

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG MẠNG CHUYÊN TIẾP ĐA CHẶNG TRONG TRUYỀN THÔNG GÓI TIN NGẮN

Huỳnh Văn Hóa*, Ngô Hoàng Tú*, Võ Nguyễn Quốc Bảo*

* Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông

* Khoa Công nghệ thông tin, Trường Đại học Giao Thông Vận Tải thành phố Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Trong bài báo này, chúng tôi phân tích tỉ lệ lỗi khối của mạng truyền thông gói tin ngắn nhằm mở rộng vùng phủ sóng và giảm tỉ lệ lỗi khối dưới tác động của kênh truyền fading Rayleigh. Trong mô hình đề xuất, nút đích sẽ nhận được dữ liệu thông qua các nút chuyển tiếp. Tỉ lệ lỗi khối ở kênh truyền này được chứng minh dưới cả hai dạng là chính xác và xấp xỉ bằng biểu thức dạng tường minh (closed-form expression). Cuối cùng, chúng tôi thực hiện mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng lại các kết quả đã phân tích được.

Từ khóa- fading Rayleigh, giải mã và chuyển tiếp, tỉ lệ lỗi khối, truyền thông gói tin ngắn.

I. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, thế giới chúng ta đang hướng đến nền công nghiệp tiên tiến nhằm phục vụ nhu cầu ngày càng tăng cao của con người trong hầu hết các lĩnh vực nhằm mục đích chính là cải thiện tính linh hoạt trong quy trình sản xuất và tạo ra nhiều sản phẩm hơn, tiết kiệm tài nguyên và tăng tính tiện dụng hơn bằng cách sử dụng kết nối các cảm biến và dữ liệu với quy mô lớn, chẳng hạn như nhà máy thông minh, nông nghiệp thông minh hay y tế thông minh, ... nói chung cũng như trong lĩnh vực thông tin di động nói riêng nhằm tập trung và tăng cường khả năng giao tiếp, kết nối giữa con người và máy móc, và giữa máy móc với máy móc lẫn nhau sử dụng cảm biến [1]. Để đáp ứng được những tiêu chí trên, các nhà khoa học trong nước cũng như trên thế giới đã và đang tích cực nghiên cứu phát triển các kỹ thuật mới, chẳng hạn như kỹ thuật đa truy nhập không trực giao NOMA [2], kỹ thuật truyền dẫn song công [3] và kỹ thuật MIMO [4]. Với sự phát triển của các kỹ thuật mới này sẽ hứa hẹn tạo ra thế hệ mạng di động mới, đó là mạng di động thế hệ thứ 5 (5G) với khả năng truyền tin hiệu có tốc độ nhanh hơn và có băng thông lớn hơn.

Với những tiềm năng to lớn từ các kỹ thuật mới mang lại hứa hẹn sẽ tháo gỡ được những hạn chế còn tồn đọng trong mạng di động hiện tại. Thứ nhất là hỗ trợ truyền thông tin với dung lượng lớn hơn giúp tiết kiệm được thời gian truyền nhận dữ liệu giữa các thiết bị. Bên cạnh đó, chính là khả năng truyền thông tin với thời gian thực khi mà các thiết bị và con người giao tiếp với nhau qua khoảng cách xa, với độ chính xác lên đến mức micro giây và cho phép

các thiết bị đồng bộ hóa thời gian. Để kết nối các thiết bị theo thời gian thực, đồng nghĩa với việc các thiết bị cần phải truyền các gói tin đáp ứng được các yêu cầu chất lượng với sự ràng buộc về độ trễ phải cực thấp và độ tin cậy cao. Chính vì vậy, truyền thông gói tin ngắn (short packet) [5, 6] hiện đang là ứng viên hàng đầu để đáp ứng được các yêu cầu như trên và cũng đã và đang nhận được nhiều sự quan tâm của các nhà nghiên cứu khoa học trên thế giới.

Hơn nữa, truyền thông chuyên tiếp đang được xem là giải pháp hiệu quả để cải thiện vùng phủ sóng nhằm nâng cao hiệu năng của hệ thống [7]. Cụ thể, trong [8], các tác giả đã đề xuất mạng chuyên tiếp từng phần, truyền thông đa chặng và truyền thông chuyên tiếp tăng cường được khảo sát lần lượt trong [9] và [10]. Hơn nữa, truyền thông chuyên tiếp cũng đã kết hợp hiệu quả với các kỹ thuật khác, chẳng hạn như kỹ thuật đa truy nhập không trực giao [2], kỹ thuật thu thập năng lượng [11, 12], vô tuyến nhận thức [13] và bảo mật lớp vật lý [14]. Rõ ràng, truyền thông chuyên tiếp là một kỹ thuật đầy tiềm năng với việc sử dụng các nút trung gian để chuyển tiếp dữ liệu từ thiết bị phát đến thiết bị thu với các mục đích chính như sau: Một là; làm giảm sự ảnh hưởng của hiệu ứng bóng mờ trong thông tin vô tuyến [15] gây cản trở trên đường truyền, ví dụ như các tòa nhà cao tầng, cây cối, ... giúp cho việc kết nối dữ liệu hoặc trao đổi thông tin giữa các thiết bị với nhau luôn được liên tục theo thời gian. Hai là; mở rộng vùng phủ sóng để truyền dữ liệu tới được những thiết bị có khoảng cách kết nối xa hơn để đảm bảo sự kết nối liên tục giữa các thiết bị lẫn nhau khi có sự thay đổi khoảng cách truyền. Ba là; việc mở rộng vùng phủ sóng sẽ giúp kết nối các thiết bị giao tiếp lẫn nhau được nhiều hơn. Có hai kỹ thuật chuyên tiếp được sử dụng trong các nghiên cứu gần đây, đó là kỹ thuật khuếch đại chuyên tiếp (AF) [16-18] và giải mã và chuyển tiếp (DF) [19-21]. Ngoài ra, trong mạng bảo mật ở lớp vật lý như bài báo của tác giả Nguyen Thi Yen Linh và các đồng tác giả [22] cũng đã nghiên cứu và cho thấy được hiệu năng của mạng chuyên tiếp đa chặng trong mạng vô tuyến.

