

ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CỦA NOMA TRONG THÔNG TIN VÔ TUYẾN

PERFORMANCE EVALUATION OF NOMA IN WIRELESS COMMUNICATIONS

Nguyễn Thị Thu Thảo¹, Nguyễn Hoàng Tú¹, Hồ Nhật Minh²,
Đỗ Duy Tân¹, Trương Quang Phúc¹

¹Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP.HCM, Việt Nam

²Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông Cơ sở TP.HCM, Việt Nam

Ngày toà soạn nhận bài 13/7/2021, ngày phản biện đánh giá 28/7/2021, ngày chấp nhận đăng 3/8/2021.

TÓM TẮT

Bài báo này nghiên cứu hiệu năng của kỹ thuật đa truy cập không trực giao (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA) trong thông tin vô tuyến. Đây là kỹ thuật được ứng dụng hiệu quả trong mạng 5G và hứa hẹn sẽ là ứng viên tiềm năng được sử dụng trong mạng 6G. Trong bài báo này, hiệu năng của NOMA được đánh giá qua giá trị tỉ lệ lỗi bit (Bit Error Rate – BER), tốc độ dữ liệu và xác suất dừng (Outage Probability – OP). Các giá trị này thu được thông qua mô phỏng hệ thống NOMA qua kênh truyền Rayleigh có chịu ảnh hưởng của nhiễu AWGN (Additive white Gaussian noise) ở cả hai trường hợp SIC (Successive Interference Cancellation) hoàn hảo và SIC không hoàn hảo. Nhìn chung, công suất phát càng tăng thì giá trị tốc độ dữ liệu sẽ càng cao đồng thời giá trị BER và OP sẽ được cải thiện đáng kể. Hơn nữa, kết quả phân tích cho thấy mô hình hệ thống NOMA cung cấp một nền tảng tốt phục vụ việc phát triển các kỹ thuật góp phần cải thiện chất lượng dịch vụ cho các hệ thống truyền thông dựa trên NOMA trong tương lai.

Từ khóa: NOMA; SIC; BER; tốc độ dữ liệu; OP.

ABSTRACT

This paper studies the performance of Non-Orthogonal Multiple Access Technique (NOMA), which is effectively applied in 5G and a potential candidate in 6G. The performance of NOMA is assessed in terms of bit error rate (BER), data rate, and outage probability (OP), which are obtained through various simulation results in Matlab considering Rayleigh fading channels influenced by Additive White Gaussian Noise (AWGN) in both perfect Successive Interference Cancellation (SIC) and imperfect SIC. In general, as the transmit power increases, the data rate value increases accordingly while the BER and OP values are significantly improved. The analytical results show that NOMA provides a good foundation for the development of techniques that contribute to improving quality of service for future (wireless) communication systems.

Keywords: NOMA; SIC; BER; data rate; OP.

1. GIỚI THIỆU

Nhu cầu về dung lượng mạng, tốc độ và thông lượng dữ liệu cao ngày càng tăng do sự tăng trưởng mạnh mẽ trong lưu lượng di động. Một trong những giải pháp để đáp ứng nhu cầu này là sử dụng kỹ thuật đa truy cập không trực giao (Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA). Đây được xem là giải

pháp triển vọng để đạt được hiệu suất hệ thống tốt hơn so với các kỹ thuật hiện có.

NOMA được phân thành hai loại chính là ghép kênh miền công suất và ghép kênh miền mã [1]. Cụ thể, ghép kênh miền mã có tiềm năng để tăng cường hiệu quả phổ nhưng kỹ thuật này đòi hỏi băng thông truyền dẫn cao và khó áp dụng vào các hệ thống thông

tin hiện tại. Mặt khác, ghép kênh miền công suất có cách thực thi đơn giản vì các hệ thống mạng hiện có không cần phải triển khai những thay đổi đáng kể. Ngoài ra, ghép kênh miền công suất không yêu cầu băng thông bổ sung để cải thiện hiệu quả phổ tần [2]. Vì thế NOMA miền công suất đã trở thành mô hình hiệu quả và được nghiên cứu phổ biến nhất trong số các mô hình NOMA.

Do ghép kênh trong miền công suất nên hệ thống dùng kỹ thuật NOMA không cần quan tâm tính trực giao giữa các người dùng trong việc chia sẻ về tài nguyên ở miền thời gian, miền tần số hay miền mã. Dung lượng hệ thống NOMA được tăng đáng kể so với các kỹ thuật cũ do kỹ thuật này có thể dễ dàng được thực hiện cùng với các chùm tia hẹp để ghép kênh không gian, cung cấp sự kết hợp giữa ghép kênh miền công suất và ghép kênh không gian. Lý do mà kỹ thuật NOMA đáp ứng được yêu cầu về giảm độ trễ là vì khi mỗi người dùng sử dụng khối tài nguyên hoàn chỉnh thì thông tin có thể truyền ngay lập tức theo yêu cầu [3]. Bên cạnh đó, mặc dù tài nguyên vô tuyến là có giới hạn nhưng trước đây việc cấp phát tài nguyên trong các hệ thống sử dụng kỹ thuật đa truy cập trực giao (Orthogonal Multiple Access – OMA) là riêng biệt cho mỗi người dùng nên nguồn tài nguyên dần không đáp ứng đủ. Tuy nhiên, trong hệ thống sử dụng kỹ thuật NOMA miền công suất, hai hoặc nhiều người dùng có thể chia sẻ cùng một tài nguyên vô tuyến, tín hiệu của các người dùng được gán các mức công suất khác nhau để máy phát mã hóa xếp chồng phục vụ cho việc ghép kênh và máy thu giải mã tín hiệu của từng người dùng bằng cách sử dụng kỹ thuật loại bỏ nhiễu liên tiếp (Successive Interference Cancellation – SIC) [4], nhờ vậy mà hệ thống có thể tận dụng được tài nguyên vô tuyến mà vẫn đáp ứng được nhu cầu của nhiều người dùng.

