# ĐÁNH GIÁ XÁC SUẤT DỪNG TRONG MẠNG HỢP TÁC MỘT CHIỀU VỚI THU HOẠCH NĂNG LƯỢNG SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP CHIA KHE THỜI GIAN VÀ KỸ THUẬT NOMA

ĐÀO THỊ THU THỦY*, DƯƠNG HOÀNG TÂN, NGUYỄN XUÂN PHÚ TÂN,
*Khoa Công nghệ Điện tử, Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh*
** Tác giả liên hệ: daothithuthuy@iuh.edu.vn*
*DOIs: https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v80i2.5908*

**Tóm tắt.** Bài báo nghiên cứu xác suất dừng của một hệ thống mạng hợp tác một chiều, kết hợp thu hoạch năng lượng thông qua giao thức chia khe thời gian và sử dụng kỹ thuật đa truy cập phi trực giao. Mô hình bao gồm một nút nguồn và một nút chuyển tiếp AF có khả thu hoạch năng lượng đồng thời giúp khuếch đại và chuyển tiếp tín hiệu đến hai nút đích trên kênh truyền chịu tác động của fading Rayleigh. Nghiên cứu phân tích chi tiết quá trình truyền tín hiệu đến hai nút đích và xây dựng các biểu thức toán học của xác suất dừng. Mô phỏng Monte-Carlo được dùng để khảo sát xác suất dừng theo các thông số như tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu, tỷ lệ phân chia thời gian, cùng một số thông số khác, nhằm đánh giá ảnh hưởng của chúng đến hiệu suất hệ thống. Qua đó, nghiên cứu xác định được kết quả tốt nhất, cung cấp cơ sở cho việc phân tích và đánh giá hiệu quả hoạt động của mô hình. Điểm mới của mô hình là tận dụng được các ưu điểm của chuyển tiếp AF như xử lý tín hiệu đơn giản, độ trễ xử lý thấp và chi phí triển khai thấp. Điều này cho thấy mô hình có thể trở thành giải pháp phù hợp, đáp ứng hiệu quả yêu cầu của các ứng dụng IoT và giao tiếp thời gian thực.
**Từ khóa.** thu hoạch năng lượng, khuếch đại và chuyển tiếp, đa truy cập phi trực giao, triệt can nhiễu tuần tự.

## 1 GIỚI THIỆU

Trong bối cảnh nhu cầu năng lượng ngày càng tăng và những lo ngại về môi trường, việc tối ưu hóa sử dụng năng lượng trong các thiết bị không dây là rất quan trọng [1]. Thu hoạch năng lượng từ tín hiệu vô tuyến (RF) đã nổi lên như một giải pháp đầy hứa hẹn, đặc biệt trong các mạng 5G và Internet of Things. Phương pháp này cho phép các nút mạng, nhất là các nút chuyển tiếp bị giới hạn năng lượng, tự thu thập năng lượng từ tín hiệu RF xung quanh để hoạt động, giúp kéo dài tuổi thọ mạng, tăng hiệu quả sử dụng và giảm sự phụ thuộc vào pin cũng như tác động môi trường [1, 2]. Tín hiệu vô tuyến có thể truyền tải đồng thời cả thông tin và năng lượng, cho phép thực hiện truyền thông tin và năng lượng không dây đồng thời (SWIPT). Các giao thức thực tế, bao gồm phân chia công suất (PS) và phân chia khe thời gian (TS), được áp dụng để triển khai SWIPT [3-6]. Trong kỹ thuật TS, nút nhận luân phiên giữa xử lý tín hiệu và thu hoạch năng lượng theo thời gian, trong khi với phương pháp PS, nút này chia công suất tín hiệu nhận được để thực hiện đồng thời xử lý tín hiệu và EH [7].

Bên cạnh EH, kỹ thuật NOMA được công nhận là một giải pháp hiệu quả để tăng hiệu suất phổ tần và hỗ trợ quản lý năng lượng hợp lý trong mạng hợp tác. Kỹ thuật NOMA miền công suất là truyền nhiều dữ liệu cho nhiều người dùng bằng cách chia sẻ các tài nguyên như thời gian và tần số trong cùng một lớp không gian ở các mức công suất khác nhau. Trong đó công suất phân bổ nhiều hơn cho người dùng có độ lợi kênh thấp và thấp hơn cho người dùng có độ lợi kênh cao [8, 9]. Tại thiết bị thu, quá trình triệt can nhiễu tuần tự (SIC) được sử dụng để tách và giải mã tín hiệu tổng hợp, tối ưu hóa hiệu suất và công bằng cho hệ thống [9-11]. Trong các mạng hợp tác, nút chuyển tiếp thường hoạt động theo cơ chế giải mã và chuyển tiếp (DF) để hỗ trợ truyền thông tin [12]. Ngoài ra, chúng cũng có thể sử dụng cơ chế khuếch đại và chuyển tiếp (AF) để tăng cường hiệu quả truyền thông tin, chuyển tiếp AF có ưu điểm hơn DF là chỉ khuếch đại tín hiệu và chuyển tiếp nên độ trễ khi xử lý tín hiệu thấp và chi phí triển khai thấp [13, 14]. Việc tích hợp các công nghệ EH, NOMA, chuyển tiếp hợp tác và SIC tạo ra một hệ thống mạng không dây mạnh mẽ, tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng và tài nguyên, đồng thời nâng cao hiệu suất tổng thể, đáp ứng yêu cầu của các hệ thống truyền thông thế hệ mới [15, 16].

