

NÂNG CAO HIỆU NĂNG MẠNG CHUYÊN TIẾP ĐA CHẶNG TRUYỀN THÔNG GÓI TIN NGẮN VỚI TRUYỀN THÔNG CỘNG TÁC TĂNG CƯỜNG TẠI MỖI CHẶNG

Phạm Minh Quang, Trần Trung Duy, Lê Chu Khản

¹Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Tại Thành Phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất mô hình chuyên tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng để nâng cao hiệu năng cho mạng truyền thông gói tin ngắn. Chúng tôi cũng nghiên cứu kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường đơn giản tại mỗi chặng, ở đây nếu tỷ số tín hiệu trên nhiễu tức thời của đường truyền trực tiếp nhỏ hơn một ngưỡng cho trước thì đường chuyên tiếp sẽ được sử dụng để truyền dữ liệu. Chúng tôi đưa ra các biểu thức đánh giá tỷ lệ lỗi khối cho mô hình đề xuất trên kênh fading Rayleigh. Cuối cùng, mô phỏng Monte-Carlo được thực hiện để kiểm chứng sự chính xác của kết quả phân tích, cũng như để so sánh hiệu năng của mô hình đề xuất với mô hình chuyên tiếp đa chặng thông thường.

Từ khóa: Chuyên tiếp đa chặng, truyền thông cộng tác, truyền thông gói tin ngắn, tỷ lệ lỗi khối.

I. MỞ ĐẦU

Ngày nay, các hệ thống mạng tự cấu hình như mạng cảm biến vô tuyến (WSNs: Wireless Sensor Networks) [1]-[5], với các thiết bị có ưu điểm về kích thước, hiệu quả sử dụng năng lượng và giá thành thấp, đang cung cấp rất nhiều dịch vụ tiện lợi cho người dùng và ngày càng trở nên phổ biến. Cũng bởi sự đơn giản trong kích thước, các thiết bị mạng thường bị giới hạn về mặt công suất, khả năng lưu trữ và tính toán. Do đó, để mở rộng vùng phủ cho các hệ thống mạng này, kỹ thuật chuyên tiếp được xem là giải pháp hiệu quả nhất. Thật vậy, chuyên tiếp giúp các nút có công suất phát thấp có thể gửi dữ liệu đến các nút ở xa, đồng thời cũng nâng cao độ tin cậy (do truyền thông ở khoảng cách ngắn), tiết kiệm năng lượng (khi so sánh với việc truyền trực tiếp đến các nút ở xa với công suất phát lớn) và sử dụng hiệu quả tài nguyên mạng (sử dụng các nút mạng đang rỗi). Tùy thuộc vào khoảng cách giữa nút nguồn và nút đích mà sự chuyên tiếp cần đến sự giúp đỡ của một hoặc nhiều nút chuyên tiếp trung gian. Các nút trung gian này còn được gọi là các nút chuyên tiếp (relay) và chúng có thể sử dụng kỹ thuật khuếch đại chuyên tiếp (AF: Amplify-and-Forward) [6]-[7] hoặc giải mã và chuyên tiếp (DF: Decode-and-Forward) [8]-[9] để vận chuyển dữ liệu của nguồn. Mặc dù kỹ thuật AF đơn giản hơn nhưng nhiều tại mỗi chặng sẽ tích lũy tại nút

đích do sự khuếch đại tín hiệu của nút chuyên tiếp. Ngược lại, kỹ thuật DF có khả năng khử nhiễu tại từng chặng nên đạt được độ tin cậy truyền tin cao hơn. Trong chuyên tiếp đa chặng (Multi-hop Relaying) thông thường, dữ liệu nguồn sẽ được truyền theo từng chặng một để đến đích. Tuy nhiên, sự ảnh hưởng của nhiễu và fading kênh truyền làm cho hiệu năng của mạng chuyên tiếp đa chặng bị suy giảm nghiêm trọng. Đây là động lực để chúng tôi nghiên cứu và áp dụng truyền thông cộng tác (Cooperative Communication) [10] để nâng cao hiệu năng cho mạng chuyên tiếp đa chặng.

Nguyên lý cơ bản của truyền thông cộng tác là các nút đơn anten sẽ chia sẻ anten của chúng để tạo thành chuỗi anten ảo. Nhờ vậy, mạng đạt được độ lợi phân tập không gian giống như các hệ thống truyền thông đa đầu vào đa đầu ra (MIMO). Trong các công trình [11]-[15], các tác giả đã đề xuất những mô hình chuyên tiếp đa chặng cộng tác, trong đó các nút chuyên tiếp ở phía sau sẽ nhận tín hiệu từ tất cả các nút ở phía trước. Sau đó, các nút chuyên tiếp sử dụng các kỹ thuật kết hợp (combining techniques) để giải mã dữ liệu. Điều này làm nâng cao độ tin cậy của việc giải mã dữ liệu tại các nút chuyên tiếp và cũng như tại nút đích. Tuy nhiên, nhược điểm chính của các mô hình này đó là sự đồng bộ cao giữa tất cả các nút. Hơn nữa, sự phức tạp trong xử lý dữ liệu ở các nút chuyên tiếp cũng là thách thức lớn khi triển khai các mô hình này trong thực tế. Trong các công trình [16]-[18], các tác giả đề xuất mô hình chuyên tiếp đa chặng dạng cụm (cluster), trong đó sự chuyên tiếp dữ liệu giữa nguồn và đích được thực hiện thông qua những cụm trung gian. Hơn nữa, các tác giả của [16]-[18] cũng đề xuất phương pháp chọn lựa nút nhận tốt nhất tại mỗi cụm, nhằm nâng cao độ tin cậy của sự truyền dữ liệu ở mỗi chặng. Khác với [11]-[18], các tác giả trong các tài liệu [19]-[20] đề xuất mô hình chuyên tiếp sử dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng. Các mô hình này dễ dàng triển khai trong thực tế hơn, khi so sánh với các mô hình trong [11]-[18]. Cụ thể, trong [19], tại mỗi chặng trên tuyến giữa nguồn và đích, một nút chuyên tiếp bên ngoài sẽ được chọn để hỗ trợ. Khác với [19], công trình [20] áp dụng kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường (Incremental Cooperative Communication) tại mỗi chặng, nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần. Thật vậy, các nút chuyên tiếp trong truyền thông cộng tác tăng cường chỉ được dùng khi đường truyền trực tiếp có chất lượng xấu.

