

# PHÂN TÍCH XÁC SUẤT DỪNG HỆ THỐNG CHUYỂN TIẾP HAI CHIỀU SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ THU THẬP NĂNG LƯỢNG TỪ NGUỒN PHÁT

Nguyễn Anh Tuấn\*, Trần Thiên Thanh\*\*, Võ Nguyễn Quốc Bảo#

\*Cục Tần số vô tuyến điện-Bộ Thông tin và Truyền thông

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

# Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

*Tóm tắt- Bài báo này nghiên cứu mạng chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng từ nguồn phát năng lượng. Các nút mạng không có năng lượng lưu trữ mà sử dụng năng lượng thu thập từ nguồn phát năng lượng để cung cấp cho các hoạt động truyền phát. Chúng tôi đã đề xuất phương pháp để phân tích xác suất dừng chính xác của hệ thống và biểu diễn dưới dạng tường minh. Kết quả mô phỏng đã xác nhận tính chính xác của kết quả phân tích và chỉ ra rằng vị trí của nguồn phát và nút chuyển tiếp ảnh hưởng rất lớn đến hiệu năng của hệ thống.*

*Từ khóa-* chuyển tiếp hai chiều, fading Rayleigh, thu thập năng lượng vô tuyến, nguồn phát năng lượng

## I. GIỚI THIỆU

Trong những năm gần đây, công nghệ thu thập năng lượng là một hướng nghiên cứu sôi động và được các nhóm nghiên cứu trên thế giới quan tâm [1-3] như là một phần của công nghệ truyền thông xanh [4-7]. Bên cạnh thu thập năng lượng từ nguồn tự nhiên ví dụ như gió, thủy triều, ánh sáng mặt trời, thu thập năng lượng từ sóng vô tuyến có nhiều ưu điểm như tính ổn định, chủ động, và dễ dàng áp dụng cho các mạng thông tin vô tuyến [8-10]. Công nghệ thu thập năng lượng vô tuyến cho phép các nút mạng thu năng lượng bên cạnh thông tin từ tín hiệu vô tuyến để chuyển đổi thành năng lượng phục vụ cho các hoạt động truyền phát của mạng [11, 12]. Công nghệ này cho phép kéo dài thời gian hoạt động của các nút mạng vô tuyến ngay cả khi nút mạng không được cấp nguồn tại chỗ, đặc biệt hữu dụng cho các mạng cảm biến không dây. Hiện nay, có hai kiến trúc cơ bản trong thu thập năng lượng vô tuyến, đó là (i) thu thập năng lượng phân chia theo thời gian và (ii) thu thập năng lượng phân chia theo công suất [12]. Cho đến nay, có rất nhiều nghiên cứu nhằm cải thiện hiệu năng và vùng phủ sóng của mạng thu thập năng lượng, ví dụ như: [13] đề xuất phương

pháp phân tích hiệu năng của mạng chuyển tiếp thu thập năng lượng, [14] đề xuất phương pháp phân tích hiệu năng dựa trên chuỗi Taylor cho mạng chuyển tiếp có lựa chọn nút chuyển tiếp, [15] đề xuất phương pháp phân tích hiệu năng mới cho mạng Multi-Input Multi-Output chuyển tiếp thu thập năng lượng thu thập năng lượng, [16] khảo sát ảnh hưởng của kênh truyền không hoàn hảo trong lựa chọn nút chuyển tiếp của mạng chuyển tiếp thu thập năng lượng, [17, 18] áp dụng kỹ thuật distributed switch-and-stay cho mạng chuyển tiếp thu thập năng lượng, [19] tận dụng kênh truyền trực tiếp cho hệ thống chuyển tiếp đa người dùng sử dụng kỹ thuật SWIPT (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer), [20] khảo sát hiệu năng của mạng chuyển tiếp đa chặng theo cụm với kỹ thuật thu thập năng lượng, [21] khảo sát thông lượng của mạng thu thập năng lượng có nguồn phát.

Bên cạnh kỹ thuật thu thập năng lượng, kỹ thuật chuyển tiếp là một kỹ thuật hiệu quả để mở rộng vùng phủ sóng của mạng vô tuyến, đặc biệt là mạng vô tuyến thu thập năng lượng do năng lượng thu thập hiện nay vẫn ở mức mW [22-24]. Trong các kỹ thuật chuyển tiếp, chuyển tiếp hai chiều cho hiệu suất phổ tần cao nhất [25, 26]. Cho đến nay, kỹ thuật chuyển tiếp hai chiều đã được xem xét cho nhiều công nghệ tiên tiến ở lớp vật lý, ví dụ như vô tuyến nhận thức [27-29], bảo mật lớp vật lý [30], song công [31], gói tin ngắn [32], và điều chế không gian [33].