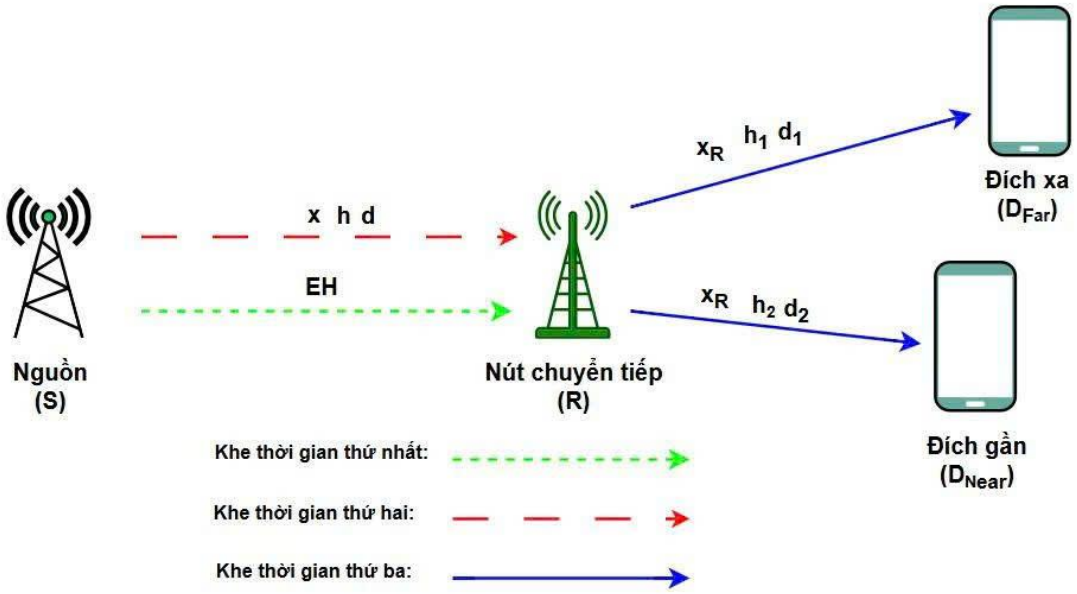
Tiếp nối các nghiên cứu trước nhằm tối ưu hóa việc sử dụng năng lượng và giảm thiểu các thách thức từ môi trường đang biến đổi. Bài báo đề xuất mô hình hệ thống mạng hợp tác AF một chiều có thu hoạch năng lượng vô tuyến theo giao thức TS đồng thời sử dụng kỹ thuật NOMA. Sau đó, bài báo phân tích quá trình

© 2026 Trường Đại học Công nghiệp Thành phố Hồ Chí Minh

truyền tín hiệu và tìm xác suất dừng tại hai nút đích. Mô phỏng được sử dụng để đánh giá hiệu năng của mô hình dựa trên các thông số thay đổi, từ đó tối ưu hóa hiệu năng hệ thống. Bài báo đưa ra các kết luận về chọn lựa các thông số tối ưu cho mô hình, cung cấp một nền tảng cho các nghiên cứu tiếp theo trong lĩnh vực hệ thống vô tuyến hợp tác tiết kiệm năng lượng.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: Phần 2 mô tả chi tiết mô hình hệ thống được đề xuất, quá trình thu hoạch năng lượng, truyền nhận dữ liệu và khảo sát hiệu năng của hệ thống. Phần 3 cung cấp các kết quả mô phỏng Monte-Carlo và thảo luận về hiệu suất của các hệ thống. Cuối cùng, Phần 5 là các kết luận chính và hướng phát triển của nghiên cứu.

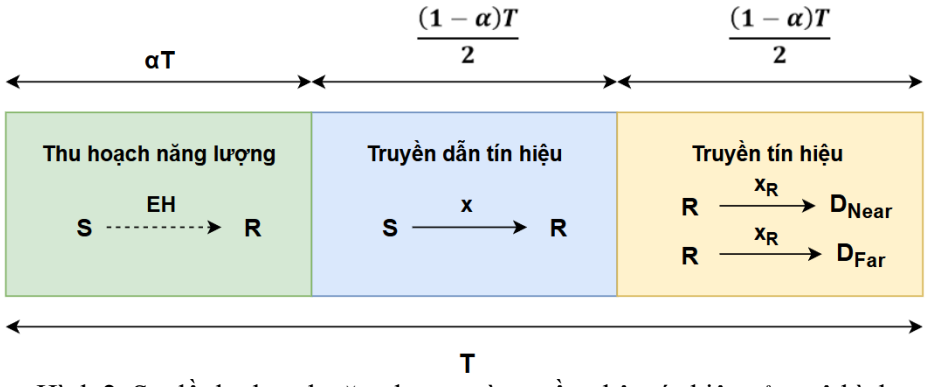
## 2 MÔ HÌNH




Hình 1. Mô hình hệ thống.

Mô hình hệ thống như Hình 1 gồm một nút nguồn (S), một nút chuyển tiếp AF (R) có khả năng thu hoạch năng lượng, và hai nút đích $D_{Far}$ $D_{Near}$ ,với giả định không tồn tại đường truyền trực tiếp từ nguồn đến hai nút đích. Nguồn S truyền tín hiệu $x_1$ đến $D_{Far}$ và tín hiệu $x_2$ đến $D_{Near}$. Tín hiệu $x_1$ và $x_2$ được S sử dụng mã hóa xếp chồng theo nguyên lý NOMA đường lên tạo thành tín hiệu x và truyền đến R. Tại R, tín hiệu nhận được từ S được khuếch đại và chuyển tiếp dưới dạng tín hiệu $x_R$ đến hai đích $D_{Far}$ và $D_{Near}$. Khoảng cách chuẩn hóa từ S đến R là d và khoảng chuẩn hóa từ R đến $D_{Far}$, $D_{Near}$ lần lượt là $d_1$, $d_2$ (với $d_1+d_2=1$). Trong mô hình NOMA hợp tác, giả sử đích $D_{Far}$ ở xa nút chuyển tiếp R hơn đích $D_{Near}$ ($d_1 > d_2$). Các kênh truyền h, $h_1$ và $h_2$ được giả định tuân theo mô hình fading Rayleigh, trong đó h tương ứng với S→R, $h_1$ và $h_2$ tương ứng với R→ $D_{Far,}$ $D_{Near}$. Độ lợi kênh truyền $|h|^2$ ,$|h_1|^2$ ,$|h_2|^2$ là các biến ngẫu nhiên, với hàm mật độ xác suất (PDF) và hàm phân bố tích lũy (CDF) lần lượt là: $f(x)=\frac{1}{\lambda}e^{\frac{-x}{\lambda}}$ , $F(x)=1-e^{\frac{-x}{\lambda}}$ với $\lambda=d^{-\beta}$ cho liên kết S→R, và $\lambda_i=d_i^{-\beta}$ cho các liên kết R→ $D_{Far}$, $D_{Near}$, với $\beta$ là hệ số mũ suy hao đường truyền.