Gần đây, truyền thông gói tin ngắn (SPC: Short Packet Communications) [21]-[22] nhận được nhiều sự quan tâm

Tác giả liên hệ: Trần Trung Duy,

Email: trantrungduy@ptithcm.edu.vn

Đến tòa soạn: 11/2022, chỉnh sửa: 1/2023, chấp nhận đăng: 02/2023.

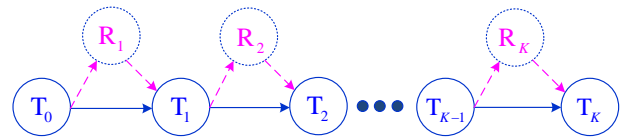
của các nhà nghiên cứu trong và ngoài nước. Truyền thông gói tin ngắn hiện đang là một ứng viên đầy tiềm năng, và sẽ là một kỹ thuật hiệu quả trong các ứng dụng thời gian thực, với yêu cầu độ trễ cực thấp và độ tin cậy cực cao. Trong các công trình [23]-[26], các tác giả đã đề xuất những mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông gói tin ngắn. Tài liệu [23] phân tích tỷ lệ lỗi khối (BLER: Block Error Rate) toàn trình cho mạng chuyển tiếp đa chặng DF sử dụng SPC. Các tác giả trong [23] cũng đánh giá sự ảnh hưởng của các tham số hệ thống như công suất phát và số chặng lên hiệu năng của mô hình. Trong [24], mô hình chuyển tiếp đa chặng dạng nền sử dụng SPC đã được đề xuất và phân tích. Cụ thể, các tác giả của công trình [24] đánh giá BLER toàn trình cho mạng đa chặng thứ cấp, sử dụng phương thức chia sẻ phổ tần dạng nền (underlay spectrum sharing). Các tác giả trong các tài liệu [25]-[26] đề xuất mô hình chuyển tiếp đa chặng dạng cụm sử dụng SPC và lựa chọn nút chuyển tiếp tốt nhất tại mỗi chặng. Ngoài ra, những nút phát trong các mô hình này phải thu thập năng lượng vô tuyến từ các trạm phát để sử dụng cho việc truyền dữ liệu.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng để nâng cao hiệu năng cho mạng truyền thông gói tin ngắn. Những điểm mới, điểm khác biệt so với các công trình liên quan và đóng góp chính của bài báo này sẽ được tóm tắt như bên dưới:

- Khác với các công trình [23]-[24], truyền thông cộng tác tăng cường được sử dụng tại mỗi chặng để nâng cao hiệu năng cho mạng chuyển tiếp đa chặng trong mạng SPC. Đây cũng chính là điểm khác của bài báo này với các công trình [25]-[26], khi mà các tác giả trong [25]-[26] xem xét mô hình chuyển tiếp đa chặng dạng cụm và sự lựa chọn nút nhận tốt nhất tại mỗi cụm.
- Khác với các mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng được đề xuất trong [19]-[20] và [27], kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường trong bài báo này đơn giản hơn. Thật vậy, ở mỗi chặng, nếu tỷ số tín hiệu trên nhiễu (SNR: Signal-to-Noise Ratio) tức thời của đường truyền trực tiếp nhỏ hơn một ngưỡng quyết định cho trước thì đường chuyển tiếp mới được sử dụng để truyền dữ liệu.
- Để đánh giá hiệu năng của mô hình đề xuất, chúng tôi đưa ra các công thức toán học tính BLER toàn trình trên kênh fading Rayleigh. Chúng tôi cũng thực hiện mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng tính chính xác của các công thức đưa ra.
- Các kết quả đạt được trong bài báo cho thấy mô hình đề xuất có thể đạt hiệu năng tốt hơn khi so sánh với mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường [23]-[24], ở các mức công suất phát trung bình và lớn. Hơn nữa, để tối ưu hiệu năng cho mô hình đề xuất, chúng tôi khảo sát kỹ giá trị của ngưỡng quyết định.

Phần còn lại của bài báo được cấu trúc như sau: phần II trình bày nguyên lý hoạt động của mô hình đề xuất. Phần III phân tích hiệu năng BLER toàn trình trên kênh fading Rayleigh. Phần IV đưa ra các kết quả mô phỏng để kiểm chứng các phân tích lý thuyết. Cuối cùng, phần V đưa ra các kết luận, giải pháp thiết kế và hướng phát triển của bài báo.

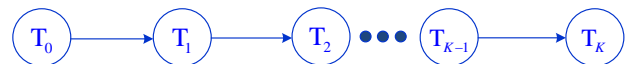
II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



Hình 1. Mô hình đề xuất (MH-CC).

Hình 1 mô tả mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng SPC và truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng. Mô hình này được đặt tên là MH-CC (Multi-Hop relaying with Cooperative Communication). Trong Hình 1, nút nguồn T_0 muốn gửi dữ liệu đến nút đích T_K , sử dụng SPC. Do khoảng cách lớn giữa nguồn và đích nên nút nguồn T_0 không thể truyền dữ liệu trực tiếp đến nút đích T_K . Vì vậy, nút nguồn T_0 cần thiết lập một tuyến đến đích để gửi dữ liệu. Như trong Hình 1, ta ký hiệu các nút chuyển tiếp trên tuyến giữa nguồn và đích, theo thứ tự như sau: T_1, T_2, \dots, T_{K-1} . Để nâng cao độ tin cậy khi truyền dữ liệu tại các chặng, truyền thông cộng tác tăng cường sẽ được áp dụng, ở đây một nút ngoài tuyến sẽ được yêu cầu hỗ trợ. Giả sử rằng mật độ các nút mạng là lớn; do đó mỗi chặng đều có thể tìm được 01 nút chuyển tiếp bên ngoài sẵn sàng giúp đỡ. Ký hiệu R_k là nút cộng tác ở chặng thứ k , với $k = 1, 2, \dots, K$. Giả sử tất cả các nút mạng đều có 01 anten và hoạt động ở chế độ bán song công (half-duplex), và sự truyền dữ liệu được thực hiện trên các khe thời gian trực giao.

Để thấy được ưu điểm của mô hình đề xuất, bài báo này sẽ so sánh hiệu năng của MH-CC với mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường [23]-[24] (được đặt tên là MH-DT: Multi-Hop relaying with Direct Transmission). Như ta có thể thấy trong Hình 2, ở mỗi chặng trong mô hình MH-DT, sự truyền trực tiếp giữa các nút sẽ được thực hiện.



