

# ĐÁNH GIÁ HỆ THỐNG CHUYỂN TIẾP GIA TĂNG THU THẬP NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN TRONG ĐIỀU KIỆN CÓ VÀ KHÔNG CÓ MÁY PHÁT NĂNG LƯỢNG CỐ ĐỊNH

Trần Thiên Thanh\*, Võ Nguyễn Quốc Bảo#, và Lê Quốc Cường<sup>†</sup>

\*Trường Đại Học Giao Thông Vận Tải TP. Hồ Chí Minh

# Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

<sup>†</sup>Sở Thông Tin và Truyền Thông TP. Hồ Chí Minh

**Tóm tắt-** Trong bài báo này, chúng tôi tiến hành so sánh hiệu năng của mạng chuyển tiếp gia tăng thu thập năng lượng trong điều kiện có và không có máy phát năng lượng cố định. Chúng tôi đã phân tích xác suất dừng của hệ thống trong hai trường hợp sử dụng kỹ thuật xấp xỉ chuỗi và hàm Bessel điều chỉnh bậc một loại 2. Kết quả phân tích chỉ ra rằng trong cùng một điều kiện kênh truyền và hệ thống, mạng chuyển tiếp gia tăng thu thập năng lượng từ nguồn cho hiệu năng hệ thống tốt hơn mạng chuyển tiếp gia tăng thu thập năng lượng cố định là 5 dB.

**Từ khóa-** thu thập năng lượng, fading Rayleigh, thu thập năng lượng vô tuyến, nguồn phát năng lượng cố định

## I. GIỚI THIỆU

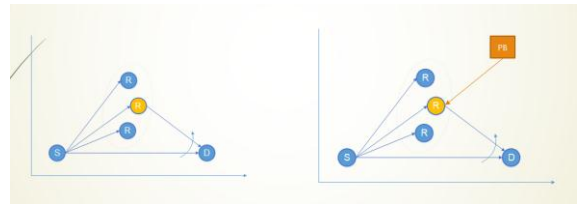
Trong truyền thông hợp tác, kỹ thuật truyền gia tăng là một trong những kỹ thuật chuyển tiếp có hiệu quả nhất về mặt hiệu suất phổ tần, cho phép nút chuyển tiếp chỉ hỗ trợ nút đích khi mà tín hiệu mà nút đích nhận từ nút nguồn không đảm bảo để giải điều chế [1]. Kỹ thuật truyền gia tăng cũng có ưu điểm là giảm áp lực cho nút chuyển tiếp khi phải luôn luôn chuyển tiếp dữ liệu của nút nguồn cũng như hạn chế việc tiêu tốn năng lượng của nút chuyển tiếp [2-7].

Để khuyến khích các nút chuyển tiếp tham gia vào cộng tác chuyển tiếp dữ liệu cho nút nguồn, Bảo và Tuấn trong bài báo [8] đã đề xuất sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng cho nút chuyển tiếp và đề xuất phương pháp đánh giá hiệu năng của hệ thống. Tuy nhiên, năng lượng thu thập từ nút chuyển tiếp trong hệ thống này thường là nhỏ, do phụ thuộc vào năng lượng phát của nút chuyển tiếp, và dẫn đến vùng phủ sóng của hệ thống là nhỏ. Để mở rộng vùng phủ sóng của hệ thống, cũng như tăng cường hiệu năng của hệ thống, một giải pháp khác là sử dụng nút phát năng lượng cố định – chuyên cung cấp năng lượng – để cung cấp năng lượng cho nút phát [9-19]. Tuy nhiên, hiệu năng hệ thống của hai trường hợp thu thập năng lượng từ nguồn và thu thập năng lượng từ nút phát cố định là chưa rõ.

Trong bài báo này, chúng tôi sẽ đánh giá và so sánh hiệu năng hệ thống chuyển tiếp gia tăng thu thập năng lượng vô tuyến trong điều kiện có và không có máy phát năng lượng cố định ở kênh truyền fading Rayleigh dưới dạng xác suất dừng hệ thống. Kết quả và những nhận xét đạt được sẽ cho biết hệ thống nào hiệu quả hơn và có thể áp dụng vào các mạng cảm biến không dây sử dụng năng lượng thu thập.

Phần còn lại của bài báo sẽ được tổ chức như sau. Phần II sẽ đề xuất mô hình hoạt động và đề xuất phương pháp đánh giá hiệu năng mạng. Phần III sẽ so sánh hiệu năng hệ thống chuyển tiếp gia tăng thu thập năng lượng vô tuyến trong điều kiện có và không có máy phát năng lượng cố định ở kênh truyền fading Rayleigh. Bài báo sẽ kết thúc với phần kết luận ở Phần VI.