Quá trình truyền nhận tín hiệu gồm ba khe thời gian như minh họa trong Hình 2. Đầu tiên, R thu hoạch năng lượng RF từ tín hiệu do S phát ra. Sau đó, ở khe thời gian thứ hai, S truyền tín hiệu x đến R. Cuối cùng, R dùng năng lượng đã thu hoạch được để khuếch đại và chuyển tiếp tín hiệu đến $D_{Far}$ và $D_{Near}$. Thời gian của khe thứ hai và thứ ba được giả định bằng nhau, với α là hệ số phân bổ thời gian ($0 < \alpha < 1$).




Hình 2. Sơ đồ thu hoạch năng lượng và truyền nhận tín hiệu của mô hình

## 2.1 Quá trình thu hoạch năng lượng và truyền nhận dữ liệu

**Khe thời gian thứ nhất** (αT)**:** R thu năng lượng từ tín hiệu phát ra bởi S. Năng lượng thu hoạch được tại R được tính như sau:

$$E_R = \eta P|h|^2 \alpha T, \quad (1)$$

trong đó: η là hiệu suất thu hoạch năng lượng; P là công suất phát của S; $|h|^2$ là độ lợi kênh truyền S→R; αT là thời gian thu hoạch năng lượng.

**Khe thời gian thứ hai** $\left(\frac{(1-\alpha)T}{2}\right)$: S tạo tín hiệu x và tín hiệu của đích xa $D_{Far}$ được truyền với công suất lớn hơn so với tín hiệu của đích gần $D_{Near}$ [8].

$$x = \sqrt{a_1}x_1 + \sqrt{a_2}x_2, \quad (2)$$

với $a_1$ và $a_2$ là hệ số phân bổ công suất, thỏa mãn $a_1 + a_2 = 1$ và $a_1 > a_2$.

Tính hiệu nhận được tại R:

$$y_R = \sqrt{P}hx + n_R, \quad (3)$$

với $n_R$ là nhiễu trắng Gaussian tại R có giá trị trung bình bằng 0 và phương sai $N_0$ (0, $N_0$).

**Khe thời gian thứ ba** $\left(\frac{(1-\alpha)T}{2}\right)$: R truyền tín hiệu sau khi được khuếch đại $x_R$ đến $D_{Far}$ và $D_{Near}$ bằng năng lượng đã thu hoạch được.

Công suất phát tại R là:

$$P_R = \frac{E_R}{\frac{(1-\alpha)T}{2}} = \frac{\eta P|h|^2 \alpha T}{\frac{(1-\alpha)T}{2}} = \frac{2\alpha\eta}{(1-\alpha)} P|h|^2 = \rho P|h|^2, \quad (4)$$

với $\rho = \frac{2\alpha\eta}{(1-\alpha)}$.

Sử dụng giao thức khuếch đại và chuyển tiếp ta có hệ số khuếch đại $G_f$:

$$G_f = \sqrt{\frac{P_R}{P|h|^2 + N_0}} = \sqrt{\frac{\rho P|h|^2}{P|h|^2 + N_0}}. \quad (5)$$

Tín hiệu sau khi được khuếch đại tại R:

$$x_R = G_f\sqrt{a_1 P}hx_1 + G_f\sqrt{a_2 P}hx_2 + G_f n_R. \quad (6)$$

Tín hiệu nhận được tại $D_{Near}$ là:

$$y_{D_{Near}} = G_f\sqrt{a_1 P}hh_2x_1 + G_f\sqrt{a_2 P}hh_2x_2 + G_f h_2 n_R + n_{D_{Near}}, \quad (7)$$

trong đó: $n_{D_{Near}}$ là nhiễu trắng Gaussian (0, $N_0$) tại $D_{Near}$.

Theo kỹ thuật SIC, tại $D_{Near}$ sẽ giải mã tín hiệu $x_1$ của $D_{Far}$ trước, coi $x_2$ là nhiễu, rồi loại bỏ $x_1$ để giải mã $x_2$. Tỉ lệ tín hiệu trên nhiễu và can nhiễu (SINR) để giải mã tín hiệu $x_1$ tại $D_{Near}$ là:

$$\gamma_{D_{Near}x_1} = \frac{a_1\rho\gamma^2|h|^4|h_2|^2}{a_2\rho\gamma^2|h|^4|h_2|^2 + \rho\gamma|h|^2|h_2|^2 + \gamma|h|^2 + 1}, \quad (8)$$

với $\gamma = \frac{P}{N_0}$.

Sau khi giải mã tín hiệu $x_1$, đích $D_{Near}$ loại bỏ thành phần liên quan $x_1$ khỏi tín hiệu tổng hợp theo công thức (7), rồi tiếp tục giải mã $x_2$. SINR để giải mã tín hiệu $x_2$:

$$\gamma_{D_{Near}x_2} = \frac{a_2\rho\gamma^2|h|^4|h_2|^2}{\rho\gamma|h|^2|h_2|^2 + \gamma|h|^2 + 1}. \quad (9)$$

Tín hiệu nhận được tại $D_{Far}$ là:

$$y_{D_{Far}} = G_f\sqrt{a_1P}hh_1x_1 + G_f\sqrt{a_2P}hh_1x_2 + G_fh_1n_R + n_{D_{Far}}, \quad (10)$$

với $n_{D_{Far}}$ là nhiễu trắng Gaussian (0, $N_0$) tại $D_{Far}$.