Với những tính năng và lợi ích to lớn như trên sẽ hứa hẹn việc kết hợp kỹ thuật chuyên tiếp với công nghệ truyền thông gói tin ngắn sẽ nâng cao hiệu năng của mạng hơn nữa. Cụ thể, trong bài báo [23], các tác giả đã đề xuất mô

Tác giả liên hệ: Võ Nguyễn Quốc Bảo

Email: baovng@ptithcm.edu.vn

Đến tòa soạn: 10/2020, chỉnh sửa: 11/2020, chấp nhận đăng: 12/2020.

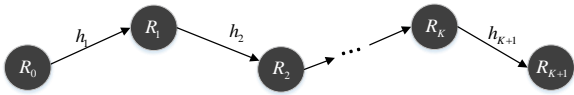
hình mạng truyền thông gói tin ngắn kết hợp với kỹ thuật chuyển tiếp theo phương thức đa truy nhập không trực giao (NOMA). Trong bài báo [24], Yifan Gu và các cộng sự đã nghiên cứu mô hình mạng truyền thông gói tin ngắn sử dụng kỹ thuật khuếch đại chuyển tiếp (AF). Các nghiên cứu này đều chứng minh được hiệu năng vượt trội của mạng chuyển tiếp trong truyền thông gói tin ngắn. Theo chúng tôi được biết, cho đến thời điểm hiện tại vẫn chưa có công trình nghiên cứu nào cho thấy sự ảnh hưởng đầy đủ các thông số của nút chuyển tiếp, khi mà số nút chuyển tiếp lớn hơn hai.

Trong nghiên cứu này, chúng tôi tiến hành thiết kế và phân tích một hệ thống mạng với số nút chuyển tiếp lớn hơn hai trong truyền thông gói tin ngắn, hoạt động dựa trên việc chuyển tiếp dữ liệu từ nguồn đến đích thông qua các nút chuyển tiếp. Để đánh giá chất lượng của hệ thống, chúng tôi đưa ra và phân tích biểu thức tính tỉ lệ lỗi khối dạng đóng trên kênh truyền fading Rayleigh.

Phần tiếp theo của bài báo được trình bày như sau. Phần II sẽ trình bày mô hình của hệ thống cũng như cách thức truyền dữ liệu từ nút nguồn đến nút đích thông qua các nút chuyển tiếp. Phần III sẽ trình bày phương pháp phân tích theo mô hình đề xuất để đánh giá chất lượng của hệ thống với thông số tỉ lệ lỗi khối với cả hai dạng chính xác và xấp xỉ. Phần IV là các kết quả tính toán sẽ được kiểm chứng lại bằng phần mềm Matlab. Cuối cùng là phần kết luận của bài báo.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Trong nghiên cứu này, chúng tôi đề xuất mô hình mạng chuyển tiếp đa chặng trong truyền thông gói tin ngắn để truyền thông tin từ nút nguồn đến nút đích như *Hình 1*.



Hình 1. Mô hình mạng chuyển tiếp đa chặng trong truyền thông gói tin ngắn

Các thành phần chính của hệ thống gồm một nút nguồn (R_0), một nút đích (R_{K+1}) và các nút chuyển tiếp, lần lượt được ký hiệu là R_1, R_2, \dots, R_K như *Hình 1*. Tại nút chuyển tiếp sẽ sử dụng kỹ thuật DF để giải mã và chuyển tiếp tín hiệu vừa nhận được đến nút chuyển tiếp kế tiếp. Gọi h_k là hệ số kênh truyền giữa R_{k-1} và R_k .

Hoạt động truyền tín hiệu của hệ thống thông qua các khe thời gian với tổng chiều dài gói tin là m , và gói tin này sẽ được chia thành các khối tin (blocklength) có chiều dài bằng nhau $\frac{m}{K+1}$ và được truyền từ R_0 đến R_{K+1} , với K là số chặng trong mạng. Ta có tín hiệu nhận được tại R_k ($k=1, K+1$)² là

$$y_k = \sqrt{P_{k-1}} h_k x + n_k, \quad (1)$$

² Giá trị $k=1, K+1$ sẽ được sử dụng xuyên suốt bài báo này.

với P_{k-1} là công suất phát của R_{k-1} , n_k là nhiễu Gauss trắng cộng AWGN tại nút chuyển tiếp thứ k với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai bằng σ_k^2 , và x là thông tin của nút nguồn có năng lượng chuẩn hóa $E\{|x|^2\} = 1$, với $E\{\cdot\}$ là toán tử kỳ vọng thống kê. Để công suất nhiễu trắng ở các máy thu là như nhau, chúng tôi giả sử $\sigma_k^2 = \sigma^2$.

Chúng tôi cũng giả sử rằng thông tin trạng thái kênh truyền (CSI) là hoàn hảo tại nút nguồn và các nút nhận tín hiệu và kênh truyền là kênh fading Rayleigh. Do đó, tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) nhận được tại R_k (được ký hiệu là γ_k) sẽ tuân theo phân bố mũ với giá trị trung bình được biểu diễn như sau

$$\bar{\gamma}_k = \frac{P_{k-1} \Omega_k}{\sigma^2}, \quad (2)$$

với Ω_k là độ lợi kênh trung bình tương ứng của đường truyền $R_{k-1} \rightarrow R_k$.

