thức bằng mô phỏng Monte Carlo. Các kết quả cho thấy rằng mô hình thứ hai đạt được hiệu năng tốt hơn mô hình thứ nhất.

**Từ khóa**—Mã Fountain, thu thập năng lượng sóng vô tuyến, chuyển tiếp đa chặng, xác suất dừng, kênh fading Weibull.

## I. GIỚI THIỆU

Chuyển tiếp [1]-[3] là một phương pháp phổ biến, với mục đích nâng cao hiệu năng cho các mạng thông tin vô tuyến, như mở rộng vùng phủ, tăng độ tin cậy truyền tin, tăng hiệu quả năng lượng thông qua việc sử dụng công suất phát thấp. Nguyên lý cơ bản của chuyển tiếp đó là sử dụng các nút trung gian để vận chuyển dữ liệu từ nguồn đến đích. Các nút trung gian cũng được gọi là các nút chuyển tiếp (relay nodes), và chúng thường sử dụng các kỹ thuật chuyển tiếp cơ bản như giải mã chuyển tiếp DF (Decode and Forward) [4] hay khuếch đại chuyển tiếp AF (Amplify and Forward) [5]. Kỹ thuật DF giúp loại bỏ nhiễu tại mỗi

chặng nên đạt được hiệu năng tốt hơn kỹ thuật AF. Tuy nhiên, kỹ thuật AF đơn giản hơn vì các nút chuyển tiếp chỉ cần khuếch đại tín hiệu nhận được và gửi đến nút kế tiếp. Các công trình [6]-[8] đánh giá xác suất dừng toàn trình (E2E-OP: End-to-end Outage Probability) cho mạng chuyển tiếp đa chặng (MRN: Multi-hop Relaying Network), ở đây dữ liệu nguồn được gửi qua từng chặng để đến đích. Hơn nữa, các công trình [6]-[7] còn đề xuất kỹ thuật chọn tuyến tốt nhất cho mạng vô tuyến nhận thức (Cognitive Radio) để nâng cao hiệu năng E2E-OP. Các tác giả trong [3] và [9] đánh giá hiệu năng bảo mật của MRN, với sự xuất hiện của nút nghe lén. Trong [10]-[11], chuyển tiếp đa chặng được áp dụng để vận chuyển các gói tin ngắn (short packets) từ nguồn đến đích.

Gần đây, thu thập năng lượng vô tuyến (WEH: Wirelessly Energy Harvesting) thu hút sự quan tâm của các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước [12]-[14]. Trong WEH, các thiết bị vô tuyến được trang bị bộ chuyển đổi để biến đổi sóng vô tuyến thu được thành dòng điện một chiều, nhằm cung cấp năng lượng và kéo dài thời gian hoạt động. So với các kỹ thuật thu thập năng lượng khác như năng lượng mặt trời, năng lượng gió, v.v. thì WEH khá ổn định và ít bị ảnh hưởng bởi các yếu tố môi trường. Thông thường, để cung cấp năng lượng ổn định cho các thiết bị, các trạm phát sóng vô tuyến (PB: Power Beacon) sẽ được lắp đặt tại từng khu vực cụ thể trong mạng [15]-[18]. Các công bố [17]-[18] đề xuất những mô hình chuyển tiếp đa chặng cho mạng thứ cấp (secondary network) hoạt động trong môi trường vô tuyến nhận thức, ở đây, các nút phát thứ cấp, gồm nguồn và các nút chuyển tiếp, phải hiệu chỉnh công suất phát để giao thoa gây lên mạng sơ cấp không vượt quá một ngưỡng quy định trước. Hơn nữa, các nút phát này phải thu thập năng lượng từ một trạm PB và sử dụng năng lượng này để chuyển tiếp dữ liệu. Các tác giả trong [10]-[11] nghiên cứu những mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng WEH và kỹ thuật thu/phân tập tại mỗi chặng để nâng cao độ tin cậy truyền tin toàn trình. Tài liệu [19] đề xuất các phương pháp chọn tuyến giữa nguồn và

Tác giả liên hệ: Ngô Hoàng Ân,

Email: annh@hufi.edu.vn

Đến tòa soạn: 12/2022, chỉnh sửa: 03/2023, chấp nhận đăng: 04/2023.

đích để làm giảm E2E-OP trong điều kiện công suất phát của các nút mạng bị hạn chế do sự xuất hiện của các nút nghe lén, và sự ảnh hưởng của khiếm khuyết phần cứng (Hardware Impairments). Các tác giả của công trình [20] áp dụng truyền thông cộng tác (Cooperative Communication [21]-[22]) tại mỗi chặng để nâng cao độ lợi phân tập và hiệu năng E2E-OP cho MRNs sử dụng WEH.

Mã Fountain hay mã Rateless (FC: Fountain code) gần đây được nghiên cứu rộng rãi bởi khả năng áp dụng dễ dàng vào các hệ thống mạng vô tuyến [23]-[26]. Ưu điểm của FC là bộ mã hóa và giải mã đơn giản, thích ứng với điều kiện môi trường, không yêu cầu thiết bị phát phải biết trước thông tin trạng thái kênh truyền, và đặc biệt, không yêu cầu sự hồi tiếp từ thiết bị thu về thiết bị phát khi sự truyền của một gói bất kỳ bị lỗi. Thật vậy, thiết bị phát sử dụng FC sẽ liên tục gửi các gói mã hóa đến thiết bị thu, cho đến khi thiết bị thu nhận đủ số gói để khôi phục thông tin gốc [23]-[27]. Công trình [28] nghiên cứu hiệu năng bảo mật của mạng vô tuyến nhận thức dạng nền cộng tác sử dụng FC. Công trình [29] đưa ra mô hình quảng bá đa người dùng sử dụng FC với sự xuất hiện của nhiều nút nghe lén. Hơn nữa, trong [29], kỹ thuật tạo nhiễu cộng tác (Cooperative Jamming) được áp dụng để hạn chế khả năng giải mã của các nút nghe lén. Các tác giả trong [30] đánh giá sự đánh đổi giữa hiệu năng dừng OP và hiệu năng mất bảo mật thông tin IP (Intercept Probability) cho mạng chuyển tiếp đa chặng sử dụng FC và WEH. Hơn nữa, nút nguồn trong [30] sẽ gửi từng gói mã hóa đến nút đích, với sự giúp đỡ của các nút chuyển tiếp trung gian. Nhằm nâng cao độ tin cậy khi truyền các gói mã hóa tại từng chặng, nhóm nghiên cứu trong tài liệu [31] áp dụng truyền thông cộng tác tăng cường (Incremental Cooperative Communication [32]), sử dụng các nút bên ngoài tuyến giữa nguồn và đích.

Bài báo này nghiên cứu và đánh giá hiệu năng của hai mô hình MRNs sử dụng FC và WEH. Trong mô hình đầu tiên, ký hiệu HPR (Hop-by-hop Fountain Packet Relaying), nút nguồn liên tục gửi các gói mã hóa đến nút đích, thông qua sự giúp sức của các nút chuyển tiếp trung gian. Trong mô hình thứ hai, ký hiệu HDR (Hop-by-hop Data Relaying), dữ liệu nguồn sẽ được chuyển tiếp theo từng chặng từ nguồn đến đích. Điểm khác nhau cơ bản giữa hai mô hình này là: HPR sử dụng chuyển tiếp đa chặng để gửi từng gói mã hóa đến đích, trong khi HDR sẽ chuyển tiếp toàn bộ dữ liệu nguồn theo từng chặng. Tất cả các nút phát bao gồm nguồn và các nút chuyển tiếp trong HPR và HDR đều phải thu thập năng lượng từ một trạm PB đặt trong mạng. Hơn nữa, kỹ thuật DF đều được sử dụng trong cả hai mô hình đề xuất.