Đích $D_{Far}$ giải mã tín hiệu $x_1$ và coi $x_2$ là nhiễu. SINR để giải mã tín hiệu $x_1$:

$$\gamma_{D_{Far}x_1} = \frac{a_1\rho\gamma^2|h|^4|h_1|^2}{a_2\rho\gamma^2|h|^4|h_1|^2 + \rho\gamma|h|^2|h_1|^2 + \gamma|h|^2 + 1}. \quad (11)$$

## 2.2 Khảo sát hiệu năng của hệ thống

### *2.2.1 Xác suất dừng (OP) tại đích $D_{Near}$*

Để giải mã thành công $x_1$ và $x_2$ tại $D_{Near}$ thì $\gamma_{D_{Near}x_1}$ và $\gamma_{D_{Near}x_2}$ phải lớn hơn hoặc bằng giá trị $\gamma_{th,D}$ ngưỡng, $\gamma_{th,D} = 2^{\frac{2R_{th}}{1-\alpha}} - 1$ với $R_{th}$ *(bits/s/Hz)* là tốc độ ngưỡng. Xác suất dừng tại $D_{Near}$ được tính bằng 1 trừ đi xác suất giải mã thành công tín hiệu $x_1$ và $x_2$ tại $D_{Near}$ [12]. Cụ thể, xác suất dừng tại $D_{Near}$ là:

$$OP_{D_{Near}} = 1 - \Pr\left(\gamma_{D_{Near}x_1} \geq \gamma_{th,D}, \gamma_{D_{Near}x_2} \geq \gamma_{th,D}\right). \quad (12)$$

Thay công thức (8) và (9) vào (12), ta có:

$$OP_{D_{Near}} = 1 - \Pr\left(\frac{a_1\rho\gamma^2|h|^4|h_2|^2}{a_2\rho\gamma^2|h|^4|h_2|^2 + \rho\gamma|h|^2|h_2|^2 + \gamma|h|^2 + 1} \geq \gamma_{th,D}, \frac{a_2\rho\gamma^2|h|^4|h_2|^2}{\rho\gamma|h|^2|h_2|^2 + \gamma|h|^2 + 1} \geq \gamma_{th,D}\right). \quad (13)$$

Công thức (13) viết lại như sau:

$$OP_{D_{Near}} = \begin{cases} 1 - \int_{z_1}^{\infty} e^{-\frac{y_1}{\lambda_{h_2}}} \frac{1}{\lambda_h} e^{-\frac{z}{\lambda_h}} dz, \; khi \; a_1 - \gamma_{th,D}a_2 > a_2 \\ 1 - \int_{z_2}^{\infty} e^{-\frac{y_2}{\lambda_{h_2}}} \frac{1}{\lambda_h} e^{-\frac{z}{\lambda_h}} dz, \; khi \; a_1 - \gamma_{th,D}a_2 < a_2 \end{cases}, \quad (14)$$

trong đó: $y_1 = \frac{\gamma_{th,D}(\gamma z + 1)}{\rho\gamma z(a_2\gamma z - \gamma_{th,D})}$; $y_2 = \frac{\gamma_{th,D}(\gamma z + 1)}{\rho\gamma z(\gamma z(a_1 - \gamma_{th,D}a_2) - \gamma_{th,D})}$; $z_1 = \frac{\gamma_{th,D}}{\gamma(a_1 - \gamma_{th,D}a_2)}$; $z_2 = \frac{\gamma_{th,D}}{a_2\gamma}$.

Dựa vào công thức (14) ta có được hai trường hợp xác suất dừng tại $D_{Near}$ với hai công thức (16) và (18). Với trường hợp thứ nhất, khi $a_1 - \gamma_{th,D}a_2 > a_2$ xác suất dừng tại $D_{Near}$ được tính:

$$OP_{D_{Near}} = 1 - \int_{\frac{\gamma_{th,D}}{\gamma(a_1 - \gamma_{th,D}a_2)}}^{\infty} e^{-\frac{\frac{\gamma_{th,D}(\gamma z+1)}{\rho\gamma z(a_2\gamma z - \gamma_{th,D})}}{\lambda_{h_2}}} \frac{1}{\lambda_h} e^{-\frac{z}{\lambda_h}} dz. \quad (15)$$

Sau khi thực hiện phép tính tích phân phức tạp của công thức (15), ta có giá trị xác dừng tại $D_{Near}$ [13, 14]:

$$OP_{D_{Near}} = 1 - 2\sqrt{\frac{l}{\lambda_h}}K_1\left(2\sqrt{\frac{l}{\lambda_h}}\right) + \sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n=m}^{\infty}\frac{(-1)^{m+n}}{m!n!(n-m+1)}l^m n_0^{\,n-m+1}\lambda_h^{-m}, \quad (16)$$

trong đó: $l = \frac{\gamma_{th,D}}{\rho\gamma a_2\lambda_{h_2}}$; $n_0 = \frac{\gamma_{th,D}}{\gamma\left(a_1 - \gamma_{th,D}a_2\right)\lambda_h}$; và $\int_0^{\infty} e^{-\frac{\beta}{4t}-\gamma t}dt = \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}}K_1\left(\sqrt{\beta\gamma}\right)$ là hàm Bessel của công thức [3.324.1] trong [17].

Với trường hợp thứ hai khi $a_1 - \gamma_{th,D}a_2 < a_2$ xác suất dừng tại $D_{Near}$ được tính:

$$OP_{D_{Near}} = 1 - \int_{\frac{\gamma_{th,D}}{a_2\gamma}}^{\infty} e^{-\frac{\frac{\gamma_{th,D}(\gamma z+1)}{\rho\gamma z\left(\gamma z\left(a_1-\gamma_{th,D}a_2\right)-\gamma_{th,D}\right)}}{\lambda_{h_2}}}\frac{1}{\lambda_h}e^{-\frac{z}{\lambda_h}}\mathrm{d}z\,. \quad (17)$$

Sau khi thực hiện phép tính tích phân phức tạp của công thức (17), ta có giá trị xác dừng tại $D_{Near}$ [13, 14]:

$$OP_{D_{Near}} = 1 - 2\sqrt{\frac{j}{\lambda_h}}K_1\left(2\sqrt{\frac{j}{\lambda_h}}\right) + \sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n=m}^{\infty}\frac{(-1)^{m+n}}{m!n!(n-m+1)}j^m t_0^{\,n-m+1}\lambda_h^{-m}, \quad (18)$$

trong đó: $j = \frac{\gamma_{th,D}}{\rho\gamma\left(a_1 - \gamma_{th,D}a_2\right)\lambda_{h_2}}$; $t_0 = \frac{\gamma_{th,D}}{a_2\ \gamma\lambda_h}$.

