

# PHÂN TÍCH VÀ ĐÁNH GIÁ HIỆU NĂNG CỦA NOMA-CRN SỬ DỤNG HỌC SÂU

Lê Minh Thanh<sup>1</sup>, Nguyễn Hữu Sự<sup>2</sup>, Ngô Hoàng Ân<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Trường Đại học Công nghiệp Thực phẩm TP.HCM (HUFIT)

<sup>2</sup>Công ty Viễn Thông Mobifone

<sup>3</sup>Trường Đại học Công nghiệp TP.HCM (IUH)

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

Ngày nhận bài: 10/06/2022; Ngày chấp nhận đăng: 15/07/2022

## TÓM TẮT

Hiệu năng của mạng vô tuyến nhận thức đa truy cập không trực giao NOMA-CRN (Non-Orthogonal Multiple Access Cognitive Radio Network) cho hai người dùng được phân tích và đánh giá trong bài báo này sử dụng kỹ thuật học sâu. Hướng tới mục tiêu này, nhóm tác giả trước hết đề xuất các biểu thức xác suất dừng chính xác dạng tường minh cho NOMA-CRN, tiếp theo là thực hiện các mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng tính chính xác của các biểu thức được đề xuất. Ngoài ra, kỹ thuật học sâu cũng được ứng dụng để xác minh độ chính xác của kết quả ước tính về xác suất dừng của NOMA-CRN so với lý thuyết và mô phỏng. Sau cùng, bài báo này cung cấp các kết quả để cho thấy tác động của các thông số hệ thống quan trọng đến hiệu năng của NOMA-CRN.

*Từ khóa:* Kỹ thuật học sâu, vô tuyến nhận thức, NOMA, xác suất dừng.

## 1. MỞ ĐẦU

Hiệu suất sử dụng phổ tần cao của mạng vô tuyến nhận thức đa truy cập không trực giao NOMA-CRN là do sự tích hợp của kỹ thuật đa truy cập không trực giao vào các thiết bị vô tuyến nhận thức, từ đó thỏa mãn được các ràng buộc thiết kế nghiêm ngặt của các mạng truyền thông hiện đại như 5G/6G. Pei và các cộng sự đã nghiên cứu NOMA-CRN với thiết bị chuyển tiếp và thiết bị đích có nhiều ăng ten [1]. Theo Arzykulov và các cộng sự, ảnh hưởng của nhiễu nhiệt và can nhiễu đồng kênh lên hiệu năng của NOMA-CRN với thiết bị chuyển tiếp hoạt động theo cơ chế khuếch đại và chuyển tiếp (Decode and Forward - DaF) [2, 3], nghĩa là thiết bị chuyển tiếp sẽ nhận tín hiệu từ thiết bị nguồn, thực hiện giải mã và sau đó, mã hóa lại trước khi truyền tín hiệu đến thiết bị đích. Bariah và các cộng sự đánh giá xác suất lỗi bit của NOMA-CRN với thiết bị khuếch đại và chuyển tiếp tối ưu [4], trong khi Luo cùng các cộng sự đánh giá xác suất dừng với bộ triệt can nhiễu tuần tự SIC (Successive Interference Cancellation) không hoàn hảo [5]. Chen và các cộng sự đã áp dụng lý thuyết về phân chia phổ tài nguyên tối ưu để cải thiện hiệu năng của NOMA-CRN [6].

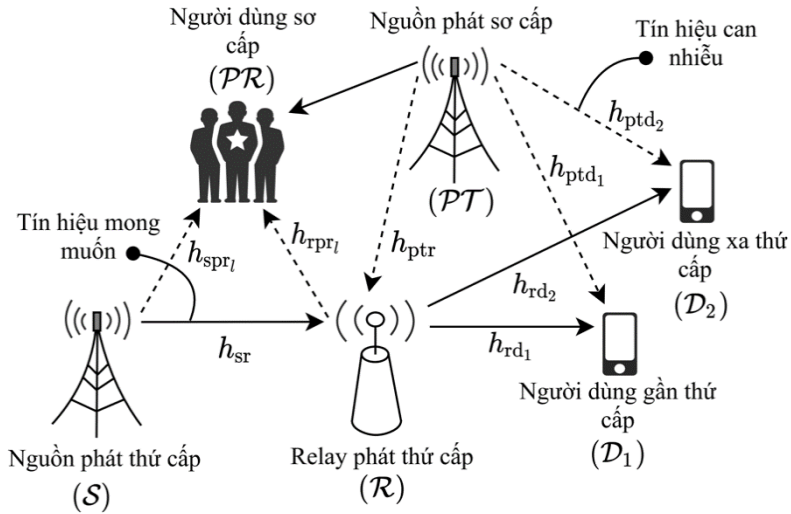
Ứng dụng kỹ thuật học sâu (KTHS) vào các hệ thống thông tin đang là xu thế nghiên cứu mới hiện nay. Theo nghiên cứu của Ho và các cộng sự, hiệu năng của truyền thông gói tin ngắn trong mạng vạn vật IoT (Internet of Things) được đánh giá bằng KTHS [7]. Kỹ thuật học sâu DNN (Deep Neural Networks) đã được Yang cùng với các cộng sự ứng dụng cho việc quản lý tài nguyên trong mạng NOMA [8]. Theo nghiên cứu Shim cùng các cộng sự, kỹ thuật gây nhiễu và lựa chọn người dùng được đề xuất để tăng cường bảo mật ở lớp vật lý cho mạng NOMA. Ngoài ra, hiệu năng của mạng này cũng được phân tích và đánh giá bằng kỹ thuật học sâu DNN [9].

Trong bài báo này, hiệu năng của NOMA-CRN được phân tích và đánh giá bằng cách ứng dụng KTHS với các đóng góp chính như sau:

- Đề xuất tích hợp kỹ thuật NOMA vào các thiết bị vô tuyến nhận thức để hình thành nên NOMA-CRN.
- Đề xuất ứng dụng KTHS vào việc dự đoán xác suất dừng của NOMA-CRN. Kết quả dự đoán xác suất dừng có thể đáp ứng thời gian thực, từ đó có thể dùng các kết quả dự đoán để tối ưu các tham số đầu vào của NOMA-CRN.
- Trình bày đa dạng các kết quả để có hiểu biết tường tận về ảnh hưởng của các thông số hệ thống như SNR, tốc độ truyền dữ liệu của hai người dùng thứ cấp, hệ số phân bổ công suất.

Phần tiếp theo của bài báo đề xuất mô hình NOMA-CRN. Tiếp theo, Phần 3 sẽ phân tích một cách chi tiết xác suất dừng. Kế đến, Phần 4 thực hiện các mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng độ chính xác của phân tích lý thuyết. Hơn nữa, Phần 4 cũng trình bày kết quả ước tính xác suất dừng ứng dụng kỹ thuật học sâu. Sau cùng, các kết luận được đúc kết trong Phần 5.

## 2. NOMA-CRN



Hình 1. NOMA-CRN được đề xuất

Xét NOMA-CRN được mô tả trong Hình 1. Nguồn phát thứ cấp  $S$  giao tiếp với hai người dùng NOMA  $D_1$  và  $D_2$  với sự trợ giúp của thiết bị chuyển tiếp  $R$  mà thực hiện DaF và bị can nhiễu đồng kênh từ nguồn phát sơ cấp  $PT$  đang phục vụ nhiều người dùng sơ cấp  $\mathcal{PR} = \{\mathcal{PR}_i\}_{i=1}^L$  ở gần nhau trong mạng vô tuyến nhận thức. Giả sử rằng, các thiết bị chỉ có một ăng ten và giữa nguồn phát thứ cấp và máy thu thứ cấp sẽ không có kết nối trực tiếp do sự tồn tại của vật cản hoặc hiện tượng che chắn.

Xét các kênh truyền fading Rayleigh. Trong Hình 1, hệ số kênh truyền  $h_{XY} \in \{h_{sr}, h_{spr1}, h_{spr2}, h_{rd1}, h_{rd2}, h_{ptd1}, h_{ptd2}, h_{ptr}\}$  từ nguồn phát  $X$  ( $S$ ,  $R$ , và  $PT$ ) đến máy thu  $Y$  ( $R$ ,  $\mathcal{PR}$ ,  $D_1$  và  $D_2$ ) được biểu diễn dưới dạng  $h_{XY} = \sqrt{\Omega_{XY}} \bar{h}$  với  $\bar{h}$  là fading cỡ nhỏ (small-scale) được biểu diễn với phân bố Gaussian có phương sai bằng 1 và trung bình bằng

0, được ký hiệu là  $\mathcal{CN}(0,1)$ , và  $\Omega_{XY}$  là hệ số fading cỡ lớn (large-scale).