Tiếp đến, chúng tôi phân tích điểm mới và điểm khác biệt giữa công trình này và các công bố trước đây:

- Khác với các công trình [10]-[11], [17]-[20], bài báo này nghiên cứu và đánh giá hiệu năng mạng WEH MRN sử dụng mã FC.
- Các mô hình được đề xuất trong [30]-[31] và [33] tương tự như mô hình HPR trong bài báo này. Tuy nhiên, điểm mới của mô hình HPR đó là: khi nút đích nhận đủ số gói mã hóa để khôi phục dữ liệu nguồn, nút đích sẽ gửi thông báo về nút nguồn để nguồn dừng việc truyền. Vì thế, mô hình HPR sẽ giảm số lần truyền các gói mã hóa, giảm thời gian

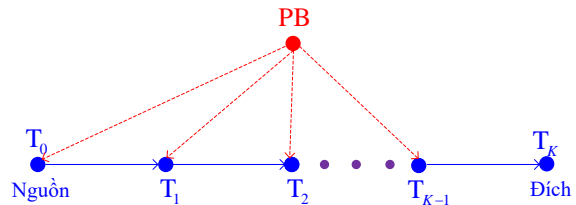
trễ và đạt được hiệu quả năng lượng cao hơn các mô hình được đưa ra trong [30]-[31] và [33].

- Kế tiếp, bài báo này đề xuất mô hình HDR và mô hình này đạt được hiệu năng cao hơn mô hình thứ nhất. Hơn nữa, sự truyền dữ liệu tại mỗi chặng cũng sẽ kết thúc ngay khi nút thu nhận đủ số gói mã hóa để khôi phục dữ liệu.
- Cuối cùng, khác với tất cả các công trình liên quan kể trên, công trình này đánh giá hiệu năng của hai mô hình HDR và HPR trên kênh truyền tổng quát fading Weibull [34].

Một trong những đóng góp chính của bài báo này đó là: chúng tôi đưa ra các biểu thức tính chính xác suất dừng toàn trình (E2E-OP) và tổng số lần truyền trung bình trên mỗi lần truyền thành công của các mô hình HDR và HPR trên kênh Weibull fading. Chúng tôi cũng thực hiện mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng các biểu thức toán học. Các kết quả chọn lọc sẽ được trình bày để mô tả xu hướng hiệu năng, và sự tác động của các tham số hệ thống như số chặng, các tham số kênh truyền, số lần truyền tối đa và hệ số phân bố thời gian tại mỗi chặng lên các hiệu năng mô hình.

Phần còn lại của bài báo được tóm tắt như sau: Phần II mô tả nguyên lý hoạt động của HDR và HPR. Phần III trình bày các công thức toán học đánh giá hiệu năng của các mô hình. Phần IV thực hiện mô phỏng Monte Carlo kiểm chứng lý thuyết. Phần V đưa ra các kết luận và kiến nghị thiết kế.

## II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



Hình 1. Mô hình đề xuất.

Hình 1 mô tả mô hình hệ thống của các mô hình đề xuất HPR và HDR, ở đây, nguồn ( $T_0$ ) gửi dữ liệu đến đích ( $T_K$ ), sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp với  $K$  chặng và với sự giúp sức của  $(K-1)$  nút chuyển tiếp DF ( $T_k$ ), với  $k=1,2,\dots,K-1$  và  $K>1$ . Tất cả nút phát như nguồn ( $T_0$ ) và các nút chuyển tiếp ( $T_k$ ) sẽ thu thập năng lượng từ trạm PB và sử dụng năng lượng này để truyền dữ liệu. Hơn nữa, PB sử dụng tần số được cấp riêng để tránh nhiễu đồng kênh giữa hoạt động truyền dữ liệu và hoạt động truyền năng lượng trong mạng. Giả sử rằng các nút mạng đều chỉ có 01 ăngten và hoạt động ở chế độ bán song công.

Sử dụng FC để gửi dữ liệu, nguồn ( $T_0$ ) chia dữ liệu của mình thành các gói nhỏ có chiều dài bằng nhau. Từ các gói này,  $T_0$  chọn ngẫu nhiên 01 hoặc nhiều gói để tạo thành 01 gói mã hóa. Thật vậy, thao tác mã hóa rất đơn giản khi mà  $T_0$  chỉ cần XOR các gói được chọn lại, thêm vào các thành phần mào đầu và các bit kiểm tra lỗi [28]-[31]. Tiếp đến, các gói mã hóa sẽ liên tục được gửi đi cho đến khi nút

thu (các nút chuyển tiếp hoặc nút đích) nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói để khôi phục dữ liệu gốc của nguồn [28]-[31]. Do giới hạn về thời gian trễ, ta giả sử rằng số lần truyền tối đa của nguồn và các nút chuyển tiếp là  $N_{\text{max}}$ .

Trong mô hình HPR, từng gói mã hóa sẽ được gửi đến đích. Nếu đích  $T_k$  nhận thành công  $N_{\text{req}}$  gói, nút này sẽ gửi thông báo ACK về nút nguồn để nút nguồn dừng việc truyền các gói mã hóa. Ngược lại, nếu nguồn  $T_0$  đã gửi xong  $N_{\text{max}}$  gói mã hóa mà đích  $T_k$  không thể nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói thì ta xem như sự truyền dữ liệu giữa nguồn và đích bị dừng. Như đã được đề cập, ta thấy rằng các mô hình đề xuất trong [30]-[31] và [33] đều cho nút nguồn sử dụng hết  $N_{\text{max}}$  lần truyền. Tuy nhiên, nếu  $T_k$  có thể nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói trước khi  $T_0$  sử dụng hết số lần truyền thì sự truyền dữ liệu của nút nguồn sau đó sẽ trở nên dư thừa. Ví dụ, mô hình HPR khắc phục được nhược điểm này, nên đạt được hiệu quả năng lượng cao hơn các mô hình trước đây.

Trong mô hình HDR,  $T_0$  sẽ liên tục gửi các gói mã hóa đến  $T_1$  cho đến khi  $T_1$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói để khôi phục dữ liệu. Tiếp đến,  $T_1$  sẽ mã hóa lại dữ liệu nguồn và sử dụng mã Fountain để gửi dữ liệu đến  $T_2$ . Quá trình truyền này sẽ được lặp lại ở các chặng. Ta lưu ý rằng nút nguồn và các nút chuyển tiếp đều chỉ được gửi tối đa  $N_{\text{max}}$  lần. Hơn nữa, sau khi nút phát  $T_{k-1}$  ở chặng thứ  $k$  sử dụng hết  $N_{\text{max}}$  lần truyền mà nút thu  $T_k$  không nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói thì dữ liệu nguồn bị rớt (drop) ở chặng này. Ta cũng lưu ý rằng trong trường hợp  $T_k$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói trước khi  $T_{k-1}$  sử dụng hết lượt truyền,  $T_k$  sẽ gửi thông báo để  $T_{k-1}$  ngưng truyền dữ liệu.

Nếu  $L$  là tổng thời gian trễ cho mỗi lần truyền 01 gói mã hóa từ nguồn đến đích thì thời gian dành cho mỗi chặng là  $\tau = L/K$ . Xét sự truyền 01 gói mã hóa bất kỳ ở chặng thứ  $k$  giữa nút  $T_{k-1}$  và nút  $T_k$ ; ở đây thời gian để  $T_{k-1}$  thu thập năng lượng là  $\alpha\tau$  và thời gian để  $T_{k-1}$  gửi gói mã hóa đến  $T_k$  là  $(1-\alpha)\tau$ , với  $\alpha (0 \leq \alpha \leq 1)$  là hệ số phân chia thời gian và là tham số hệ thống được thiết kế trước.

Ký hiệu  $\psi_{AB}$  là độ lợi kênh fading Weibull giữa nút phát A và nút thu B, với  $A \rightarrow B \in \{PB \rightarrow T_{k-1}, T_{k-1} \rightarrow T_k\}$ . Như được đưa ra trong [34],  $\psi_{AB}$  là biến ngẫu nhiên liên tục có hàm phân phối tích lũy (CDF: Cumulative Distribution Function) được viết ra như sau:

$$F_{\psi_{AB}}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^{\beta_{AB}}}{\delta_{AB}}\right), \quad (1)$$

với  $\beta_{AB}$  và  $\delta_{AB}$  là các tham số kênh fading Weibull giữa A và B.