Với mục tiêu áp dụng kỹ thuật đáp ứng được mục đích phục vụ nhiều người dùng sử dụng cùng một nguồn tài nguyên, NOMA trở thành kỹ thuật truy cập vô tuyến được ứng dụng trong mạng 5G và là kỹ thuật được mong đợi sẽ góp phần xây dựng nên sự tối

ưu của mạng 6G trong tương lai. Vì thế trong những năm gần đây, cả trong lẫn ngoài nước đã có nhiều công trình nghiên cứu được ra đời để làm rõ các vấn đề quanh kỹ thuật NOMA khi ứng dụng vào hệ thống truyền thông không dây. Trong nước có thể kể đến nghiên cứu [5], tác giả đã phân tích và đánh giá hiệu suất hệ thống về xác suất dừng hoạt động trong các kênh Rayleigh fading. Trong nghiên cứu [6], tác giả đã phân tích hiệu suất NOMA khi truyền liên kết xuống nhóm đơn vị băng tần cơ sở (BBU) đến nhiều bộ phát sóng từ xa (RRH) phục vụ nhiều loại tế bào (macro, micro, pico, femto). Ở ngoài nước ví dụ như nghiên cứu [7], tác giả đã xác minh tính ưu việt của hệ thống MIMO-NOMA so với MIMO-OMA về cả tỷ lệ tổng và sự công bằng của các người dùng trong hệ thống. Trong nghiên cứu [8], tác giả đã cung cấp tổng quan về khái niệm, tiềm năng và thách thức của NOMA miền công suất cho các hệ thống 5G. Hay trong nghiên cứu [9], tác giả đã chỉ ra sự khác biệt về trạng thái kênh người dùng đã cải thiện hiệu suất bằng cách tăng cường độ lợi phân tập người dùng trong hệ thống NOMA.

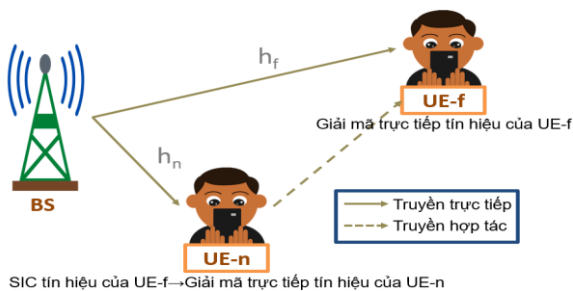
Mặc dù nhiều khía cạnh của NOMA đã được đào sâu trong các nghiên cứu trước đây, tuy nhiên chưa có nghiên cứu tổng hợp về nhiều thông số hiệu năng mà hệ thống đạt được khi áp dụng những kỹ thuật NOMA. Do đó, bài báo này tổng hợp lại những khái niệm cơ bản trong NOMA, sau đó đánh giá ảnh hưởng của các thông số quan trọng lên hiệu năng của hệ thống NOMA theo dạng tỉ lệ lỗi bit (Bit Error Rate – BER), xác suất dừng (Outage Probability – OP) và tốc độ dữ liệu thông qua các kết quả mô phỏng thực hiện trong Matlab.

Phần còn lại của bài báo này được tổ chức như sau. Phần 2 trình bày mô hình hệ thống và phân tích các biểu thức toán học liên quan tới NOMA. Phần 3 giải thích nguyên lý hoạt động của kỹ thuật SIC trong hệ thống NOMA. Phần 4 trình bày các kết quả mô phỏng và đánh giá hiệu năng của hệ thống dựa vào thông số BER, OP và tốc độ dữ liệu. Cuối cùng, chúng tôi rút ra kết luận và đề xuất hướng phát triển trong phần 5.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

So với truyền trực giao truyền thống, mục đích của kỹ thuật NOMA khi sử dụng kỹ thuật mã hóa xếp chồng tại máy phát là để tăng hiệu quả phổ và kỹ thuật SIC tại máy thu là để loại bỏ các tín hiệu gây nhiễu [10]. Để đảm bảo chất lượng truyền thông thì NOMA truyền không trực giao tại các đầu cuối, đưa vào thông tin bị nhiễu có chủ ý và thực hiện giải điều chế nhằm phát hiện và xóa nhiễu đa người dùng.

Quá trình truyền thông tin của hệ thống NOMA được mô tả như sau. Tại máy phát của mạng NOMA đường xuống, các tín hiệu mong muốn của nhiều người dùng với các hệ số công suất được phân bổ khác nhau sẽ được mã hóa xếp chồng trước khi được truyền đi cho tất cả người dùng di động. Tại máy thu của mỗi người dùng, quá trình SIC được giả định thực hiện liên tiếp cho đến khi tín hiệu của người dùng được khôi phục. Hệ số phân bổ công suất của người dùng được phân bổ tỷ lệ nghịch với điều kiện kênh của họ [11]. Do đó, người dùng có công suất truyền cao hơn sẽ xem tín hiệu của người dùng khác là nhiễu nên nó sẽ khôi phục tín hiệu của mình ngay lập tức mà không cần thực hiện bất kỳ quá trình SIC nào, những người dùng khác có công suất truyền thấp hơn thì cần thực hiện các quy trình SIC. Để minh họa cho quá trình này, chúng tôi xét đường xuống của hệ thống NOMA miền công suất gồm một trạm gốc (Base station – BS) và hai người dùng sao cho một người dùng gần BS và người dùng còn lại ở xa với BS lần lượt ký hiệu là UE-n và UE-f như minh họa trên Hình 1.