### 2.2.2 Xác suất dừng tại đích $D_{Far}$

Do không thực hiện SIC, $D_{Far}$ giải mã trực tiếp tín hiệu của mình và coi tín hiệu của $D_{Near}$ là nhiễu. Nếu tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại $D_{Far}$ ($\gamma_{D_{Far}x_1}$) thấp hơn ngưỡng yêu cầu $\gamma_{th,D}$, $D_{Far}$ sẽ không thể giải mã tín hiệu. Xác suất dừng tại $D_{Far}$:

$$OP_{D_{Far}} = \Pr\left(\gamma_{D_{Far}x_1} < \gamma_{th,D}\right), \quad (19)$$

Thay công thức (11) vào (19), ta có:

$$OP_{D_{Far}} = \Pr\left(\frac{a_1\rho\gamma^2|h|^4|h_1|^2}{a_2\rho\gamma^2|h|^4|h_1|^2 + \rho\gamma|h|^2|h_1|^2 + \gamma|h|^2 + 1} < \gamma_{th,D}\right). \quad (20)$$

Công thức (20) viết lại như sau:

$$OP_{D_{Far}} = \int_{\frac{\gamma_{th,D}}{\gamma\left(a_1-\gamma_{th,D}a_2\right)}}^{\infty}\left(1 - e^{-\frac{\frac{\gamma_{th,D}(\gamma z+1)}{\rho\gamma z\left(\gamma z\left(a_1-\gamma_{th,D}a_2\right)-\gamma_{th,D}\right)}}{\lambda_{h_1}}}\right)\frac{1}{\lambda_h}e^{-\frac{z}{\lambda_h}}dz\,. \quad (21)$$

Sau khi thực hiện phép tính tích phân phức tạp của công thức (21), ta có giá trị xác dừng tại $D_{Far}$ [13, 14]:

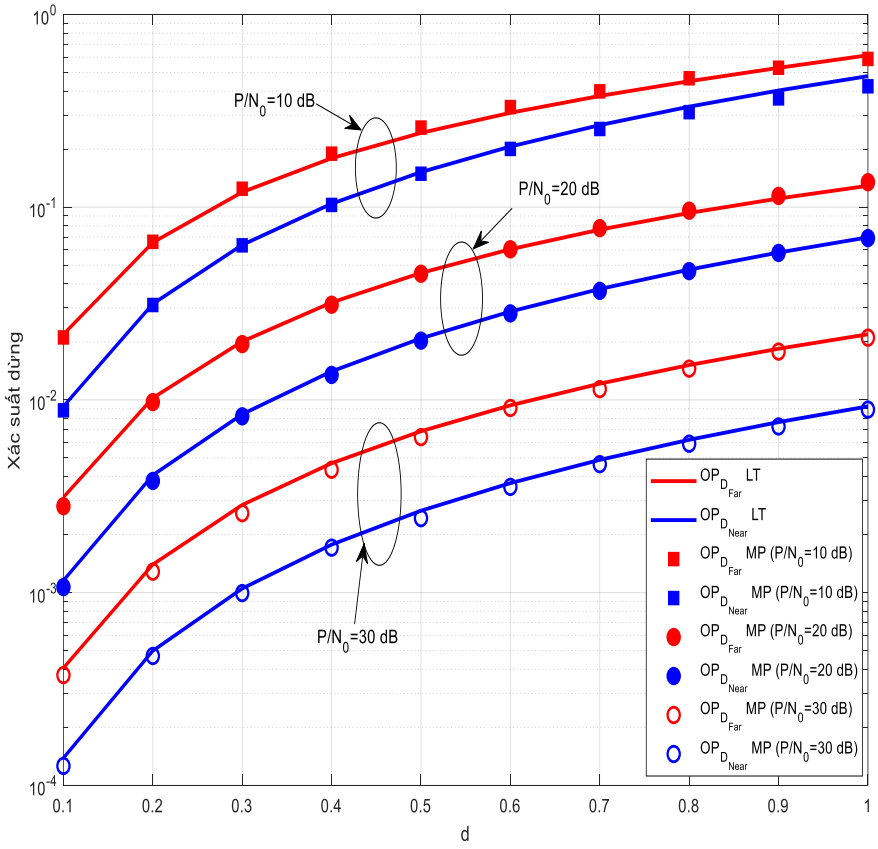
$$OP_{D_{Far}} = e^{-f_0} - \left[2\sqrt{\frac{k}{\lambda_h}}K_1\left(2\sqrt{\frac{k}{\lambda_h}}\right) - \sum_{m=0}^{\infty}\sum_{n=m}^{\infty}\frac{(-1)^{m+n}}{m!n!(n-m+1)}k^m f_0^{\,n-m+1}\lambda_h^{-m}\right], \quad (22)$$

trong đó: $k = \frac{\gamma_{th,D}}{\rho\gamma\left(a_1 - \gamma_{th,D}a_2\right)\lambda_{h_1}}$; $f_0 = \frac{\gamma_{th,D}}{\gamma\left(a_1 - \gamma_{th,D}a_2\right)\lambda_h}$.