Gần đây, kỹ thuật thu thập năng lượng cũng được áp dụng cho mạng chuyển tiếp hai chiều, ví dụ ở những bài báo [34], [35], [36], [37]. Cụ thể, trong [34], nhóm tác giả đã đánh giá hiệu năng của hệ thống truyền chuyển tiếp hai chiều trong môi trường vô tuyến nhận thức với nút chuyển tiếp thu thập năng lượng trong điều kiện suy giảm phân cứng. Trong bài báo [35], Tutuncuoğlu và cộng sự đã đề xuất các giao thức cho phép tối đa tổng thông lượng của mạng chuyển tiếp hai chiều với giả sử các nút mạng hoạt động dựa trên năng lượng

Tác giả liên hệ: Nguyễn Anh Tuấn

Email: [natuan@rfd.gov.vn](mailto:natuan@rfd.gov.vn)

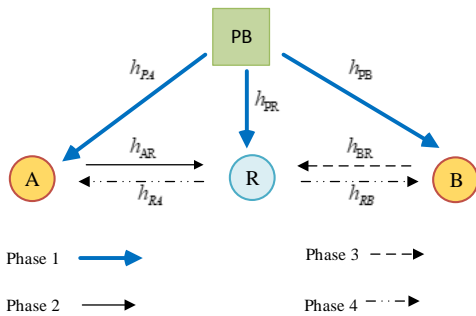
Đền tòa soạn: 16/4/2018, chỉnh sửa: 10/5/2018, chấp nhận đăng: 20/5/2018

thu thập và không có bộ đệm. Các kết quả phân tích trong bài báo đã chỉ ra rằng kỹ thuật chuyển tiếp có ảnh hưởng đáng kể lên giao thức truyền tối ưu. Bài báo [36] đã xem xét mạng chuyển tiếp hai chiều thu thập năng lượng vô tuyến với một nút mạng không thu thập năng lượng và một nút mạng có sử dụng thu thập năng lượng. Bài báo đã đề xuất một giao thức truyền tối ưu dựa trên mô hình thu thập năng lượng ngẫu nhiên. Gần đây, bài báo [37] đã phân tích chất lượng hệ thống truyền chuyển tiếp DF hai chiều ba pha thời gian trong đó nút chuyển tiếp thu thập năng lượng từ tín hiệu vô tuyến trong hai pha đầu tiên để chuyển đổi thành nguồn phát tín hiệu trong pha thời gian thứ ba. Trong bài báo này, nhóm tác giả phân tích chất lượng hệ thống theo hai thông số là xác suất dừng và thông lượng. Tuy nhiên, bài báo chưa đưa ra biểu thức dạng tường minh của xác suất dừng toàn hệ thống.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất mô hình chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp sử dụng năng lượng thu thập với bốn khe thời gian. Các nút mạng thu thập năng lượng từ nguồn phát năng lượng độc lập. Chúng tôi phân tích và biểu diễn xác suất dừng hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh ở dạng tường minh. Các kết quả phân tích là mới và là đóng góp quan trọng. Các kết quả phân tích trong bài báo là những kết quả bước đầu để phân tích những mô hình phức tạp hơn khi sử dụng chuyển tiếp hai chiều và nhiều nguồn phát năng lượng.

Các phần tiếp theo của bài báo được bố cục như sau. Phần II là Mô hình hệ thống. Phần III phân tích xác suất dừng chính xác của hệ. Phần IV trình bày kết quả mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng kết quả phân tích lý thuyết và khảo sát đặc tính của hệ thống. Phần V là phần kết luận của bài báo.

## II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG



**Hình 1** Hệ thống chuyển tiếp hai chiều thu thập năng lượng sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp DF với một nguồn phát năng lượng.

Hệ thống chuyển tiếp hai chiều thu thập năng lượng gồm hai nút nguồn (ký hiệu A và B), một nút chuyển tiếp (ký hiệu R) và một nút cung cấp năng lượng (ký hiệu PB). Giả sử rằng các nút A, B, và R đều không được trang bị nguồn năng lượng và phải sử dụng năng

lượng thu thập từ PB. Mô hình này rất thực tế thường ứng dụng cho mạng cảm biến không dây với các nút mạng thường dựa vào năng lượng thu thập để hoạt động.

Quá trình truyền năng lượng và thông tin của hệ thống diễn ra trong bốn khe thời gian con có thời gian lần lượt là:  $\alpha T$ ,  $\frac{(1-\alpha)T}{3}$ ,  $\frac{(1-\alpha)T}{3}$ , và  $\frac{(1-\alpha)T}{3}$  với  $\alpha$  là hệ số phân chia thời gian với  $\alpha \in (0,1)$  và  $T$  là thời gian truyền của một symbol chuẩn trong chế độ truyền trực tiếp. Trong thực tế, giá trị  $\alpha$  là một tham số hiệu năng quan trọng, và có thể chọn  $\alpha$  để hiệu năng hệ thống tối ưu [41] [42].