## II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



**Hình 1** Mô hình hệ thống truyền gia tăng với kỹ thuật lựa chọn nút chuyển tiếp và kết hợp lựa chọn. Hình bên trái là hệ thống thu thập năng lượng từ nguồn. Hình bên phải là hệ thống thu thập năng lượng từ nút phát năng lượng.

Xem xét mô hình truyền gia tăng cộng tác bao gồm một nút nguồn (S), một nút đích (D) và  $N$  nút chuyển tiếp ký hiệu từ  $R_1, R_2, \dots, R_N$ . Quá trình truyền thông tin từ nút nguồn S đến nút đích D với sự giúp đỡ của  $N$  nút chuyển tiếp thông qua giao thức truyền gia tăng.

Giao thức truyền gia tăng là để giảm áp lực năng lượng lên các nút chuyển tiếp như đối với giao thức truyền thông cộng tác thông thường [1, 3, 4]. Các nút chuyển tiếp được trang bị mạch thu thập năng lượng vô tuyến và sẽ sử dụng năng lượng thu thập để giúp chuyển tiếp dữ liệu trong khi nút nguồn và

Tác giả liên hệ: Võ Nguyễn Quốc Bảo

Email: baovng@ptithcm.edu.vn

Đến tòa soạn: 11/2018, chỉnh sửa: 12/2018, chấp nhận đăng: 28/12/2018

nút đích sẽ sử dụng năng lượng lưu trữ từ nguồn, ví dụ như pin. Nghiên cứu này sẽ nghiên cứu hai trường hợp: (i) các nút chuyển tiếp thu thập năng lượng từ nút nguồn và (ii) các nút chuyển tiếp thu thập năng lượng từ nút phát năng lượng (PB).

Giả sử hệ thống sử dụng chế độ thu thập năng lượng phân chia theo thời gian. Gọi  $T$  là thời gian truyền chuẩn cho một symbol và  $\alpha$  là tỷ lệ phân chia thời gian thu thập năng lượng. Quá trình truyền tin từ nút nguồn đến nút đích sẽ chia ra làm ba khe thời gian con lần lượt là: khe phát quang bá, khe thu thập năng lượng, và khe truyền gia tăng, trong đó khe thu thập năng lượng và khe truyền gia tăng là hai khe truyền tùy chọn phụ thuộc vào chất lượng của kênh truyền trực tiếp trong khe phát quang bá. Thời lượng cho ba khe thời gian lần lượt là:  $\frac{1-\alpha}{2}T$ ,  $\alpha T$ , và  $\frac{1-\alpha}{2}T$ .

Trong khe phát quang bá với thời gian là  $\frac{1-\alpha}{2}T$ , nút nguồn phát quang bá tín hiệu và tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại nút đích và nút chuyển tiếp  $R_n$  có dạng:

$$\gamma_{SD} = \frac{P_S |h_{SD}|^2}{N_0}, \quad (1)$$

và

$$\gamma_{SR_n} = \frac{P_S |h_{SR_n}|^2}{N_0}, \quad (2)$$

với  $P_S$  là công suất phát của nút nguồn,  $h_{SD}$  là hệ số kênh truyền từ S đến D, và  $N_0$  là công suất nhiễu tại máy thu.

Tại cuối khe thời gian phát quang bá, nút đích kiểm tra tỷ số tín hiệu tại nút đích. Có hai trường hợp sẽ xảy ra là nút đích giải mã thành công và giải mã không thành công. Trong trường hợp giải mã thành công, nút đích sẽ gửi tín hiệu hồi tiếp để nút nguồn và các nút chuyển tiếp tiếp tục phát symbol kế tiếp. Trong trường hợp giải mã không thành công, nút đích cũng sẽ gửi tín hiệu hồi tiếp để các nút chuyển tiếp thu thập năng lượng trong khe thời gian thứ 2 và nút chuyển tiếp lựa chọn thực hiện khe truyền gia tăng. Để đơn giản trong phân tích hiệu năng của hệ thống, giả sử rằng kênh truyền hồi tiếp là không trễ và không lỗi. Ảnh hưởng trễ và lỗi của kênh truyền hồi tiếp như trình bày ở nghiên cứu là có thể bù đắp bằng công suất phát [8].

Xem xét trong khe thời gian thứ 2, các nút chuyển tiếp tiến hành thu thập năng lượng. Năng lượng thu thập tại nút chuyển tiếp thứ  $n$  trong 3 trường hợp được viết như sau:

#### a. Trường hợp 1: Thu thập năng lượng từ nút nguồn

Gọi  $h_{SR_n}$  hệ số kênh truyền từ nút nguồn S đến nút  $R_n$ , ta có

$$E_{R_n} = \eta P_S |h_{SR_n}|^2 \alpha T \quad (3)$$

với  $\eta$  là hệ số chuyển đổi năng lượng.