Áp dụng lý thuyết về phân bố mũ trong [25], ta có hàm phân bố tích lũy (CDF) và hàm mật độ xác suất (PDF) của γ_k được tính như sau

$$\begin{cases} F_{\gamma_k}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_k}\right) \\ f_{\gamma_k}(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}_k} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_k}\right) \end{cases}. \quad (3)$$

Theo như trong [26], mỗi giá trị của m nên lớn hơn 100, vì kênh truyền được giả sử hoạt động ở chế độ fading bán tĩnh (quasi-static fading) [27], nghĩa là hệ số kênh truyền không đổi trong suốt quá trình truyền tín hiệu từ nút nguồn đến nút đích và có thể sẽ thay đổi trong chu kỳ truyền tín hiệu tiếp theo. Khi R_0 truyền β bit thông tin đến R_{K+1} qua $K+1$ chặng trong suốt một chu kỳ truyền. Ta có tỉ lệ mã hóa của mỗi chặng là

$$r = \frac{(K+1)\beta}{m}. \quad (4)$$

Công thức số (4) biểu diễn tốc độ mã hóa của mỗi chặng trong $(K+1)$ chặng sẽ bằng số bit thông tin chia cho thời gian truyền của mỗi chặng.

III. ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG HỆ THỐNG

A. Tỉ lệ lỗi khối dạng chính xác

Trong truyền thông gói tin ngắn, khi chiều dài khối tin đủ lớn, tỉ lệ lỗi khối (BLER) trung bình được xấp xỉ như trong [27, Eq. (59)] và [28, Eq. (4)] theo từng chặng là

$$\text{BLER}_k \approx E_{\gamma_k} \left\{ Q \left(\frac{C(\gamma_k) - r}{\sqrt{V(\gamma_k)/m}} \right) \right\}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{BLER}_k &\approx \nu\sqrt{m} \int_{\rho_L}^{\rho_H} \left(1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_k}\right)\right) d\gamma \\ &= \nu\sqrt{m} \left[\rho_H - \rho_L + \bar{\gamma}_k \left(\exp\left(-\frac{\rho_H}{\bar{\gamma}_k}\right) - \exp\left(-\frac{\rho_L}{\bar{\gamma}_k}\right) \right) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{BLER}_{e_{2e}} &= \text{BLER}_1 + (1 - \text{BLER}_1)\text{BLER}_2 + \dots + (1 - \text{BLER}_1)\dots(1 - \text{BLER}_{K-1})\text{BLER}_K \\ &= \text{BLER}_1 + \sum_{k=2}^{K+1} \left(\text{BLER}_k \times \prod_{m=2}^k (1 - \text{BLER}_{m-1}) \right). \end{aligned} \quad (10)$$

với BLER_k là tỉ lệ lỗi khối của một chu kỳ truyền tín hiệu từ R_{k-1} đến R_k và được định nghĩa là $E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} xf_X(x)dx$.

Viết lại biểu thức (5) ở dạng tường minh, ta có tỉ lệ lỗi khối trung bình tại chặng thứ k được tính như sau

$$\text{BLER}_k \approx \int_0^{\infty} Q\left(\frac{C(\gamma_k) - r}{\sqrt{V(\gamma_k)/m}}\right) f_{\gamma_k}(\gamma) d\gamma, \quad (6)$$

với $f_X(x)$ là hàm mật độ xác suất của biến ngẫu nhiên X .

Bởi vì biểu thức $Q\left(\frac{C(\gamma_k) - r}{\sqrt{V(\gamma_k)/m}}\right)$ rất phức tạp nên sẽ rất khó để tìm ra biểu thức dạng tường minh (closed-form expression) cho công thức (6). Áp dụng [26, Eq. (4)], chúng tôi triển khai hàm xấp xỉ đối với hàm $Q(\cdot)$, cụ thể

$$\begin{aligned} \text{là } Q\left(\frac{C(\gamma_k) - r}{\sqrt{V(\gamma_k)/m}}\right) &\approx Z(\gamma_k), \text{ với} \\ Z(\gamma_k) &= \begin{cases} 1, & \gamma_k \leq \rho_L \\ \frac{1}{2} - \nu\sqrt{m}(\gamma_k - \theta), & \rho_L < \gamma_k < \rho_H \\ 0, & \gamma_k \geq \rho_H \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

với $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{2^{2r-1}}}$, $\theta = 2^r - 1$, $\rho_H = \theta + \frac{1}{2\nu\sqrt{m}}$ và $\rho_L = \theta - \frac{1}{2\nu\sqrt{m}}$.

Thay (7) vào (6), BLER_k được tính như sau

$$\text{BLER}_k = \int_0^{\infty} Z(\gamma_k) f_{\gamma_k}(\gamma) d\gamma = \nu\sqrt{m} \int_{\rho_L}^{\rho_H} F_{\gamma_k}(\gamma) d\gamma. \quad (8)$$

Thay (3) vào (8), ta tính được BLER_k của mỗi chặng như công thức (9).

Kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp có lựa chọn (SDF) là một kỹ thuật được áp dụng tại nút chuyển tiếp với cơ chế là nếu nút chuyển tiếp không giải mã đúng được dữ liệu nhận được thì sẽ không tiếp tục chuyển tiếp dữ liệu đến nút tiếp theo [29].

Giả sử các nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật SDF nên tỉ lệ lỗi khối toàn trình được tính theo công thức (10) (Chứng minh: Xem phụ lục A).