Từ công thức (1), ta có hàm mật độ xác suất (PDF: Probability Density Function) của  $\psi_{AB}$  là

$$f_{\psi_{AB}}(x) = \frac{\beta_{AB}}{\delta_{AB}} x^{\beta_{AB}-1} \exp\left(-\frac{x^{\beta_{AB}}}{\delta_{AB}}\right). \quad (2)$$

Kênh fading Weibull là kênh truyền tổng quát vì tùy thuộc vào các giá trị khác nhau của  $\beta_{AB}$ , ta có được những kênh fading khác nhau. Ví dụ, khi  $\beta_{AB} = 1$ , ta có kênh fading Rayleigh, và hàm CDF và PDF của  $\psi_{AB}$  lần lượt là:

$$F_{\psi_{AB}}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\delta_{AB}}\right), \quad (3)$$

$$f_{\psi_{AB}}(x) = \frac{1}{\delta_{AB}} \exp\left(-\frac{x}{\delta_{AB}}\right).$$

Trở lại với sự truyền gói mã hóa ở chặng thứ  $k$ ; năng lượng mà  $T_{k-1}$  thu thập được trong khoảng thời gian  $\alpha\tau$  được tính như trong [30]-[31]:

$$\begin{aligned} \text{EH}_{k-1} &= \eta\alpha\tau P_{\text{PB}} d_{\text{PBT}_{k-1}}^{-\chi} \psi_{\text{PBT}_{k-1}} \\ &= \eta\alpha\tau \Omega_{\text{PBT}_{k-1}} P_{\text{PB}} \psi_{\text{PBT}_{k-1}}, \end{aligned} \quad (4)$$

với  $\eta (0 < \eta < 1)$  là hiệu suất chuyển đổi tín hiệu sóng vô tuyến thành dòng điện,  $P_{\text{PB}}$  là công suất phát của PB,  $d_{AB}$  là khoảng cách giữa nút phát A và nút thu B,  $\chi$  là hệ số suy hao đường truyền, và tham số kênh truyền giữa A và B ( $\Omega_{AB}$ ) được mô hình hóa như trong [33]:  $\Omega_{AB} = d_{AB}^{-\chi}, \forall A, B$ .

Bởi vì thời gian truyền dữ liệu là  $(1-\alpha)\tau$  nên công suất phát trung bình của  $T_{k-1}$  là (xem [30]-[31])

$$P_{k-1} = \frac{\text{EH}_{k-1}}{(1-\alpha)\tau} = \mu \Omega_{\text{PBT}_{k-1}} P_{\text{PB}} \psi_{\text{PBT}_{k-1}}, \quad (5)$$

với

$$\mu = \frac{\eta\alpha}{1-\alpha}. \quad (6)$$

Từ công thức (5), tốc độ dữ liệu tức thời trên kênh  $T_{k-1} \rightarrow T_k$  được viết như trong [30]-[31]:

$$\begin{aligned} C_k &= (1-\alpha)\tau \log_2 \left( 1 + \frac{P_{k-1} d_{T_{k-1}T_k}^{-\chi} \psi_{T_{k-1}T_k}}{\sigma_0^2} \right) \\ &= (1-\alpha)\tau \log_2 \left( 1 + \frac{\mu \Omega_{\text{PBT}_{k-1}} \Omega_{T_{k-1}T_k} P_{\text{PB}} \psi_{\text{PBT}_{k-1}} \psi_{T_{k-1}T_k}}{\sigma_0^2} \right) \\ &= (1-\alpha)\tau \log_2 \left( 1 + \mathcal{G}_k \psi_{\text{PBT}_{k-1}} \psi_{T_{k-1}T_k} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

với  $\sigma_0^2$  là phương sai của nhiễu Gauss tại tất cả các nút thu B,  $\mathcal{G}_k = \mu \Omega_{\text{PBT}_{k-1}} \Omega_{T_{k-1}T_k} Q$ , và  $Q = P_{\text{PB}} / \sigma_0^2$ .

Giả sử rằng  $T_k$  sẽ giải mã thành công gói mã hóa nhận được nếu dung lượng kênh tức thời  $C_k$  lớn hơn ngưỡng dương  $C_{\text{th}}$  xác định trước. Ngược lại, nếu  $C_k \leq C_{\text{th}}$ , ta có thể giả sử việc giải mã gói mã hóa tại  $T_k$  bị lỗi. Do đó, xác suất giải mã lỗi 01 gói mã hóa tại  $T_k$  được viết dưới dạng sau: (xem [30]-[31])

$$\begin{aligned}\theta_k &= \Pr(C_k < C_{th}) \\ &= \Pr(\psi_{\text{PBT}_{k-1}} \psi_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} < \phi_k),\end{aligned}\quad (8)$$

với

$$\phi_k = \frac{C_{th}}{2^{(1-\alpha)r} - 1}.\quad (9)$$

Tiếp tục thực hiện biến đổi, và sử dụng các hàm phân phối CDF và PDF đã đưa ra trong các công thức (1) và (2), ta đạt được công thức tính chính xác xác suất  $\theta_k$  như bên dưới:

$$\begin{aligned}\theta_k &= \int_0^{+\infty} F_{\psi_{\text{PBT}_{k-1}}} \left( \frac{\phi_k}{x} \right) f_{\psi_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}}(x) dx \\ &= 1 - \frac{\beta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}}{\delta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}} \\ &\quad \times \int_0^{+\infty} \left[ x^{\beta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} - 1} \exp\left( -\frac{(\phi_k)^{\beta_{\text{PBT}_{k-1}}}}{\delta_{\text{PBT}_{k-1}} x^{\beta_{\text{PBT}_{k-1}}}} \right) \right. \\ &\quad \left. \exp\left( -\frac{x^{\beta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}}}{\delta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}} \right) \right] dx.\end{aligned}\quad (10)$$

Bởi vì tích phân trong công thức (10) không thể được biểu diễn dưới dạng tường minh (closed-form) nên ta có thể sử dụng phần mềm Matlab để tính tích phân này bằng phương pháp số học.

Trong trường hợp đặc biệt tất cả các kênh truyền đều là kênh fading Rayleigh:  $\beta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} = \beta_{\text{PBT}_{k-1}} = 1$ , ta đạt được biểu thức dạng tường minh cho xác suất  $\theta_k$  như sau:

$$\begin{aligned}\theta_k &= 1 - \\ &\frac{1}{\delta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}} \int_0^{+\infty} \exp\left( -\frac{\phi_k}{\delta_{\text{PBT}_{k-1}} x} \right) \exp\left( -\frac{x}{\delta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k}} \right) dx \\ &= 1 - 2 \sqrt{\frac{\phi_k}{\delta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \delta_{\text{PBT}_{k-1}}}} K_1 \left( 2 \sqrt{\frac{\phi_k}{\delta_{\text{T}_{k-1}\text{T}_k} \delta_{\text{PBT}_{k-1}}}} \right),\end{aligned}\quad (11)$$

với  $K_1(\cdot)$  là hàm Bessel biến đổi loại 2, bậc 1 [35].

Tiếp theo, ta xét xác suất đích  $\text{T}_k$  không nhận thành công 01 gói mã hóa được truyền từ nguồn  $\text{T}_0$  trong mô hình MPR. Bởi vì  $\text{T}_k$  nhận thành công 01 gói nếu sự truyền gói này thành công trên tất cả các chặng, nên xác suất  $\text{T}_k$  không nhận thành công 01 gói mã hóa được viết dưới dạng sau:

$$\rho_{\text{E2E}} = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - \theta_k).\quad (12)$$

Trong công thức (12),  $\prod_{k=1}^K (1 - \theta_k)$  là xác suất mà sự

truyền 01 gói mã hóa thành công trên tất cả các chặng hay xác suất mà nút đích nhận thành công 01 gói mã hóa.