Hình 1. Mô hình đường truyền xuống của hệ thống NOMA.

Trong Hình 1, giả sử rằng tổng công suất phát của BS là P_T , hệ thống phải truyền đồng thời tín hiệu x_n đến UE-n và x_f đến UE-f với cùng một tài nguyên vô tuyến, lúc này $P_T = P_n + P_f$. Trong đó, P_n và P_f lần lượt là công suất được BS phân bổ cho UE-n và UE-f thỏa mãn $P_n < P_f$ để tuân theo nguyên tắc phân bổ công suất. Lượng công suất mà người dùng được phân bổ sẽ tỉ lệ thuận với khoảng cách từ người dùng đó tới BS, nghĩa là người dùng nào ở càng xa BS thì sẽ được phân bổ càng nhiều công suất. Các hệ số phân bổ công suất α_n và α_f tương ứng cho UE-n và UE-f thỏa mãn $\alpha_n + \alpha_f = 1$, hệ số này được xác định khi $\alpha_i = \frac{P_i}{P}$ với $i = \{n, f\}$ [12]. Vì thế, tín hiệu mã hóa xếp chồng từ BS đến hai người dùng được biểu diễn như sau [13]:

$$x = \sqrt{P_T}(\sqrt{\alpha_n}x_n + \sqrt{\alpha_f}x_f). \quad (1)$$

Tín hiệu nhận được ở bất kỳ người dùng i nào sau khi đi qua kênh Rayleigh fading có sự ảnh hưởng của nhiễu AWGN được biểu diễn như sau [13]:

$$y_i = h_i x + w_i. \quad (2)$$

Trong đó, h_i là hệ số kênh Rayleigh fading ở người dùng i và w là nhiễu AWGN của người dùng (với $w_i \sim CN(0; \sigma_i^2)$) tuân theo phân phối Gaussian có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai là σ_i^2).

Do UE-n ở gần trạm BS nên sẽ có ít nhiễu và được phân bổ công suất thấp hơn so với UE-f. Vì thế, UE-n xem tín hiệu của UE-f là nhiễu cần loại bỏ bằng kỹ thuật SIC. Quá trình giải mã ở hai người dùng được trình bày tiếp theo.

2.1. Giải mã NOMA ở UE-f:

Thay (1) vào (2) với $i = f$ để thu được biểu thức (3) thể hiện tín hiệu nhận được ở UE-f sau khi truyền qua kênh h_f :

$$y_f = h_f \sqrt{P}(\sqrt{\alpha_n}x_n + \sqrt{\alpha_f}x_f) + w_f \quad (3)$$

trong đó $h_f \sqrt{P} \sqrt{\alpha_f} x_f$ là thành phần mong muốn nhận được do nó được giải mã trực

tiếp từ x_f , $h_f\sqrt{P}\sqrt{\alpha_n}x_n$ là nhiễu và có công suất thấp.

Tỷ số tín hiệu trên can nhiễu và tạp âm (SINR) tại UE-f được biểu diễn như sau:

$$\gamma_f = \frac{g_f P_T \alpha_f}{g_f P_T \alpha_n + \sigma_f^2} \quad (4)$$

trong đó g_f là độ lợi kênh của UE-f và được xác định bởi $g_f = |h_f|^2$.

Từ biểu thức (4), tốc độ dữ liệu có thể đạt được tại UE-f được biểu diễn như sau [13]:

$$\begin{aligned} R_f &= \log_2(1 + \gamma_f) \\ &= \log_2\left(1 + \frac{g_f P_T \alpha_f}{g_f P_T \alpha_n + \sigma_f^2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

2.2. Giải mã NOMA ở UE-n:

Tương tự như đối với UE-f, thay (1) vào (2) với $i = n$ để thu được biểu thức (6) thể hiện tín hiệu nhận được ở UE-n sau khi truyền qua kênh h_n :

$$y_n = h_n \sqrt{P_T} (\sqrt{\alpha_n} x_n + \sqrt{\alpha_f} x_f) + w_n \quad (6)$$

trong đó $h_n \sqrt{P}\sqrt{\alpha_n}x_n$ là thành phần mong muốn nhận được và có công suất thấp, $h_n \sqrt{P}\sqrt{\alpha_f}x_f$ là nhiễu.

Thông số SINR tại UE-n để giải mã tín hiệu của UE-f trước khi SIC được biểu diễn như sau:

$$\gamma_{fn} = \frac{g_n P_T \alpha_f}{g_n P_T \alpha_n + \sigma_n^2} \quad (7)$$

trong đó g_n là độ lợi kênh của UE-n và được xác định bởi $g_n = |h_n|^2$.

Từ biểu thức (7), tốc độ dữ liệu có thể đạt được tại UE-n trước khi SIC được biểu diễn như sau [13]:

$$\begin{aligned} R_{fn} &= \log_2(1 + \gamma_{fn}) \\ &= \log_2\left(1 + \frac{g_n P_T \alpha_f}{g_n P_T \alpha_n + \sigma_n^2}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Trước khi giải mã tín hiệu của chính mình thì UE-n phải thực hiện SIC để loại bỏ tín hiệu của UE-f, đối với UE-n thì tín hiệu

của UE-f được xem là nhiễu liên tiếp cần được loại bỏ. Sau khi loại bỏ tín hiệu của UE-f bằng SIC, thông số SINR ở UE-n để giải mã tín hiệu của chính nó được biểu diễn như sau:

$$\gamma_n = \frac{g_n P_T \alpha_n}{err g_n P_T \alpha_f + \sigma_n^2} \quad (9)$$

trong đó err là hệ số lan truyền lỗi và có giá trị trong khoảng $0 \leq err \leq 1$. Đây là phần tín hiệu của UE-f còn sót lại ở UE-n do lỗi SIC.