B. Tỉ lệ lỗi khối dạng xấp xỉ

Tiếp theo, chúng tôi sẽ trình bày dạng xấp xỉ của tỉ lệ lỗi khối để có đánh giá khách quan hơn về hiệu năng của hệ thống ở mức công suất nguồn phát cao. Dạng xấp xỉ này được xem như là một đường giới hạn trên (upper bound) cho các giá trị của tỉ lệ lỗi khối khi càng tăng mức công suất nguồn phát tiến ra vô cùng. Điều này có nghĩa là tỉ lệ lỗi khối toàn trình của hệ thống luôn đạt giá trị nhỏ hơn hoặc bằng giá trị đường giới hạn trên này cho dù có tăng công suất phát lớn thế nào đi chăng nữa. Mặt khác, đây cũng là điều mà chúng ta mong muốn vì tỉ lệ lỗi khối càng nhỏ thì hiệu năng hệ thống càng được cải thiện.

Sử dụng vô cùng bé tương đương của hàm $1 - \exp(-x) \approx x$ khi $x \rightarrow 0$, kết quả tiệm cận của BLER_k được tính như sau

$$\begin{aligned} \text{BLER}_{k,tc} &\approx \nu\sqrt{m} \int_{\rho_L}^{\rho_H} \frac{\gamma}{\bar{\gamma}_k} d\gamma \\ &= \frac{\nu\sqrt{m}}{\bar{\gamma}_k} \left(\frac{\rho_H^2 - \rho_L^2}{2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Dễ thấy rằng giá trị của tỉ lệ lỗi khối từng chặng BLER_k thì rất nhỏ khi công suất nguồn phát càng lớn. Khi đó, ta có $\text{BLER}_{k,tc} \approx 1$, điều này đồng nghĩa là $1 - \text{BLER}_{k,tc} \approx 1$. Tỉ lệ lỗi khối toàn trình dạng xấp xỉ có thể được viết lại như công thức (12).

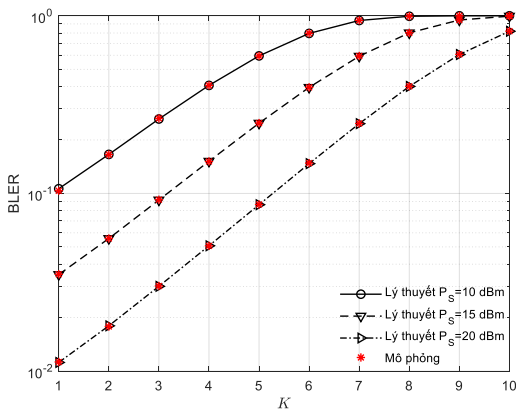
$$BLER_{e2e,tc} = BLER_{1,tc} + (1 - BLER_{1,tc})BLER_{2,tc} + \dots + (1 - BLER_{1,tc}) \dots (1 - BLER_{K-1,tc})BLER_{K,tc}$$

$$\approx \sum_{k=1}^{K+1} BLER_{k,tc} \tag{12}$$

IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần này, chúng tôi sử dụng phương pháp mô phỏng Monte-Carlo trên phần mềm Matlab cũng như trong sách mô phỏng [30] cho mô hình đề xuất để kiểm chứng lại các kết quả lý thuyết đã được trình bày ở phần trước.

Đơn giản và không mất tính tổng quát, chúng tôi xem xét mô hình tuyến tính đơn giản là nút nguồn, nút đích và các nút chuyển tiếp được đặt trên cùng một đường thẳng. Xem xét kênh chuẩn hóa với công suất nhiễu là $\sigma^2 = 0$ dBm. Một vài thông số để thực hiện mô phỏng như sau: số bit thông tin là $\beta = 256$ và chiều dài khối $m = 256$. Tương tự như các thông số trong [15], độ lợi kênh trung bình được tính theo mô hình suy hao trong không gian tự do là $\Omega_k = d_k^{-\eta}$, với η là hệ số suy hao của kênh truyền (giá trị điển hình của η là từ 2 đến 6). Trong nghiên cứu này, chúng tôi sử dụng $\eta = 3$. Chúng tôi giả sử rằng khoảng cách giữa nút R_0 và R_{K+1} được chuẩn hóa với $D = 1$, xem xét kênh truyền đối xứng với d_k là khoảng cách bằng nhau giữa các nút và $d_k = \frac{1}{K+1}$. Ngoài ra, chúng tôi cũng xem xét mô hình với giả sử phân bố công suất đều cho từng nút chuyển tiếp, nghĩa là $P_k = \frac{P_s}{K+1}$. Tổng công suất truyền của nguồn phát năng lượng P_s được khảo sát từ 0dBm đến 30dBm.

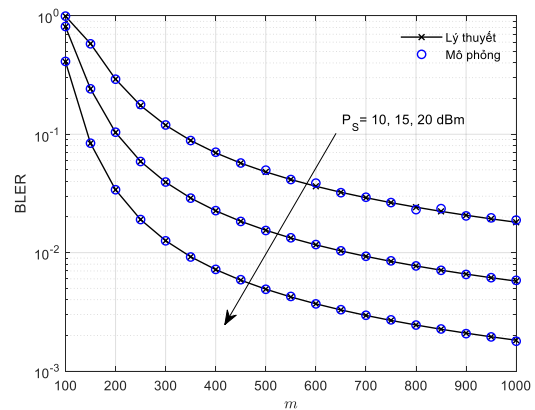


Hình 2. Ảnh hưởng của số nút chuyển tiếp lên hiệu năng hệ thống

Đầu tiên, chúng tôi sẽ khảo sát sự ảnh hưởng của số nút chuyển tiếp lên hiệu năng hệ thống như Hình 2 để tìm ra số lượng nút chuyển tiếp tối ưu cho mô hình. Mục tiêu là càng ít số lượng nút chuyển tiếp càng tốt mà hiệu năng hệ thống vẫn được cải thiện vì như vậy chúng ta sẽ tiết kiệm được chi phí triển khai và thậm chí là giảm thiểu được tổng độ trễ truyền khi truyền qua các nút chuyển tiếp.