### III. PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG

#### A. Xác suất dừng toàn trình (E2E-OP)

Với mô hình HPR; ta gọi  $r$  là số gói mã hóa mà đích  $\text{T}_K$  nhận thành công. Nếu  $0 \leq r < N_{\text{req}}$  thì  $\text{T}_K$  không thể khôi phục dữ liệu nguồn. Do đó, xác suất dừng toàn trình của mô hình HPR được tính, tương tự như [31]:

$$\text{OP}_{\text{HPR}} = \sum_{r=0}^{N_{\text{req}}-1} C_{N_{\text{max}}}^r (1 - \rho_{\text{E2E}})^r (\rho_{\text{E2E}})^{N_{\text{max}}-r},\quad (13)$$

với  $1 - \rho_{\text{E2E}}$  là xác suất đích  $\text{T}_K$  nhận thành công 01 gói mã hóa, và  $C_{N_{\text{max}}}^r$  là hệ số nhị phân:

$$C_{N_{\text{max}}}^r = \frac{N_{\text{max}}!}{r!(N_{\text{max}}-r)!}.\quad (14)$$

Thay  $\rho_{\text{E2E}}$  trong (12) vào (13), ta được biểu thức tính chính xác E2E-OP của mô hình HPR.

Với mô hình HDR; trước tiên, xác suất dừng ở chặng thứ  $k$  hay xác suất  $\text{T}_k$  không thể nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói mã hóa từ  $\text{T}_{k-1}$  được viết bằng công thức sau:

$$\text{OP}_{\text{HDR},k} = \sum_{r=0}^{N_{\text{req}}-1} C_{N_{\text{max}}}^r (1 - \theta_k)^r (\theta_k)^{N_{\text{max}}-r},\quad (15)$$

với  $1 - \theta_k$  là xác suất  $\text{T}_k$  nhận thành công 01 gói mã hóa từ  $\text{T}_{k-1}$ .

Rồi thì, E2E-OP của mô hình HDR được viết như sau:

$$\text{OP}_{\text{HDR}} = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - \text{OP}_{\text{HDR},k}).\quad (16)$$

Trong (16),  $\prod_{k=1}^K (1 - \text{OP}_{\text{HDR},k})$  là xác suất sự truyền dữ

liệu nguồn trên tất cả các chặng đều thành công.

#### B. Tổng Số Lần Truyền Trung Bình

Trong các tài liệu [30]-[31] và [33], nút nguồn luôn sử dụng hết  $N_{\text{max}}$  lần truyền tối đa được phép. Trong một số trường hợp, nút đích có thể nhận được hơn  $N_{\text{req}}$  gói mã hóa, và như vậy, một số gói nhận được tại đích là dư thừa. Để giảm số lần truyền cho nguồn và các nút chuyển tiếp, trong mô hình HPR, chúng tôi đề xuất rằng một khi đích  $\text{T}_k$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói mã hóa, nút này sẽ gửi thông báo về nguồn để nguồn dừng việc truyền. Tương tự, trong mô hình HDR, khi nút  $\text{T}_k$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói từ nút  $\text{T}_{k-1}$ ,  $\text{T}_k$  cũng gửi thông báo để  $\text{T}_{k-1}$  dừng việc gửi gói mã hóa. Để đánh giá và so sánh hiệu năng, chúng tôi sẽ phân tích tổng số lần truyền trung bình trên một lần gửi dữ liệu thành công từ nguồn đến đích cho cả hai mô hình đề xuất.

Trong mô hình HPR, để nút đích nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói mã hóa thì nút nguồn phải gửi ít nhất  $N_{\text{req}}$  gói, cũng như các nút chuyển tiếp cũng phải chuyển tiếp ít nhất  $N_{\text{req}}$  lần. Vì vậy, tổng số lần truyền tối thiểu của nguồn và các nút chuyển tiếp sẽ là  $K * N_{\text{req}}$ . Do sự tác động của nhiễu và fading kênh truyền, sự truyền các gói mã hóa có thể bị lỗi, vì thế số lần truyền của nguồn và các nút chuyển tiếp sẽ lớn hơn  $N_{\text{req}}$ . Ta ký hiệu  $N_S$  là số lần truyền cần thiết của

nguồn  $T_0$  trong mô hình HPR để đích  $T_K$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói mã hóa, với  $N_{\text{req}} \leq N_S \leq N_{\text{max}}$ . Vì số lần truyền thành công các gói giữa nguồn và đích là  $N_{\text{req}}$  nên số lần truyền bị lỗi sẽ là  $N_S - N_{\text{req}}$ . Hơn nữa, mỗi lần gửi thành công 01 gói mã hóa luôn cần  $K$  lần truyền của các nút, trong khi mỗi lần gửi không thành công 01 gói mã hóa sử dụng  $H$  lần truyền, với  $1 \leq H \leq K$ . Ví dụ, nếu việc truyền gói mã hóa bị lỗi ngay ở chặng đầu tiên thì mạng chỉ mất 01 lần truyền, tức  $H=1$ , và nếu việc truyền này thất bại ở chặng cuối (chặng thứ  $K$ ) thì  $H=K$ . Một cách tổng quát, nếu sự truyền 01 gói mã hóa không thành công ở chặng thứ  $k$  thì tổng số lần truyền gói mã hóa của các nút là  $k$ , hay  $H=k$ . Do đó, số lần truyền trung bình khi truyền không thành công 01 gói mã hóa sẽ được tính bằng công thức sau:

$$\bar{H} = \frac{\sum_{k=1}^K k \left( \prod_{u=1}^{k-1} (1-\theta_u) \right) \theta_k}{\rho_{\text{E2E}}} = \frac{\sum_{k=1}^K k \left( \prod_{u=1}^{k-1} (1-\theta_u) \right) \theta_k}{1 - \prod_{k=1}^K (1-\theta_k)}. \quad (17)$$

Trong công thức (17),  $\prod_{u=1}^{k-1} (1-\theta_u) \theta_k$  là xác suất gói mã

hóa bị rớt ở chặng thứ  $k$  (sự truyền ở  $k-1$  chặng trước đó phải thành công). Kế tiếp, ta tính được tổng số lần truyền trung bình để gửi thành công  $N_{\text{req}}$  gói đến đích trong mô hình HPR như sau:

$$\begin{aligned} \text{Num}_{\text{HPR}} &= \frac{1}{1 - \text{OP}_{\text{HPR}}} \\ &\times \sum_{N_S=N_{\text{req}}}^{N_{\text{max}}} C_{N_S-1}^{N_{\text{req}}-1} (1-\rho_{\text{E2E}})^{N_{\text{req}}} (\rho_{\text{E2E}})^{N_S-N_{\text{req}}} \\ &\times \left[ KN_{\text{req}} + (N_S - N_{\text{req}}) \bar{H} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Trong công thức (18),  $1 - \text{OP}_{\text{HPR}}$  là xác suất nút đích  $T_K$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói mã hóa để khôi phục thành công dữ liệu nguồn,  $KN_{\text{req}} + (N_S - N_{\text{req}}) \bar{H}$  là tổng số lần truyền trung bình của nguồn và các nút chuyển tiếp cần thiết để  $T_K$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói, và  $C_{N_S-1}^{N_{\text{req}}-1} (1-\rho_{\text{E2E}})^{N_{\text{req}}} (\rho_{\text{E2E}})^{N_S-N_{\text{req}}}$  là xác suất đích  $T_K$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói khi nguồn  $T_0$  gửi  $N_S$  gói mã hóa.