Hình 2. Mô hình đa chặng thông thường (MH-DT).

Ta cũng lưu ý rằng, trong chuyển tiếp đa chặng, thời gian trễ sẽ tăng theo số chặng bởi tổng thời gian truyền và thời gian xử lý tại các nút chuyển tiếp sẽ tăng. Hơn nữa, bởi vì mô hình đề xuất MH-CC sử dụng truyền thông cộng tác tại mỗi chặng nên việc triển khai mô hình này sẽ phức tạp hơn mô hình truyền thông MH-DT. Cũng vậy, việc sử dụng các nút chuyển tiếp cộng tác tại mỗi chặng cũng gia tăng thời gian trễ đến từ các hoạt động đồng bộ, lưu trữ và xử lý tín hiệu.

Trong SPC, mỗi khối có chiều dài là m CU (Channel Use), với $m > 100$. Trong mô hình MH-DT, khi nút nguồn T_0 truyền δ bit thông tin tới nút đích T_K thì tốc độ mã hóa là $r_{DT} = \delta K / m$ [23]-[24].

Trong mô hình MH-CC, xét sự truyền dữ liệu ở chặng thứ k giữa T_{k-1} và T_k với sự giúp đỡ của R_k , ở đây $k = 1, 2, \dots, K$. Nếu chất lượng kênh giữa T_{k-1} và T_k là tốt, T_{k-1} sẽ trực tiếp truyền dữ liệu đến T_k với tốc độ mã hóa là $r_{DT} = \delta K / m$. Nếu chất lượng kênh giữa T_{k-1} và T_k

không đảm bảo; nút T_{k-1} sẽ nhờ R_k chuyển tiếp dữ liệu đến T_k , sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp (DF). Trong trường hợp này, tốc độ mã hóa trên các liên kết $T_{k-1} \rightarrow R_k$ và $R_k \rightarrow T_k$ sẽ là: $r_{CC} = 2\delta K / m$ [29].

Ta ký hiệu $g_{A,B}$ là độ lợi kênh giữa nút phát A và nút thu B, với $A \in \{T_0, T_k, R_k\}$ và $B \in \{T_k, R_k, T_k\}$. Bởi vì kênh truyền là fading Rayleigh, $g_{A,B}$ là một biến ngẫu nhiên có phân phối mũ với hàm phân phối tích lũy (CDF: Cumulative Distribution Function) và hàm mật độ xác suất (PDF: Probability Density Function) lần lượt là:

$$\begin{aligned} f_{g_{A,B}}(x) &= 1 - \exp(-\Omega_{A,B}x), \\ f_{g_{A,B}}(x) &= \Omega_{A,B} \exp(-\Omega_{A,B}x), \end{aligned} \quad (1)$$

với $\Omega_{A,B} = (d_{A,B})^\beta$ [10], [28], ở đây $d_{A,B}$ là khoảng cách giữa A và B, và β là hệ số suy hao đường truyền.

Hơn nữa, tỷ số SNR tức thời đạt được tại nút B để giải mã dữ liệu mà A gửi được viết ra như sau:

$$\psi_{A,B} = \frac{P_A g_{A,B}}{\sigma_B^2}, \quad (2)$$

với P_A là công suất phát của A, và σ_B^2 là phương sai của nhiễu Gauss cộng tính tại B.

Để thuận tiện trong việc trình bày, cũng như để có sự so sánh công bằng giữa MH-DT và MH-CC; ta giả sử tất cả nhiễu Gauss tại các nút thu B đều có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng σ_0^2 , cụ thể $\sigma_B^2 = \sigma_0^2$, $\forall B \in \{T_k, R_k, T_k\}$. Tiếp theo, giả sử công suất phát của nút nguồn T_0 và tất cả các nút chuyển tiếp T_k trong mô hình MH-DT đều bằng nhau và bằng P , cụ thể: $P_{T_0} = P_{T_k} = P(\forall k)$. Cuối cùng, xét sự truyền dữ liệu ở chặng thứ k trong mô hình MH-CC; nếu nút T_{k-1} trực tiếp truyền dữ liệu đến T_k thì công suất phát của T_{k-1} sẽ là P . Trong trường hợp, nút chuyển tiếp R_k được sử dụng thì công suất phát của T_{k-1} và R_k sẽ là $P_{T_{k-1}} = P_{R_k} = P/2(\forall k)$. Mục đích của việc phân bổ công suất này là để có sự so sánh công bằng giữa truyền trực tiếp và truyền chuyển tiếp.

Tiếp đến, chúng tôi trình bày nguyên lý hoạt động của kỹ thuật truyền thông cộng tác tăng cường tại chặng thứ k trong mô hình MH-CC. Từ công thức (2), ta viết lại tỷ số SNR tức thời trên kênh trực tiếp $T_{k-1} \rightarrow T_k$ như sau:

$$\psi_{T_{k-1}, T_k} = \frac{P g_{T_{k-1}, T_k}}{\sigma_0^2} = \Delta g_{T_{k-1}, T_k}, \quad (3)$$

với $\Delta = P / \sigma_0^2$.

Nếu $\psi_{T_{k-1}, T_k} > \psi_{th}$ thì kênh truyền trực tiếp được dùng, và nếu $\psi_{T_{k-1}, T_k} \leq \psi_{th}$, kênh chuyển tiếp sẽ được sử dụng. Ở đây, ta lưu ý rằng bởi vì các nút T_{k-1} và T_k ở trong tầm truyền của nhau nên các nút này sẽ thường xuyên trao đổi các thông điệp để bảo trì mạng (như định kỳ trao đổi các

gói HELLO trong giao thức AODV [30]). Do đó, ta có thể giả sử T_{k-1} và T_k biết thông tin trạng thái kênh truyền g_{T_{k-1}, T_k} . Ngoài ra, ta cũng có thể giả sử T_{k-1} và T_k biết thông tin g_{T_{k-1}, T_k} thông qua hoạt động bắt tay giữa T_{k-1} và T_k ở pha thiết lập trước khi sự truyền dữ liệu bắt đầu [31]. Do đó, T_{k-1} có thể quyết định sử dụng kênh trực tiếp hoặc kênh chuyển tiếp bằng cách so sánh ψ_{T_{k-1}, T_k} với giá trị ψ_{th} .