Hình 2 cho chúng ta thấy được các kết quả đường lý thuyết (Analysis) hoàn toàn trùng khớp với các kết quả

đường mô phỏng (Simulations). Từ Hình 2, ta dễ dàng thấy được các giá trị của tỉ lệ lỗi khối toàn trình BLER càng giảm khi công suất phát tăng. Cụ thể, khi ta tăng công suất phát lần lượt là 10, 15 và 20 dBm, giá trị của tỉ lệ lỗi khối toàn trình BLER tương ứng là vào khoảng 10^{-1} , 2.5×10^{-2} và 0.1×10^{-2} . Điều này có nghĩa là khi ta càng tăng công suất phát của nguồn phát thì hiệu năng hệ thống sẽ càng được cải thiện như mong đợi. Đặc biệt, quan sát riêng lẻ trên cùng một giá trị công suất phát thì tỉ lệ lỗi khối đạt giá trị nhỏ nhất khi $K = 1$ trong tất cả các trường hợp khảo sát của P_s . Điều này có thể kết luận rằng đối với mô hình đề xuất này thì sử dụng một nút chuyển tiếp để truyền dữ liệu là hiệu quả nhất. Do đó, chúng tôi sẽ sử dụng giá trị $K = 1$ cho các khảo sát tiếp theo.

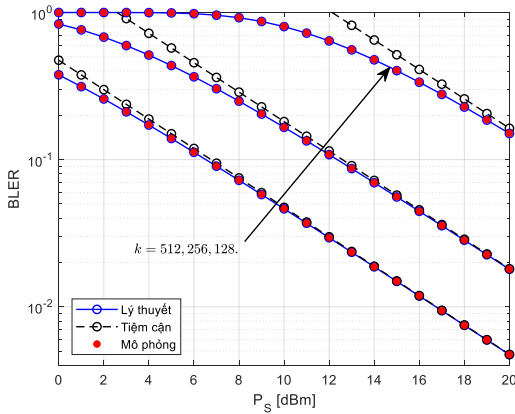


Hình 3. Ảnh hưởng của chiều dài khối tin, với $K = 1$

Tiếp theo, chúng tôi khảo sát tỉ lệ lỗi khối BLER là một hàm theo độ dài khối m như Hình 3 với mục tiêu tương tự như Hình 2 đó là tìm ra m tối ưu cho mô hình hệ thống. Cụ thể, giá trị của m càng tăng thì BLER ở tất cả các trường hợp giảm. Hơn nữa, chúng ta cũng thấy rằng tỉ lệ lỗi khối toàn chặng sẽ bằng không nếu m tiến tới vô cùng hay $\lim_{m \rightarrow \infty} BLER_{e2e}(m) = 0$ (Chứng minh: Xem phụ lục B).

Điều này có nghĩa là chúng ta chỉ có thể kết luận m càng lớn càng tốt mà không có một giá trị cụ thể nào, miễn là $m \geq 100$ như đã đề cập thì hiệu năng hệ thống sẽ càng được cải thiện. Tuy nhiên, cũng phải cân nhắc rằng mục tiêu của truyền thông gói ngắn đó là độ dài khối càng ngắn thì độ trễ truyền sẽ được giảm. Do đó, cân nhắc trong cả hai tình huống ưu nhược điểm của việc tăng hoặc giảm m chúng ta sẽ ràng buộc được giá trị m cụ thể nhằm mục tiêu đảm bảo chất lượng của một dịch vụ cụ thể. Ví dụ, giả sử mức tỷ lệ lỗi khối có thể chấp nhận được của một dịch vụ mà chúng ta muốn cung cấp là 2×10^{-2} chẳng hạn, thì giá trị của m ứng với từng trường hợp công suất phát 10, 15 và 20 dBm là khoảng 1000, 400 và 250. Mặt khác, khi công suất phát của các nút nguồn và các nút chuyển tiếp tăng thì hiệu năng của hệ thống cũng được cải thiện đáng kể. Quan trọng hơn hết vẫn là các kết quả lý thuyết của chúng tôi hoàn toàn trùng khớp với các kết quả mô phỏng

và một lần nữa xác thực tính chính xác từ các kết quả tính toán trong các phần trước.



Hình 4. Ảnh hưởng của giá trị công suất phát lên hiệu năng hệ thống với $K = 1$

Cuối cùng, chúng tôi sẽ khảo sát tỉ lệ lỗi khối toàn trình là hàm theo công suất phát như Hình 4. Trong Hình 4, chúng ta có thể thấy rằng các đường phân tích lý thuyết dạng chính xác hoàn toàn trùng khớp với các kết quả mô phỏng. Điều này chứng minh rằng các phân tích lý thuyết của chúng tôi là chính xác. Hơn nữa, đường xấp xỉ hội tụ với đường chính xác và đường mô phỏng ở dải công suất phát cao cũng cho thấy rằng các giá trị của tỉ lệ lỗi khối luôn nhỏ hơn hoặc bằng các giá trị đường xấp xỉ này. Mặt khác, khi so sánh với cùng một giá trị m xác định thì tỉ lệ lỗi khối của hệ thống càng giảm khi càng tăng công suất nguồn phát. Từ đó, ta có thể kết luận rằng, với dải công suất phát càng lớn thì hiệu năng hệ thống càng được cải thiện và luôn không vượt quá giá trị của đường giới hạn trên (đường tỉ lệ lỗi khối xấp xỉ) và điều này đúng như chúng ta mong đợi. Mặc dù tăng công suất phát làm cho hiệu năng hệ thống được cải thiện nhưng chúng ta cũng không nên lạm dụng tăng công suất phát quá lớn sẽ có thể ảnh hưởng can nhiễu lớn lên các người dùng khác của hệ thống.