Đối với HDR, số lần truyền trung bình trong mô hình này sẽ bằng tổng số lần truyền trung bình trên mỗi chặng. Xét sự truyền dữ liệu ở chặng thứ  $k$  giữa  $T_{k-1}$  và  $T_k$ ; nếu ta ký hiệu  $N_{T_{k-1}} (N_{\text{req}} \leq N_{T_{k-1}} \leq N_{\text{max}})$  là số lần truyền của  $T_{k-1}$  thì số lần truyền trung bình của  $T_{k-1}$  để  $T_k$  có thể nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói sẽ được tính bằng công thức sau:

$$\begin{aligned} \text{Num}_{\text{HDR},k} &= \frac{\sum_{N_{T_{k-1}}=N_{\text{req}}}^{N_{\text{max}}} N_{T_{k-1}} C_{N_{T_{k-1}}-1}^{N_{\text{req}}-1} (1-\theta_k)^{N_{\text{req}}} (\theta_k)^{N_{T_{k-1}}-N_{\text{req}}}}{1 - \text{OP}_{\text{HDR},k}}. \end{aligned} \quad (19)$$

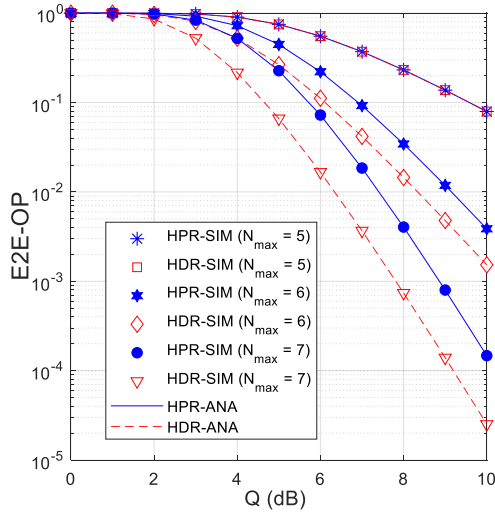
Trong (19),  $C_{N_{T_{k-1}}-1}^{N_{\text{req}}-1} (1-\theta_k)^{N_{\text{req}}} (\theta_k)^{N_{T_{k-1}}-N_{\text{req}}}$  là xác suất mà nút  $T_k$  nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói khi nút  $T_{k-1}$  gửi  $N_{T_{k-1}}$  gói mã hóa đến  $T_k$ . Như đã lập luận ở trên, tổng số lần truyền trung bình cho một lần gửi thành công dữ liệu giữa nguồn và đích trong mô hình HDR được viết như sau:

$$\text{Num}_{\text{HDR}} = \sum_{k=1}^K \text{Num}_{\text{HDR},k}. \quad (20)$$

### III. KẾT QUẢ MÔ PHÒNG VÀ LÝ THUYẾT

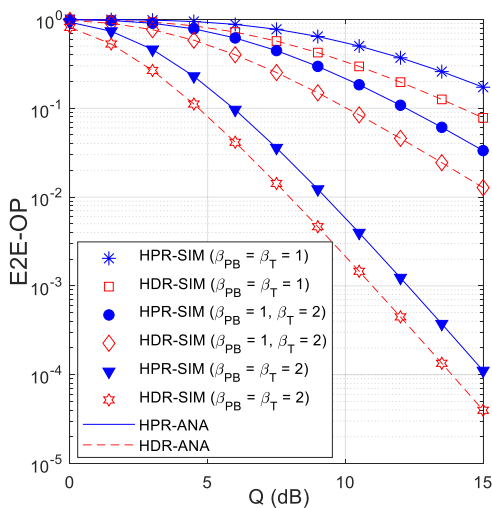
Trong mục này, chúng tôi thực hiện mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng các kết quả phân tích, cũng như để so sánh hiệu năng E2E-OP và tổng số lần truyền trung bình (ký hiệu NUM) của hai mô hình đề xuất HPR và HDR. Trong các hình vẽ bên dưới, kết quả mô phỏng được ký hiệu là SIM và kết quả phân tích được ký hiệu là ANA. Môi trường mô phỏng là mặt phẳng Oxy, ở đây nguồn  $T_0$  được cố định ở góc tọa độ  $(0,0)$ ; đích  $T_K$  cố định ở vị trí  $(1,0)$ , nút chuyển tiếp  $T_k$  được đặt ở vị trí  $(k/K, 0)$ , và trạm PB được cố định ở  $(0.5, 1)$ . Hơn nữa, trong tất cả các kết quả mô phỏng và lý thuyết, các thông số hệ thống sau sẽ được cố định: thời gian trễ toàn trình được tiêu chuẩn hóa bằng 1 ( $L=1$ ), hiệu suất chuyển đổi năng lượng sóng vô tuyến bằng 0.5 ( $\eta=0.5$ ), hệ số suy hao đường truyền bằng 3 ( $\chi=3$ ). Ta cũng giả sử rằng các tham số kênh truyền fading Weibull ở các chặng là giống nhau và được ký hiệu như sau:  $\delta_{\text{PBT}_{k-1}} = \delta_{T_{k-1}T_k} = 1$ ,  $\beta_{\text{PBT}_{k-1}} = \beta_{\text{PB}}$  và  $\beta_{T_{k-1}T_k} = \beta_T$ , với mọi  $k=0, 1, \dots, K$ . Ta cũng lưu ý rằng các biểu thức đưa ra trong bài báo này có thể áp dụng cho tất cả các giá trị khác nhau của các thông số hệ thống trong thực tế.

Trong hình 2, chúng tôi biểu diễn xác suất dừng toàn trình của hai mô hình đề xuất theo  $Q$  (dB) ( $Q = P_{\text{PB}} / \sigma_0^2$ ) với các giá trị khác nhau của  $N_{\text{max}}$  và với  $K=3$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $C_{\text{th}}=0.5$ ,  $\beta_{\text{PB}}=3.5$ ,  $\beta_T=2.7$  và  $N_{\text{req}}=5$ . Đầu tiên, ta thấy rằng xác suất dừng của cả hai mô hình giảm nhanh khi  $Q$  tăng bởi công suất phát của trạm PB tăng cũng làm tăng công suất phát của nguồn và các nút chuyển tiếp. Tiếp đến, khi  $N_{\text{max}} = N_{\text{req}} = 5$ , ta thấy hai mô hình HPR và HDR có giá trị E2E-OP giống nhau. Thật vậy, bởi vì số lần truyền tối đa ( $N_{\text{max}}$ ) bằng với số gói cần nhận tại đích ( $N_{\text{req}}$ ) nên tất cả sự truyền gói mã hóa ở tất cả các chặng đều phải thành công để đích có thể nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói. Khi tăng giá trị của  $N_{\text{max}}$  từ 5 lên 6 và 7, ta thấy rằng xác suất dừng của HPR và HDR giảm vì nút đích có thêm cơ hội nhận đủ  $N_{\text{req}}$  gói mã hóa. Ta cũng quan sát rằng với  $N_{\text{max}} = 6$  và 7, mô hình HDR đạt được giá trị xác suất dừng thấp hơn mô hình HPR. Cuối cùng, các kết quả mô phỏng và lý thuyết tương đồng nhau, điều này kiểm chứng tính chính xác của các kết quả phân tích của E2E-OP trong mục III.

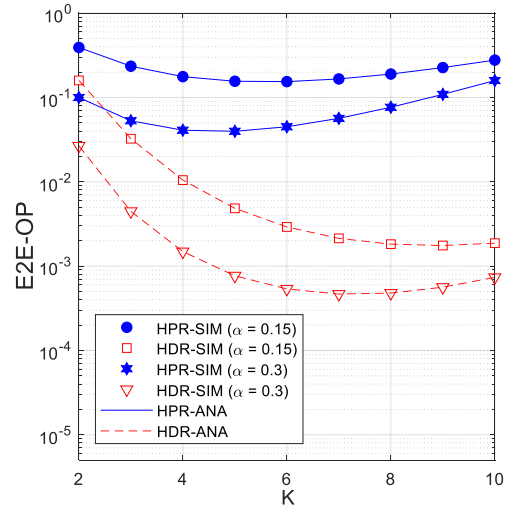


Hình 2. E2E-OP về theo  $Q$  (dB) với  $K=3$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $C_{th}=0.5$ ,  $\beta_{PB}=3.5$ ,  $\beta_T=2.7$  và  $N_{req}=5$ .

Trong hình 2, xác suất dừng toàn trình của hai mô hình đề xuất được vẽ theo  $Q$  (dB) với  $K=3$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $C_{th}=0.25$ ,  $N_{max}=6$  và  $N_{req}=5$ . Ta thấy rằng mô hình HDR luôn đạt giá trị xác suất dừng thấp hơn mô hình HPR và các kết quả mô phỏng phù hợp với các kết quả phân tích. Hình 3 cũng cho thấy sự ảnh hưởng đáng kể của các thông số kênh truyền fading Weibull như  $\beta_{PB}$  và  $\beta_T$  lên hiệu năng dừng của hai mô hình. Khi  $\beta_{PB}=\beta_T=1$ , tất cả các kênh truyền đều là kênh fading Rayleigh, và trong trường hợp này giá trị E2E-OP của HPR và HDR là lớn nhất. Bởi vì kênh truyền fading Weibull có độ lợi kênh lớn hơn khi tăng giá trị  $\beta_{PB}$  và  $\beta_T$ , nên đây là lý do tại sao xác suất dừng của cả hai mô hình là thấp nhất khi  $\beta_{PB}=\beta_T=2$ , và lớn nhất khi  $\beta_{PB}=\beta_T=1$ . Hơn nữa, giá trị E2E-OP trong trường hợp  $\beta_{PB}=\beta_T=2$  cũng thấp hơn rất nhiều khi so sánh với 02 trường hợp còn lại.