Đối với mạng thứ cấp, nguồn phát phải thực hiện điều khiển công suất để đảm bảo can nhiễu trong mức cho phép đối với các người dùng sơ cấp của mạng sơ cấp như sau:

$$P_S = \min \left\{ \bar{P}, \frac{I_{th}}{\max_{l=1, \dots, L} |h_l^l|^2} \right\}, \quad (1)$$

với  $P_S$  là công suất phát tức thời của nguồn thứ cấp,  $\bar{P}$  là công suất phát tối đa của nguồn thứ cấp,  $I_{th}$  là công suất ngưỡng cho phép của mạng sơ cấp.  $h_l^l$  là hệ số kênh truyền ước lượng không hoàn hảo tại nguồn phát thứ cấp đến người dùng sơ cấp  $l$ . Trong thực tế, hệ số kênh truyền này không thể được ước lượng chính xác bởi nguồn phát thứ cấp. Do đó, nguồn phát thứ cấp phải thực hiện ước lượng kênh truyền bằng các kỹ thuật như Maximum Likelihood Estimation, Linear-Minimum-Mean-Square-Error Estimation, hoặc Least Square Estimation. Chính vì vậy, khi xét khía cạnh thực tế này thì

$$|h_l^l|^2 = \beta |h_{spr}^l|^2 + \sqrt{1-\beta^2} |h_{err}|^2, \quad (2)$$

trong đó:  $h_{spr}^l$  là hệ số kênh truyền thực,  $h_{err}$  là lỗi ước lượng kênh truyền, và  $\beta$  là hệ số miêu tả mức độ tương quan của kênh truyền được ước lượng và kênh truyền thật với  $\beta \in [0,1]$ .

NOMA-CRN được đề xuất sẽ thực hiện truyền dữ liệu thông qua hai khe thời gian. Nguồn thứ cấp truyền tín hiệu đến thiết bị chuyển tiếp trong khe thời gian thứ nhất. Tín hiệu này sẽ được giải mã và mã hóa lại tại thiết bị chuyển tiếp trước khi được phát tới các người dùng thứ cấp trong khe thời gian thứ hai. Chi tiết cụ thể về quá trình truyền tin sẽ được biểu diễn trong phân tiếp theo bên dưới.

## 2.1. Khe truyền thứ nhất

Trong khe thời gian này,  $\mathcal{S}$  sẽ truyền tín hiệu hỗn hợp bao gồm tín hiệu của người dùng gần  $x_1$  và người dùng xa  $x_2$  với hệ số phân chia công suất tương ứng là  $a_1$  và  $a_2$  theo kỹ thuật NOMA đến nút chuyển tiếp, với  $a_1 < a_2$ ,  $a_1 + a_2 = 1$  và giá trị trung bình của  $|x_1|^2$  và  $|x_2|^2$  đều bằng 1. Do đó, thiết bị chuyển tiếp với can nhiễu từ máy phát sơ cấp  $\mathcal{PT}$  nhận được tín hiệu:

$$y_{\mathcal{R}} = \sum_{j=1}^2 \sqrt{a_j P_S} x_j h_{sr} + \sqrt{P_T} s h_{ptr} + n_{\mathcal{R}} \quad (3)$$

với  $P_T$  là công suất phát của nguồn sơ cấp  $\mathcal{PT}$ ,  $s$  là tín hiệu của người dùng sơ cấp với  $E\{|s|^2\} = 1$  và  $n_{\mathcal{R}}$  là nhiễu Gaussian tại  $\mathcal{R}$  với  $n_{\mathcal{R}} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ .

Dựa trên kỹ thuật NOMA, thiết bị chuyển tiếp sẽ thực hiện giải mã tín hiệu của người dùng xa trước khi giải mã tín hiệu của người dùng gần theo nguyên tắc khử can nhiễu tuần tự SIC. Theo đó, giả sử quá trình SIC là lý tưởng, ta có tỷ số tín hiệu trên can nhiễu cộng nhiễu SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio) nhận được cho giải mã  $x_2$  và  $x_1$  lần lượt là

$$SINR_{\mathcal{R}}^{x_2} = \frac{a_2 P_S |h_{sr}|^2}{a_1 P_S |h_{sr}|^2 + P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2} \quad (4)$$

$$SINR_{\mathcal{R}}^{x_1} = \frac{a_1 P_S |h_{sr}|^2}{P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

## 2.2. Khe truyền thứ hai

Sau khi thực hiện giải mã tín hiệu  $x_1$  và  $x_2$  hoàn tất, thiết bị chuyển tiếp bắt đầu mã hóa lại hai tín hiệu này theo kỹ thuật NOMA và sau đó truyền tín hiệu hỗn hợp này đến các người dùng thứ cấp. Tương tự nguồn phát thứ cấp, thiết bị chuyển tiếp cũng phải điều khiển công suất để tránh tạo ra can nhiễu quá mức tới mạng sơ cấp. Vì vậy, công suất phát của thiết bị chuyển tiếp được biểu diễn như sau

$$P_R = \min \left\{ \alpha \bar{P}, \frac{I_{th}}{\max_{l=1, \dots, L} |h'_{l_2}|^2} \right\}, \quad (6)$$

trong đó:  $|h'_{l_2}|^2 = \beta |h'_{rpr}|^2 + \sqrt{1 - \beta^2} |h_{err}|^2$  và  $\alpha \in (0, 1]$  là tỷ số công suất của thiết bị chuyển tiếp trên công suất cực đại của nguồn phát sơ cấp.

Các tín hiệu được phát từ thiết bị chuyển tiếp đến người dùng thứ cấp cũng bị can nhiễu bởi các tín hiệu phát đi từ nguồn sơ cấp. Do đó, người dùng thứ cấp  $\mathcal{D}_i$  với  $i \in \{1, 2\}$  sẽ nhận được tín hiệu:

$$y_{\mathcal{D}_i} = \sum_{j=1}^2 \sqrt{a_j P_R} x_j h_{sd_i} + \sqrt{P_T} s h_{ptd_i} + n_{\mathcal{D}_i}, \quad (7)$$

với  $P_R$  là công suất phát của nút chuyển tiếp và  $n_{\mathcal{D}_i}$  là nhiễu Gaussian tại  $\mathcal{D}_i$  với  $n_{\mathcal{D}_i} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ .

Bởi vì  $\mathcal{D}_2$  có hệ số công suất  $a_2$  lớn hơn hệ số  $a_1$  của  $\mathcal{D}_1$  nên  $\mathcal{D}_2$  sẽ giải mã trực tiếp tín hiệu  $x_2$  và xem tín hiệu  $x_1$  như nhiễu nền. Khi đó, SINR nhận được tại  $\mathcal{D}_2$  cho giải mã tín hiệu  $x_2$  có thể được biểu diễn như sau

$$SINR_{\mathcal{D}_2}^{x_2} = \frac{a_2 P_R |h_{rd_2}|^2}{a_1 P_R |h_{rd_2}|^2 + P_T |h_{ptd_2}|^2 + \sigma^2}. \quad (8)$$

Ngược lại,  $\mathcal{D}_1$  phải thực hiện SIC để loại bỏ tín hiệu  $x_2$  trước khi giải mã tín hiệu  $x_1$ . Vì vậy, SINR nhận được tại  $\mathcal{D}_1$  cho giải mã tín hiệu  $x_2$  và  $x_1$  được biểu diễn lần lượt như sau

$$SINR_{\mathcal{D}_1}^{x_2} = \frac{a_2 P_R |h_{rd_1}|^2}{a_1 P_R |h_{rd_1}|^2 + P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2}, \quad (9)$$

$$SINR_{\mathcal{D}_1}^{x_1} = \frac{a_1 P_R |h_{rd_1}|^2}{P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2}. \quad (10)$$

### 3. HIỆU NĂNG CỦA NOMA-CRN

Các biểu thức xác suất dừng chính xác dạng tường minh sẽ được suy ra trong phần này để đánh giá nhanh hiệu năng hệ thống mà không cần các mô phỏng tốn nhiều thời gian. Xác suất này được định nghĩa như là xác suất mà SINR nhận được tại máy thu nhỏ hơn một giá trị ngưỡng cho trước. Đối với NOMA-CRN, xác suất dừng được tính toán với hai sự kiện chính như sau:

**Sự kiện 1:** Thiết bị chuyển tiếp không giải mã thành công tín hiệu của các người dùng thứ cấp.

**Sự kiện 2:** Thiết bị chuyển tiếp hoàn toàn giải mã được tín hiệu của các người dùng thứ cấp nhưng người dùng thứ cấp không giải mã được tín hiệu, nghĩa là (i) người dùng xa không giải mã thành công tín hiệu  $x_2$  và (ii) người dùng gần không giải mã thành công tín hiệu  $x_2$  hoặc tín hiệu  $x_1$ .