Một khi kênh chuyển tiếp được sử dụng, tỷ số SNR tức thời của các kênh $T_{k-1} \rightarrow R_k$ và $R_k \rightarrow T_k$ lần lượt là:

$$\psi_{T_{k-1}, R_k} = \frac{\Delta}{2} g_{T_{k-1}, R_k}, \psi_{R_k, T_k} = \frac{\Delta}{2} g_{R_k, T_k}. \quad (4)$$

Ta lưu ý rằng hệ số $1/2$ trong phương trình (4) là do các nút T_{k-1} và T_k phát với công suất $P/2$.

III. ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

Mục này sẽ đưa ra các công thức toán học đánh giá BLER toàn trình của mô hình đề xuất. Trước tiên, ta xét BLER toàn trình của mô hình MH-DT [23]-[24].

A. Mô hình MH-DT

Khi các nút chuyển tiếp T_k sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp có lựa chọn (SDF: Selective Decode-and-Forward) [32], sử dụng [23, công thức (10)], ta viết công thức tính BLER toàn trình của mô hình MH-DT như sau:

$$\begin{aligned} \text{BLER}_{e2e}^{\text{MH-DT}} &= \text{BLER}_1^{\text{MH-DT}} \\ &+ \sum_{k=2}^K \left[\text{BLER}_k^{\text{MH-DT}} \times \prod_{u=1}^{k-1} (1 - \text{BLER}_u^{\text{MH-DT}}) \right], \end{aligned} \quad (5)$$

với $\text{BLER}_k^{\text{MH-DT}}$ là BLER ở chặng thứ k trong MH-DT.

Sử dụng công thức (6) trong tài liệu [23], $\text{BLER}_k^{\text{MH-DT}}$ được viết dưới dạng sau:

$$\text{BLER}_k^{\text{MH-DT}} \approx \int_0^{+\infty} Q\left(\frac{C(x) - r_{DT}}{\sqrt{V(x)/m}}\right) f_{\psi_{T_{k-1}, T_k}}(x) dx, \quad (6)$$

ở đây, $Q(\cdot)$ là hàm Gaussian Q [33], và

$$V(x) = \left(1 - \frac{1}{(1+x)^2}\right) (\log_2(e))^2, C(x) = \log_2(1+x). \quad (7)$$

Trong công thức (6) ở trên, hàm PDF $f_{\psi_{T_{k-1}, T_k}}(x)$ được tính, dựa vào các công thức (1) và (3), như sau:

$$f_{\psi_{T_{k-1}, T_k}}(x) = \frac{\Omega_{T_{k-1}, T_k}}{\Delta} \exp\left(-\frac{\Omega_{T_{k-1}, T_k}}{\Delta} x\right). \quad (8)$$

Thay (8) vào (6), ta có:

$$\begin{aligned} \text{BLER}_k^{\text{MH-DT}} &\approx \\ &\int_0^{+\infty} Q\left(\frac{C_{DT}(x) - r_{DT}}{\sqrt{V_{DT}(x)/m}}\right) \frac{\Omega_{A,B}}{\Delta} \exp\left(-\frac{\Omega_{A,B}}{\Delta} x\right) dx. \end{aligned} \quad (9)$$

Để tính tích phân trong công thức (9), ta có thể sử dụng các phần mềm như Matlab hoặc Mathematica. Sau đó, ta thay $\text{BLER}_k^{\text{MH-DT}}$ vào công thức (5) để có được BLER toàn trình cho mô hình MH-DT.

B. Mô hình MH-CC

Giả sử tất cả các nút T_k và R_k trong MH-CC đều sử dụng kỹ thuật SDF; tương tự công thức (5), BLER toàn trình của mô hình MH-CC cũng được viết như sau:

$$\text{BLER}_{e2e}^{\text{MH-CC}} = \text{BLER}_1^{\text{MH-CC}} + \sum_{k=2}^K \left[\text{BLER}_k^{\text{MH-CC}} \times \prod_{u=1}^{k-1} (1 - \text{BLER}_u^{\text{MH-CC}}) \right], \quad (10)$$

với $\text{BLER}_k^{\text{MH-CC}}$ là BLER ở chặng thứ k trong MH-CC.

Với truyền thông cộng tác tăng cường được sử dụng ở chặng thứ k , $\text{BLER}_k^{\text{MH-CC}}$ được tính như sau:

$$\text{BLER}_k^{\text{MH-CC}} = \text{BLER}_{k,\text{DT}}^{\text{MH-CC}} + \text{BLER}_{k,\text{CC}}^{\text{MH-CC}}. \quad (11)$$

Trong công thức (11), $\text{BLER}_{k,\text{DT}}^{\text{MH-CC}}$ là BLER trong trường hợp đường truyền trực tiếp được sử dụng, và $\text{BLER}_{k,\text{CC}}^{\text{MH-CC}}$ là BLER trong trường hợp đường truyền chuyển tiếp được sử dụng. Xét $\text{BLER}_{k,\text{DT}}^{\text{MH-CC}}$, ta có:

$$\text{BLER}_{k,\text{DT}}^{\text{MH-CC}} \approx \int_0^{+\infty} Q \left(\frac{C_{\text{DT}}(x) - r_{\text{DT}}}{\sqrt{V_{\text{DT}}(x)/m}} \right) f_{\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}}}(x) dx, \quad (12)$$

với $f_{\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}}}(x)$ là hàm PDF của $\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}}$ trong điều kiện $\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}} > \psi_{\text{th}}$.

Để tìm $f_{\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}}}(x)$, trước hết ta cần tìm hàm CDF có điều kiện $F_{\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}}}(x)$. Thật vậy, ta có:

$$F_{\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}}}(x) = \Pr(\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}} < x, \psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}} > \psi_{\text{th}}) = \begin{cases} 0, & x \leq \psi_{\text{th}} \\ \exp\left(-\frac{\Omega_{T_{k-1},T_k} x}{\Delta}\right) - \exp\left(-\frac{\Omega_{T_{k-1},T_k} \psi_{\text{th}}}{\Delta}\right), & x > \psi_{\text{th}} \end{cases} \quad (13)$$

Tiến hành lấy đạo hàm cho hàm CDF trong (13), ta có được hàm PDF có điều kiện $f_{\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}}}(x)$ như sau:

$$f_{\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq \psi_{\text{th}} \\ \frac{\Omega_{T_{k-1},T_k}}{\Delta} \exp\left(-\frac{\Omega_{T_{k-1},T_k} x}{\Delta}\right), & x > \psi_{\text{th}} \end{cases} \quad (14)$$