V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã đề xuất mạng chuyển tiếp đa chặng trong truyền thông gói tin ngắn sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp. Theo kênh truyền fading Rayleigh, chúng tôi đã đưa ra biểu thức dạng đóng cho tỉ lệ lỗi khối của mô hình đề xuất. Bên cạnh đó, chúng tôi cũng đã đưa ra được biểu thức tính tiệm cận của hệ thống ở dải công suất phát cao. Ngoài ra, chúng tôi cũng xét sự ảnh hưởng của số chặng chuyển tiếp và độ dài khối m lên hiệu năng hệ thống. Các kết quả phân tích số trong mô hình đề xuất đều trùng khớp với kết quả mô phỏng Monte-Carlo. Thông qua mô hình đề xuất, ta thấy rằng khi tăng lần lượt các giá trị công suất phát P_s và độ dài khối m đều làm cho hiệu năng hệ thống được cải thiện một cách đáng kể.

Tuy nhiên đối với m , cũng phải cân nhắc rằng mục tiêu của truyền thông gói ngắn đó là độ dài khối càng ngắn thì

độ trễ truyền sẽ được giảm. Do đó, cân nhắc trong cả hai tình huống ưu nhược điểm của việc tăng hoặc giảm m chúng ta sẽ ràng buộc được giá trị m cụ thể nhằm mục tiêu đảm bảo chất lượng của một dịch vụ cụ thể. Và đối với P_s , mặc dù tăng công suất phát làm cho hiệu năng hệ thống được cải thiện nhưng chúng ta cũng không nên lạm dụng tăng công suất phát quá lớn sẽ có thể ảnh hưởng can nhiễu lớn lên các người dùng khác của hệ thống. Đặc biệt, chúng tôi cũng chỉ ra được giá trị $K = 1$ hay nói cách khác là mạng hai chặng (dual-hop) là tối ưu trong trường hợp mô hình đề xuất này.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông trong đề tài có mã số **14-HV-2020-RD_VT2**.

PHỤ LỤC A

Trong phần này chúng tôi sẽ thực hiện chứng minh công thức (10).

Giả sử trong trường hợp hệ thống truyền dữ liệu 2 chặng bao gồm 1 nút nguồn, 1 nút chuyển tiếp và 1 nút đích. Khi hệ thống sử dụng kỹ thuật SDF tại nút chuyển tiếp, tỉ lệ lỗi khối toàn trình là tổng tỉ lệ lỗi khối của hai trường hợp được phân tích cụ thể như sau:

- i) Nếu nút chuyển tiếp không giải mã đúng được dữ liệu nhận được từ nút nguồn thì sẽ không tiếp tục chuyển tiếp dữ liệu đến nút đích, khi đó tỉ lệ lỗi khối của chặng hai sẽ bằng 1, hay $BLER_2 = 1$. Ta có tỉ lệ lỗi khối trong trường hợp này là $BLER_1 BLER_2 = BLER_1$.
- ii) Nút chuyển tiếp có thể giải mã đúng tín hiệu nhận được và tiếp tục truyền dữ liệu đến đích. Ta có tỉ lệ lỗi khối trong trường hợp này là $(1 - BLER_1) BLER_2$.

Như vậy, tỉ lệ lỗi khối toàn trình trong trường hợp hệ thống truyền dữ liệu 2 chặng là

$$BLER_{e2e} = BLER_1 + (1 - BLER_1) BLER_2. \quad (A.1)$$

Tương tự, với trường hợp tổng quát, chúng ta xem xét kỹ thuật SDF trên $K + 1$ chặng. Nếu tại nút chuyển tiếp thứ k ($k = \overline{1, K}$) không giải mã đúng được dữ liệu nhận được thì $BLER_n = 1$ với $n > k$. Phân tích tương tự chúng ta sẽ có tỉ lệ lỗi khối toàn trình như sau

$$BLER_{e2e} = BLER_1 + (1 - BLER_1) BLER_2 + \dots + (1 - BLER_1) \dots (1 - BLER_{k-1}) BLER_k. \quad (A.2)$$

Quy công thức (A.2) về dạng lấy tổng, chúng tôi thu được tỉ lệ lỗi khối toàn trình như trong công thức (10).

PHỤ LỤC B

$$\begin{aligned}
 A &= \lim_{m \rightarrow +\infty} \nu \sqrt{m} \left\{ \rho_H - \rho_L + \bar{\gamma}_k \left[\exp\left(-\frac{\rho_H}{\bar{\gamma}_k}\right) - \exp\left(-\frac{\rho_L}{\bar{\gamma}_k}\right) \right] \right\} \\
 &= \lim_{m \rightarrow +\infty} \left\{ 1 + \bar{\gamma}_k \nu \sqrt{m} \left\{ \exp\left[-\frac{1}{\bar{\gamma}_k} \left(2^{\frac{(K+1)\beta}{m}} - 1 + \frac{1}{2\nu\sqrt{m}} \right)\right] - 1 \right\} - \left\{ \exp\left[-\frac{1}{\bar{\gamma}_k} \left(2^{\frac{(K+1)\beta}{m}} - 1 - \frac{1}{2\nu\sqrt{m}} \right)\right] - 1 \right\} \right\}. \quad (B.2)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A &= \lim_{m \rightarrow +\infty} \left\{ 1 + \bar{\gamma}_k \nu \sqrt{m} \left\{ \frac{1}{\bar{\gamma}_k} \left(2^{\frac{(K+1)\beta}{m}} - 1 - \frac{1}{2\nu\sqrt{m}} \right) - \frac{1}{\bar{\gamma}_k} \left(2^{\frac{(K+1)\beta}{m}} - 1 + \frac{1}{2\nu\sqrt{m}} \right) \right\} \right\} \\
 &= \lim_{m \rightarrow +\infty} \left\{ 1 + \bar{\gamma}_k \nu \sqrt{m} \left\{ -\frac{1}{\bar{\gamma}_k} \frac{1}{\nu\sqrt{m}} \right\} \right\} = \lim_{m \rightarrow +\infty} 0 = 0. \quad (B.3)
 \end{aligned}$$

Trong phần này, chúng tôi chứng minh $\lim_{m \rightarrow +\infty} \text{BLER}_{e2e}(m) = 0$.