Để thuận lợi khi trình bày xác suất dừng của các người dùng thứ cấp, ta ký hiệu  $\Lambda_1 = \max_{l=1, \dots, L} |h_{l_1}^l|^2$  và  $\Lambda_2 = \max_{l=1, \dots, L} |h_{l_2}^l|^2$ . Vì kênh truyền  $h$  được xem xét là kênh truyền Rayleigh nên  $|h|^2$  có phân bố mũ (ngoại trừ  $\Lambda_1$  và  $\Lambda_2$ ) với hàm mật độ xác suất PDF (Probability Density Function) và hàm phân bố tích lũy CDF (Cumulative Distribution Function) lần lượt là

$$f_{|h_{AB}|^2}(x) = \frac{1}{\Omega_{AB}} \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{AB}}\right) \quad (11)$$

$$F_{|h_{AB}|^2}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{AB}}\right) \quad (12)$$

Khi đó,  $\Lambda_1$  và  $\Lambda_2$  có hàm phân phối CDF và PDF [10] lần lượt như sau

$$F_{\Lambda_i}(x) = 1 - \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_i}\right) \quad (13)$$

$$f_{\Lambda_i}(x) = \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2\lambda_i} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_i}\right) \quad (14)$$

trong đó:  $\lambda_i = \frac{(1+l-l\beta^2)\Omega_i}{l+1}$  và  $\psi(L, l) = \binom{L-1}{l} \frac{2L(-1)^l}{l+1}$ .

#### 3.1. Xác suất dừng theo Sự kiện 1

Sử dụng điều kiện bù để tính xác suất dừng tại thiết bị chuyển tiếp như sau:

$$\begin{aligned}
 OP_{\mathcal{R}} &= 1 - \Pr\left(SINR_{\mathcal{R}}^{x_2} > \gamma_2, SINR_{\mathcal{R}}^{x_1} > \gamma_1\right) \\
 &= 1 - \Pr\left(\frac{a_2 P_S |h_{sr}|^2}{a_1 P_S |h_{sr}|^2 + P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2} > \gamma_2, \frac{a_1 P_S |h_{sr}|^2}{P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2} > \gamma_1\right) \\
 &= 1 - \Pr\left(P_S |h_{sr}|^2 > \frac{\gamma_2 (P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2)}{(a_2 - \gamma_2 a_1)}, P_S |h_{sr}|^2 > \frac{\gamma_1 (P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2)}{a_1}\right) \\
 &= 1 - \Pr\left(P_S |h_{sr}|^2 > \underbrace{\max\left(\frac{\gamma_2}{(a_2 - \gamma_2 a_1)}, \frac{\gamma_1}{a_1}\right)}_{\Xi_1} (P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2)\right)
 \end{aligned} \tag{15}$$

trong đó:  $\gamma_2$  và  $\gamma_1$  là ngưỡng giải mã cho người dùng xa và người dùng gần với  $\gamma_i = 2^{2R_i} - 1$ ,  $i \in \{1, 2\}$ ,  $R_i$  là tốc độ bit của người dùng  $\mathcal{D}_i$  và  $a_2 - \gamma_2 a_1 > 0$  nếu không thì  $OP_{\mathcal{R}} = 1$ .

Thay thế điều kiện công suất ở (1) vào biểu thức trên, ta có

$$\begin{aligned}
 OP_{\mathcal{R}} &= 1 - \Pr\left(\min\left\{\bar{P}, \frac{I_{th}}{\Lambda_1}\right\} |h_{sr}|^2 > \Xi_1 (P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2)\right) \\
 &= 1 - \left[ \Pr\left(\bar{P} |h_{sr}|^2 > \Xi_1 (P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2), \bar{P} < \frac{I_{th}}{\Lambda_1}\right) \right. \\
 &\quad \left. + \Pr\left(\frac{I_{th}}{\Lambda_1} |h_{sr}|^2 > \Xi_1 (P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2), \bar{P} > \frac{I_{th}}{\Lambda_1}\right) \right]
 \end{aligned} \tag{16}$$

Ta tính  $Q_1$  như sau

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \Pr\left(\frac{\bar{P}}{\sigma^2} |h_{sr}|^2 > \Xi_1 \left(\frac{P_T}{\sigma^2} |h_{ptr}|^2 + 1\right), \frac{\bar{P}}{\sigma^2} < \frac{I_{th}}{\sigma^2 \Lambda_1}\right) \\
 &= \Pr\left(|h_{sr}|^2 > \frac{\Xi_1}{\rho_S} \left(\rho_T |h_{ptr}|^2 + 1\right), \rho_S < \frac{\rho_{th}}{\Lambda_1}\right)
 \end{aligned} \tag{17}$$

trong đó:  $\rho_S = \frac{\bar{P}}{\sigma^2}$ ,  $\rho_T = \frac{P_T}{\sigma^2}$ ,  $\rho_{th} = \frac{I_{th}}{\sigma^2}$ .

Các biến ngẫu nhiên  $|h_{sr}|^2$ ,  $|h_{ptr}|^2$ ,  $\Lambda_1$  là độc lập nên

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= \Pr\left(x > \frac{\Xi_1}{\rho_S}(\rho_T y + 1)\right) \Pr\left(z < \frac{\rho_{th}}{\rho_S}\right) \\
 &= F_{\Lambda_1}\left(\frac{\rho_{th}}{\rho_S}\right) \int_0^\infty \left[1 - F_{|h_{sr}|^2}\left(\frac{\Xi_1}{\rho_S}(\rho_T y + 1)\right)\right] f_{|h_{ptr}|^2}(y) dy \\
 &= \left[1 - \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2} \exp\left(-\frac{\rho_{th}}{\rho_S \lambda_{\Lambda_1}}\right)\right] \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\Xi_1(\rho_T y + 1)}{\rho_S \Omega_{sr}}\right) \frac{1}{\Omega_{ptr}} \exp\left(-\frac{y}{\Omega_{ptr}}\right) dy \\
 &= \left[1 - \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2} \exp\left(-\frac{\rho_{th}}{\rho_S \lambda_{\Lambda_1}}\right)\right] \frac{1}{\Omega_{ptr}} \exp\left(-\frac{\Xi_1}{\rho_S \Omega_{sr}}\right) \int_0^\infty \exp\left(-\left(\frac{\Xi_1 \rho_T}{\rho_S \Omega_{sr}} + \frac{1}{\Omega_{ptr}}\right)y\right) dy \\
 &= \left[1 - \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2} \exp\left(-\frac{\rho_{th}}{\rho_S \lambda_{\Lambda_1}}\right)\right] \frac{\exp\left(-\frac{\Xi_1}{\rho_S \Omega_{sr}}\right)}{\Omega_{ptr} \left(\frac{\Xi_1 \rho_T}{\rho_S \Omega_{sr}} + \frac{1}{\Omega_{ptr}}\right)}
 \end{aligned}$$

(18)

Bây giờ, ta tính  $Q_2$  như sau:

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= \Pr\left(|h_{sr}|^2 > \frac{\Xi_1}{I_{th}} \Lambda_1 \left(P_T |h_{ptr}|^2 + \sigma^2\right), \Lambda_1 > \frac{I_{th}}{P}\right) \\
 &= \int_{y=0}^\infty \int_{x=\frac{\rho_{th}}{\rho_S}}^\infty \left[1 - F_{|h_{sr}|^2}\left(\frac{\Xi_1 x(\rho_T y + 1)}{\rho_{th}}\right)\right] f_{\Lambda_1}(x) dx f_{|h_{ptr}|^2}(y) dy \\
 &= \int_{y=0}^\infty \int_{x=\frac{\rho_{th}}{\rho_S}}^\infty \exp\left(-\frac{\Xi_1 x(\rho_T y + 1)}{\rho_{th} \Omega_{sr}}\right) \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2 \lambda_{\Lambda_1}} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_{\Lambda_1}}\right) dx f_{|h_{ptr}|^2}(y) dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2 \lambda_{\Lambda_1}} \int_{y=0}^\infty \int_{x=\frac{\rho_{th}}{\rho_S}}^\infty \exp\left(-\left(\frac{\Xi_1 \rho_T y + \Xi_1}{\rho_{th} \Omega_{sr}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_1}}\right)x\right) dx f_{|h_{ptr}|^2}(y) dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2 \lambda_{\Lambda_1}} \exp\left(-\left(\frac{\Xi_1}{\rho_{th} \Omega_{sr}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_1}}\right) \frac{\rho_{th}}{\rho_S}\right) \int_{y=0}^\infty \frac{\exp\left(-\frac{\Xi_1 \rho_T}{\rho_S \Omega_{sr}} y\right)}{\left(\frac{\Xi_1 \rho_T}{\rho_{th} \Omega_{sr}} y + \left(\frac{\Xi_1}{\rho_{th} \Omega_{sr}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_1}}\right)\right)} f_{|h_{ptr}|^2}(y) dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l)}{2 \lambda_{\Lambda_1}} \exp\left(-\Phi_1 \frac{\rho_{th}}{\rho_S}\right) \int_{y=0}^\infty \frac{\exp\left(-\frac{\Xi_1 \rho_T}{\rho_S \Omega_{sr}} y\right)}{\frac{\Xi_1 \rho_T}{\rho_{th} \Omega_{sr}} \left(y + \frac{\rho_{th} \Omega_{sr}}{\Xi_1 \rho_T} \Phi_1\right)} \frac{1}{\Omega_{ptr}} \exp\left(-\frac{y}{\Omega_{ptr}}\right) dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l) \rho_{th} \Omega_{sr}}{2 \lambda_{\Lambda_1} \Omega_{ptr} \Xi_1 \rho_T} \exp\left(-\Phi_1 \frac{\rho_{th}}{\rho_S}\right) \int_{y=0}^\infty \frac{\exp\left(-\left(\frac{\Xi_1 \rho_T}{\rho_S \Omega_{sr}} + \frac{1}{\Omega_{ptr}}\right)y\right)}{\left(y + \frac{\rho_{th} \Omega_{sr}}{\Xi_1 \rho_T} \Phi_1\right)} dy
 \end{aligned}$$

(19)

trong đó:  $\Phi_1 = \frac{\Xi_1}{\rho_{th}\Omega_{sr}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_1}}$ .

Tích phân trên có dạng  $\int_0^{\infty} \frac{\exp(-ax)}{(x+b)} dx = -\exp(ab) Ei(-ab)$  trong [11] nên ta có thể viết lại (19) như sau:

$$Q_2 = -\sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L,l)\rho_{th}\Omega_{sr}}{2\lambda_{\Lambda_1}\Omega_{ptr}\Xi_1\rho_T} \exp\left(-\Phi_1 \frac{\rho_{th}}{\rho_S}\right) \times \exp\left(\frac{\rho_{th}}{\rho_S}\Phi_1 + \frac{\rho_{th}\Omega_{sr}\Phi_1}{\Omega_{ptr}\Xi_1\rho_T}\right) Ei\left(-\left(\frac{\rho_{th}}{\rho_S}\Phi_1 + \frac{\rho_{th}\Omega_{sr}\Phi_1}{\Omega_{ptr}\Xi_1\rho_T}\right)\right) \quad (20)$$

### 3.2. Xác suất dừng theo Sự kiện 2

- *Xác suất tại người dùng xa*

Phần này thực hiện tính xác suất dừng khi thiết bị chuyển tiếp phát tín hiệu đến người dùng xa thứ cấp. Xác suất dừng này được tính như sau:

$$\begin{aligned} OP_{D_2} &= 1 - \Pr\left(SINR_{D_2}^{x_2} > \gamma_2\right) \\ &= 1 - \Pr\left(\frac{a_2 P_R |h_{rd_2}|^2}{a_1 P_R |h_{rd_2}|^2 + P_T |h_{ptd_2}|^2 + \sigma^2} > \gamma_2\right) \\ &= 1 - \Pr\left(P_R |h_{rd_2}|^2 > \underbrace{\frac{\gamma_2}{(a_2 - \gamma_2 a_1)}}_{\Xi_2} \left(P_T |h_{ptd_2}|^2 + \sigma^2\right)\right) \\ &= 1 - \left[ \underbrace{\Pr\left(\alpha \rho_S |h_{rd_2}|^2 > \Xi_2 \left(\rho_T |h_{ptd_2}|^2 + 1\right), \alpha \rho_S < \frac{\rho_{th}}{\Lambda_2}\right)}_{Q_3} \right. \\ &\quad \left. + \Pr\left(\frac{\rho_{th}}{\Lambda_2} |h_{rd_2}|^2 > \Xi_2 \left(\rho_T |h_{ptd_2}|^2 + 1\right), \alpha \rho_S > \frac{\rho_{th}}{\Lambda_2}\right) \right] \quad (21) \\ &\quad \underbrace{\hspace{10em}}_{Q_4} \end{aligned}$$

Để có thể tính được biểu thức xác suất trên, ta cần thực hiện tính hai xác suất  $Q_3$  và  $Q_4$  mà lần lượt được tính như sau:



$$\begin{aligned}
 Q_3 &= \Pr\left(|h_{rd_2}|^2 > \frac{\Xi_2}{\alpha\rho_S}(\rho_T|h_{pid_2}|^2 + 1)\right)\Pr\left(\Lambda_2 < \frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right) \\
 &= F_{\Lambda_2}\left(\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right)\int_0^\infty\left[1 - F_{|h_{rd_2}|^2}\left(\frac{\Xi_2}{\alpha\rho_S}(\rho_T x + 1)\right)\right]f_{|h_{pid_2}|^2}(x)dx \\
 &= F_{\Lambda_2}\left(\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right)\int_0^\infty\exp\left(-\frac{\Xi_2}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_2}}(\rho_T x + 1)\right)\frac{1}{\Omega_{pid_2}}\exp\left(-\frac{x}{\Omega_{pid_2}}\right)dx \\
 &= \left[1 - \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2}\exp\left(-\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S\lambda_{\Lambda_2}}\right)\right]\frac{\exp\left(-\frac{\Xi_2}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_2}}\right)}{\Omega_{pid_2}}\int_0^\infty\exp\left(-\left(\frac{\Xi_2\rho_T}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_2}} + \frac{1}{\Omega_{pid_2}}\right)x\right)dx \\
 &= \left[1 - \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2}\exp\left(-\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S\lambda_{\Lambda_2}}\right)\right]\frac{\exp\left(-\frac{\Xi_2}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_2}}\right)}{\Omega_{pid_2}\left(\frac{\Xi_2\rho_T}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_2}} + \frac{1}{\Omega_{pid_2}}\right)}
 \end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
 Q_4 &= \Pr\left(|h_{rd_2}|^2 > \frac{\Xi_2}{\rho_{th}}\Lambda_2(\rho_T|h_{pid_2}|^2 + 1), \Lambda_2 > \frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right) \\
 &= \int_{y=0}^\infty\int_{x=\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}}^\infty\left[1 - F_{|h_{rd_2}|^2}\left(\frac{\Xi_2}{\rho_{th}}x(\rho_T y + 1)\right)\right]f_{\Lambda_2}(x)f_{|h_{pid_2}|^2}(y)dx dy \\
 &= \int_{y=0}^\infty\int_{x=\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}}^\infty\exp\left(-\frac{\Xi_2}{\rho_{th}\Omega_{rd_2}}x(\rho_T y + 1)\right)\sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2\lambda_{\Lambda_2}}\exp\left(-\frac{x}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)f_{|h_{pid_2}|^2}(y)dx dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2\lambda_{\Lambda_2}}\int_{y=0}^\infty\int_{x=\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}}^\infty\exp\left(-\left(\frac{\Xi_2(\rho_T y + 1)}{\rho_{th}\Omega_{rd_2}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)x\right)dx f_{|h_{pid_2}|^2}(y)dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2\lambda_{\Lambda_2}}\int_{y=0}^\infty\frac{\exp\left(-\left(\frac{\Xi_2\rho_T}{\Omega_{rd_2}\alpha\rho_S}y + \left(\frac{\Xi_2}{\rho_{th}\Omega_{rd_2}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right)\right)}{\left(\frac{\Xi_2\rho_T}{\rho_{th}\Omega_{rd_2}}y + \left(\frac{\Xi_2}{\rho_{th}\Omega_{rd_2}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)\right)}f_{|h_{pid_2}|^2}(y)dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)\rho_{th}\Omega_{rd_2}}{2\lambda_{\Lambda_2}\Omega_{pid_2}\Xi_2\rho_T}\exp\left(-\left(\frac{\Xi_2}{\rho_{th}\Omega_{rd_2}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right)\int_{y=0}^\infty\frac{\exp\left(-\left(\frac{\Xi_2\rho_T}{\Omega_{rd_2}\alpha\rho_S} + \frac{1}{\Omega_{pid_2}}\right)y\right)}{\left(y + \frac{\rho_{th}\Omega_{rd_2}}{\Xi_2\rho_T}\left(\frac{\Xi_2}{\rho_{th}\Omega_{rd_2}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)\right)}dy,
 \end{aligned} \tag{23}$$