Trong khe thời gian con thứ nhất, PB phát năng lượng cho các nút A, B, và R. Trong khe thời gian con thứ 2 và 3, nút nguồn A và B lần lượt truyền thông tin về nút chuyển tiếp R. Trong khe thời gian cuối cùng, nút R chuyển tiếp thông tin nhận được từ nút A (và B) về nguồn B (và A) dùng giao thức giải mã và chuyển tiếp.

Gọi  $h_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}$  với  $\mathcal{X} \in \{A,B,R,P\}$  và  $\mathcal{Y} \in \{A,B,R\}$  là hệ số kênh truyền từ  $\mathcal{X} \rightarrow \mathcal{Y}$ , ta có  $|h_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}|^2$  có phân bố hàm mũ với giá trị trung bình  $\lambda_{\mathcal{X}\mathcal{Y}}$  khi xem xét hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh.

Xem xét khe thời gian con thứ nhất, năng lượng thu thập tại nút A, B và R từ PB lần lượt như sau:

$$E_A = \varepsilon P_{PB} \alpha T |h_{PA}|^2, \quad (1)$$

$$E_B = \varepsilon P_{PB} \alpha T |h_{PB}|^2, \quad (2)$$

và

$$E_R = \varepsilon P_{PB} \alpha T |h_{PR}|^2 \quad (3)$$

với  $\varepsilon$  là hiệu năng thu thập năng lượng và  $P_{PB}$  là công suất phát trung bình của PB.

Xem xét trong khoảng thời gian  $\frac{(1-\alpha)T}{3}$ , ta tính được công suất phát của A, B, và R như sau:

$$P_A = \frac{3\varepsilon P_{PB} \alpha |h_{PA}|^2}{1-\alpha}, \quad (4)$$

$$P_B = \frac{3\varepsilon P_{PB} \alpha |h_{PB}|^2}{1-\alpha}, \quad (5)$$

và

$$P_R = \frac{3\varepsilon P_{PB} \alpha |h_{PR}|^2}{1-\alpha}. \quad (6)$$

Khi đó, ta có tỷ số tín hiệu nhận được tại R trong khe thời gian con thứ 2 và 3 như sau:

$$\gamma_{AR} = \frac{P_A |h_{AR}|^2}{N_0} = \frac{3\epsilon\alpha P_{PB} |h_{PA}|^2 |h_{AR}|^2}{1-\alpha N_0}, \quad (7)$$

$$\gamma_{BR} = \frac{P_A |h_{BR}|^2}{N_0} = \frac{3\epsilon\alpha P_{PB} |h_{PB}|^2 |h_{BR}|^2}{1-\alpha N_0}. \quad (8)$$

với  $N_0$  là công suất nhiễu trắng tại máy thu.

Tương tự, ta có tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại A và B trong khe thời gian con thứ 4 như sau

$$\gamma_{RA} = \frac{P_A |h_{AR}|^2}{N_0} = \frac{3\epsilon\alpha P_{PB} |h_{PR}|^2 |h_{RA}|^2}{1-\alpha N_0}, \quad (9)$$

$$\gamma_{RB} = \frac{P_A |h_{AR}|^2}{N_0} = \frac{3\epsilon\alpha P_{PB} |h_{PR}|^2 |h_{RB}|^2}{1-\alpha N_0}. \quad (10)$$

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

Trong phần này, chúng tôi sẽ phân tích xác suất dừng của hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh. Xem xét ba khe thời gian con để truyền thông tin, hệ thống chuyển tiếp hai chiều sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp sẽ bị dừng nếu bất kỳ một khe thời gian con nào không đảm bảo tốc độ dữ liệu mong muốn cho trước,  $\mathcal{R}$ . Áp dụng định luật tổng xác suất, ta có thể viết xác suất dừng hệ thống như sau

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr[f(\gamma_{AR}) < \mathcal{R}] \\ &+ \Pr[f(\gamma_{AR}) \geq \mathcal{R}, f(\gamma_{BR}) < \mathcal{R}] \\ &+ \Pr(f(\gamma_{AR}) \geq \mathcal{R}, f(\gamma_{BR}) \geq \mathcal{R}, f(\gamma_R) < \mathcal{R}) \end{aligned} \quad (11)$$

với  $f(\gamma_M) = \frac{1-\alpha}{3} \log_2(1+\gamma_M)$  với  $M \in \{AR, BR, R\}$ ;  $\gamma_R$  là tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương của khe thời gian con thứ 4.