Như chúng ta đã biết, giới hạn của các tổng bằng tổng các giới hạn hội tụ, nghĩa là

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) + g(x)] = 0 \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) + \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) = 0, \quad (B.1) \text{ với } \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) \neq \pm\infty \text{ và } \lim_{x \rightarrow +\infty} g(x) \neq \pm\infty.$$

Do đó, $\lim_{m \rightarrow +\infty} \text{BLER}_{e2e}(m) = 0$ nếu $\lim_{m \rightarrow +\infty} \text{BLER}_k(m) = 0$ ($k = \overline{1, K+1}$).

Thật vậy, đặt $A := \lim_{m \rightarrow +\infty} \text{BLER}_k(m)$. Khi $m \rightarrow +\infty$, A có thể được viết lại như trong (B.2).

Khi $m \rightarrow +\infty$ thì $2^{\frac{(K+1)\beta}{m}} - 1 + \frac{1}{2\nu\sqrt{m}} \rightarrow 0$ và $2^{\frac{(K+1)\beta}{m}} - 1 - \frac{1}{2\nu\sqrt{m}} \rightarrow 0$. Áp dụng vô cùng bé tương đương dạng $\exp(x) - 1 \sim x$ khi $x \rightarrow 0$ cho (B.2), khi đó A có thể được tính như trong (B.3).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] T. Van Nguyen, T.-N. Do, V. N. Q. Bao, D. B. da Costa, and B. An, "On the Performance of Multihop Cognitive Wireless Powered D2D Communications in WSNs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 3, pp. 2684-2699, 2020.
- [2] H. Van Hoa, N. X. Quynh, and V. N. Q. Bao, "On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access schemes in Coordinated Direct with Partial Relay Selection," in *2018 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2018: IEEE, pp. 337-343.
- [3] C. Zhong and Z. Zhang, "Non-orthogonal multiple access with cooperative full-duplex relaying," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 2478-2481, 2016.
- [4] Do Dung Nguyen, Vo Nguyen Quoc Bao, and Q. Chen, "On the Secrecy Performance of Massive MIMO Relay-Aided Downlink with Multiuser Transmission."
- [5] Y. Polyanskiy, H. V. Poor, and S. Verdú, "Channel coding rate in the finite blocklength regime," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 5, pp. 2307-2359, 2010.
- [6] W. Yang, G. Durisi, T. Koch, and Y. Polyanskiy, "Quasi-static multiple-antenna fading channels at finite blocklength," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, no. 7, pp. 4232-4265, 2014.
- [7] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "End-to-end performance of transmission system with relays over Rayleigh-fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 2, no. 6, pp. 1126-1131, 2003.
- [8] V. N. Q. Bao and H. Y. Kong, "Diversity order analysis of dual-hop relaying with partial relay selection," *IEICE Trans Commun*, vol. E92B, no. 12, pp. 3942-3946, 2009.
- [9] V. N. Q. Bao, T. T. Thanh, N. T. Duc, and V. D. Thanh, "Spectrum sharing-based multihop decode-and-forward relay networks under interference constraints: Performance analysis and relay position optimization," *Journal of Communications and Networks*, vol. 15, no. 3, pp. 266-275, 2013.
- [10] V. N. Q. Bao and H. Y. Kong, "Incremental relaying with partial relay selection," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E93.B, no. 5, pp. 1317-1321, 2010.
- [11] T. M. Hoang, T. T. Duy, and V. N. Q. Bao, "On the performance of non-linear wirelessly powered partial relay selection networks over Rayleigh fading channels," in *2016 3rd National Foundation for Science and Technology Development Conference on Information and Computer Science (NICS)*, Sep. 2016, pp. 6-11.
- [12] N. T. Van, T. N. Do, V. N. Q. Bao, and B. An, "Performance analysis of wireless energy harvesting multihop cluster-based networks over Nakagami-m fading channels," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3068-3084, 2018.
- [13] P. T. D. Ngoc, T. T. Duy, V. N. Q. Bao, and K. Ho-Van, "Performance enhancement for underlay cognitive radio with partial relay selection methods under impact of hardware impairment," in *2015 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, Oct 2015, pp. 645-650.
- [14] C. T. Dung, N. T. Van, T. T. Duy, V. N. Q. Bao, and N. L. Nhat, "Security enhancement for dual-hop RF protocols with Nth-best partial relay and EH-based jammer," in *2015 International Conference on Communications, Management and Telecommunications (ComManTel)*, Dec 2015, pp. 111-115.
- [15] A. Goldsmith, *Wireless communications*. Stanford University, 2005.
- [16] S. Dang, et al., "OFDM-IM based dual-hop system using fixed-gain amplify-and-forward relay with pre-processing capability," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 4, pp. 2259-2270, 2019.
- [17] Nhu Tri Do, Daniel Benevides da Costa, Trung Q. Duong, Vo Nguyen Quoc Bao, and Beongku An, "Opportunistic scheduling for fixed-gain amplify-and-forward-based multiuser multirelay SWIPT cooperative networks," presented at the 2017 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom), 2017.
- [18] T. Q. Duong, Daniel Benevides da Costa, Maged El-kashlan, and Vo Nguyen Quoc Bao, "Cognitive amplify-and-forward relay networks over Nakagami-m fading," *IEEE*

Transactions on Vehicular Technology vol. 61, no. 5, pp. 2368-2374, 2012.