Từ biểu thức (9), tốc độ dữ liệu có thể đạt được tại UE-n sau khi SIC được biểu diễn như sau [13]:

$$\begin{aligned} R_n &= \log_2(1 + \gamma_n) \\ &= \log_2\left(1 + \frac{g_n P_T \alpha_n}{err g_n P_T \alpha_f + \sigma_n^2}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

Trong trường hợp SIC hoàn hảo thì thành phần err trong biểu thức (7) và (10) sẽ bằng không. Khi đó, biểu thức (9) và (10) lần lượt biểu diễn thông số SINR ở UE-n để giải mã tín hiệu của chính nó và tốc độ dữ liệu có thể đạt được tại UE-n sau khi SIC lần lượt được biểu diễn lại như sau:

$$\gamma'_n = \frac{g_n P_T \alpha_n}{\sigma_n^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} R'_n &= \log_2(1 + \gamma'_n) \\ &= \log_2\left(1 + \frac{g_n P_T \alpha_n}{\sigma_n^2}\right) \end{aligned} \quad (12)$$

Trường hợp xấu nhất xảy ra khi $err = 1$, điều này nghĩa là UE-n hoàn toàn không thể thực hiện SIC để loại bỏ tín hiệu của UE-f nên UE-n xem cả tín hiệu thông tin cần nhận được của chính UE-n là nhiễu.

Để xác định được thông số OP chúng tôi đặt ngưỡng SINR của UE-f và UE-n lần lượt là $\bar{\gamma}_f$ và $\bar{\gamma}_n$. Xác suất dừng hoạt động của UE-f và UE-n sau khi đi qua kênh Rayleigh fading lần lượt được biểu diễn như sau [14]:

$$OP_f = P\{\gamma_f < \bar{\gamma}_f\} \quad (13)$$

$$OP_n = P\{\gamma_{fn} < \bar{\gamma}_f \mid \gamma_n < \bar{\gamma}_n\}. \quad (14)$$

Xét hệ thống trên kênh truyền Rayleigh fading, ta có hàm CDF của mỗi người dùng là:

$$F_X(x) = 1 - e^{-\lambda x}. \quad (15)$$

Từ (13) và (15), ta có OP tại UE-f được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} OP_f &= P\{\gamma_f < \bar{\gamma}_f\} \\ &= P\left\{\frac{g_f P_T \alpha_f}{g_f P_T \alpha_n + \sigma_f^2} < \bar{\gamma}_f\right\} \\ &= P\left\{g_f < \frac{\bar{\gamma}_f \sigma_f^2}{P_T \alpha_f - \bar{\gamma}_f P_T \alpha_n}\right\} \\ &= F_{g_f}(T_f) = 1 - e^{-\lambda_{g_f} T_f}. \end{aligned} \quad (17)$$

Từ (14) và (15), ta có OP tại UE-n được biểu diễn như sau:

$$\begin{aligned} OP_n &= P\{\gamma_{fn} < \bar{\gamma}_f \mid \gamma_n < \bar{\gamma}_n\} \\ &= P\left\{\left(\frac{g_n P_T \alpha_f}{g_n P_T \alpha_n + \sigma_n^2} < \bar{\gamma}_f\right)\right. \\ &\quad \left.\mid \left(\frac{g_n P_T \alpha_n}{g_n P_T \alpha_f + \sigma_n^2} < \bar{\gamma}_n\right)\right\} \\ &= P\left\{\left(g_n < \frac{\bar{\gamma}_f \sigma_n^2}{P_T \alpha_f - \bar{\gamma}_f P_T \alpha_n}\right)\right. \\ &\quad \left.\mid \left(g_n < \frac{\bar{\gamma}_n \sigma_n^2}{P_T \alpha_n - \bar{\gamma}_n P_T \alpha_f}\right)\right\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Đặt: $T_n = \max\left(\frac{\bar{\gamma}_f \sigma_n^2}{P_T \alpha_f - \bar{\gamma}_f P_T \alpha_n}, \frac{\bar{\gamma}_n \sigma_n^2}{P_T \alpha_n - \bar{\gamma}_n P_T \alpha_f}\right)$

Suy ra:

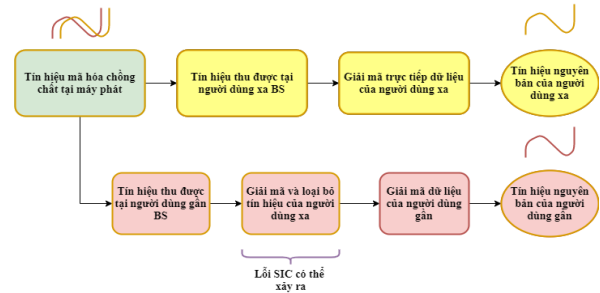
$$\begin{aligned} OP_n &= P\{g_n < T_n\} \\ &= F_{g_n}(T_n) = 1 - e^{-\lambda_{g_n} T_n}. \end{aligned} \quad (19)$$