Vì (23) có dạng tương tự với  $Q_2$  nên ta có thể dễ dàng rút ra biểu thức cho  $Q_4$  như sau:

$$Q_4 = -\sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l) \rho_{th} \Omega_{rd_2}}{2\lambda_{\Lambda_2} \Omega_{ptd_2} \Xi_2 \rho_T} \exp\left(-\Phi_2 \frac{\rho_{th}}{\alpha \rho_S}\right) \times \exp\left(\frac{\rho_{th} \Phi_2}{\alpha \rho_S} + \frac{\rho_{th} \Omega_{rd_2} \Phi_2}{\Omega_{ptd_2} \Xi_2 \rho_T}\right) Ei\left(-\left(\frac{\rho_{th} \Phi_2}{\alpha \rho_S} + \frac{\rho_{th} \Omega_{rd_2} \Phi_2}{\Omega_{ptd_2} \Xi_2 \rho_T}\right)\right) \quad (24)$$

trong đó:  $\Phi_2 = \left(\frac{\Xi_2}{\rho_{th} \Omega_{rd_2}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)$ .

▪ *Xác suất dừng tại người dùng ở gần*

Phần này tiếp tục thực hiện tính xác suất dừng khi thiết bị chuyển tiếp phát tín hiệu đến người dùng gần thứ cấp. Xác suất dừng này được tính như sau:

$$\begin{aligned} OP_{D_1} &= 1 - \Pr\left(SINR_{D_1}^{x_2} > \gamma_2, SINR_{D_1}^{x_1} > \gamma_1\right) \\ &= 1 - \Pr\left(\frac{a_2 P_R |h_{rd_1}|^2}{a_1 P_R |h_{rd_1}|^2 + P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2} > \gamma_2, \frac{a_1 P_R |h_{rd_1}|^2}{P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2} > \gamma_1\right) \\ &= 1 - \Pr\left(P_R |h_{rd_1}|^2 > \frac{\gamma_2 (P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2)}{(a_2 - \gamma_2 a_1)}, P_S |h_{rd_1}|^2 > \frac{\gamma_1}{a_1} (P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2)\right) \\ &= 1 - \Pr\left(P_R |h_{rd_1}|^2 > \underbrace{\max\left(\frac{\gamma_2}{(a_2 - \gamma_2 a_1)}, \frac{\gamma_1}{a_1}\right)}_{\Xi_1} (P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2)\right) \end{aligned} \quad (25)$$

mà được rút gọn như sau:

$$\begin{aligned} OP_{D_1} &= 1 - \Pr\left(\overbrace{\alpha \bar{P} |h_{rd_1}|^2 > \Xi_1 (P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2), \alpha \bar{P} < \frac{I_{th}}{\Lambda_2}}^{Q_5}\right) \\ &\quad - \Pr\left(\underbrace{\frac{I_{th}}{\Lambda_2} |h_{rd_1}|^2 > \Xi_1 (P_T |h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2), \alpha \bar{P} > \frac{I_{th}}{\Lambda_2}}_{Q_6}\right). \end{aligned} \quad (26)$$

Để tìm ra biểu thức của  $OP_{D_1}$ , ta phải tính các biểu thức xác suất  $Q_5$  và  $Q_6$  lần lượt như sau:

$$\begin{aligned}
 Q_5 &= \Pr\left(|h_{rd_1}|^2 > \frac{\Xi_1}{\alpha\rho_S}(\rho_T|h_{ptd_1}|^2 + 1)\right)\Pr\left(\Lambda_2 < \frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right) \\
 &= F_{\Lambda_2}\left(\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right)\int_0^\infty\left[1 - F_{|h_{rd_1}|^2}\left(\frac{\Xi_1}{\alpha\rho_S}(\rho_T y + 1)\right)\right]f_{|h_{ptd_1}|^2}(y)dy \\
 &= \left[1 - \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2}\exp\left(-\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S\lambda_{\Lambda_2}}\right)\right]\int_0^\infty\exp\left(-\frac{\Xi_1(\rho_T y + 1)}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_1}}\right)\frac{1}{\Omega_{ptd_1}}\exp\left(-\frac{y}{\Omega_{ptd_1}}\right)dy \\
 &= \left[1 - \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2}\exp\left(-\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S\lambda_{\Lambda_2}}\right)\right]\frac{1}{\Omega_{ptd_1}}\exp\left(-\frac{\Xi_1}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_1}}\right)\times \\
 &\quad \int_0^\infty\exp\left(-\left(\frac{\Xi_1\rho_T}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_1}} + \frac{1}{\Omega_{ptd_1}}\right)y\right)dy \\
 &= \left[1 - \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2}\exp\left(-\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S\lambda_{\Lambda_2}}\right)\right]\frac{\exp\left(-\frac{\Xi_1}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_1}}\right)}{\Omega_{ptd_1}\left(\frac{\Xi_1\rho_T}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_1}} + \frac{1}{\Omega_{ptd_1}}\right)}
 \end{aligned} \tag{27}$$