Khi nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp, ta có thể viết [43]

$$\gamma_R = \min(\gamma_{RA}, \gamma_{RB}). \quad (12)$$

Từ (7), (8), và (12), ta có thể viết OP lại do tính độc lập thống kê của  $\gamma_{AR}$ ,  $\gamma_{BR}$ , và  $\gamma_R$  như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr(\gamma_{AR} < \gamma_{th}) + \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{BR} < \gamma_{th}) \\ &+ \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{BR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_R < \gamma_{th}) \\ &= 1 - \Pr(\gamma_{AR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{BR} \geq \gamma_{th}) \Pr(\gamma_R \geq \gamma_{th}) \end{aligned} \quad (13)$$

với  $\gamma_{th} = 2^{\frac{3R}{1-\alpha}} - 1$  và dấu “=” ở (13) có được do sử dụng tính chất  $\Pr(\gamma_{XY} < \gamma_{th}) = 1 - \Pr(\gamma_{XY} \geq \gamma_{th})$ .

Để tìm được OP, ta cần tính toán  $\Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th})$ ,  $\Pr(\gamma_{BR} > \gamma_{th})$  và  $\Pr(\gamma_R > \gamma_{th})$ . Cụ thể ta viết lại (7) như sau:

$$\Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th}) = 1 - \Pr\left(\frac{3\epsilon\alpha P_{PB} |h_{PA}|^2 |h_{AR}|^2}{1-\alpha N_0} < \gamma_{th}\right) \quad (14)$$

Sử dụng xác suất có điều kiện, ta có thể viết

$$\Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th}) = 1 - \int_0^\infty F_{|h_{AR}|^2}\left(\frac{\gamma_{th} N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB} x}\right) f_{|h_{PA}|^2}(x) dx \quad (15)$$

với  $F_{|h_{AR}|^2}(\gamma)$  và  $f_{|h_{PA}|^2}(\gamma)$  lần lượt là hàm CDF của  $|h_{AR}|^2$  và hàm PDF của  $|h_{PA}|^2$ . Thay thế  $F_{|h_{AR}|^2}(\gamma)$  có dạng

$$F_{|h_{AR}|^2}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\lambda_{AR}}\right) \quad (16)$$

và  $f_{|h_{PA}|^2}(\gamma)$  có dạng

$$f_{|h_{PA}|^2}(\gamma) = \frac{1}{\lambda_{AR}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\lambda_{AR}}\right) \quad (17)$$

vào (15), ta được

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th}) &= 1 - \int_0^\infty \left(1 - \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{AR}} \frac{\gamma_{th} N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB} \gamma_{AP}}\right)\right) \\ &\times \frac{1}{\lambda_{AR}} \exp\left(-\frac{\gamma_{AP}}{\lambda_{AP}}\right) d\gamma_{AP} \\ &= \frac{1}{\lambda_{AR}} \int_0^\infty \exp\left(-\frac{1}{\lambda_{AR}} \frac{\gamma_{th} N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB} \gamma_{AP}} - \frac{\gamma_{AP}}{\lambda_{AP}}\right) d\gamma_{AP} \end{aligned} \quad (18)$$

Sử dụng biến đổi (3.321.1) ở [44], ta được

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th}) &= 2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB} \lambda_{AR} \lambda_{AP}}} \\ &\times \mathcal{K}_1\left(2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB} \lambda_{AR} \lambda_{AP}}}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

với  $\mathcal{K}_1(x)$  làm hàm Bessel điều chỉnh loại 2 bậc 1 [45].

Từ (7) và (8), ta nhận thấy rằng  $\gamma_{AR}$  và  $\gamma_{BR}$  có cùng một dạng, nên từ  $\Pr(\gamma_{AR} > \gamma_{th})$ , ta dễ dàng suy ra  $\Pr(\gamma_{BR} > \gamma_{th})$  như sau:

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{BR} > \gamma_{th}) &= 2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB} \lambda_{BR} \lambda_{BP}}} \\ &\times \mathcal{K}_1\left(2 \sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB} \lambda_{BR} \lambda_{BP}}}\right). \end{aligned} \quad (20)$$

Bây giờ ta sẽ tìm  $\Pr(\gamma_R > \gamma_{th})$  bằng cách xem xét  $\gamma_{RA}$  và  $\gamma_{RB}$  ở (9) và (10) và nhận thấy  $\gamma_{RA}$  và  $\gamma_{RB}$  là tương quan với nhau do có một thành phần chung  $|h_{PR}|^2$ . Do đó, áp dụng xác suất có điều kiện, ta có thể viết  $\Pr(\gamma_R > \gamma_{th})$  như sau:

$$\Pr(\gamma_R < \gamma_{th}) = \int_0^{\infty} F_{\gamma_R|\gamma_{PR}}(\gamma_{th}) f_{\gamma_{PR}}(\gamma_{PR}) d\gamma_{PR}. \quad (21)$$