Thay công thức (14) vào công thức (12), ta được BLER ở chặng thứ k khi đường truyền trực tiếp được sử dụng:

$$\text{BLER}_{k,\text{DT}}^{\text{MH-CC}} \approx \int_{\psi_{\text{th}}}^{+\infty} Q \left(\frac{C_{\text{DT}}(x) - r_{\text{DT}}}{\sqrt{V_{\text{DT}}(x)/m}} \right) \frac{\Omega_{T_{k-1},T_k}}{\Delta} \exp\left(-\frac{\Omega_{T_{k-1},T_k} x}{\Delta}\right) dx. \quad (15)$$

Xét BLER trong trường hợp kênh chuyển tiếp ở chặng thứ k được sử dụng, ta có:

$$\text{BLER}_{k,\text{CC}}^{\text{MH-CC}} = \Pr(\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}} \leq \psi_{\text{th}}) \times \left[\text{BLER}_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}} + (1 - \text{BLER}_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}}) \text{BLER}_{R_k,T_k}^{\text{MH-CC}} \right]. \quad (16)$$

Trong công thức (16), $\text{BLER}_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}}$ là BLER trên kênh liên kết giữa T_{k-1} và R_k , và $\text{BLER}_{R_k,T_k}^{\text{MH-CC}}$ là BLER trên kênh liên kết giữa R_k và T_k .

Đầu tiên, ta tính được $\Pr(\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}} \leq \psi_{\text{th}})$ trong (16) như:

$$\Pr(\psi_{T_{k-1},T_k}^{\text{MH-CC}} \leq \psi_{\text{th}}) = 1 - \exp\left(-\frac{\Omega_{T_{k-1},T_k} \psi_{\text{th}}}{\Delta}\right). \quad (17)$$

Xét $\text{BLER}_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}}$, tương tự công thức (6), ta có:

$$\text{BLER}_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}} \approx \int_0^{+\infty} Q \left(\frac{C(x) - r_{\text{CC}}}{\sqrt{V(x)/m}} \right) f_{\psi_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}}}(x) dx. \quad (18)$$

Kết hợp (1) và (4), ta đạt được $f_{\psi_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}}}(x)$ như sau:

$$f_{\psi_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}}}(x) = \frac{2\Omega_{T_{k-1},T_k}}{\Delta} \exp\left(-\frac{2\Omega_{T_{k-1},T_k}}{\Delta} x\right). \quad (19)$$

Thay công thức (19) vào công thức (18), ta có:

$$\text{BLER}_{T_{k-1},R_k}^{\text{MH-CC}} \approx \int_0^{+\infty} Q \left(\frac{C(x) - r_{\text{CC}}}{\sqrt{V(x)/m}} \right) \frac{2\Omega_{T_{k-1},R_k}}{\Delta} \exp\left(-\frac{2\Omega_{T_{k-1},R_k}}{\Delta} x\right) dx. \quad (20)$$

Tương tự, $\text{BLER}_{R_k,T_k}^{\text{MH-CC}}$ được tính bằng biểu thức sau:

$$\text{BLER}_{R_k,T_k}^{\text{MH-CC}} \approx \int_0^{+\infty} Q \left(\frac{C(x) - r_{\text{CC}}}{\sqrt{V(x)/m}} \right) \frac{2\Omega_{R_k,T_k}}{\Delta} \exp\left(-\frac{2\Omega_{R_k,T_k}}{\Delta} x\right) dx. \quad (21)$$

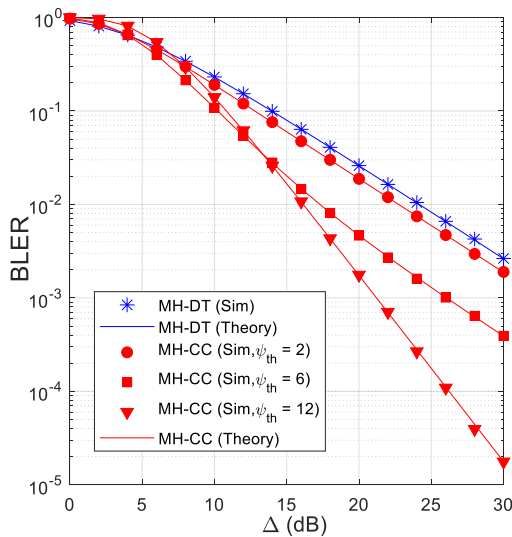
Kết hợp các công thức (10), (11), (15), (16), (17), (20) và (21), ta đạt được biểu thức tính BLER toàn trình cho mô hình đề xuất MH-CC.

IV. KẾT QUẢ

Chúng tôi thực hiện mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng các phân tích lý thuyết trong mục III. Trong các mô phỏng, giả sử khoảng cách giữa các nút trên mỗi chặng đều bằng nhau và bằng L : $d_{T_{k-1},T_k} = L, \forall k$. Hơn nữa, nút chuyển tiếp cộng tác R_k cách đều các nút T_{k-1} và T_k : $d_{T_{k-1},R_k} = d_{R_k,T_k} = L/2$. Cũng trong các mô phỏng, chúng tôi cố định các tham số hệ thống như sau: số bit thông tin $\delta = 256$ và hệ số suy hao đường truyền $\beta = 3$. Chúng tôi cũng lưu ý rằng việc chọn vị trí của các nút R_k như trên chỉ với mục đích đơn giản hóa môi trường mô phỏng, để tập trung vào đánh giá xu hướng hiệu năng của các mô hình. Thật vậy, các biểu thức đạt được trong bài báo này là các biểu thức dạng chữ, cho nên chúng có thể áp dụng cho mọi giá trị tham số của hệ thống cũng như vị trí và khoảng cách của các nút trong thực tế.