và

$$\begin{aligned}
 Q_6 &= \Pr\left(|h_{rd_1}|^2 > \frac{\Xi_1}{I_{th}}\Lambda_1(P_T|h_{ptd_1}|^2 + \sigma^2), \Lambda_2 > \frac{I_{th}}{\alpha P}\right) \\
 &= \int_{y=0}^\infty\int_{x=\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}}^\infty\left[1 - F_{|h_{rd_1}|^2}\left(\frac{\Xi_1 x(\rho_T y + 1)}{\rho_{th}}\right)\right]f_{\Lambda_2}(x)dx f_{|h_{ptd_1}|^2}(y)dy \\
 &= \int_{y=0}^\infty\int_{x=\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}}^\infty\exp\left(-\frac{\Xi_1 x(\rho_T y + 1)}{\rho_{th}\Omega_{rd_1}}\right)\sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2\lambda_{\Lambda_2}}\exp\left(-\frac{x}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)dx f_{|h_{ptd_1}|^2}(y)dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2\lambda_{\Lambda_2}}\int_{y=0}^\infty\int_{x=\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}}^\infty\exp\left(-\left(\frac{\Xi_1\rho_T y + \Xi_1}{\rho_{th}\Omega_{rd_1}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)x\right)dx f_{|h_{ptd_1}|^2}(y)dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2\lambda_{\Lambda_2}}\exp\left(-\left(\frac{\Xi_1}{\rho_{th}\Omega_{rd_1}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right)\int_{y=0}^\infty\frac{\exp\left(-\frac{\Xi_1\rho_T}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_1}}y\right)}{\left(\frac{\Xi_1\rho_T}{\rho_{th}\Omega_{rd_1}}y + \left(\frac{\Xi_1}{\rho_{th}\Omega_{rd_1}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}\right)\right)}f_{|h_{ptd_1}|^2}(y)dy \\
 &= \sum_{l=0}^{L-1}\frac{\psi(L,l)}{2\lambda_{\Lambda_2}}\exp\left(-\Phi_3\frac{\rho_{th}}{\alpha\rho_S}\right)\int_{y=0}^\infty\frac{\exp\left(-\frac{\Xi_1\rho_T}{\alpha\rho_S\Omega_{rd_1}}y\right)}{\frac{\Xi_1\rho_T}{\rho_{th}\Omega_{rd_1}}\left(y + \frac{\rho_{th}\Omega_{rd_1}}{\Xi_1\rho_T}\Phi_3\right)}\frac{1}{\Omega_{ptd_1}}\exp\left(-\frac{y}{\Omega_{ptd_1}}\right)dy
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l) \rho_{th} \Omega_{rd_1}}{2 \lambda_{\Lambda_2} \Omega_{ptd_1} \Xi_1 \rho_T} \exp\left(-\Phi_3 \frac{\rho_{th}}{\alpha \rho_S}\right) \int_{y=0}^{\infty} \frac{\exp\left(-\left(\frac{\Xi_1 \rho_T}{\alpha \rho_S \Omega_{rd_1}} + \frac{1}{\Omega_{ptd_1}}\right) y\right)}{\left(y + \frac{\rho_{th} \Omega_{rd_1}}{\Xi_1 \rho_T} \Phi_3\right)} dy \\
 &= -\sum_{l=0}^{L-1} \frac{\psi(L, l) \rho_{th} \Omega_{rd_1}}{2 \lambda_{\Lambda_2} \Omega_{ptd_1} \Xi_1 \rho_T} \exp\left(-\Phi_3 \frac{\rho_{th}}{\alpha \rho_S}\right) \times \\
 &\quad \exp\left(\frac{\rho_{th} \Phi_3}{\alpha \rho_S} + \frac{\rho_{th} \Omega_{rd_1} \Phi_3}{\Xi_1 \rho_T \Omega_{ptd_1}}\right) Ei\left(-\left(\frac{\rho_{th} \Phi_3}{\alpha \rho_S} + \frac{\rho_{th} \Omega_{rd_1} \Phi_3}{\Xi_1 \rho_T \Omega_{ptd_1}}\right)\right)
 \end{aligned} \tag{28}$$

trong đó:  $\Phi_3 = \frac{\Xi_1}{\rho_{th} \Omega_{rd_1}} + \frac{1}{\lambda_{\Lambda_2}}$ .

### 3.3. Tổng kết xác suất dừng

**Sự kiện 2** tác động trực tiếp đến hiệu năng của NOMA-CRN nên chúng tôi tập trung xem xét xác suất dừng cho sự kiện này. Do đó, biểu thức xác suất dừng tương ứng cho hai người dùng thứ cấp được xác định bởi

- Xác suất dừng toàn trình cho người dùng xa được tính như sau:

$$OP_{D_2}^{e2e} = OP_{\mathcal{R}} + [1 - OP_{\mathcal{R}}] OP_{D_2} = 1 - Q_1 - Q_2 + [Q_1 + Q_2][1 - Q_3 - Q_4]. \tag{29}$$

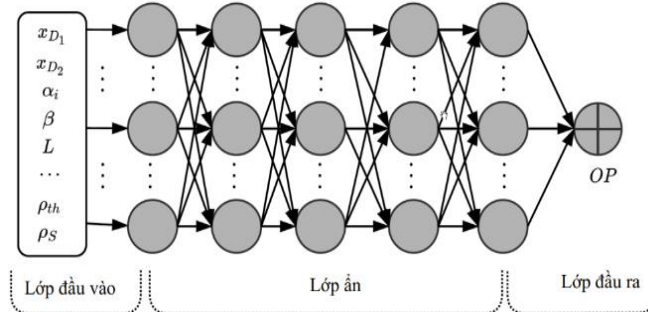
- Xác suất dừng toàn trình cho người dùng gần được tính như sau:

$$OP_{D_1}^{e2e} = OP_{\mathcal{R}} + [1 - OP_{\mathcal{R}}] OP_{D_1} = 1 - Q_1 - Q_2 + [Q_1 + Q_2][1 - Q_5 - Q_6]. \tag{30}$$

### 3.4. Dự đoán xác suất dừng bằng kỹ thuật học sâu

- Mô hình dự đoán xác suất dừng bằng DNN

Bài báo này ứng dụng KTHS DNN như bài toán hồi quy để đánh giá xác suất dừng. Hình 2 minh họa DNN được ứng dụng với một lớp đầu vào, nhiều lớp ẩn và một lớp đầu ra.



Hình 2. Mô hình DNN

Xét mô hình với giả sử tọa độ của người dùng  $D_1$  là (30,30), tọa độ của người dùng  $D_2$  là (80,5), tọa độ của thiết bị chuyển tiếp là (25,0), tọa độ của máy phát sơ cấp là (100,0), tọa độ của máy thu sơ cấp là (30,40), tọa độ của trạm phát thứ cấp là (0,0), hệ số phân bổ công

suất  $a_1 = 0.2$ , hệ số ước lượng  $\beta = 0.6$ , số lượng máy thu sơ cấp  $L=5$ , và giá trị ngưỡng cho phép  $\rho_{th} = 20, 30$  dB được dùng làm biên đầu vào cho DNN. Căn cứ vào các kết quả trong các biểu thức (29) và biểu thức (30), một tập dữ liệu được tạo với hơn 500000 mẫu, trong đó 80% dành cho huấn luyện và 20% dùng để thử nghiệm. Quan sát về mặt số học rằng số lượng mẫu này phù hợp để thu được các dự đoán xác suất dùng chính xác cao trong hầu hết các trường hợp.

- *Huấn luyện*

Hàm kích hoạt đơn vị tuyến tính hàm mũ ELU (Exponential Linear Unit)  $\Xi(w)$  được sử dụng cho mỗi lớp ẩn để thực hiện việc tạo ngưỡng cho mọi phần tử đầu vào  $z$ , trong đó bất kỳ giá trị nào nhỏ hơn 0 đều được làm tròn thành 0, theo công thức sau:

$$\Xi(w) = \begin{cases} \Delta(e^w - 1) & , w < 0 \\ w & , w \geq 0 \end{cases} \quad (31)$$

trong đó:  $\Delta$  là giá trị không đổi được khởi tạo bằng 1. So với các hàm kích hoạt Sigmoid hoặc Tanh thì hàm kích hoạt ELU mang lại lợi ích đáng kể hơn, chẳng hạn như tính toán đơn giản và tối ưu hóa dễ dàng hơn, do đặc tính gần như tuyến tính của nó, và ELU tránh được vấn đề về Gradient biến mất (Vanishing Gradients), nghĩa là khi đạo hàm quá nhỏ thì  $\Xi(w)$  gần như bằng 0 trong [12]. Ở đây không áp dụng hàm kích hoạt ở lớp đầu ra vì bài toán hồi quy dự đoán trực tiếp các giá trị số mà không cần bất kỳ biến đổi nào nữa.