3. KỸ THUẬT LOẠI BỎ NHIỀU LIÊN TIẾP (SIC)

Có nhiều kỹ thuật có thể giảm nhiễu trong mạng không dây như căn chỉnh nhiễu và tiền mã hóa Costa [15], nhưng các kỹ thuật này thường phụ thuộc nhiều vào thông tin trạng thái kênh tại các máy phát, do đó chúng ít có khả năng được triển khai vào các hệ thống không dây thực tế trong tương lai

gần. Trong khi đó, SIC là kỹ thuật được sử dụng ở máy thu trong truyền dữ liệu không dây để giải mã nhiều gói dữ liệu truyền đến đồng thời. Trong một hệ thống thông thường, nhiều gói đến cùng một lúc sẽ gây ra xung đột, tuy nhiên nhờ SIC mà máy thu giải mã tín hiệu tốt hơn và tránh được xung đột giữa các tín hiệu nhận được. Ý tưởng của SIC là giải mã các người dùng khác nhau một cách tuần tự, tức là sự can thiệp của những người dùng được giải mã sẽ được loại trừ trước khi giải mã những người dùng khác [15].

Kỹ thuật SIC được phân thành hai loại là SIC hoàn hảo và SIC không hoàn hảo [15]. Trong quá trình thực hiện SIC, điều quan trọng là phải xác định được thứ tự giải mã, trước tiên người dùng gần BS hơn sẽ ước tính dữ liệu nhận được tại người dùng xa BS hơn. Nếu ước tính xảy ra sai sót, thì lỗi này sẽ phản ánh trong việc giải mã thông tin của chính người dùng gần [16]. Nói cách khác, người dùng gần phải giải mã cả dữ liệu của người dùng xa và dữ liệu của chính mình một cách chính xác, bất kỳ lỗi nào trong việc giải mã dữ liệu của người dùng xa hoặc dữ liệu của chính người dùng gần cũng sẽ gây ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống.



Hình 2. Quy trình giải mã SIC của hệ thống NOMA có hai người dùng.

Giả sử xem xét hệ thống gồm hai người dùng thì quy trình SIC được thể hiện qua Hình 2 và được giải thích như sau. Tại UE-f: vì ở xa BS được phân bổ công suất lớn hơn nên người dùng này sẽ thực hiện giải mã trực tiếp từ tín hiệu nhận được để thu được tín hiệu lúc chưa bị mã hóa xếp chồng của chính mình. Tại UE-n: ngược lại so với UE-f thì người dùng này được phân bổ công suất nhỏ hơn nên nó xem tín hiệu của UE-f là nhiễu và cần phải thực hiện SIC để loại bỏ dữ liệu

nhiều này, sau đó mới giải mã để thu được dữ liệu của chính mình.

3.1. SIC hoàn hảo

Trong trường hợp SIC hoàn hảo, UE-n được xem là đã hoàn tất giải mã và có đầy đủ thông tin tín hiệu của UE-f. Lúc này, nhiễu từ tín hiệu của UE-f được xem là hoàn toàn bị loại bỏ tại UE-n. Đối với bộ thu SIC lý tưởng, việc phát hiện tín hiệu cho UE-f và UE-n lần lượt được biểu diễn như sau [17]:

$$\hat{x}'_f = \left\langle \frac{y_f - x_n \sqrt{P_T \alpha_n}}{\sqrt{P_T \alpha_f}} \right\rangle \quad (13)$$

$$\hat{x}'_n = \left\langle \frac{y_n}{\sqrt{P_T \alpha_n}} \right\rangle \quad (14)$$

Lý tưởng nhất khi SIC hoàn hảo thì biểu thức (6) biểu diễn tín hiệu nhận được ở UE-n được biểu diễn lại như sau:

$$y'_n = h_n \sqrt{P_T \alpha_n} x_n + w_n. \quad (15)$$

3.2. SIC không hoàn hảo

Trong thực tế, quá trình xử lý SIC sẽ sót lại một lượng nhiễu của UE-f gây ra trường hợp SIC không hoàn hảo. Khi người dùng có phân bố công suất cao bị giải mã sai, lỗi sẽ tiếp tục truyền sang người dùng có phân bố công suất thấp hơn, điều này làm sai lệch thông tin tín hiệu của UE-f tại UE-n bằng cách thêm các hiệu ứng của kênh Rayleigh fading và AWGN [15].

Lỗi SIC có thể là kết quả của nhiều lý do khác nhau như đồng bộ hóa, lỗi ước tính kênh, chất lượng máy thu, điều kiện môi trường tác động, ... dẫn đến lỗi SIC còn sót lại nhiều hay ít để gây nên trường hợp SIC không hoàn hảo.

4. MÔ PHỎNG VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG

4.1. Tỷ lệ lỗi bit của hệ thống NOMA

4.1.1. BER trong kênh AWGN

Áp dụng các giả sử sau vào quá trình mô phỏng BER của hệ thống NOMA trong kênh AWGN có hai người dùng:

- Hệ thống được mô phỏng thực hiện truyền đường xuống từ BS đến hai người dùng.

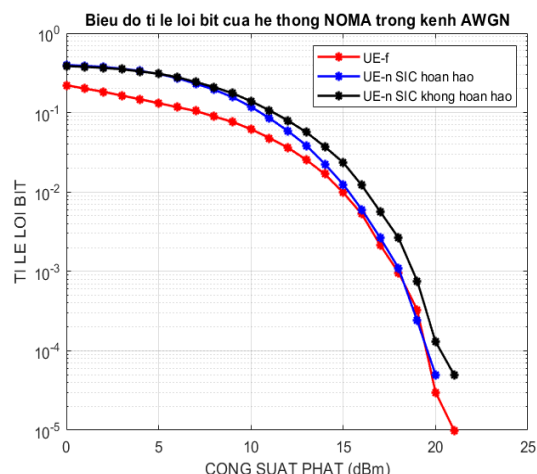
- Không áp dụng bất kỳ mô hình mất đường dẫn nào và giả định rằng cả hai người dùng đều ở khoảng cách bằng nhau từ BS.
- Sử dụng điều chế BPSK cho cả hai người dùng nên chỉ xem xét thành phần thực của pha trong khi AWGN phức.