Hình 3 vẽ BLER toàn trình của mô hình MH-CC và mô hình MH-DT theo giá trị của Δ (dB) khi số chặng

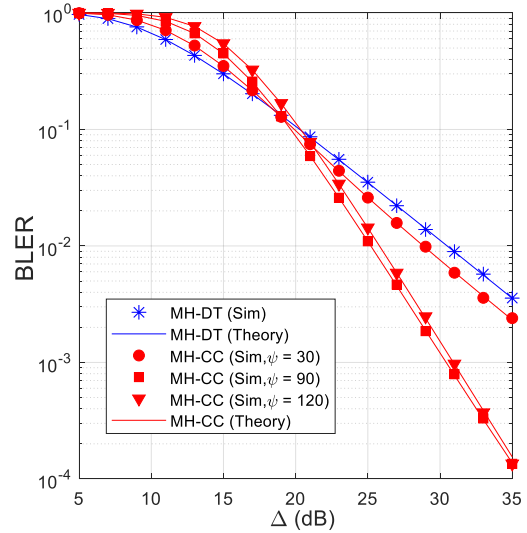
bằng 4 ($K=4$), số CU bằng 256 ($m=256$) và khoảng cách giữa các nút ở các chặng bằng 0.5 ($L=0.5$). Quan sát hình vẽ, ta thấy BLER toàn trình của cả hai mô hình đều giảm khi tăng Δ , bởi vì tăng Δ cũng là tăng công suất phát của các nút phát. Hình 3 cũng cho ta thấy BLER của mô hình MH-DT lớn hơn mô hình MH-CC khi Δ có giá trị trung bình và lớn. Ta cũng thấy rằng giá trị của ψ_{th} ảnh hưởng lớn đến hiệu năng của mô hình MH-CC. Thật vậy, khi $\psi_{th}=2$ thì BLER của MH-CC thấp hơn các trường hợp còn lại khi giá trị Δ thấp. Như ta thấy, khi Δ có giá trị trung bình thì BLER của MH-CC với $\psi_{th}=6$ là thấp nhất, và khi Δ lớn, thì BLER của MH-CC với $\psi_{th}=12$ lại có giá trị thấp nhất. Như vậy, việc thiết kế giá trị ψ_{th} thích hợp sẽ nâng cao đáng kể hiệu năng của mô hình MH-CC. Ta thấy rằng khi ngưỡng ψ_{th} quá thấp thì hầu như đường truyền trực tiếp sẽ luôn được sử dụng ở các chặng, và vì thế mạng không tận dụng được ưu điểm của kênh chuyển tiếp. Ví dụ, Hình 3 cho ta thấy khi $\psi_{th}=2$ thì BLER của MH-CC gần như song song với BLER của MH-DT và sự chênh lệch giá trị BLER của hai mô hình này là thấp nhất trong tất cả các trường hợp của ψ_{th} . Tiếp đến, nếu ta thiết kế giá trị ψ_{th} quá lớn thì hầu như kênh chuyển tiếp sẽ được sử dụng khi giá trị Δ nhỏ và trung bình. Hơn nữa, khi Δ nhỏ và trung bình thì sự truyền dữ liệu trên kênh chuyển tiếp sẽ không hiệu quả bởi công suất phát của T_{k-1} và R_k chỉ bằng một nửa ($P/2$) khi so với trường hợp T_{k-1} truyền trực tiếp đến T_k . Đây là nguyên nhân tại sao khi $\psi_{th}=12$ và Δ nhỏ thì BLER của mô hình MH-CC là cao nhất khi so với các trường hợp khác, và khi Δ lớn thì BLER lại đạt giá trị thấp nhất và giảm nhanh nhất. Cuối cùng, như ta có thể quan sát, các kết quả mô phỏng (Sim) và lý thuyết (Theory) trùng với nhau. Điều này kiểm chứng tính chính xác của các công thức toán học đưa ra trong Mục 3.



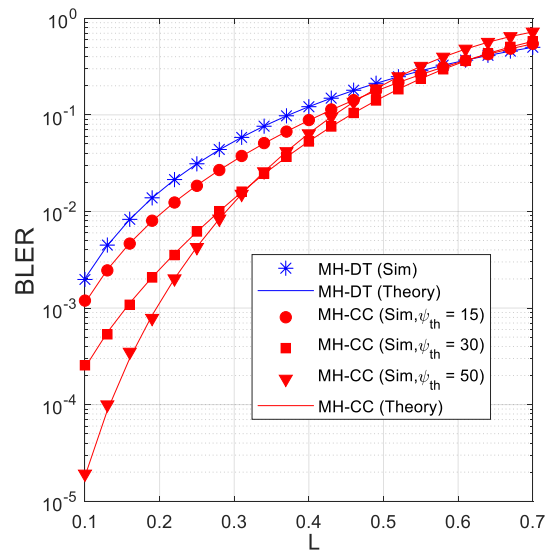
Hình 3. BLER vẽ theo Δ (dB) với $K=4$, $m=256$, $L=0.5$.

Hình 4 vẽ BLER toàn trình của mô hình MH-CC và MH-DT theo Δ (dB) khi $K=5$, $m=200$ và $L=0.3$. Tương tự như Hình 3, mô hình MH-CC chỉ đạt được hiệu năng tốt hơn mô hình MH-DT khi Δ đạt giá trị trung

bình và cao. Hơn nữa, việc thiết kế giá trị ngưỡng ψ_{th} phù hợp cũng sẽ tối ưu được hiệu năng BLER toàn trình cho mô hình MH-CC. Trong Hình 4, ta có thể quan sát rằng khi $\psi_{th}=90$ thì BLER của mô hình MH-CC đạt giá trị thấp nhất trong tất cả các trường hợp. Hơn nữa, khi $\psi_{th}=90$ và $\psi_{th}=120$ thì BLER của mô hình MH-CC giảm nhanh hơn khi so sánh với trường hợp $\psi_{th}=30$. Ta cũng lưu ý rằng khi thay đổi thông số hệ thống thì giá trị ngưỡng ψ_{th} trong Hình 4 là lớn hơn khi so với ψ_{th} trong Hình 3. Một lần nữa, các kết quả mô phỏng đã kiểm chứng sự chính xác của các phân tích lý thuyết.



Hình 4. BLER vẽ theo Δ (dB) với $K=5$, $m=200$, $L=0.3$.

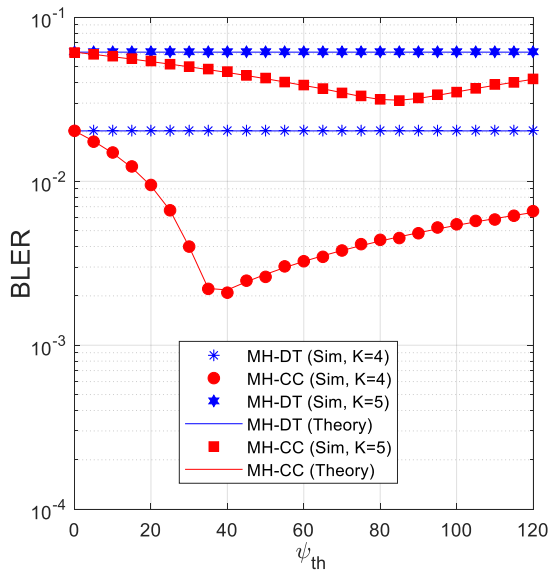


Hình 5. BLER vẽ theo L với $K=6$, $m=300$, $\Delta=20$ (dB).