## 3 MÔ PHỎNG VÀ NHẬN XÉT

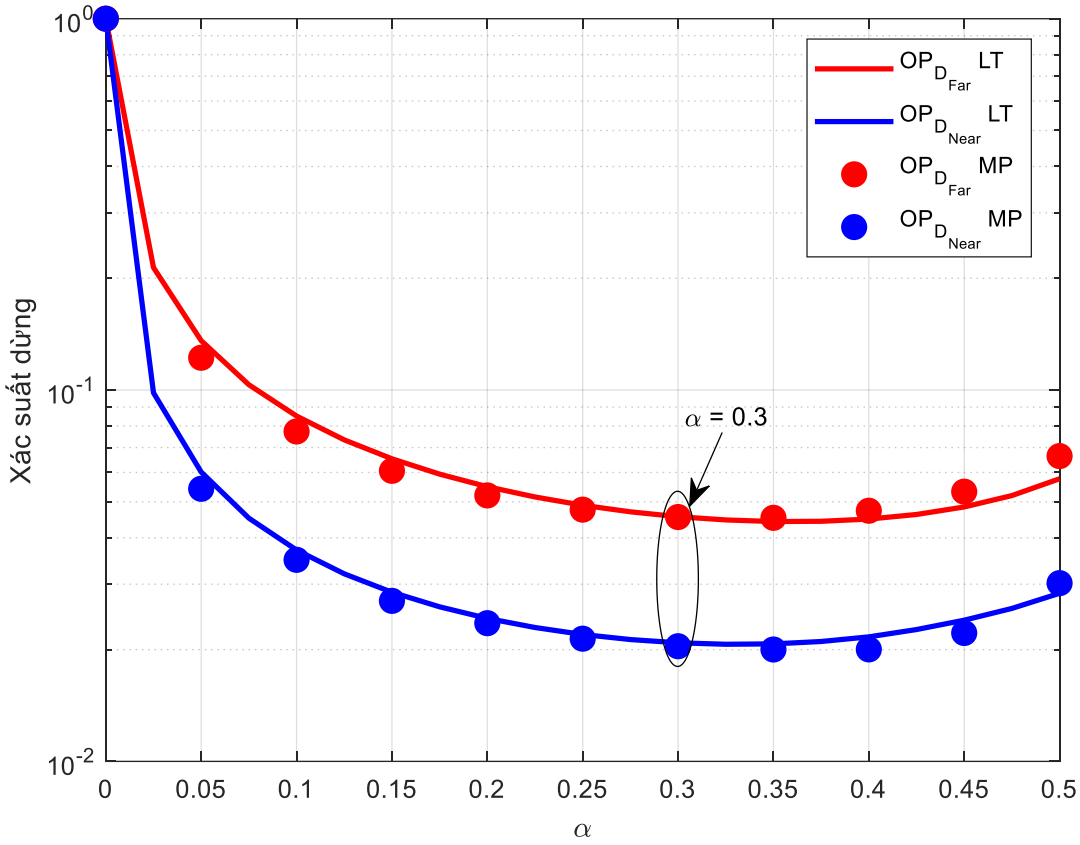
Trong phần này, chúng tôi tiến hành phân tích và đánh giá xác suất dừng trong mạng hợp tác một chiều với thu hoạch năng lượng và NOMA. Để xác minh tính chính xác của các biểu thức lý thuyết, mô phỏng Monte Carlo được thực hiện với số lần lặp lớn hơn $10^6$, trong đó các điểm đánh dấu trên biểu đồ thể hiện kết quả mô phỏng. Các tham số hệ thống cố định bao gồm: $\eta$=0.35, $R_{th}$=0.35, $a_1$=0.7, $a_2$=0.3, $\beta = 2$, $d_1 + d_2 = 1$,

và $\rho = \frac{2\alpha\eta}{(1-\alpha)}$. Các đường cong màu đỏ biểu thị các OP của $D_{Far}$, trong khi đường cong màu xanh thể hiện OP của $D_{Near}$.