#### b. Trường hợp 2: Thu thập năng lượng từ nút phát năng lượng

Khi hệ thống sử dụng nút phát năng lượng, năng lượng thu thập tại nút chuyển tiếp là như sau:

$$E_n = \eta P_S |h_{PR_n}|^2 \alpha T \quad (4)$$

với  $h_{SR_n}$  hệ số kênh truyền từ nút phát năng lượng (P) đến nút  $R_n$ .

Khi có nhiều nút chuyển tiếp, hệ thống chọn nút chuyển tiếp thu thập được nhiều năng lượng nhất để làm nút chuyển tiếp trong pha truyền gia tăng [20]. Gọi  $R_b$  là nút chuyển tiếp được lựa chọn, ta có

$$R_b = \arg \max_{n=1, \dots, N} E_n. \quad (5)$$

Tương ứng với hai trường hợp, ta viết lại biểu thức (5) cho TH1 và TH2 như sau

$$R_b = \begin{cases} \arg \max_{n=1, \dots, N} \eta P_S |h_{SR_n}|^2 \alpha T, & \text{TH1} \\ \arg \max_{n=1, \dots, N} \eta P_P |h_{PR_n}|^2 \alpha T, & \text{TH2} \end{cases}. \quad (6)$$

Khi đó, công suất phát của nút được lựa chọn trong pha thời gian thứ 3 tương ứng trong hai trường hợp là

$$P_{R_b} = \begin{cases} \frac{2\eta\alpha}{1-\alpha} P_S \max_{n=1, \dots, N} |h_{SR_n}|^2, & \text{TH1} \\ \frac{2\eta\alpha}{1-\alpha} P_P \max_{n=1, \dots, N} |h_{PR_n}|^2, & \text{TH2} \end{cases}. \quad (7)$$

Tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại nút đích D trong pha truyền gia tăng lần lượt trong hai trường hợp là

$$\begin{aligned} \gamma_{R_b,D} &= \frac{P_{R_b}}{N_0} |h_{R_b,D}|^2 \\ &= \begin{cases} \frac{2\eta\alpha}{1-\alpha} \frac{P_S}{N_0} \max_{n=1, \dots, N} |h_{SR_n}| |h_{R_b,D}|^2, & \text{TH1} \\ \frac{2\eta\alpha}{1-\alpha} \frac{P_P}{N_0} \max_{n=1, \dots, N} |h_{PR_n}| |h_{R_b,D}|^2, & \text{TH2} \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

Nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp, tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương của hai chặng là [1]

$$\gamma_{AF} = \frac{\gamma_{SR_b} \gamma_{R_b,D}}{\gamma_{SR_b} + \gamma_{R_b,D} + 1}. \quad (9)$$

Ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao,  $\gamma_{AF}$  có thể được xấp xỉ như sau [21]

$$\gamma_{AF} \approx \min(\gamma_{SR_b}, \gamma_{R_b,D}). \quad (10)$$

Tại nút đích, để giảm độ phức tạp phân cứng, hệ thống sử dụng bộ kết hợp lựa chọn (selection combining) dẫn đến tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại nút đích sau ba khe thời gian như sau:

$$\gamma_{\Sigma} = \max(\gamma_{SD}, \gamma_{AF}) \quad (11)$$

### III. PHÂN TÍCH XÁC SUẤT DỪNG HỆ THỐNG

Trong phần này, chúng tôi sẽ phân tích hiệu năng của hệ thống thông qua xác suất dừng ở kênh truyền fading Rayleigh với trường hợp tổng qua khi mà giá trị ngưỡng chuyển kênh ( $R_s$ ) và ngưỡng dừng ( $R_o$ ) của hệ thống là khác nhau. Áp dụng định lý tổng xác suất, ta có xác suất dừng của hệ thống là như sau [22]:

$$\begin{aligned} \text{OP} = & \Pr \left[ \underbrace{\frac{1-\alpha}{2} \log_2(1+\gamma_{SD}) \geq R_s, \frac{1-\alpha}{2} \log_2(1+\gamma_{SD}) < R_o}_{I_1} \right] \\ & + \Pr \left[ \underbrace{\frac{1-\alpha}{2} \log_2(1+\gamma_{SD}) < R_s, \frac{1-\alpha}{2} \log_2(1+\gamma_{\Sigma}) < R_o}_{I_2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Trong (12),  $I_1$  được viết lại là hàm của  $R_s$  và  $R_o$  như sau

$$I_1 = \begin{cases} 0 & R_s \geq R_o \\ \exp\left(-\frac{2^{R_s}-1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) - \exp\left(-\frac{2^{R_o}-1}{\bar{\gamma}_{SD}}\right) & R_s < R_o \end{cases} \quad (13)$$