Xem xét một lớp trong mô hình được kết nối đầy đủ, trong đó hàm kích hoạt  $u_j^i$  của neural thứ  $j$  trong lớp thứ  $i$  được kết nối với các hàm kích hoạt trong lớp thứ  $(i - 1)$  bằng biểu thức sau:

$$u_j^i = \Xi \left( \sum_{g=1}^{T_{i-1}} w_{jg}^i u_g^{i-1} + c_j^i \right), \quad (32)$$

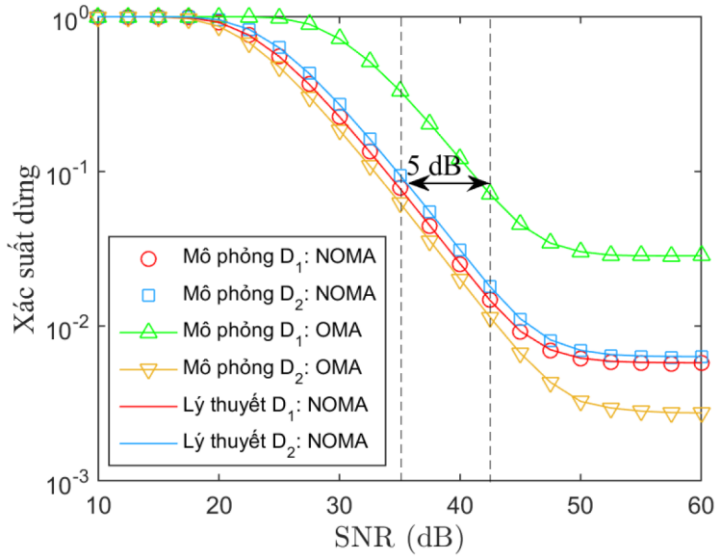
trong đó:  $T_{i-1}$  là số lượng neural trong lớp thứ  $(i - 1)$ ,  $w_{jg}^i$  là trọng số kết nối với neural thứ  $g$  trong lớp  $(i - 1)$  và  $c_j^i$  là hệ số bias ở lớp thứ  $i$ .

#### 4. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Phần này trình bày các kết quả được lập trình bằng phần mềm Matlab. Phương pháp Monte-Carlo được dùng để tạo các kết quả mô phỏng nhằm xác thực các phân tích lý thuyết ở phần 3. Ngoài ra, phần này cũng trình bày kết quả dự đoán xác suất dùng sử dụng KTHS. Quá trình huấn luyện và thử nghiệm của DNN được thực hiện dự trên TensorFlow phiên bản 2.1.0 với Python 3.7.9 kết hợp Keras 2.3.1.

Trước tiên, hãy xem xét tác động của SNR đến xác suất dùng của mô hình NOMA và so sánh với mô hình đa truy cập trực giao OMA thông thường (sử dụng nhiều khe thời gian truyền) với mức công suất phân phối cho tín hiệu tương ứng  $a_i$ . Xét về mặt tài nguyên khe thời gian, mô hình OMA tiêu tốn tổng cộng bốn khe thời gian để truyền tất cả dữ liệu của người dùng  $\mathcal{D}_i$  trong khi đó mô hình NOMA chỉ cần hai khe thời gian. Do đó, dữ liệu cần sử dụng cho mạng OMA sẽ gấp đôi so với mạng NOMA. Để mô tả chính xác hơn về môi trường truyền thực tế, nhóm tác giả áp dụng mô hình suy hao đường truyền trong không gian tự do với kênh truyền fading Rayleigh như sau:  $\Omega_{XY} = d_{XY}^{-\theta}$ , trong đó  $d_{XY}$  là khoảng cách chuẩn

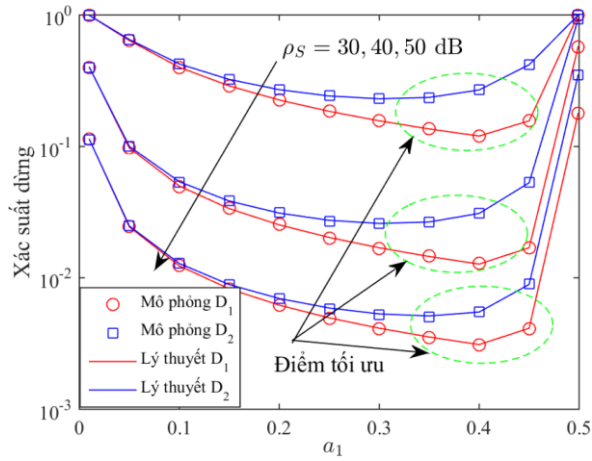
hóa giữa nút  $X$  và nút  $Y$ ,  $\theta$  là hệ số suy hao đường truyền. Kế tiếp, xem xét các thông số hệ thống như sau: khoảng cách từ  $S \rightarrow R$  là 25, khoảng cách từ  $R \rightarrow D_1$  là 5, khoảng cách từ  $R \rightarrow D_2$  là 30, khoảng cách từ  $S \rightarrow PR$  là 40, khoảng cách từ  $R \rightarrow PR$  là 50, khoảng cách từ  $PT \rightarrow R$  là 50, khoảng cách từ  $PT \rightarrow D_1$  là 40, khoảng cách từ  $PT \rightarrow D_2$  là 45 (các khoảng cách đã được chuẩn hóa nên không ghi đơn vị), số lượng người dùng mạng sơ cấp  $L$  là 5, công suất hạn mức  $I_{th}$  là 30 dBm, công suất của máy phát sơ cấp  $P_T$  là 10 dBm. Các tham số quan trọng chính:  $a_1 = 0,2, a_2 = 0,8, \beta = 0,8, R_1 = 1$  bit/s/Hz, băng thông sử dụng là 1 MHz, mật độ nhiễu tại máy thu là -90 dBm/Hz, tần số sóng mang sử dụng là 2,4 GHz, công suất phát của thiết bị chuyển tiếp là  $P_R = 0,8P_S, R_2 = 0,5$  bit/s/Hz.



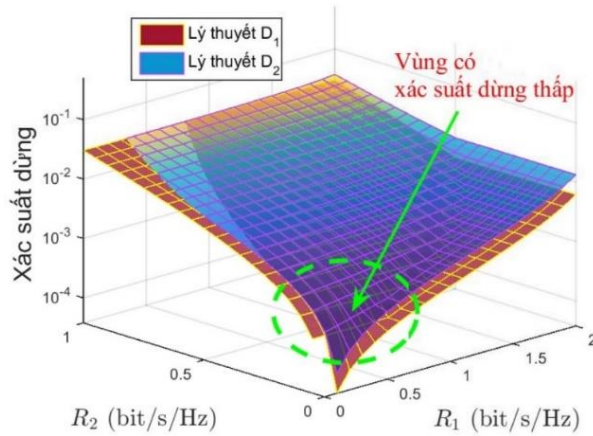
Hình 3. Xác suất dừng của các người dùng NOMA so với OMA với SNR  $\rho_S$

Hình 3 cho thấy kết quả mô phỏng và lý thuyết trong mô hình NOMA cho hai người dùng  $D_1$  và  $D_2$  là hoàn toàn trùng khớp. Ngoài ra, ta cũng có nhận xét là hiệu năng của người dùng  $D_1$  sử dụng mô hình NOMA vượt trội so với mô hình OMA (độ lợi là 5 dB tại  $10^{-1}$ ), trong khi đó hiệu năng của người dùng  $D_2$  có giảm nhưng không đáng kể với vùng SNR thấp và trung bình (khoảng 1 dB). Mặc dù tại vùng SNR cao của  $D_2$  có giá trị xác suất dừng với mô hình OMA nhỏ hơn so với mô hình NOMA nhưng xét trên phương diện thực tế thì điều này không phù hợp cho mạng vô tuyến nhận thức. Bởi vì hệ thống OMA tiêu tốn quá nhiều tài nguyên để truyền tín hiệu cho người dùng  $D_2$  dưới một mức nhiễu nền cố định  $\sigma^2$ .

Xét về tổng thể, NOMA vẫn mang lại hiệu năng tốt hơn rất nhiều so với OMA về mặt tài nguyên thời gian và cả hiệu năng. Ngoài ra, Hình 3 cũng cho thấy ở cả hai mô hình NOMA và OMA đều có cùng độ lợi phân tập giống nhau tại vùng SNR cao và cùng bằng 0.



Hình 4. Xác suất dừng của các người dùng  $\mathcal{D}_1$  và  $\mathcal{D}_2$  theo  $a_1$



Hình 5. Xác suất dừng của các người dùng  $\mathcal{D}_1$  và  $\mathcal{D}_2$  khi tốc độ dữ liệu của hai người tương ứng thay đổi  $R_1$  và  $R_2$ .