Nhắc lại (12), ta có thể viết

$$F_{\gamma_R|\gamma_{PR}}(\gamma_{th}) = 1 - \Pr(\gamma_{RA}|\gamma_{PR} > \gamma_{th}, \gamma_{RB}|\gamma_{PR} > \gamma_{th}). \quad (22)$$

Khi điều kiện trên  $\gamma_{PR}$ ,  $\gamma_{RA}|\gamma_{PR}$  và  $\gamma_{RB}|\gamma_{PR}$  là độc lập thống kê với nhau, nên ta có thể viết lại (22) như sau:

$$F_{\gamma_R|\gamma_{PR}}(\gamma_{th}) = 1 - \Pr(\gamma_{RA}|\gamma_{PR} > \gamma_{th}) \Pr(\gamma_{RB}|\gamma_{PR} > \gamma_{th}). \quad (23)$$

Ở kênh fading Rayleigh, ta có

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_{RA}|\gamma_{PR} > \gamma_{th}) &= \Pr\left(|h_{RA}|^2 > \frac{\gamma_{th} N_0 (1-\alpha)}{3\epsilon\alpha P_{PB} |h_{PR}|^2}\right) \\ &= \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0 (1-\alpha)}{3\epsilon\alpha P_{PB} \lambda_{RA} |h_{PR}|^2}\right). \end{aligned} \quad (24)$$

Tương tự, ta có

$$\Pr(\gamma_{RB}|\gamma_{PR} > \gamma_{th}) = \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0 (1-\alpha)}{3\epsilon\alpha P_{PB} \lambda_{RB} |h_{PR}|^2}\right). \quad (25)$$

Kết hợp (22), (23), (24), và (25), ta có

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_R < \gamma_{th}) &= \int_0^{\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0 (1-\alpha)}{3\epsilon\alpha P_{PB} \lambda_{RA} \gamma_{PR}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0 (1-\alpha)}{3\epsilon\alpha P_{PB} \lambda_{RB} \gamma_{PR}}\right)\right] \\ &\quad \times \frac{1}{\lambda_{PR}} \exp\left(-\frac{\gamma_{PR}}{\lambda_{PR}}\right) d\gamma_{PR} \end{aligned} \quad (26)$$

với  $\gamma_{PR} = |h_{PR}|^2$ .

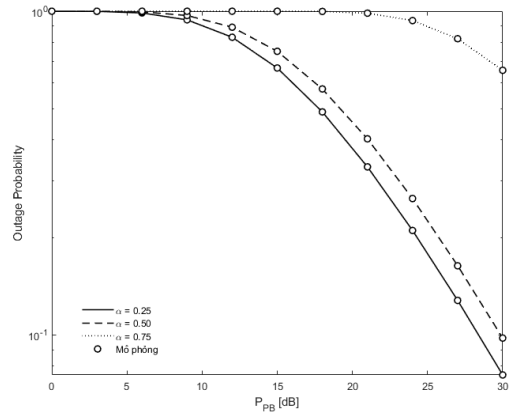
Sử dụng lại biến đổi (3.321.1) ở [44], ta có

$$\begin{aligned} \Pr(\gamma_R < \gamma_{th}) &= 1 - \left[2\sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB}\lambda_{AR}\lambda_{AP}}}\mathcal{K}_1\left(2\sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB}\lambda_{AR}\lambda_{AP}}}\right)\right] \\ &\quad \times \left[2\sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB}\lambda_{BR}\lambda_{BP}}}\mathcal{K}_1\left(2\sqrt{\frac{\gamma_{th}(1-\alpha)N_0}{3\epsilon\alpha P_{PB}\lambda_{BR}\lambda_{BP}}}\right)\right] \\ &\quad \times 2\sqrt{\frac{\gamma_{th}N_0(1-\alpha)}{3\epsilon\alpha P_{PB}\lambda_{PR}}\left(\frac{1}{\lambda_{RA}} + \frac{1}{\lambda_{RB}}\right)} \\ &\quad \times \mathcal{K}_1\left(2\sqrt{\frac{\gamma_{th}N_0(1-\alpha)}{3\epsilon\alpha P_{PB}\lambda_{PR}}\left(\frac{1}{\lambda_{RA}} + \frac{1}{\lambda_{RB}}\right)}\right) \end{aligned} \quad (27)$$

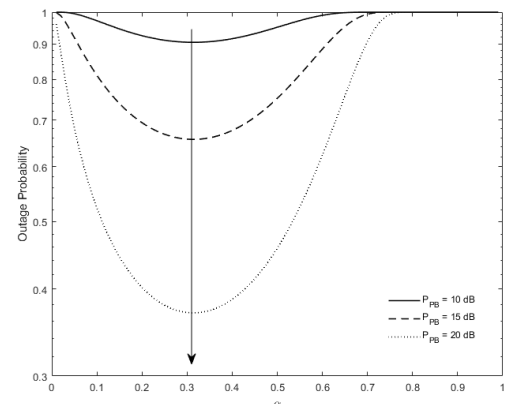
Cuối, thay thế (19), (20) và (27) vào (13), ta có được kết quả dạng đóng của xác suất dừng hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh.