- [19] Dac-Binh Ha, Tung Thanh Vu, Tran Trung Duy, and Vo Nguyen Quoc Bao, "Secure cognitive reactive decode-and-forward relay networks: With and without eavesdropper," *Wireless Personal Communications* vol. 85, no. 4, pp. 2619-2641, 2015.
- [20] N. A. Tuan, Vo Nguyen Quoc Bao, and Truong Trung Kien, "Performance Analysis of Energy Harvesting Two-Way Decode-and-Forward Relay Networks with Power Beacon over Nakagami-m Fading Channels," presented at the 2018 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC), 2018.
- [21] Y. Lu, and Wai Ho Mow, "Low-complexity Detection and Performance Analysis for Decode-and-forward Relay Networks," presented at the ICASSP 2019-2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2019.
- [22] Nguyen Thi Yen Linh, Chan Dai Truyen Thai, Vo Nguyen Quoc Bao, and H. V. Hoa, "Physical Layer Security in Multi-hop Relay Networks with Modified Dijkstra's Routing Algorithms," in *2020 7th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*, 2020.
- [23] X. Lai, Q. Zhang, and J. Qin, "Cooperative NOMA Short-Packet Communications in Flat Rayleigh Fading Channels," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019.
- [24] Y. Gu, H. Chen, Y. Li, L. Song, and B. Vucetic, "Short-Packet Two-Way Amplify-and-Forward Relaying," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 263-267, 2018, doi: 10.1109/LSP.2017.2782828.
- [25] A. P. S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and stochastic processes*.
- [26] B. Makki, T. Svensson, and M. Zorzi, "Finite Block-Length Analysis of the Incremental Redundancy HARQ," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 3, pp. 529-532, Oct. 2014.
- [27] W. Yang, G. Durisi, T. Koch, and Y. Polyanskiy, "Quasi-static multiplexed fading channels at finite blocklength," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 60, 2014.
- [28] Y. Yu, H. Chen, Y. Li, Z. Ding, and B. Vucetic, "On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access in Short-Packet Communications," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, pp. 590-593, 2018.
- [29] 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, 2013.
- [30] V. N. Q. Bảo, *Mô phỏng hệ thống truyền thông*. Nhà Xuất Bản Khoa học và Kỹ thuật, 2020.

ON THE PERFORMANCE OF MULTIHOP NETWORKS WITH DECODE AND FORWARD RELAYS IN SHORT PACKET COMMUNICATIONS

Abstract: This paper investigates the short packet communications for multi-hop networks with DF relays. Under Rayleigh fading channels, we obtain the closed-form expressions for exact system block error rate (BLER) of proposed system model. Besides that, we also derive the asymptotic system BLER in high regime of source's transmit power to get more insight about the performance which is affected by some system model parameters. Eventually, the accuracy of our analytical expressions are verified by Monte Carlo simulations and demonstrate the advantages of the system model. Especially, we figure out

the optimal value of relay numbers for our proposed system model.

Keywords: block error rate, cooperative networks, short packet communications, Rayleigh fading.



Huỳnh Văn Hóa tốt nghiệp Thạc sĩ chuyên ngành viễn thông tại Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Tại Thành Phố Hồ Chí Minh vào năm 2018. Hiện nay, Th. S Hóa là giảng viên của bộ môn Thông Tin Quang, Khoa Viễn Thông 2, Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Tại

Thành Phố Hồ Chí Minh. Hướng nghiên cứu chính hiện tại đang quan tâm gồm: thông tin vô tuyến, truyền thông hợp tác, vô tuyến nhận thức, bảo mật vật lý và truyền thông gói tin ngắn.

Email: huynhvanhoa@ptithcm.edu.vn



Ngô Hoàng Tú tốt nghiệp kỹ sư chuyên ngành Truyền thông và mạng máy tính tại Đại học Giao Thông Vận Tải thành phố Hồ Chí Minh vào năm 2020. Hiện nay, Ngô Hoàng Tú đang là giảng viên của bộ môn Kỹ thuật máy tính, Khoa Công nghệ thông tin, trường Đại học Giao Thông Vận Tải thành phố Hồ

Chí Minh. Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: vô tuyến nhận thức, truyền thông hợp tác, đa truy nhập không trực giao và truyền thông gói tin ngắn.

Email: tu.ngo@ut.edu.vn



Võ Nguyễn Quốc Bảo tốt nghiệp Tiến sĩ chuyên ngành vô tuyến tại Đại học Ulsan, Hàn Quốc vào năm 2010. Hiện nay, TS. Bảo là phó giáo sư của Bộ Môn Vô Tuyến, Khoa Viễn Thông 2, Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Thành Phố Hồ Chí Minh và đồng thời là giám đốc của phòng thí

nghiệm nghiên cứu vô tuyến(WCOMM). TS. Bảo hiện là thành viên chủ chốt (senior member) của IEEE và là tổng biên tập kỹ thuật của tạp chí REV Journal on Electronics and Communication. TS. Bảo đồng thời là biên tập viên (editor) của nhiều tạp chí khoa học chuyên ngành uy tín trong và ngoài nước, ví dụ: Transactions on Emerging Telecommunications Technologies (Wiley ETT), VNU Journal of Computer Science and Communication Engineering. TS. Bảo đã tham gia tổ chức nhiều hội nghị quốc gia và quốc tế, ví dụ: ATC (2013, 2014), NAFOSTED-NICS (2014, 2015, 2016), REV-ECIT 2015, ComManTel (2014, 2015), và SigComTel 2017. Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: vô tuyến nhận thức, truyền thông hợp tác, truyền song công, bảo mật lớp vật lý và thu thập năng lượng vô tuyến.

Email: baovnq@ptithcm.edu.vn