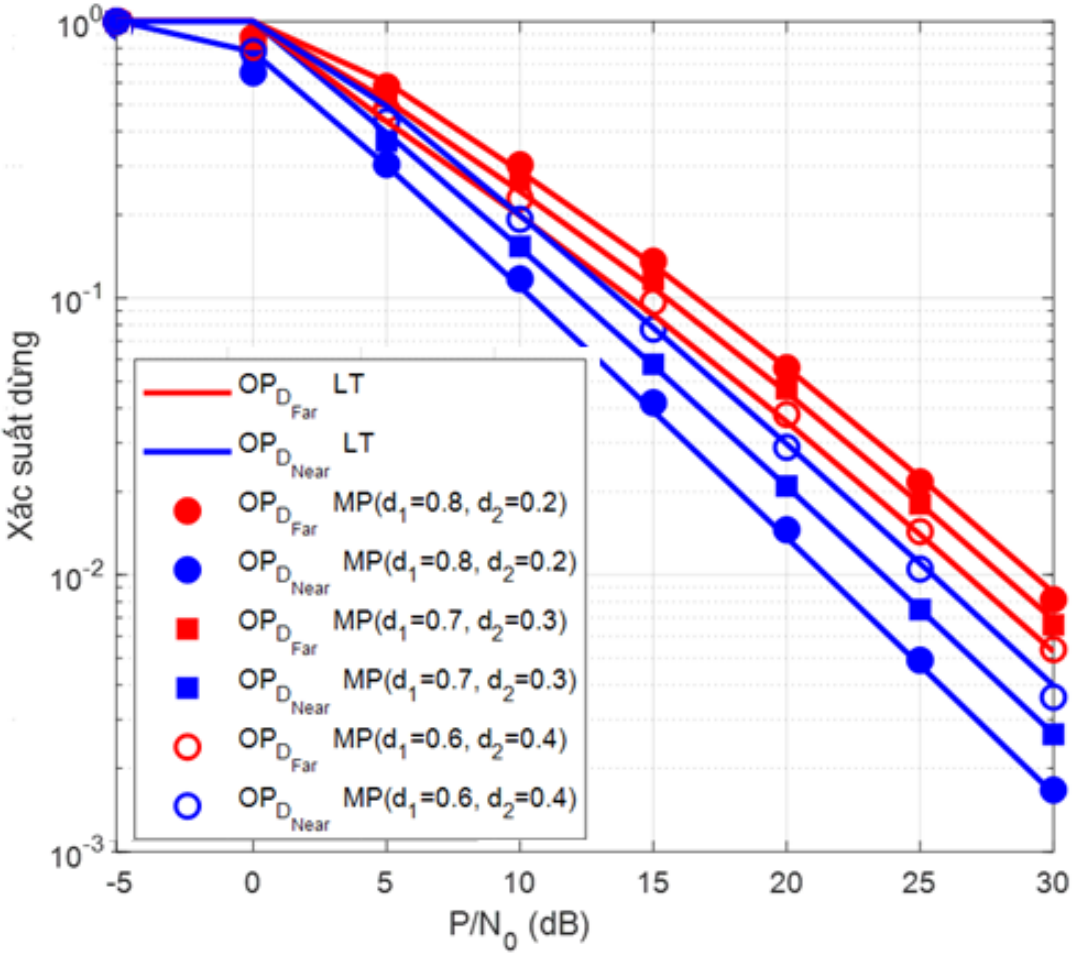

Hình 3. Xác suất dừng của hai đích theo khoảng cách d với $P/N_0$ thay đổi

Hình 3 biểu diễn xác suất dừng của $D_{Far}$ và $D_{Near}$ theo khoảng cách d khi $P/N_0$ = (10, 20, 30), $\alpha = 0.3$, $d_1 = 0.7$ và $d_2 = 0.3$. Đầu tiên ta thấy khi khoảng cách d tăng, xác suất dừng của $D_{Far}$ và $D_{Near}$ đều tăng, phản ánh ảnh hưởng của khoảng cách đến chất lượng kênh truyền. Xác suất dừng giảm khi $P/N_0$ tăng cho ta thấy hệ thống hoạt động hiệu quả hơn trong điều kiện SNR cao. Khi d quá nhỏ hoặc quá lớn, xác suất dừng rất thấp hoặc rất cao khiến khó quan sát sự khác biệt giữa các thông số hệ thống. Do đó, khoảng cách trung bình d = 0.5 được chọn để mô phỏng trong các hình sau, vì đây là giá trị đủ đại diện, giúp làm nổi bật rõ hơn ảnh hưởng của các tham số khác đến hiệu năng hệ thống.




Hình 4. Xác suất dừng của hai đích theo hệ số phân chia thời gian α

Hình 4 biểu diễn các OP của $D_{Far}$ và $D_{Near}$ theo α với $a_1 = 0.7$, $a_2 = 0.3$, $d = 0.5$, $d_1 = 0.7$, $d_2 = 0.3$, $P/N_0 = 20dB$. Quan sát hình 4 ta thấy xác suất dừng của $D_{Far}$ luôn cao hơn $D_{Near}$. Khi α thay đổi xác suất dừng của $D_{Far}$ và $D_{Near}$ thay đổi, phản ánh được tác động của sự phân chia thời gian thu hoạch năng lượng và thời gian truyền tín hiệu đến hệ thống. Trong khoảng $\alpha<0.3$, OP của $D_{Far}$ và $D_{Near}$ giảm khi α tăng, do tăng thời gian thu hoạch năng lượng dẫn đến tăng công suất truyền của R. Tuy nhiên khi $\alpha>0.3$, OP của $D_{Far}$ và $D_{Near}$ tăng khi α tăng, điều này có thể giải thích là dù năng lượng thu thập nhiều hơn nhưng thời gian truyền tín hiệu bị giảm cũng dẫn đến giảm hiệu năng của hệ thống. Hình 4 cũng chỉ ra rằng tại tại $\alpha=0.3$, xác suất dừng của $D_{Far}$ và $D_{Nea}$ gần như đạt mức tối thiểu, điều này cho thấy với một bộ thông số cho trước ta có thể chọn được hệ số phân chia thời gian hợp lý để hiệu năng của hệ thống đạt tối ưu.




Hình 5. Xác suất dừng của hai đích theo $P/N_0$ với khoảng cách $d_1$ và $d_2$ thay đổi

Hình 5 biểu diễn các OP của hai đích theo $P/N_0$ (dB) với $a_1$=0.7, $a_2$=0.3, d = 0.5, α=0.3, $d_1$= (0.8, 0.7, 0.6) và $d_2$ = 1-$d_1$. Đầu tiên ta thấy được khi $P/N_0$ tăng xác suất dừng của $D_{Far}$ và $D_{Near}$ giảm, chứng minh rằng hệ thống hoạt động hiệu quả hơn khi SINR cao. Ngoài ra, các cặp vị trí của hai nút đích có ảnh hưởng rõ rệt đến hiệu năng. Với hệ số phân chia công suất $a_1$=0.7, $a_2$=0.3 thì cặp $d_1$= 0.6 và $d_2$ = 0.4 giúp cải thiện tính công bằng về hiệu năng của $D_{Far}$ và $D_{Near}$ tốt nhất (tức là xác suất dừng của hai đích gần bằng nhau nhất).

Trong tất cả các hình, các kết quả từ phân tích lý thuyết và mô phỏng Monte Carlo, khi được biểu diễn bằng đồ thị, hoàn toàn khớp với nhau. Điều này khẳng định tính chính xác của các biểu thức phân tích trong đánh giá hệ thống.

## KẾT LUẬN

Nghiên cứu này đề xuất một mô hình mạng chuyển tiếp một chiều tích hợp thu hoạch năng lượng vô tuyến, dùng phương pháp phân chia khe thời gian tại chuyển tiếp AF và kỹ thuật NOMA. Hệ thống được đánh giá thông qua xác suất dừng và phân tích tác động của các thông số như tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu, tỷ lệ phân bổ thời gian, và vị trí tương đối của nút chuyển tiếp. Kết quả nghiên cứu cho thấy xác suất dừng tại hai nút đích giảm khi tỉ lệ công suất phát của nguồn trên nhiễu $P/N_0$ tăng. Bên cạnh đó khi hệ số phân chia khe thời gian và phân bổ công suất hợp lý sẽ giúp giảm xác suất dừng và tăng tính công bằng cho hai người dùng. Điều này có vai trò quan trọng của việc tối ưu hóa hiệu năng của hệ thống. Các mô phỏng Monte Carlo đã khẳng định độ chính xác của các phân tích lý thuyết. Mô hình được đề xuất khắc phục được các hạn chế về độ phức tạp và độ trễ cao của chuyển tiếp DF[3]. Mô hình tận dụng được những ưu điểm của chuyển tiếp AF như độ trễ xử lý thấp và chi phí triển khai thấp, đồng thời kết hợp với thu hoạch năng lượng. Điều này giúp mô hình trở thành một giải pháp cho các ứng dụng trong các hệ thống IoT và giao tiếp thời

gian thực. Hướng phát triển tiếp theo của nghiên cứu là mô hình sử dụng nhiều chuyển tiếp AF hoặc truyền tín hiệu cho nhiều người dùng.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO


[1] I. Ahmed, M. M. Butt, C. Psomas, A. Mohamed, I. Krikidis, and M. Guizani, Survey on energy harvesting wireless communications: Challenges and opportunities for radio resource allocation, *Computer Networks*, vol. 88, pp. 234-248, 2015.