## V. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Trong phần này chúng tôi sẽ thực hiện mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng kết quả lý thuyết phân tích ở phần trên và khảo sát đặc tính của hệ thống. Để đơn giản, chúng ta giả sử hệ thống được đặt trên một mặt phẳng hai chiều và các nút nguồn A, B, R và PB có tọa độ lần lượt là: (0, 0), (1, 0), (0.5, 0), và  $(x_{PB}, y_{PB})$  ngoại trừ các khai báo khác. Với kênh truyền, chúng ta sử dụng mô hình suy hao đường truyền đơn giản để mô hình hóa độ lợi kênh truyền trung bình, cụ thể  $\lambda_{XY} = d_{XY}^{-\eta}$  với  $d_{XY}$  là khoảng cách vật lý giữa  $X$  và  $Y$  và  $\eta$  hệ số suy hao đường truyền có giá trị từ 2 đến 6, với  $\eta = 3$ . Các tham số hệ thống có giá trị như sau:  $\epsilon = 0.6$  và  $\mathcal{R} = 1$ .



Hình 2 Xác suất dừng hệ thống theo  $P_{PB}$ : ảnh hưởng của  $\alpha$  với  $(x_{PB}, y_{PB}) = (0.5, 1)$  và  $d_{AR} = 0.5$ .

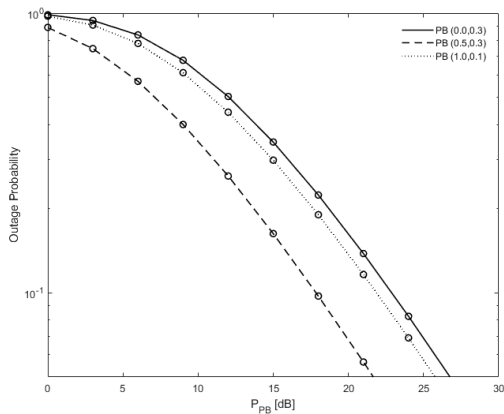


Hình 3 Xác suất dừng hệ thống theo  $\alpha$ : ảnh hưởng của  $P_{PB}$  với  $(x_{PB}, y_{PB}) = (0.5, 1)$  và  $d_{AR} = 0.5$ .

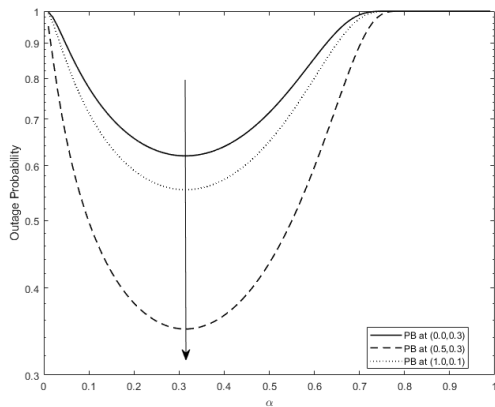
Hình 2 khảo sát ảnh hưởng của hệ số  $\alpha$  lên xác suất dừng của hệ thống bằng cách vẽ xác suất dừng hệ thống theo  $P_{PB}$ . Ta xem xét ba trường hợp của hệ số  $\alpha$ , đó là 0.25, 0.5 và 0.75. Kết quả trong Hình 2 chỉ ra rằng giá trị hệ thống sẽ có giá trị xác suất dừng

thấp nhất khi  $\alpha = 0.25$  và xác suất dừng lớn nhất khi  $\alpha = 0.75$ . Bên cạnh đó, kết quả lý thuyết và kết quả mô phỏng trùng khít nhau, xác nhận phương pháp phân tích xác suất dừng ở phần trên là đúng đắn.