Hình 3. E2E-OP về theo  $Q$  (dB) với  $K=3$ ,  $\alpha=0.2$ ,  $C_{th}=0.25$ ,  $N_{max}=6$  và  $N_{req}=5$ .



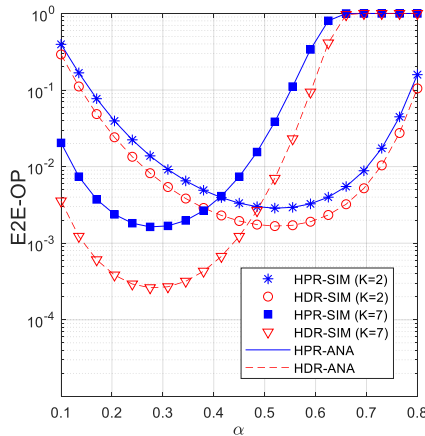
Hình 4. E2E-OP về theo  $K$  với  $Q=7.5$  (dB),  $C_{th}=0.35$ ,  $\beta_{PB}=1$ ,  $\beta_T=3$ ,  $N_{req}=4$  và  $N_{max}=7$ .

Hình 4 vẽ E2E-OP theo số chặng giữa nguồn và đích với  $Q=7.5$  (dB),  $C_{th}=0.35$ ,  $\beta_{PB}=1$ ,  $\beta_T=3$ ,  $N_{req}=4$  và  $N_{max}=7$ . Trong hình vẽ này, xác suất dừng của HDR cũng thấp hơn của HPR. Ta có nhận xét rằng khi số chặng quá nhỏ thì khoảng cách giữa các nút trên mỗi chặng sẽ lớn và điều này làm giảm xác suất truyền thành công các gói mã hóa trên mỗi chặng. Ngược lại, khi số chặng quá lớn thì thời gian truyền dữ liệu ở mỗi chặng sẽ giảm đáng kể, và vì thế xác suất dừng trên mỗi chặng cũng tăng lên. Do đó, quan sát hình 4, ta thấy rằng tồn tại giá trị của  $K$  để E2E-OP của hai mô hình là thấp nhất. Cụ thể, trong mô hình HPR, xác suất dừng sẽ thấp nhất với  $K=4$  khi  $\alpha=0.15$  và với  $K=3$  khi  $\alpha=0.3$ . Đối với mô hình HDR, các giá trị tương ứng là  $K=9$  khi  $\alpha=0.15$  và  $K=7$  khi  $\alpha=0.3$ . Kết quả này cho thấy HDR hoạt động tốt với số chặng lớn, trong khi, HPR chỉ phù hợp với số chặng nhỏ. Ngoài ra, hình 4 cũng cho thấy khoảng thời gian sử dụng cho thu thập năng lượng ở mỗi chặng cũng ảnh hưởng lớn đến hiệu năng của các mô hình. Cụ thể, giá trị E2E-OP của HPR và HDR khi  $\alpha=0.3$  thì thấp hơn đáng kể khi so với trường hợp  $\alpha=0.15$ .

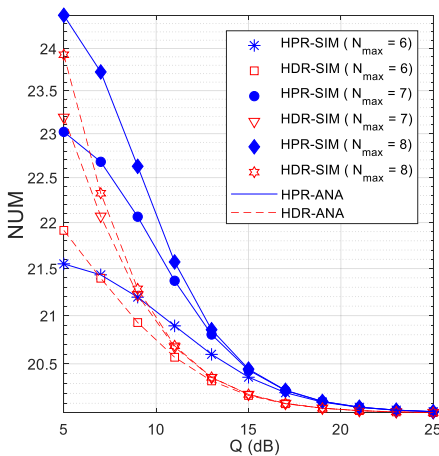
Trong hình 5, chúng tôi vẽ xác suất dừng toàn trình của các mô hình theo giá trị  $\alpha$ , với  $Q=10$  (dB),  $C_{th}=0.35$ ,  $\beta_{PB}=1$ ,  $\beta_T=3$ ,  $N_{req}=4$  và  $N_{max}=7$ . Đầu tiên, ta thấy nếu giá trị  $\alpha$  quá thấp thì năng lượng thu thập và công suất phát của các nút cũng thấp, dẫn đến E2E-OP lớn. Tuy nhiên, nếu  $\alpha$  quá lớn thì thời gian dành cho việc truyền dữ liệu ở mỗi chặng sẽ nhỏ, nên xác suất dừng toàn trình của các mô hình cũng tăng. Giống như đã suy đoán, hình 5 cho thấy hiệu năng dừng của HPR và HDR đều rất lớn khi  $\alpha$  quá lớn hoặc quá nhỏ. Hơn nữa, tồn tại giá trị tối ưu của  $\alpha$  để xác suất dừng toàn trình của các mô hình đạt giá trị thấp nhất. Cụ thể, trong cả hai mô hình HPR và HDR, E2E-OP sẽ nhỏ nhất với  $\alpha=0.52$  khi  $K=2$  và với  $\alpha=0.275$  khi  $K=7$ . Như ta quan sát, số chặng có tác động lớn đến giá trị E2E-OP của các mô hình. Ta cũng có nhận xét như sau: khi số chặng ( $K$ ) càng lớn thì hệ thống nên thiết kế hệ số phân chia thời gian ( $\alpha$ ) nhỏ, và ngược lại. Thật vậy, khi số chặng càng lớn thì thời gian phân bổ cho mỗi chặng sẽ càng

nhỏ. Do đó, thời gian dành cho việc thu thập năng lượng ( $\alpha\tau$ ) nên nhỏ để đảm bảo thời gian truyền dữ liệu ở mỗi chặng  $((1-\alpha)\tau)$ . Như chúng ta có thể quan sát từ hình 5, với  $K=7$  và  $\alpha \geq 0.65$  thì xác suất dừng của các mô hình hầu như đều bằng 1.

Hình 6 biểu diễn tổng số lần truyền trung bình của nguồn và các nút chuyển tiếp để chuyển thành công dữ liệu từ nguồn đến đích (ký hiệu NUM) theo  $Q$  (dB) với  $K=4$ ,  $C_{th}=0.5$ ,  $\beta_{PB}=1.5$ ,  $\beta_T=2$ ,  $N_{req}=5$  và  $K=4$ . Nhìn vào hình vẽ, ta thấy giá trị NUM của HPR và HDR giảm khi công suất phát ( $Q$ ) tăng. Thật vậy, khi công suất phát thấp thì nguồn và các nút chuyển tiếp cần truyền nhiều lần hơn để đảm bảo nút đích nhận đủ  $N_{req}$  gói mã hóa. Ta cũng quan sát thấy khi số lần truyền  $N_{max}$  giảm thì NUM của hai mô hình đều giảm. Tuy nhiên, khi  $Q$  lớn, giá trị NUM của cả hai mô hình sẽ hội tụ về số lần truyền tối thiểu:  $K * N_{req} = 20$ , như được thể hiện trong hình vẽ. Hơn nữa, NUM của HDR hội tụ về  $K * N_{req}$  nhanh hơn NUM của HPR. Cuối cùng, như ta quan sát, các kết quả mô phỏng trong hình 6 đã kiểm chứng sự chính xác của các kết quả phân tích lý thuyết của NUM trong mục III.