Với  $I_2$  trong (12), ta viết lại như sau

$$\begin{aligned} I_2 = & \Pr[\gamma_{SD} < 2^{R_s} - 1, \max(\gamma_{SD}, \gamma_{AF}) < 2^{R_o} - 1] \\ = & \begin{cases} \Pr(\gamma_{SD} < 2^{R_o} - 1) \Pr(\gamma_{AF} < 2^{R_o} - 1), & R_s \geq R_o \\ \Pr(\gamma_{SD} < 2^{R_s} - 1) \Pr(\gamma_{AF} < 2^{R_o} - 1), & R_s < R_o \end{cases} \\ = & \begin{cases} F_{\gamma_{SD}}(2^{R_o} - 1) F_{\gamma_{AF}}(2^{R_o} - 1), & R_s \geq R_o \\ F_{\gamma_{SD}}(2^{R_s} - 1) F_{\gamma_{AF}}(2^{R_o} - 1), & R_s < R_o \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

Để phân tích được dạng đóng của (14), chúng ta cần xem xét hàm CDF của  $\gamma_{AF}$  trong hai trường hợp như dưới đây.

#### a. Trường hợp 1: Thu thập năng lượng từ nguồn

Trong trường hợp này, ta bắt đầu từ định nghĩa hàm CDF của  $\gamma_{AF}$  như sau:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{AF}}(\gamma) &= \Pr[\min(\gamma_{SR_b}, \gamma_{R_bD}) < \gamma] \\ &= 1 - \Pr(\gamma_{SR_b} > \gamma, \gamma_{R_bD} > \gamma). \end{aligned} \quad (15)$$

Xem xét công thức (8), ta viết lại  $F_{\gamma_{AF}}(\gamma)$  sử dụng xác suất điều kiện như sau

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{AF}}(\gamma) &= 1 - \Pr(\gamma_{SR_b} > \gamma, \beta\gamma_{SR_b} |h_{R_bD}|^2 > \gamma) \\ &= 1 - \int_{\gamma}^{\infty} F_{|h_{R_bD}|^2} \left( \frac{\gamma}{\beta x} \right) f_{\gamma_{SR_b}}(x) dx. \end{aligned} \quad (16)$$

Ở kênh truyền fading Rayleigh, hàm PDF của  $\gamma_{SR_b}$  có dạng như sau [7]

$$f_{\gamma_{SR_b}}(\gamma) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \frac{n\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}} e^{-\frac{n\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}} \quad (17)$$

Thay thế (17) vào (16) và thực hiện đưa dấu tích phân vào bên trong, ta có

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{AF}}(\gamma) &= 1 - \int_{\gamma}^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma}{\beta x \lambda_{RD}}\right) \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \frac{n}{\bar{\gamma}_{SR}} e^{-\frac{nx}{\bar{\gamma}_{SR}}} dx \\ &= 1 - \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \frac{n}{\bar{\gamma}_{SR}} \int_{\gamma}^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma}{\beta \lambda_{RD} x} - \frac{nx}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) dx. \end{aligned} \quad (18)$$

Tích phân trong (18) là không tồn tại dạng đóng. Trong các nghiên cứu trước đây, ví dụ [23, 24], đã thực hiện xấp xỉ bằng cách cho ngưỡng dưới tích phân về không dẫn đến kết quả đạt được là không phù hợp với vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao. Nghiên cứu này đề xuất sử dụng kỹ thuật xấp xỉ chuỗi cho hàm mũ,

cụ thể là  $e^x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$ . Ưu điểm của kỹ thuật xấp xỉ hàm mũ là

cho phép chúng ta lựa chọn độ chính xác xấp xỉ cần thiết dựa vào số lượng thành phần đầu trong chuỗi. Khi đó, ta viết lại (18) như sau:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{AF}}(\gamma) &= 1 - \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \frac{n}{\bar{\gamma}_{SR}} \\ & \times \int_{\gamma}^{\infty} \exp\left(-\frac{nx}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \left(\frac{\gamma}{\beta \lambda_{RD} x}\right)^k dx \\ &= 1 - \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+n-1}}{k!} \binom{N}{n} \frac{n}{\bar{\gamma}_{SR}} \left(\frac{\gamma}{\beta \lambda_{RD}}\right)^k \\ & \times \int_{\gamma}^{\infty} x^{-k} \exp\left(-\frac{nx}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) dx. \end{aligned} \quad (19)$$