Hình 5 vẽ BLER toàn trình của mô hình MH-CC và mô hình MH-DT theo khoảng cách giữa các nút T_{k-1} và T_k ở mỗi chặng (L). Các thông số hệ thống khác được cố định như sau: $K=6$, $m=300$ và $\Delta=20$ dB. Như ta có thể thấy, khi tăng khoảng cách ở các chặng thì BLER của cả hai mô hình sẽ lớn hơn. Một lần nữa, việc chọn

ngưỡng ψ_{th} sẽ ảnh hưởng lớn đến hiệu năng BLER của mô hình đề xuất. Như quan sát từ Hình 5, BLER của mô hình MH-CC đạt giá trị BLER thấp nhất khi giá trị ψ_{th} lớn và khi giá trị L nhỏ. Đó là vì với $\Delta=20$ dB thì sự truyền dữ liệu thông qua chuyển tiếp sẽ đạt được hiệu quả cao. Hơn thế nữa, khi giá trị khoảng cách L nhỏ thì sự truyền dữ liệu thông qua chuyển tiếp lại càng phát huy bởi lúc này khoảng cách giữa nút chuyển tiếp R_k đến các nút T_{k-1} và T_k chỉ là $L/2$.

Hình 6 vẽ BLER toàn trình của mô hình MH-CC và mô hình MH-DT theo ngưỡng ψ_{th} khi $L=0.3$, $m=200$, $\Delta=22.5$ (dB). Bởi vì giá trị của Δ lớn, nên Hình 6 cho ta thấy mô hình đề xuất MH-CC đạt giá trị BLER thấp hơn mô hình MH-DT ở tất cả các giá trị của ψ_{th} . Ta cũng lưu ý rằng khi $\psi_{th}=0$ thì MH-CC sẽ trở thành MH-DT vì sự truyền trên tất cả các chặng đều sử dụng kỹ thuật truyền trực tiếp. Hình 6 cũng cho ta thấy BLER của cả hai mô hình tăng khi số chặng tăng. Bởi vì khi khoảng cách giữa các chặng được cố định bằng 0.3 thì số chặng tăng sẽ làm tăng khoảng cách giữa nguồn và đích, và vì thế BLER cũng tăng. Cuối cùng, điều chúng ta quan tâm nhất đó là tồn tại giá trị tối ưu của ψ_{th} để mà BLER của mô hình MH-CC đạt giá trị thấp nhất. Thật vậy, khi $K=4$ và $K=5$ thì giá trị tối ưu của ψ_{th} lần lượt là $\psi_{th}^*=40$ và $\psi_{th}^*=85$. Kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong việc thiết kế ngưỡng ψ_{th} để tối ưu hiệu năng cho mô hình MH-CC.



Hình 6. BLER vẽ theo ψ_{th} với $L=0.3$, $m=200$, $\Delta=22.5$ (dB).

V. KẾT LUẬN

Trong công trình này, chúng tôi đã đề xuất mô hình chuyển tiếp đa chặng sử dụng truyền thông cộng tác tăng cường tại mỗi chặng trong truyền thông gói tin ngắn. Hiệu năng của mô hình đề xuất đã được đánh giá thông qua mô phỏng và phân tích toán học. Các kết quả cho thấy rằng mô hình đề xuất đạt hiệu năng tốt hơn mô hình chuyển tiếp đa chặng thông thường ở các khoảng giá trị trung bình và cao của công suất phát. Hơn nữa, phương pháp

truyền thông cộng tác tăng cường trong bài báo cũng dễ dàng được thực hiện trong thực tế, và đạt được hiệu quả sử dụng phổ tốt hơn kỹ thuật truyền thông cộng tác thông thường. Các kết quả cũng cho thấy rằng việc thiết kế giá trị ngưỡng ψ_{th} đóng vai trò then chốt trong việc nâng cao hiệu năng cho mô hình đề xuất.

Trong tương lai, chúng tôi sẽ phát triển mô hình đề xuất với các kỹ thuật lựa chọn nút chuyển tiếp đơn phần và toàn phần tại mỗi chặng. Hơn nữa, hiệu năng của các mô hình phát triển này sẽ được đánh giá trên các kênh truyền tổng quát như Nakagami-m, Rician, v.v.

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 02-HV-2022-RD_VT2.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] Nikolaos A.Pantazis, Stefanos A.Nikolidakis, and Dimitrios D.Vergados, "Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no.2, pp.551-591, Second Quarter 2013.

[2] G. Han, J. Jiang, C. Zhang, T. Q. Duong, M. Guizani and G. K. Karagiannidis, "A Survey on Mobile Anchor Node Assisted Localization in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 2220-2243, Thirdquarter 2016.

[3] F. S. Al-Qahtani, R. M. Radaydeh, S. Hessien, T. Q. Duong, and H. Alnuweiri, "Underlay Cognitive Multihop MIMO Networks With and Without Receive Interference Cancellation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 4, pp. 1477-1493, Apr. 2017.

[4] H. Yetgin, K. T. K. Cheung, M. El-Hajjar and L. Hanzo, "A Survey of Network Lifetime Maximization Techniques in Wireless Sensor Networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no. 2, pp. 828 - 854, Secondquarter 2017.

[5] T. D. Hieu, T. T. Duy and 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.

[6] A. Behnad, N. C. Beaulieu, B. Maham, "Multi-Hop Amplify-and-Forward Relaying on Nakagami-0.5 Fading Channels," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 1, no. 3, pp. 173 – 176, Jun. 2012.

[7] A. Behnad, X. Wang, "Accuracy of Harmonic Mean Approximation in Performance Analysis of Multihop Amplify-and-Forward Relaying," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 125-128, Apr. 2014.

[8] H. V. Khuong and P. C. Sofotasios, "Exact bit-error-rate analysis of underlay decode-and-forward multi-hop cognitive networks with estimation errors," *IET Communications*, vol. 7, no. 18, pp. 2122-2132, Dec. 2013.

[9] 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.