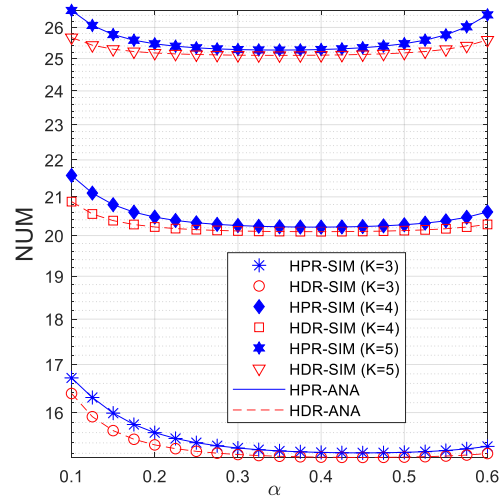


Hình 5. E2E-OP vẽ theo  $\alpha$  với  $Q=10$  (dB),  $C_{th}=0.5$ ,  $\beta_{PB}=2.5$ ,  $\beta_T=3.5$ ,  $N_{req}=5$  và  $N_{max}=6$ .



Hình 6. Tổng số lần truyền trung bình vẽ theo  $Q$  (dB) với  $K=4$ ,  $C_{th}=0.5$ ,  $\beta_{PB}=1.5$ ,  $\beta_T=2$ ,  $N_{req}=5$  và  $K=4$ .

Hình 7 vẽ tổng số lần truyền trung bình của nguồn và các nút chuyển tiếp để chuyển thành công dữ liệu từ nguồn đến đích theo  $\alpha$  với  $Q=7.5$  (dB),  $C_{th}=0.5$ ,  $\beta_{PB}=3$ ,  $\beta_T=3$ ,  $N_{req}=5$  và  $N_{max}=7$ . Hình 7 cho ta thấy NUM của HDR nhỏ hơn NUM của HPR. Tuy nhiên, độ chênh lệch giá trị NUM của hai mô hình là không lớn. Tiếp đến, ta quan sát thấy luôn tồn tại giá trị của  $\alpha$  để NUM của hai mô hình đạt giá trị thấp nhất. Cuối cùng, như ta có thể thấy, NUM của HPR và HDR tăng đáng kể khi số chặng tăng từ 3 lên 4 và 5.



Hình 7. Tổng số lần truyền trung bình vẽ theo  $\alpha$  với  $Q=7.5$  (dB),  $C_{th}=0.5$ ,  $\beta_{PB}=3$ ,  $\beta_T=3$ ,  $N_{req}=5$  và  $N_{max}=7$ .

#### IV. KẾT LUẬN

Trong công trình này, chúng tôi đã đề xuất hai mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng mã Fountain và sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến. Chúng tôi cũng đã đưa ra các biểu thức toán học đánh giá chính xác hiệu năng xác suất dừng toàn trình và tổng số lần truyền trung bình để gửi dữ liệu thành công từ nguồn đến đích trên kênh truyền tổng quát fading Weibull. Các công thức đều được kiểm chứng tính chính xác thông qua mô phỏng Monte Carlo. Các kết quả đạt được cho thấy rằng mô hình chuyển tiếp dữ liệu nguồn theo từng chặng (HDR) đạt được hiệu năng tốt hơn mô hình chuyển tiếp từng gói mã hóa (HPR). Tuy nhiên, mô hình HDR yêu cầu các nút chuyển tiếp phải lưu trữ các gói mã hóa để khôi phục thông tin gốc, đồng thời phải mã hóa lại dữ liệu bằng mã Fountain trước khi gửi dữ liệu đến chặng kế tiếp. Do đó, việc thực hiện mô hình HDR phức tạp hơn mô hình HPR. Để nâng cao hiệu năng cho các mô hình, ta có thể tăng công suất phát cho trạm phát PB hoặc tăng số lần truyền cho nút nguồn và các nút chuyển tiếp. Hơn nữa, để đạt được hiệu năng tốt nhất, tùy thuộc vào các thông số hệ thống cụ thể, hệ số phân chia thời gian và số chặng giữa nguồn và đích cần được thiết kế một cách tối ưu.

#### LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Thành Phố Hồ Chí Minh với mã số đề tài 11-HV-2022-RD\_ĐT2.

## REFERENCES

- [1] X. Zhu, N. P. Nguyen, T. L. Thanh, D. B. Ha, "Throughput Analysis of Bidirectional Relaying Networks With Wireless Power Transfer over Nakagami Fading," in Proc. of 2015 International Conference on Communications, Management and Telecommunications, pp. 153-156, 2015.
- [2] T. L. Thanh, M. H. 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, 2018.
- [3] H. D. Hung, T. D., Tran, 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.
- [4] S. -I. Chu, "Performance of Amplify-and-Forward Cooperative Diversity Networks with Generalized Selection Combining over Nakagami-m Fading Channels," IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 5, pp. 634-637, May 2012.
- [5] M. R. Bhatnagar, "On the Capacity of Decode-and-Forward Relaying over Rician Fading Channels," IEEE Communications Letters, vol. 17, no. 6, pp. 1100-1103, Jun. 2013.
- [6] M. O. Hasna and M. -S. Alouini, "Outage probability of multihop transmission over Nakagami fading channels," IEEE Communications Letters, vol. 7, no. 5, pp. 216-218, May 2003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] C. T. Dung, T. M. Hoang, N. N. Thang, M. Tran, T. T. Phuong, "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.
- [10] T. -V. Nguyen, V. -D. Nguyen, D. B. da Costa, B. An, "Short-Packet Communications in Multi-Hop WPINs: Performance Analysis and Deep Learning Design," in Proc. of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), Dec. 2021, pp. 1-6.
- [11] T. -V. Nguyen, V. -D. Nguyen, D. B. Da Costa, T. Huynh-The, R. Q. Hu, B. An, "Short-Packet Communications in Multi-Hop Networks with WET: Performance Analysis and Deep Learning-Aided Optimization," IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022. Online first, doi: 10.1109/TWC.2022.3195234.
- [12] J. C. Kwan and A. O. Fapojuwo, "Sum-Throughput Maximization in Wireless Sensor Networks With Radio Frequency Energy Harvesting and Backscatter Communication," IEEE Sensors Journal, vol. 18, no. 17, pp. 7325-7339, Sept. 2018.
- [13] L. Dong, "Optimization of Multiple Wireless Transmissions for Radio-Frequency Energy Harvesting," IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 10, pp. 2140-2143, Oct. 2018.
- [14] J. Wang and Y. Ge, "A Radio Frequency Energy Harvesting-Based Multihop Clustering Routing Protocol for Cognitive Radio Sensor Networks," IEEE Sensors Journal, vol. 22, no. 7, pp. 7142-7156, 1 April, 2022.
- [15] C. Xu, M. Zheng, W. Liang, H. Yu and Y. -C. Liang, "Outage Performance of Underlay Multihop Cognitive Relay Networks With Energy Harvesting," IEEE Communications Letters, vol. 20, no. 6, pp. 1148-1151, Jun. 2016.
- [16] X. Jiang, C. Zhong, Z. Zhang and G. K. Karagiannidis, "Power Beacon Assisted Wiretap Channels With Jamming," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 12, pp. 8353-8367, Dec. 2016.
- [17] C. Xu, M. Zheng, W. Liang, H. Yu and Y. -C. Liang, "End-to-End Throughput Maximization for Underlay Multi-Hop Cognitive Radio Networks With RF Energy Harvesting," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 16, no. 6, pp. 3561-3572, June 2017.
- [18] W. Xu, W. Chen, Y. Fan, Z. Zhang and X. Shi, "Spectrum efficiency maximization for cooperative power beacon-enabled wireless powered communication networks," China Communications, vol. 18, no. 12, pp. 230-251, Dec. 2021.
- [19] T. D. Hieu, T. T. Duy, B.-S. Kim, "Performance Enhancement for Multi-hop 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.
- [20] N. T. Huân, N. H. Ân, N. V. Hiền, P. Q. Hợp, V. T. Ty, "Xác Suất Dừng Mạng Chuyển Tiếp Đa Chặng Sử Dụng Thu Thập Năng Lượng Vô TUYẾN và Truyền Thông Cộng Tác Tại Mỗi Chặng," Hội thảo khoa học Quốc gia STAIS 2022, pp. 105-113, Binh Duong Province, 07/2022.
- [21] N. Varshney, A. V. Krishna and A. K. Jagannatham, "Selective DF Protocol for MIMO STBC Based Single/Multiple Relay Cooperative Communication: End-to-End Performance and Optimal Power Allocation," IEEE Transactions on Communications, vol. 63, no. 7, pp. 2458-2474, July 2015.
- [22] Y. Zhou and W. Zhuang, "Performance Analysis of Cooperative Communication in Decentralized Wireless Networks With Unsaturated Traffic," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 5, pp. 3518-3530, May 2016.
- [23] M. Luby, "LT Codes," in Proc. of The 43rd Annual IEEE Symposium on Foundations of Computer Science, 2002. Proceedings., Vancouver, BC, 2002, pp. 271-280.
- [24] H. Niu, M. Iwai, K. Sezaki, L. Sun and Q. Du, "Exploiting Fountain Codes for Secure Wireless Delivery," IEEE Communications Letters, vol. 18, no. 5, pp. 777-780, May 2014.
- [25] W. Li, Q. Du, L. Sun, P. Ren, Y. Wang, "Security Enhanced via Dynamic Fountain Code Design for Wireless Delivery," in Proc. of 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, Doha, 2016, pp. 1-6.
- [26] L. Sun, P. Ren, Q. Du, and Y. Wang, "Fountain-Coding Aided Strategy for Secure Cooperative Transmission in Industrial Wireless Sensor Networks," IEEE Trans. Industrial Inform., vol. 12, no. 1, pp. 291-300, Feb. 2016.
- [27] T. L. Thanh, et. al. , "Broadcasting in Cognitive Radio Networks: A Fountain Codes Approach," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 10, pp. 11289-11294, Oct. 2022.
- [28] N. V. Hien, T. T. Duy, T. D. Thuan, "Nghiên Cứu Hiệu Năng Bảo Mật Mạng Vô TUYẾN Nhận Thức Dạng Nền Cộng Tác Sử Dụng Mã Fountain," Tạp chí Khoa Học Công Nghệ Thông Tin và Truyền Thông (JSTIC), vol. 1, no. 4A, pp. 112-120, Dec. 2020.
- [29] N. V. Hien, T. T. Duy, L. Q. Phu, T. Hanh, "Nghiên Cứu Hiệu Năng Mạng Quang Bá Đa Người Dừng Sử Dụng Mã Fountain Và Kỹ Thuật Tạo Nhiều Nhân Tạo Trên Kênh Nakagami-m," Tạp chí Khoa Học Công Nghệ Thông Tin và Truyền Thông (JSTIC), 2022 (đã chấp nhận).
- [30] D. T. Hung, T. T. Duy, D. Q. Trinh, V. N. Q. Bao and T. Hanh "Security-Reliability Analysis of Power Beacon-Assisted Multi-hop Relaying Networks Exploiting Fountain Codes with Hardware Imperfection," The 2018 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC 2018) , HCM city, Viet Nam, pp. 354 - 359, Oct. 2018.
- [31] N. T. Huan, T. T. Duy, L. T. Tu, N. Q. Sang, T. Q. Hien, P. V. Tuan, "Incremental Cooperation Based Multi-hop Relaying Scheme With Fountain Codes, Wirelessly Energy Harvesting and Partial Relay Selection," 2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), HaNoi, 338-343, Oct. 2022.
- [32] Y. Lee, "End-to-End Error-Rate Based Incremental Relaying for AF Cooperative Communications," IEEE Communications Letters, vol. 17, no. 9, pp. 1806-1809, Sept. 2013.
- [33] P. X. Minh, T. T. Duy, T. L. Thanh, N. Q. Sang, T. Hanh, "Đánh Giá Hiệu Năng Mạng Chuyển Tiếp Đa Chặng Sử Dụng Mã Fountain Dưới Sự Tác Động Của Nhiều Đồng Kênh," Hội thảo khoa học Quốc gia STAIS 2022, pp. 105-113, Binh Duong Province, 07/2022.
- [34] G. C. Alexandropoulos, N. C. Sagias and K. Berberidis, "On the Multivariate Weibull Fading Model With Arbitrary Correlation Matrix," IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 6, pp. 93-95, Apr. 2007.
- [35] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik. Table of Integrals, Series, and Products. Academic press, 2014.