Sử dụng kết quả tích phân tại 3.351.4 của [25], chúng ta có

$$\begin{aligned}
 F_{\gamma_{AF}}(\gamma) &= 1 - \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \frac{n}{\bar{\gamma}_{SR}} \\
 &\quad \times \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!} \left( \frac{\gamma}{\beta \lambda_2} \right)^k \int_{\gamma}^{\infty} x^{-k} \exp\left(-\frac{nx}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) dx \\
 &= 1 - \sum_{n=1}^N \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+n-1}}{k!} \binom{N}{n} \frac{n}{\bar{\gamma}_{SR}} \left( \frac{\gamma}{\beta \lambda_{RD}} \right)^k \\
 &\quad \times \left[ (-1)^k \left( \frac{n}{\bar{\gamma}_{SR}} \right)^{k-1} \frac{1}{(k-1)!} \text{Ei}\left(-\frac{n\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \right. \\
 &\quad \left. + \frac{e^{-\frac{n\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}}}{\gamma^{k-1}} \sum_{\ell=0}^{k-1} \frac{1}{(k-1)(k-2)\dots(k-1-\ell)} \left( -\frac{n\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}} \right)^{\ell} \right]
 \end{aligned} \tag{20}$$

**b. Trường hợp 2: Thu thập năng lượng từ nút phát năng lượng**

Kết hợp (8) và (10), khác với (14), ta viết hàm CDF của  $\gamma_{AF}$  như sau:

$$\begin{aligned}
 F_{\gamma_{AF}}(\gamma) &= \Pr\left[\min(\gamma_{SR_b}, \gamma_{R_bD}) < \gamma\right] \\
 &= 1 - \Pr\left[\gamma_{SR_b} > \gamma, \beta \frac{P_p}{N_0} \max_{n=1,\dots,N} |h_{PR_n}|^2 |h_{R_bD}|^2 > \gamma\right].
 \end{aligned} \tag{21}$$

Do tính độc lập giữa các kênh truyền, ta viết lại (19) như sau:

$$F_{\gamma_{AF}}(\gamma) = 1 - \Pr(\gamma_{SR_b} > \gamma) \int_0^{\infty} \Pr\left(|h_{R_bD}|^2 > \frac{\gamma}{\beta x}\right) f_{\gamma_{PR_b}}(x) dx. \tag{22}$$

Ở đây, ta nhận thấy rằng, do phương thức lựa chọn nút chuyển tiếp là giống nhau, nên hàm PDF của  $\gamma_{PR_b}$  có dạng như sau

$$f_{\gamma_{PR_b}}(\gamma) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \frac{n}{\bar{\gamma}_{PR}} e^{-\frac{n\gamma}{\bar{\gamma}_{PR}}}, \tag{23}$$

dẫn đến (20) sau khi áp dụng 3.324 của [25] có thể viết lại như sau

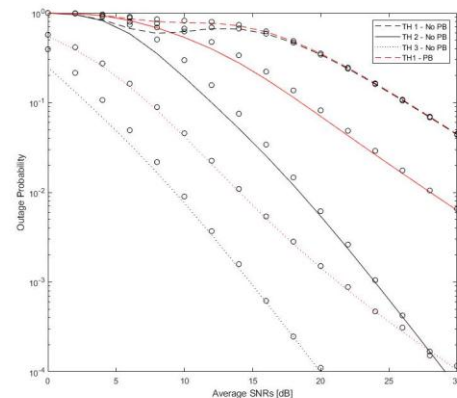
$$\begin{aligned}
 F_{\gamma_{AF}}(\gamma) &= 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{\gamma}{\beta x \lambda_{RD}}\right) \\
 &\quad \times \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \frac{n}{\bar{\gamma}_{PR}} e^{-\frac{nx}{\bar{\gamma}_{PR}}} dx \\
 &= 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \\
 &\quad \times \frac{n}{\bar{\gamma}_{PR}} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{nx}{\bar{\gamma}_{PR}} - \frac{\gamma}{\beta x \lambda_{RD}}\right) dx \\
 &= 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{SR}}\right) \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \binom{N}{n} \\
 &\quad \times 2 \sqrt{\frac{n\gamma}{\beta \lambda_{RD} \bar{\gamma}_{PR}}} K_1\left(2 \sqrt{\frac{n\gamma}{\beta \lambda_{RD} \bar{\gamma}_{PR}}}\right)
 \end{aligned} \tag{24}$$

với  $K_1(\cdot)$  là hàm Bessel điều chỉnh loại 2.

Thay thế lần lượt (20) và (24) vào (14), kết hợp với (13) và (12), ta có được xác suất dừng của hệ thống trong hai trường hợp thu thập năng lượng từ nguồn và thu thập năng lượng từ nút phát năng lượng.