Với mô hình hệ thống đã đề xuất như Hình 1, chúng tôi thiết lập các thông số mô phỏng như sau:

Bảng 1. Các thông số mô phỏng.

Thông số	Đơn vị	Giá trị
Mẫu Monte Carlo		10^5
Hệ số suy hao		4
Băng thông hệ thống	MHz	1
Hệ số phân bổ công suất cho UE-n		0,25
Hệ số phân bổ công suất cho UE-f		0,75
Công suất phát	dBm	0 đến 40
Xác suất lỗi SIC		$10^{-1.5}$

Kết quả mô phỏng BER của hệ thống NOMA trong kênh AWGN được biểu diễn qua Hình 3 như sau:



Hình 3. Kết quả mô phỏng BER của hệ thống NOMA trong kênh AWGN.

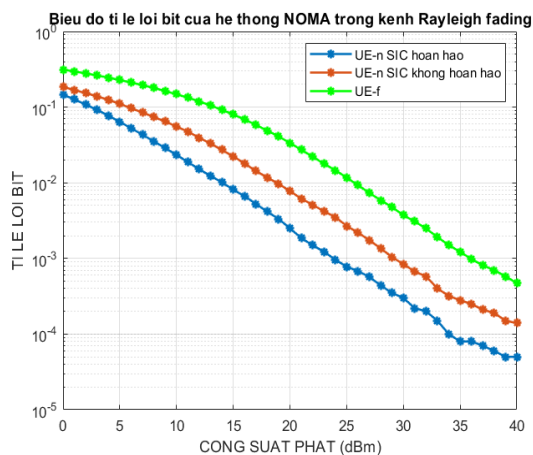
Kết quả trên Hình 3 cho thấy đồ thị biểu diễn BER là đường cong có xu hướng thác nước. Trong đó, UE-n có BER cao hơn so

với UE-f đặc biệt là khi công suất phát thấp, điều này là do UE-n phải thực hiện SIC. BER của UE-n trong trường hợp SIC không hoàn hảo sẽ cao hơn khi SIC hoàn hảo vì lúc này tại UE-n phải chịu ảnh hưởng của phần nhiễu chưa được loại bỏ hết từ UE-f.

4.1.2. BER trong kênh Rayleigh có chịu ảnh hưởng của nhiễu AWGN

Giả định kênh AWGN thực chất không khả dụng trong các ứng dụng thời gian thực vì truyền thông hồng dây phức tạp hơn do lan truyền đa đường và chịu ảnh hưởng bởi fading. Tại máy thu, do chuyển động nhiệt của các hạt mang điện nên khi hoạt động sẽ sinh ra nhiệt lượng, tạo ra nhiễu trắng có phân bố Gauss tác động cộng với tín hiệu thu được trong kênh. Trong mô phỏng hệ thống dùng kỹ thuật NOMA thì AWGN đại diện cho nhiễu nhiệt ở phía máy thu. Vì thế, để nâng cao tính thực tế của mô hình hệ thống thì cần xem xét các thông số hiệu năng của hệ thống NOMA trong kênh Rayleigh fading có chịu sự ảnh hưởng của nhiễu AWGN.

Các thông số mô phỏng tương tự như mô phỏng BER trong kênh AWGN. Tuy nhiên, cần thiết lập bổ sung các thông số như: hệ số suy hao là 4, khoảng cách của các người dùng đến BS của UE-n và UE-f lần lượt là 500m và 1000m, hệ số fading, nhiễu AWGN. Kết quả mô phỏng BER của hệ thống NOMA trong kênh Rayleigh fading chịu ảnh hưởng của nhiễu AWGN được thể hiện trên Hình 4.



Hình 4. Kết quả mô phỏng BER của hệ thống NOMA trong kênh truyền Rayleigh có chịu sự ảnh hưởng của nhiễu AWGN.

Hình 4 cho thấy thông số BER của hệ thống NOMA trong kênh Rayleigh fading chịu ảnh hưởng của nhiễu AWGN cũng có xu hướng giảm dần khi công suất phát tăng và lý do của sự khác biệt về giá trị BER giữa UE-n so với UE-f trong trường hợp này tương tự như trong trường hợp kênh của Hình 3 đã được giải thích. Cụ thể, khi công suất phát tăng thì BER của UE-n trong trường hợp SIC không hoàn hảo là cao nhất và BER của UE-f là thấp nhất. Tuy nhiên, khi xét tại cùng một mức công suất phát thì BER của cả hai người dùng trong kênh Rayleigh fading chịu ảnh hưởng của nhiễu AWGN cao hơn so với BER của cả hai người dùng trong kênh truyền AWGN do các tín hiệu phải cộng thêm phần nhiễu AWGN.