Để hiểu rõ ảnh hưởng của giá trị  $\alpha$ , ta vẽ xác suất dừng hệ thống theo  $\alpha$  với ba trường hợp của  $P_{PB}$  trong Hình 3. Từ Hình 3 ta thấy rằng, xác suất dừng hệ thống phụ thuộc mạnh vào giá trị  $\alpha$ . Khi giá trị  $\alpha$  lớn hơn 0.7, thì hệ thống hoàn toàn bị dừng, nghĩa là thời gian không đủ để truyền dữ liệu theo tốc độ mong muốn. Hình 3 chỉ ra rằng tồn tại một giá trị  $\alpha$  tối ưu làm cho xác suất dừng hệ thống là nhỏ nhất. Kết quả phân tích trong Hình 3 cũng chỉ ra rằng giá trị  $\alpha$  tối ưu là không phụ thuộc vào  $P_{PB}$  và đều cho cùng một giá trị là 0.31.



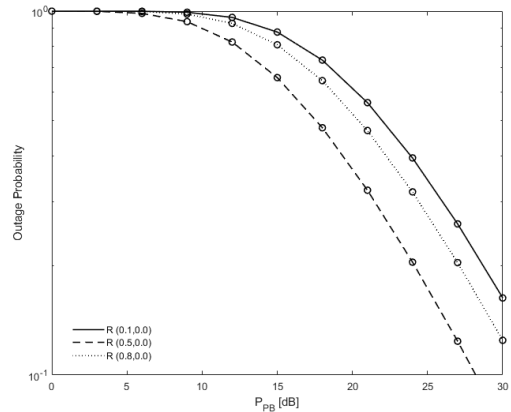
**Hình 4** Xác suất dừng hệ thống theo  $P_{PB}$ : ảnh hưởng của vị trí PB với  $\alpha = 0.3$  và  $d_{AR} = 0.5$ .



**Hình 5** Xác suất dừng hệ thống theo  $\alpha$ : ảnh hưởng của vị trí PB với  $P_{PB} = 10$  dB và  $d_{AR} = 0.5$ .

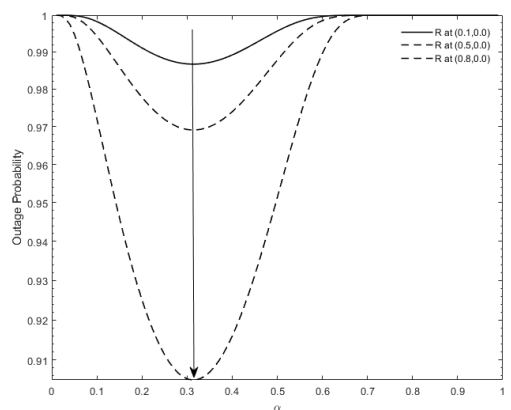
Trong Hình 4, ta khảo sát ảnh hưởng vị trí của PB lên xác suất dừng của hệ thống. Ta xem xét ba vị trí tiêu biểu của PB bao gồm: Trường hợp 1: PB rất gần nguồn A tại tọa độ  $(0, 0.3)$ , Trường hợp 2: PB rất gần nút chuyển tiếp R tại tọa độ  $(0.5, 0.3)$ , và Trường hợp 3: PB rất gần nút nguồn B tại tọa độ  $(1, 0.3)$ . Ta thấy rằng Trường hợp 2 cho xác suất dừng tốt hơn Trường hợp 3, và Trường hợp 3 cho xác suất dừng tốt hơn Trường hợp 1. Hay nói cách khác, cải thiện năng lượng

thu thập tại nút chuyển tiếp sẽ cải thiện hiệu năng của hệ thống một cách đáng kể. Tuy nhiên, giá trị tối ưu của  $\alpha$  lại không phụ thuộc vào vị trí của PB như chỉ ra ở Hình 5. Hình 5 cũng chỉ ra rằng trong cả 3 trường hợp, xác suất dừng hệ thống là nhỏ nhất khi  $\alpha = 0.31$ .



**Hình 6** Xác suất dừng hệ thống theo  $\alpha$ : ảnh hưởng của vị trí R với  $(x_{PB}, y_{PB}) = (0.5, 1)$  và  $\alpha = 0.3$ .

Trong Hình 6 và 7, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của vị trí nút chuyển tiếp R lên hiệu năng của hệ thống. Giả sử rằng R nằm trên đường thẳng kết nối giữa nút nguồn A và B và khoảng cách giữa nguồn A và B là chuẩn hóa bằng 1, chúng tôi xem xét 3 trường hợp tiêu biểu của R, cụ thể là R rất gần nguồn A tại tọa độ  $(0.1, 0)$ , R rất gần nguồn B tại tọa độ  $(0.5, 0)$ , và R nằm ngay giữa nguồn A và nguồn B tại tọa độ  $(0.8, 0)$ . Tương tự như các mạng chuyển tiếp hai chiều truyền thông, nút nguồn nằm tại ngay giữa nguồn A và nguồn B cho xác suất dừng hệ thống thấp nhất, tiếp theo là trường hợp nút chuyển tiếp nằm gần nguồn B và cuối cùng là trường hợp nút chuyển tiếp nằm gần nguồn A. Các kết quả đạt được là hợp lý với kết quả phân tích và như mong đợi và dễ dàng lý giải bằng cách vận dụng hiệu ứng suy hao đường truyền.