**V. KẾT QUẢ SỐ VÀ THẢO LUẬN**

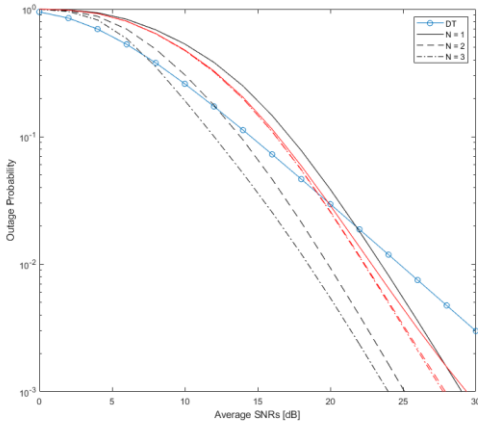
Trong phần này, tôi sẽ sử dụng mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng phân tích lý thuyết ở trên và so sánh hiệu năng của hệ thống truyền gia tăng trong hai trường hợp sử dụng và không sử dụng nút phát năng lượng. Để xem xét hiệu ứng suy hao đường truyền, nghiên cứu này sử dụng mô hình suy hao đường truyền đơn giản, nghĩa là  $\lambda_{AB} = d_{AB}^{-\eta}$  với  $d_{AB}$  là khoảng cách giữa nút A và nút B và  $\eta$  là hệ số suy hao kênh truyền. Ngoài trừ các khai báo riêng biệt khác, ta giả sử rằng nút S, R, D và P lần lượt đặt tại tọa độ (0,0), (0,1), (0;0.5), và  $(x_p, y_p)$ . Ta chọn  $\eta = 3$  và  $(x_p, y_p) = (0.5, 0.5)$ .



**Hình 2 Ảnh hưởng của tốc độ chuyển mạch lên hiệu năng hệ thống**

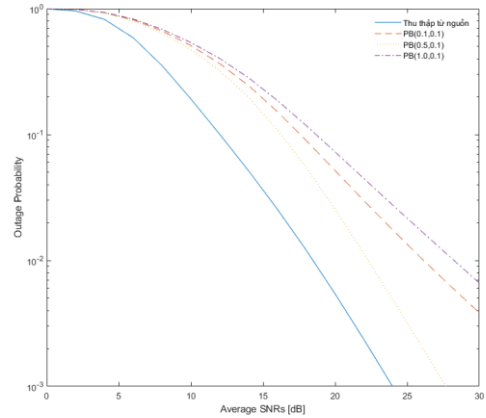
Hình 2 khảo sát ảnh hưởng của tốc độ chuyển mạch trong tương quan với tốc độ truyền truyền mong muốn. Ta xem xét

3 trường hợp đó là: (i) TH1:  $R_s = 1 < R_o = 2$  (ii) TH2:  $R_s = 2 = R_o = 2$  và (iii) TH3:  $R_s = 3 > R_o = 2$ . Ta dễ dàng nhận thấy rằng (1) Hệ thống thu thập năng lượng từ nguồn cho hiệu năng tốt hơn hệ thống thu thập năng lượng từ nút phát năng lượng (2) Cả hai hệ thống sẽ cho hiệu năng tốt hơn nếu giá trị  $R_s$  được chọn lớn hơn hoặc bằng  $R_o$  và (3) Kết quả phân tích sấp xỉ phù hợp với kết quả mô phỏng.



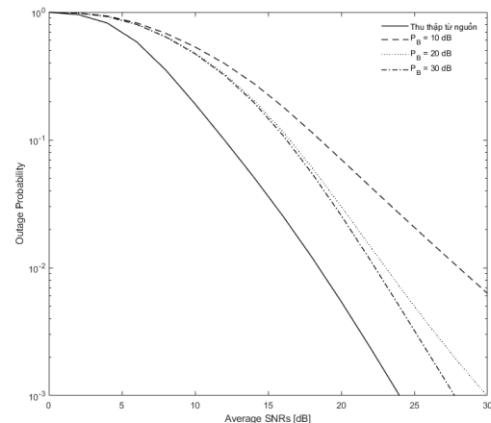
**Hình 3 Ảnh hưởng của số lượng nút chuyển tiếp**

Hình 3 khảo sát ảnh hưởng của số lượng nút chuyển tiếp lên hiệu năng của thống trong hai trường hợp có và không có nút phát năng lượng bằng cách tăng số lượng nút chuyển tiếp từ 1 lên 3. Hiệu năng của hệ thống truyền trực tiếp trong cùng điều kiện cũng được xem xét để so sánh tham chiếu. Ta có thể thấy rằng ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp, truyền trực tiếp cho hiệu năng tốt hơn cả giao thức xem xét trong cả hai điều kiện sử dụng và không sử dụng PB. Tuy nhiên, ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao, giao thức thu thập năng lượng từ nguồn cho hiệu năng hệ thống tốt nhất. Lý do là giao thức thu thập năng lượng từ nguồn bên cạnh việc lựa chọn nút chuyển tiếp thu thập năng lượng tốt nhất nó còn đảm bảo là kênh truyền tốt nhất.