## PERFORMANCE EVALUATION OF WIRELESSLY ENERGY HARVESTING MULTI-HOP RELAYING SCHEMES USING FOUNTAIN CODES OVER WEIBULL FADING CHANNELS

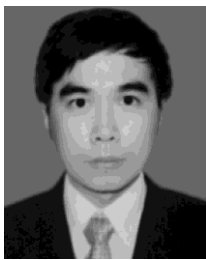
**Abstract:** This paper compares performance of two wirelessly energy harvesting multi-hop relaying schemes using Fountain codes. In the first scheme, the source sends each Fountain packet to the destination via help of the intermediate relays those are on a route between source and destination. Different with the first scheme, in the second one, the source data is relayed hop-by-hop, using Fountain codes. In addition, all the transmitters in two proposed schemes have to harvest wireless energy from one power station deployed in the considered network. We derive exact formulas of end-to-end outage probability and average total number of transmission times per each successful transmission for both schemes over Weibull fading channels, and verify them by computer simulations. The results showed that the second scheme obtains better performance, as compared with the first one.

**Key words**—Radio frequency energy harvesting, Fountain codes, multi-hop relaying, outage probability, Weibull fading channels.



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

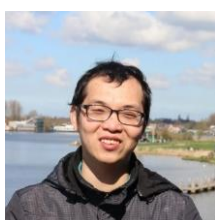
Email: [anh@hufi.edu.vn](mailto:anh@hufi.edu.vn)



**Nguyễn Quang Sang** nhận bằng Kỹ sư tại Đại học Giao Thông Vận Tải, TP. Hồ Chí Minh vào năm 2010, bằng Thạc sĩ tại Đại học Bách Khoa - Đại học Quốc Gia TP. Hồ Chí Minh vào năm 2013, và bằng Tiến Sĩ kỹ thuật điện tử tại Đại học Ulsan, Hàn Quốc vào năm 2017. Từ tháng 01/2017 đến tháng 06/2017, TS. Sang nghiên cứu sau tiến sĩ tại Đại học Queen's University Belfast, Anh Quốc.

Từ 07/2017 đến 04/2021, TS. Sang làm nghiên cứu viên tại Đại học Duy Tân. Từ tháng 5 năm 2021, TS. Sang là giảng viên Trường Đại học Giao thông Vận tải Thành phố Hồ Chí Minh. Các hướng nghiên cứu chính của TS. Sang bao gồm: truyền thông hợp tác, vô tuyến nhận thức, bảo mật lớp vật lý, thu hoạch năng lượng, đa truy cập không trực giao và kết nối backhaul không đáng tin cậy.

Email: [sang.nguyen@ut.edu.vn](mailto:sang.nguyen@ut.edu.vn)



**Từ Lâm Thanh** Từ Lâm Thanh nhận bằng Kỹ sư điện tử viễn thông tại Đại học Bách khoa Thành phố Hồ Chí Minh vào năm 2009; bằng Thạc sĩ kỹ thuật viễn thông tại Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông vào năm 2014, và bằng Tiến sĩ tại Đại học Paris-Saclay, Pháp vào năm 2018. Từ năm 2015 đến năm 2018, anh ấy làm việc tại trung tâm

French National Center for Scientific Research (CNRS), Pháp. Hướng nghiên cứu chính bao gồm: hình học ngẫu nhiên, mạng LoRa, bảo mật lớp vật lý, kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến và ứng dụng máy học cho truyền thông không dây.

Email: [tulamthanh@tdtu.edu.vn](mailto:tulamthanh@tdtu.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. 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 công tác, vô tuyến nhận thức, NOMA, Mã Fountain.

Email: [trantrungduy@ptithcm.edu.vn](mailto:trantrungduy@ptithcm.edu.vn)



**Tân Hạnh**, Phó giám đốc Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông, phụ trách cơ sở tại TP.HCM, nhận bằng Tiến Sĩ tại Grenoble Institute of Technology, Pháp. Lĩnh vực nghiên cứu bao gồm: học máy, truy xuất thông tin, xử lý ảnh.

Email: [tanhanh@ptithcm.edu.vn](mailto:tanhanh@ptithcm.edu.vn)