[2] T. N. Nguyen, P. T. Tran, and M. Voznak, Wireless energy harvesting meets receiver diversity: a successful approach for two-way half-duplex relay networks over block Rayleigh fading channel, *Computer Networks*, vol. 172, p. 107176, 2020.

[3] H. N. Huy, N. T. Hải, Đ. T. T. Thủy, N. T. Luân, và P. T. Tín, Thu thập năng lượng trong mạng hợp tác đa truy cập phi trực giao có đường truyền trực tiếp, *Hội nghị Khoa học trẻ lần 3 năm 2021 (YSC2021)*, ĐHCN tp HCM, Vietnam, 2021, pp. 213-220.

[4] Đ. T. T. Thuỷ, N. Đ. N. Huy, và Đ. Trí, Khảo sát hiệu năng mô hình thu hoạch năng lượng vô tuyến trong mạng chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật phân chia theo thời gian và đa truy cập phi trực giao, *Hội nghị khoa học trẻ lần 5 (YSC2023)*, ĐHCN tp HCM, Vietnam, 2023, pp. 267-273.

[5] H. Q. Tran, C. V. Phan, Q.-T. Vien, and Networking, Performance analysis of power-splitting relaying protocol in SWIPT based cooperative NOMA systems, *EURASIP Journal on Wireless Communications*, vol. 2021, no. 1, p. 110, 2021.

[6] Z. Zhou, M. Peng, Z. Zhao, W. Wang, and R. S. J. I. J. o. S. A. i. C. Blum, Wireless-powered cooperative communications: Power-splitting relaying with energy accumulation, vol. 34, no. 4, pp. 969-982, 2016.

[7] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, 2013.

[8] W. Duan *et al.*, On the performance of an enhanced transmission scheme for cooperative relay networks with NOMA, *EURASIP Journal on Wireless Communications*, vol. 2018, no. 1, p. 165, 2018.

[9] O. Maraqa, A. S. Rajasekaran, S. Al-Ahmadi, H. Yanikomeroglu, S. M. Sait, and Tutorials, A survey of rate-optimal power domain NOMA with enabling technologies of future wireless networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2192-2235, 2020.

[10] T. Đ. Hưng, V. M. Hảo, Đ. T. T. Thủy, N. T. Luân, và P. T. Tín, Nâng cao hiệu năng mạng hợp tác hai chiều dùng NOMA và lựa chọn chuyển tiếp, *Tạp chí Khoa học và Công nghệ,* vol. 57, pp. 45-52, 2022.

[11] X. Yue, Y. Liu, S. Kang, A. Nallanathan, and Z. Ding, Exploiting full/half-duplex user relaying in NOMA systems, *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 2, pp. 560-575, 2017.

[12] D.-T. Do, M.-S. Van Nguyen, T.-A. Hoang, and M. Voznak, NOMA-assisted multiple access scheme for IoT deployment: Relay selection model and secrecy performance improvement, *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 736, 2019.

[13] X. Liang, Y. Wu, D. W. K. Ng, Y. Zuo, S. Jin, and H. J. I. C. L. Zhu, Outage performance for cooperative NOMA transmission with an AF relay, vol. 21, no. 11, pp. 2428-2431, 2017.

[14] N. T. Do, D. B. da Costa, T. Q. Duong, V. N. Q. Bao, and B. An, Opportunistic scheduling for fixed-gain amplify-and-forward-based multiuser multirelay SWIPT cooperative networks, *2017 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom)*, 2017, pp. 49-54, IEEE.

[15] P. Ghosh, H. Sarkar, S. Sharma, S. D. Roy, and S. Kundu, Outage analysis of a two users NOMA with partial selection of an energy harvesting relay, *Wireless Networks*, pp. 1-15, 2025.

[16] T. M. Hoang, N. L. Van, B. C. Nguyen, and L. T. Dung, On the performance of energy harvesting non-orthogonal multiple access relaying system with imperfect channel state information over Rayleigh fading channels, *Sensors*, vol. 19, no. 15, p. 3327, 2019.

[17] I. S. G. a. I. M. Ryzhik, *Table of integrals, series, and products*, Seventh ed. Elsevier, 2007.

# EVALUATING OUTAGE PROBABILITY IN ONE-WAY COOPERATIVE NETWORKS WITH ENERGY HARVESTING USING TIME SWITCHING AND NOMA

ĐÀO THỊ THU THỦY*, DƯƠNG HOÀNG TÂN, NGUYỄN XUÂN PHÚ TÂN,
*Faculty of Electronics Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City*
** Corresponding author: daothithuthuy@iuh.edu.vn*

**Abstract.** This paper investigates the outage probability of a one-way cooperative network incorporating energy harvesting using the time- switching (TS) protocol and employing a non-orthogonal multiple access (NOMA) technique. The system model consists of a source node and a relay node, which amplifies and forwards (AF) the signal to two destination nodes. The model adopts a successive interference cancellation (SIC) technique over Rayleigh fading channels. The study provides a detailed analysis of the signal transmission process to both destinations and derives mathematical expressions for calculating the outage probability. The Monte Carlo simulation method is utilized to evaluate the outage probability based on various factors such as signal-to-noise ratio (SNR), time-switching ratio, and other system parameters to assess their impact on system performance. Consequently, the study identifies the best performance outcomes, providing a foundation for the analysis and evaluation of the model's operational efficiency. The model's novelty lies in its ability to leverage the advantages of AF relaying, including architectural simplicity, low processing latency, and low deployment cost. As a result, the model becomes a suitable solution, effectively meeting the requirements of IoT and real-time communication applications.

**Keywords.** energy harversting, amplify and forward, non-orthogonal multiple access, successive interference cancellation.

*Ngày nhận bài: 26/5/2025*
*Ngày chấp nhận đăng: 24/9/2025*