**Hình 4 Ảnh hưởng của vị trí nút thu thập năng lượng**

Hình 4 khảo sát ảnh hưởng của vị trí nút phát năng lượng lên hiệu năng hệ thống. Ta cũng xem xét ba trường hợp đặc biệt, cụ thể: Trường hợp A: nút phát năng lượng gần nguồn S, Trường hợp B: nút phát năng lượng gần nút chuyển tiếp, và Trường hợp C: nút phát năng lượng gần nút đích. Hình 4 chỉ ra rằng Trường hợp B cho hiệu năng tốt nhất rồi đến trường hợp A và tiếp theo là trường hợp C như kết quả mong đợi. Nút phát năng lượng càng gần các nút chuyển tiếp thì càng có khả năng giúp các nút thu thập năng lượng nhiều hơn. Một điểm đáng chú ý là vị trí nút thu thập năng lượng cũng ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng hệ thống, đặc biệt là ở vùng tỷ số tín hiệu trên nhiễu cao, ví dụ tại mức  $10^{-2}$  nếu sắp xếp vị trí nút phát năng lượng hợp lý có thể lợi gần 5 dB trong trường hợp khác.



**Hình 5 Ảnh hưởng của mức phát năng lượng của nút phát năng lượng.**

Hình 5 khảo sát ảnh hưởng của mức phát năng lượng của nút phát năng lượng lên hiệu năng hệ thống. Ta xem xét  $P_B$  thay đổi với 3 mức như sau:  $P_B = 10$  dB,  $P_B = 20$  dB, và

$P_B = 30$  dB. Ta dễ dàng nhận thấy tăng giá trị  $P_B$  sẽ cải thiện hiệu năng của hệ thống một cách đáng kể. Tuy nhiên, mức tăng cải thiện phụ thuộc vào mức độ tương quan giữa công suất của nguồn phát năng lượng và công suất phát của nguồn S do tỷ số tín hiệu trên nhiễu của hệ thống hai chặng phụ thuộc vào chặng yếu hơn.

## V. KẾT LUẬN

Bài báo đã so sánh hiệu năng hệ thống truyền gia tăng thu thập năng lượng trong hai trường hợp thu thập năng lượng từ nguồn và thu thập năng lượng từ nút chuyển tiếp cố định. Các kết quả phân tích đã chỉ ra rằng trong cùng điều kiện kênh truyền và hệ thống, hệ thống thu thập năng lượng từ nguồn cho hiệu năng tốt hơn hệ thống thu thập năng lượng từ nút phát năng lượng. Kết quả phân tích cũng thể hiện rằng khi công suất phát của nút phát năng lượng đủ lớn thì vị trí của nút phát năng lượng là không quan trọng, cụ thể là không ảnh hưởng đến hiệu năng của hệ thống. Một hệ thống lai kết hợp giữa thu thập năng lượng từ nguồn và từ nút phát năng lượng có thể là hướng nghiên cứu tiềm năng của bài báo này.

## LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Học Viện Công Nghệ Bru Chính Viễn Thông trong đề tài có mã số 10-HV-2018-RD\_VT2

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, 2004.

[2] P. Tarasak, H. Minn, and L. Yong Hoon, "Analysis of incremental relaying protocol with RCPC in cooperative diversity systems," in *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC-2005-Fall. 2005 IEEE 62nd*, 2005, vol. 4, pp. 2537-2541.

[3] S. Ikki and M. H. Ahmed, "PHY 50-5 - Performance Analysis of Incremental Relaying Cooperative Diversity Networks over Rayleigh Fading Channels," in *Wireless Communications and Networking Conference, 2008. WCNC 2008. IEEE*, 2008, pp. 1311-1315.

[4] V. N. Q. Bao and K. Hyung Yun, "Performance Analysis of Incremental Selection Decode-and-Forward Relaying over Rayleigh Fading Channels," in *IEEE International Conference on Communications Workshops, 2009 (ICC Workshops 2009)*, 2009, pp. 1-5.

[5] B. Vo Nguyen Quoc and K. Hyung Yun, "Performance Analysis of Incremental Selection Decode-and-Forward Relaying over Rayleigh Fading

Channels," in *Communications Workshops, 2009. ICC Workshops 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1-5.

[6] V. N. Q. Bao and H. Y. Kong, "Incremental relaying for partial relay selection," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E93-B, no. 5, pp. 1317-1321, May 2010.