4.1.3. Đánh giá kết quả mô phỏng BER của hệ thống NOMA trong kênh AWGN và trong kênh Rayleigh có chịu sự ảnh hưởng của nhiễu AWGN

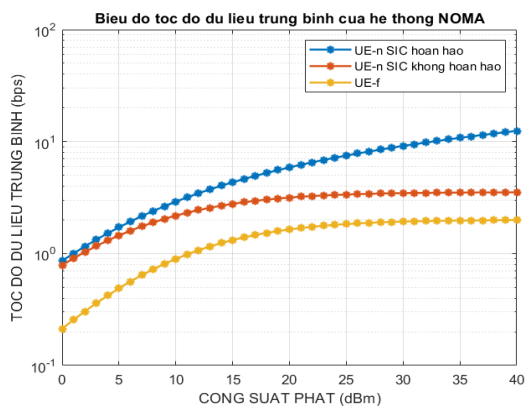
Từ kết quả mô phỏng thông số BER của hệ thống NOMA ở Hình 3 và Hình 4, chúng tôi rút ra các nhận xét chung như sau:

- Giá trị của thông số BER tỉ lệ nghịch với công suất phát, cụ thể là BER của hệ thống giảm dần khi công suất phát tăng.
- Đồ thị đường cong biểu diễn BER có xu hướng giảm dần hình thác nước. Khi khoảng cách từ các người dùng đến BS bằng nhau thì độ lớn của BER phụ thuộc vào độ lớn của hệ số phân bố công suất, người dùng nào có hệ số phân bố công suất lớn hơn thì sẽ có BER nhỏ hơn.
- Khi SIC không hoàn hảo sẽ làm giá trị BER của UE-n cao nhất khi so sánh với trường hợp khi SIC hoàn hảo và giá trị BER của UE-f.

4.2. Tốc độ dữ liệu của hệ thống NOMA

Bên cạnh BER thì tốc độ dữ liệu của các người dùng trong hệ thống cũng là một thông số quan trọng để đánh giá được chất lượng của hệ thống. Thông số này biểu thị cho lượng dữ liệu được truyền đi trong một đơn vị thời gian, giá trị càng cao thì độ trì hoãn khi truyền thông tin từ BS đến người dùng càng được khắc phục.

Các giá trị mô phỏng được thiết lập giống như mô phỏng BER của hệ thống NOMA trong kênh Rayleigh đã trình bày. Kết quả mô phỏng tốc độ dữ liệu của hệ thống NOMA được biểu diễn qua Hình 5 như sau:



Hình 5. Kết quả mô phỏng tốc độ dữ liệu của hệ thống NOMA.

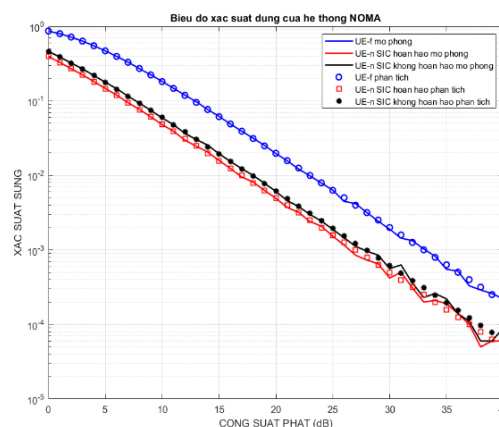
Hình 5 biểu diễn tốc độ dữ liệu của các người dùng trong hệ thống NOMA theo công suất phát của BS. Tốc độ dữ liệu của UE-n trong cả hai trường hợp SIC đều cao hơn hẳn so với UE-f do khoảng cách tính từ BS. Tuy nhiên, khi xem xét cụ thể UE-n trong hai trường hợp SIC thì ở trường hợp SIC hoàn hảo do không chịu tác động của nhiễu từ UE-n nên tốc độ dữ liệu lúc này cao hơn đáng kể so với trường hợp SIC không hoàn hảo (đường cong đồ thị tăng với chiều hướng dốc đứng hơn). Trong khi đó, tốc độ dữ liệu của UE-n khi SIC không hoàn hảo và UE-f tăng không đáng kể khi tăng công suất phát của BS và có xu hướng không tăng nữa khi công suất phát đủ lớn, ví dụ $P_T > 30 \text{ dBm}$.

4.3. Xác suất dừng của hệ thống NOMA

Xác suất dừng được định nghĩa là xác suất mà tốc độ dữ liệu có thể đạt được tức thời nhỏ hơn tốc độ dữ liệu ngưỡng được định trước để đảm bảo chất lượng hệ thống [18]. Nếu giá trị tức thời lớn hơn ngưỡng thì chất lượng truyền thông tin được thỏa mãn.

Ngoài các giá trị mô phỏng được thiết lập giống như mô phỏng BER của hệ thống NOMA trong kênh Rayleigh đã trình bày, mô phỏng này chúng tôi thiết lập thêm giá trị ngưỡng SINR cho UE-f và UE-n lần lượt là 1 dB và 2 dB. Kết quả phân tích lý thuyết và

mô phỏng xác suất dừng của hệ thống NOMA được biểu diễn trên Hình 6. Kết quả cho thấy đồ thị phân tích lý thuyết và đồ thị mô phỏng tương đồng nhau, khi công suất phát càng tăng thì OP của hệ thống càng giảm. Tại UE-n, khi SIC không hoàn hảo thì giá trị của OP sẽ cao hơn khi SIC hoàn hảo và giá trị chênh lệch của OP tại UE-n trong hai trường hợp này phụ thuộc vào giá trị lỗi SIC còn lại trong quá trình giải mã.



Hình 6. Kết quả mô phỏng OP của hệ thống NOMA.