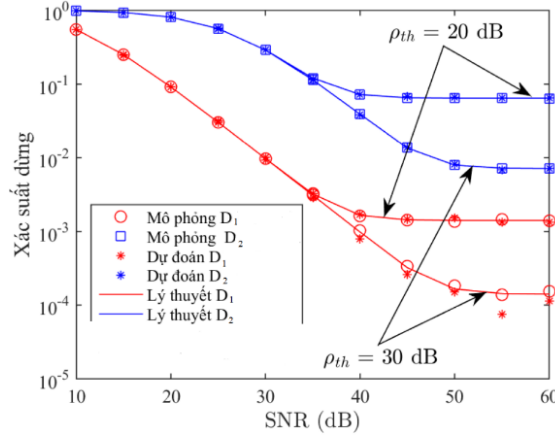
Hình 4 trình bày xác suất dừng của người dùng thứ cấp  $\mathcal{D}_1$  và  $\mathcal{D}_2$  khi hệ số phân bổ công suất  $a_1$  thay đổi. Quan sát cho thấy rằng xác suất dừng của người dùng thứ cấp giảm khi  $a_1$  tăng từ 0 đến 0,4 và sau đó tăng trở lại. Điều này chứng tỏ có tồn tại một điểm phân bổ công suất tối ưu cho cả người dùng  $\mathcal{D}_1$  và người dùng  $\mathcal{D}_2$ .

Hình 5 trình bày xác suất dừng của người dùng thứ cấp  $\mathcal{D}_1$  và  $\mathcal{D}_2$  khi tốc độ dữ liệu  $R_1$  và  $R_2$  thay đổi. Từ đó rút ra nhận xét là xác suất dừng của các người dùng thứ cấp giảm khi  $R_1$  và  $R_2$  giảm dần về giá trị 0. Lý do chính dẫn đến xác suất dừng giảm như vậy là do ngưỡng dừng của hệ thống rất bé so với SINR nhận được cho giải mã các tín hiệu  $x_1$  và  $x_2$  tại các máy thu ( $\mathcal{R}$ ,  $\mathcal{D}_1$  và  $\mathcal{D}_2$ ).

#### Kết quả dự đoán xác suất dừng bằng DNN

Quá trình huấn luyện và thử nghiệm sử dụng DNN để dự đoán xác suất dừng được thực hiện dựa trên TensorFlow phiên bản 2.1.0 với Python 3.7.9 kết hợp Keras 2.3.1. Công cụ hỗ trợ tối ưu hóa độ chính xác Adam optimize và được thực thi với 70 epochs và 4 lớp ẩn trên Nvidia GeForce RTX-2070 super GPU và máy tính AMD Ryzen Threadripper 3970X 32-core

processor. Xét mô hình với giả sử tọa độ của thiết bị chuyển tiếp là (25,0), tọa độ của máy phát sơ cấp là (100,0), tọa độ của máy thu sơ cấp là (30,40), tọa độ của người dùng  $\mathcal{D}_1$  là (30,30), tọa độ của người dùng  $\mathcal{D}_2$  là (80,5), tọa độ của trạm phát thứ cấp được là (0,0), hệ số phân bổ công suất  $a_1 = 0,2$ , hệ số ước lượng  $\beta = 0,6$ , số lượng máy thu sơ cấp  $L = 5$ , và giá trị ngưỡng cho phép  $\rho_{th} = 20, 30$  dB. Hình 6 trình bày kết quả dự đoán xác suất dừng sử dụng DNN so với lý thuyết (biểu thức dạng tường minh) và mô phỏng Monte-Carlo. Như quan sát được trong hình vẽ, giá trị dự đoán gần như chính xác hoàn toàn so với các giá trị xác suất dừng lý thuyết và mô phỏng. Vì vậy, học sâu có thể được dùng để dự đoán xác suất dừng với đáp ứng thời gian thực.



Hình 6. Dự đoán xác suất dừng cho các người dùng  $\mathcal{D}_1$  và  $\mathcal{D}_2$  bằng DNN.

## 5. KẾT LUẬN

Hệ thống thông tin tích hợp công nghệ vô tuyến nhận thức với kỹ thuật NOMA mà tạo ra NOMA-CRN đã được đề xuất trong bài báo này. Xác suất dừng của NOMA-CRN đã được biểu diễn dưới dạng tường minh chính xác, từ đó thuận lợi cho việc đánh giá hiệu năng một cách nhanh chóng. Mô phỏng Monte-Carlo và kỹ thuật học sâu đã được dùng để xác thực độ chính xác của biểu thức xác suất dừng. Hiệu quả của việc tích hợp kỹ thuật NOMA và công nghệ vô tuyến nhận thức đã được minh họa chi tiết. Hơn thế nữa, mạng thứ cấp hoạt động tốt dưới tác động của người dùng sơ cấp cũng được thể hiện qua nhiều kết quả. Ngoài ra, bài báo này cũng đã phân tích tác động của những tham số lên hiệu năng của NOMA-CRN và các kết quả dẫn đến nhận xét là hiệu năng của NOMA-CRN có thể được tối ưu khi chọn hợp lý hệ số phân bổ công suất cho người dùng.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Pei L., Yang Z., Pan C., Huang W., Chen M., Elkashlan M., Nallanathan A. - Energy-efficient D2D communications underlying NOMA-based networks with energy harvesting, *IEEE Communications Letters* **22** (5) (2018) 914-917.
2. Arzykulov S., Nauryzbayev G., Tsiftsis T. A., Maham B. - Performance analysis of underlay cognitive radio nonorthogonal multiple access networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **68** (9) (2019) 9318-9322.
3. Arzykulov S., Nauryzbayev G., Tsiftsis T. A., Maham B., Abdallah M. - On the Outage of Underlay CR-NOMA Networks With Detect-and-Forward Relaying, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking* **5** (3) (2019) 795-804.



4. Bariah L., Muhaidat S., Al-Dweik A. - Error performance of NOMA-based cognitive radio networks with partial relay selection and interference power constraints, *IEEE Transactions on Communications* **68** (2) (2020) 765-777.
5. Luo L., Li Q., Cheng J. - Performance Analysis of Overlay Cognitive NOMA Systems With Imperfect Successive Interference Cancellation, *IEEE Transactions on Communications* **68** (8) (2020) 4709-4722.
6. Chen X., Wen M., Mao T., Dang S. - Spectrum Resource Allocation Based on Cooperative NOMA With Index Modulation, *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking* **6** (3) (2020) 946-958.
7. Ho C. D., Nguyen T. V., Huynh-The T., Nguyen T. T., Costa D. B. d., An B. - Short-Packet Communications in Wireless-Powered Cognitive IoT Networks: Performance Analysis and Deep Learning Evaluation, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **70** (3) (2021) 2894-2899.
8. Yang N., Zhang H., Long K., Hsieh H., Liu J. - Deep Neural Network for Resource Management in NOMA Networks, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **69** (1) (2020) 876-886.
9. Shim K., Do T. N., Nguyen T. V., Costa D. B. d., An B. - Enhancing PHY-security of FD-enabled NOMA systems using jamming and user selection: Performance analysis and DNN evaluation, *IEEE Internet of Things Journal* **8** (24) (2021) 17476-17494.
10. Nguyen T. V., Do T., Bao V. N. Q., Costa D. B. d., An B. - On the performance of multihop cognitive wireless powered D2D communications in WSNs, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* **69** (3) (2020) 2684-2699.
11. Zwillinger D., Jeffrey A. - Table of integrals, series, and products. Elsevier 2007.
12. Clevert D.-A., Unterthiner T., Hochreiter S. - Fast and accurate deep network learning by exponential linear units (ELUs), Under Review of ICLR2016 (2015).

## **ABSTRACT**

### **ANALYZE AND EVALUATE THE PERFORMANCE OF NOMA-CRN USING DEEP LEARNING**

Le Minh Thanh<sup>1</sup>, Nguyen Huu Su<sup>2</sup>, Ngo Hoang An<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>*Ho Chi Minh City University of Food Industry (HUPI)*

<sup>2</sup>*MobiFone Corporation*

<sup>3</sup>*Industrial University of Ho Chi Minh City (IUH)*

\*Email: *annh@hufi.edu.vn*

The performance of Non-Orthogonal Multiple Access Cognitive Radio Network (NOMA-CRN) for two users is analyzed and evaluated using deep learning in this paper. To this end, we firstly recommend an exact closed-form outage probability formula for NOMA-CRN. Next, we conduct Monte-Carlo simulations to corroborate the recommended formula. Moreover, deep learning is applied to evaluate the exactness of the estimated outage probability as compared to theory and simulation. Finally, we provide multiple results to demonstrate the influence of crucial specifications on the performance of NOMA-CRN.

*Keywords:* Deep learning, cognitive radio, NOMA, outage probability.