[7] V. N. Q. Bao and H. Y. Kong, "Incremental Relaying with partial relay selection," *IEICE Transactions on Communications*, vol. 93, no. 5, pp. 1317-1321, 2010.

[8] V. N. Q. Bao and N. A. Tuấn, "Effect of imperfect CSI on wirelessly powered transfer incremental relaying networks," *Journal of Science and Technology on Information and Communications*, no. 3-4, pp. 48-57% V 1, 2017-04-11 2017.

[9] N. T. Do, V. N. Q. Bao, and B. An, "A Relay Selection Protocol for Wireless Energy Harvesting Relay Networks," in *proc. of ATC* Ho Chi Minh City.

[10] B. Medepally and N. B. Mehta, "Voluntary Energy Harvesting Relays and Selection in Cooperative Wireless Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 9, no. 11, pp. 3543-3553, 2010.

[11] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. PP, no. 99, pp. 1-19, 2010.

[12] Y. Liu, S. A. Mousavifar, Y. Deng, C. Leung, and M. Elkashlan, "Wireless Energy Harvesting in a Cognitive Relay Network," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 4, pp. 2498-2508, 2016.

[13] L. Wang, K. K. Wong, R. W. Heath, and J. Yuan, "Wireless Powered Dense Cellular Networks: How Many Small Cells Do We Need?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 9, pp. 2010-2024, 2017.

[14] H. Lee, Y. Kim, J. H. Ahn, M. Y. Chung, and T. J. Lee, "WiFi and Wireless Power Transfer Live Together," *IEEE Communications Letters*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.

[15] H. Kaibin and V. K. N. Lau, "Enabling Wireless Power Transfer in Cellular Networks: Architecture, Modeling and Deployment," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 13, no. 2, pp. 902-912, 2014.

[16] Z. Caijun, Z. Gan, Z. Zhaoyang, and G. K. Karagiannidis, "Optimum Wirelessly Powered Relaying," *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 22, no. 10, pp. 1728-1732, 2015.

[17] G. Jing, S. Durrani, Z. Xiangyun, and H. Yanikomeroglu, "Outage Probability of Ad Hoc Networks With Wireless Information and Power Transfer," *Wireless Communications Letters, IEEE*, vol. 4, no. 4, pp. 409-412, 2015.

- [18] Y. Liu, L. Wang, S. A. R. Zaidi, M. ElKashlan, and T. Q. Duong, "Secure D2D Communication in Large-Scale Cognitive Cellular Networks: A Wireless Power Transfer Model," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 1, pp. 329-342, 2016.
- [19] C. Xu, M. Zheng, W. Liang, H. Yu, and Y. C. Liang, "Outage Performance of Underlay Multihop Cognitive Relay Networks With Energy Harvesting," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 6, pp. 1148-1151, 2016.
- [20] V. N. Q. Bao and N. T. Van, "Incremental relaying networks with energy harvesting relay selection: Performance analysis," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 0, no. 0, p. e3483.
- [21] A. Ribeiro, X. Cai, and G. B. Giannakis, "Symbol error probabilities for general cooperative links," in *Communications, 2004 IEEE International Conference on*, 2004, vol. 6, pp. 3369-3373 Vol.6.
- [22] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, random variables, and stochastic processes*, 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2002, pp. x, 852 p.
- [23] A. A. Nasir, Z. Xiangyun, 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.
- [24] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Throughput and ergodic capacity of wireless energy harvesting based DF relaying network," in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014, pp. 4066-4071.
- [25] D. Zwillinger, *Table of integrals, series, and products*. Elsevier, 2014.



**Trần Thiên Thanh** hiện đang là giảng viên thuộc Khoa Công nghệ Thông tin, trường Đại học Giao thông Vận tải HCM, nhận bằng Tiến sĩ vào năm 2016 tại Trường Đại học Bách Khoa HCM. Hướng nghiên cứu tập trung vào các kỹ thuật tiên tiến cho mạng 5G bao gồm NOMA, thu thập năng lượng vô tuyến, bảo mật lớp vật lý.



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

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

công, bảo mật lớp vật lý và thu thập năng lượng vô tuyến.



**Lê Quốc Cường** tốt nghiệp tiến sĩ tại trường đại học Peterburg, Nga. Tiến sĩ Cường đã từng là phó giám đốc Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông và hiện nay đang công tác tại Sở Thông Tin và Truyền Thông Thành Phố Hồ Chí Minh với vị trí Phó Giám đốc. Hướng nghiên cứu quan tâm bao gồm thông tin vô tuyến và thông tin quan, đặc biệt các công nghệ IoT và vô tuyến nhận thức.