5. KẾT LUẬN

Trong nội dung bài báo này, chúng tôi đã tóm tắt lại nguyên lý hoạt động của hệ thống thông tin vô tuyến ứng dụng kỹ thuật NOMA, xem xét cả trường hợp SIC hoàn hảo và không hoàn hảo. Nhiều kết quả mô phỏng đã được trình bày để đánh giá hiệu năng của hệ thống theo dạng BER, tốc độ dữ liệu và OP. Bài báo có thể được xem như là một nguồn tài liệu tham khảo cho sinh viên các ngành liên quan đến mạng viễn thông khi tìm hiểu kỹ thuật NOMA.

Hướng phát triển tiềm năng của nghiên cứu này có thể là phân tích và đánh giá hiệu năng của hệ thống thông tin vô tuyến ứng dụng kỹ thuật NOMA với số lượng lớn người dùng, kết hợp với các kỹ thuật loại bỏ can nhiễu phức tạp hơn. Ngoài ra, có thể kết hợp công nghệ bề mặt phản xạ thông minh (Reconfigurable Intelligent Surface - RIS) [19] vào mô hình hệ thống sử dụng NOMA để cải thiện tốc độ luồng thông tin mà người dùng có thể nhận được.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen and L. Hanzo, “A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G”, in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 3, pp. 2294-2323, thirdquarter 2018.
- [2] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. I, and Z. Wang, “Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends”, IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 9, pp. 74-81, Sep. 2015.
- [3] Saurabh Srivastava, Prajna Parimita Dash, and Sanjay Kumar “Analysis of NOMA: In Capacity Domain”, Jul. 2020.
- [4] Jie Mei, Lei Yao, Hang Long, and Kan Zheng, “Joint User Pairing and Power Allocation for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Systems”, 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1-6, May 2016.
- [5] Nguyen Duc Anh and Pham Ngoc Son, “Performance Analysis and Evaluation of Underlay Two-Way Cooperative Networks with NOMA”, 2020 5th International Conference on Green Technology and Sustainable Development (GTSD), Nov. 2020.
- [6] Thuy-Duong Nguyen, Van-Ca Phan, Phuc Q. Truong, “Energy Efficient Performance Analysis of NOMA for Wireless Down-link in Heterogeneous Networks under Imperfect SIC”, 2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE), Jul. 2019.
- [7] Ming Zeng, Animesh Yadav, Octavia A. Dobre, Georgios I. Tsiropoulos and H. Vincent Poor, “Capacity Comparison Between MIMO-NOMA and MIMO-OMA With Multiple Users in a Cluster”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 10, pp. 2413 - 2424, Oct. 2017.
- [8] SM Riazul Islam, Ming Zeng and Octavia A. Dobre, “NOMA in 5G Systems: Exciting Possibilities for Enhancing Spectral Efficiency”, IEEE 5G Tech Focus, vol. 1, no. 2, pp. 1-6, Jun 2017.
- [9] Fei Liu and Marina Petrova, “Dynamic Power Allocation for Downlink Multi-Carrier NOMA Systems”, IEEE Communications Letters, vol. 22, no. 9, pp. 1930 - 1933, Sep 2018.
- [10] Pei Sun, Weina Yuan and Hua Cheng, “A Novel Successive Interference Cancellation Arithmetic Based on NOMA System”, International Conference on Network, Communication, Computer Engineering (NCCE), vol. 147, pp. 1951-6851, May 2018.
- [11] Mahmoud Aldababsa, Mesut Toka, Selahattin Gokceli, Gunes Karabulut Kurt and Oğuz Kucur, “A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond”, Wireless Communications and Mobile Computing, pp. 1-24, Jun. 2018.
- [12] Jinho Choi, “On the Power Allocation for a Practical Multiuser Superposition Scheme in NOMA Systems”, IEEE Communications Letters, vol. 20, no.3, pp. 438 - 441, Mar 2016.
- [13] Haijian Sun, Bei Xie, Rose Qingyang Hu and Geng Wu, “Non-orthogonal Multiple Access with SIC Error Propagation in Downlink Wireless MIMO Networks”, 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), invited paper, Sep 2016.
- [14] Xuesong Liang, Xinbao Gong, Yongpeng Wu, Derrick Wing Kwan Ng and Tao Hong, “Analysis of Outage Probabilities for Cooperative NOMA Users with Imperfect CSI”, 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), pp. 1 - 7, Dec 2018.
- [15] Xinchun Zhang and Martin Haenggi, “The Performance of Successive Interference Cancellation in Random Wireless Networks”, IEEE Transactions on Information Theory, vol. 60, no. 10, pp. 6368-6388, Oct. 2014.
- [16] Muhammad Rehan Usman, Arsla Khan, Muhammad Arslan Usman, Yun Seong Jang and Soo Young Shin, “On the performance of perfect and imperfect SIC in downlink non orthogonal multiple access (NOMA)”, International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS), pp. 102–106, Oct 2016.

- [17] Muhammad Basit Shahab, Md Fazlul Kader and Soo Young Shin, “*Simulink implementation of non-orthogonal multiple access over AWGN and Rayleigh fading channels*”, International Conference on Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS), pp. 107–110, Oct 2016.
- [18] Shenhong Li, “*Outage probability analysis and robust power allocation for downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) system*”, Loughborough University, Sep 2020.
- [19] YLiu, Yuanwei and Liu, Xiao and Mu, Xidong and Hou, Tianwei and Xu, Jiaqi and Di Renzo, Marco and Al-Dhahir, Naofal, “*Reconfigurable Intelligent Surfaces: Principles and Opportunities*”, in IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021.

Tác giả chịu trách nhiệm bài viết:

Nguyễn Thị Thu Thảo

Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Thành phố Hồ Chí Minh

Email: 17141229@student.hcmute.edu.vn