- [10] J. N. Laneman, D. N. C. Tse and G. W. Wornell, "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [11] G. Farhadi and N. C. Beaulieu, "On the Performance Of Amplify-and-Forward Cooperative Systems With Fixed Gain Relays," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 5, pp. 1851-1856, May 2008.
- [12] C. Conne, J. MinChul, Z. Yi, H. Song, I. M. Kim, "SER analysis and PDF derivation for multihop amplify-and-forward relay systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 58, no. 8, pp. 2413-2424, Aug. 2010.
- [13] S. Sharma, Y. Shi, Y. T. Hou, H. D. Sherali, S. Kompella, S. F. Midkiff, "Joint Flow Routing and Relay Node Assignment in Cooperative Multi-Hop Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 30, no. 2, pp. 254 – 262, Feb. 2012.
- [14] P. T. Tin, D. T. Hung, N. N. Tan, T. T. Duy, M. Voznak, "Secrecy Performance Enhancement for Underlay Cognitive Radio Networks Employing Cooperative Multi-hop Transmission With and Without Presence of Hardware Impairments," *Entropy MDPI*, vol. 21, no. 2, (217), Feb. 2019.
- [15] P. M. Nam, T. T. Duy, P. V. Ca, P. N. Son, N. H. An, "Outage Performance of Power Beacon-Aided Multi-Hop Cooperative Cognitive Radio Protocol Under Constraint of Interference and Hardware Noises," *Electronics MDPI*, vol. 9, no. 6, pp. 1-19, Jun. 2020.
- [16] 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.
- [17] H. K. Boddapati, M. R. Bhatnagar, S. Prakriya, "Performance of Incremental Relaying Protocols for Cooperative Multihop CRNs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 7, pp. 6006 - 6022, Jul. 2018.
- [18] 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.
- [19] B. An, T. T. Duy and H.Y. Kong, "A Cooperative Transmission Strategy using Entropy-based Relay Selection in Mobile Ad-hoc Wireless Sensor Networks with Rayleigh Fading Environments," *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 3, no. 2, pp.147-162, Feb. 2009.
- [20] 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," in *Proc. of 2022 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, HaNoi, Oct. 2022, pp. 338-343.
- [21] N. T. Y. Linh, N. H. Tú, V. N. Q. Bao, "Đánh Giá Hiệu Năng Mạng Chuyển Tiếp Từng Phần Với Đa Anten Thu Trong Truyền Thông GóI Tin Ngắn," *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, vol. 1, no. 4A, pp. 53-61, Dec. 2020.
- [22] P. N. Son, T. T. Duy, P. V. Tuan, H. V. Phuoc, "Short Packet Communication in Underlay Cognitive Network Assisted by Intelligent Reflecting Surface," *ETRI Journal*, 2022. Online First, Doi: 10.4218/etrij.2021-0435.
- [23] H. V. Hóa, N. H. Tú, V. N. Q. Bao, "Đánh Giá Hiệu Năng Mạng Chuyển Tiếp Đa Chặng Trong Truyền Thông GóI Tin Ngắn," *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, vol. 1, no. 4B, pp. 43-49, Dec. 2020.
- [24] V. N. Q. Bao, T. T. Thanh, "Mạng Chuyển Tiếp Đa Chặng Dạng Nền Trong Truyền Thông GóI Tin Ngắn: Đánh Giá Tỷ Lệ Lỗi Khối," *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, vol. 1, no. 4B, pp. 69-74, Dec. 2020.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] T. T. Duy, V.N.Q. Bao, "Performance Analysis of Cooperative-based Multi-hop Transmission Protocols in Underlay Cognitive Radio with Hardware Impairment," *VNU Journal of Computer Science and Communication Engineering*, vol. 31, no. 2, pp. 15-28, Nov. 2015.
- [28] P. M. Nam, H. D. Hung, T. T. Duy and Thuong L. T., "Security-Reliability Tradeoff of MIMO TAS/SC Networks using Harvest-to-Jam Cooperative Jamming Methods With andom Jammer Location," *ICT Express*, 2022. Online First, Doi: 10.1016/j.icte.2021.11.003.
- [29] N. T. Y. Linh, N. H. Tu, P. N. Son and V. N. Q. Bao, "Dual-hop relaying networks for short-packet URLLCs: Performance analysis and optimization," *Journal of Communications and Networks*, vol. 24, no. 4, pp. 408-418, Aug. 2022.
- [30] C. E. Perkins and E. M. Royer, "Ad-hoc on-demand distance vector routing," in *Proc. of WMCSA'99, Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 90-100, 1999.
- [31] P. Liu, Z. Tao, Z. Lin, E. Erkip, S. Panwar, "Cooperative wireless communications: a cross-layer approach," *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 4, pp. 84-92, Aug. 2006.
- [32] M. Khafagy, A. Ismail, M. -S. Alouini and S. Aissa, "On the Outage Performance of Full-Duplex Selective Decode-and-Forward Relaying," *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 1180-1183, June 2013.
- [33] D. Zwillinger. *Table of Integrals, Series, and Products*. Elsevier, 2014.

PERFORMANCE ANALYSIS FOR SHORT-PACKET COMMUNICATIONS IN MULTI-HOP COOPERATIVE NETWORKS WITH INCREMENTAL RELAYING PROTOCOL

Abstract: In this paper, we propose a multi-hop relaying scheme using cooperative communication at each hop to enhance performance for short packet communication networks. We also study a simple incremental cooperation approach at each hop, where if instantaneous signal-to-noise ratio of the direct link is below a pre-determined threshold, the relaying link is used to transmit the data. We derive expressions of block error rate of the proposed protocol over the Rayleigh

fading channel. Finally, Monte-Carlo simulation is performed to verify the theoretical results, as well as to compare the performance of the proposed protocol with the conventional multi-hop relaying one.

Keywords: multi-hop relaying, cooperative communication, short-packet communication, block error rate.



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. Phạm Minh Quang hiện đang công tác tại Khoa Viễn thông 2 thuộc Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông cơ sở tại TP. Hồ Chí Minh. Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: thông tin vô tuyến, kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, phân tích hiệu năng mạng vô tuyến.

Email: phamminhquang@ptithcm.edu.vn



Trần Trung Duy nhận bằng Kỹ sư tại Đại học Bách Khoa TP. Hồ Chí Minh vào năm 2007, và bằng Tiến sĩ vào năm 2013 tại Đại học Ulsan, Hàn Quốc. 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: 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