**Hình 7** Xác suất dừng hệ thống theo  $\alpha$ : ảnh hưởng của vị trí R với  $(x_{PB}, y_{PB}) = (0.5, 1)$  và  $P_{PB} = 10$  dB.

Trong Hình 7, chúng ta lại có thể khẳng định một lần nữa là hệ thống sẽ bị dừng nên giá trị  $\alpha$  lớn và giá trị tối ưu của  $\alpha$  không phụ thuộc vào vị trí của nút

chuyên tiếp trong cả ba trường hợp mà chúng ta khảo sát. Trong phạm vi bài báo này, chúng tôi chưa tìm dạng đóng của giá trị  $\alpha$  tối ưu, tuy nhiên các kết quả đạt được trong bài báo này sẽ là một trong những sở cứ quan trọng để chúng tôi tìm tòi và phân tích giá trị  $\alpha$  tối ưu

## V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất mô hình chuyên tiếp hai chiều giải mã và chuyên tiếp với một nút cung cấp năng lượng. Chúng tôi đã phân tích xác suất dừng hệ thống ở kênh truyền fading Rayleigh và sử dụng mô phỏng Monte Carlo để kiểm chứng tính chính xác của phương pháp phân tích đề xuất. Các kết quả mô phỏng đã chỉ ra rằng giá trị  $\alpha$  tối ưu không phụ thuộc vào vị trí của PB và R và hiệu năng của hệ thống sẽ cải thiện tốt nhất nếu PB được đặt gần nút chuyên tiếp.

## LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ Phát triển khoa học và công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 102.04-2014.32

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] A. A. Nasir, Z. Xiangyun, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing," *IEEE Transactions on, vol. 12, no. 7, pp. 3622-3636, 2013.*
- [2] N. Zlatanov, R. Schober, and Z. Hadzi-Velkov, "Asymptotically Optimal Power Allocation for Energy Harvesting Communication Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.*
- [3] V. D. Nguyen, T. Q. Duong, H. D. Tuan, O. S. Shin, and H. V. Poor, "Spectral and Energy Efficiencies in Full-Duplex Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Transactions on Communications, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.*
- [4] X. Huang, T. Han, and N. Ansari, "On Green Energy Powered Cognitive Radio Networks," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.*
- [5] M. Yuyi, L. Yaming, Z. Jun, and K. B. Letaief, "Energy harvesting small cell networks: feasibility, deployment, and operation," *Communications Magazine, IEEE, vol. 53, no. 6, pp. 94-101, 2015.*
- [6] S. A. Raza Zaidi, A. Afzal, M. Hafeez, M. Ghogho, D. C. McLernon, and A. Swami, "Solar energy empowered 5G cognitive metro-cellular networks," *Communications Magazine, IEEE, vol. 53, no. 7, pp. 70-77, 2015.*
- [7] Y. Zou, J. Zhu, and R. Zhang, "Exploiting Network Cooperation in Green Wireless Communication," *Communications, IEEE Transactions on, vol. PP, no. 99, pp. 1-12, 2013.*
- [8] Z. Ding *et al.*, "Application of smart antenna technologies in simultaneous wireless information and power transfer," *Communications Magazine, IEEE, vol. 53, no. 4, pp. 86-93, 2015.*
- [9] I. Krikidis, S. Timotheou, S. Nikolaou, Z. Gan, D. W. K. Ng, and R. Schober, "Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems," *Communications Magazine, IEEE, vol. 52, no. 11, pp. 104-110, 2014.*
- [10] L. Xiao, P. Wang, D. Niyato, D. Kim, and Z. Han, "Wireless Networks with RF Energy Harvesting: A Contemporary Survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.*
- [11] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, "Wireless Information and Power Transfer: A Dynamic Power Splitting Approach," *IEEE Transactions on Communications, vol. 61, no. 9, pp. 3990-4001, 2013.*
- [12] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff," *Communications, IEEE Transactions on, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, 2013.*
- [13] 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.*
- [14] N. Do, V. Bao, and B. An, "Outage Performance Analysis of Relay Selection Schemes in Wireless Energy Harvesting Cooperative Networks over Non-Identical Rayleigh Fading Channels," *Sensors, vol. 16, no. 3, p. 295, 2016.*
- [15] N. A. Tuan, V. N. Q. Bao, and L. Q. Cường, "A New Derivation Approach for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer for MIMO Dual-Hop Relay Networks," *Journal of Science and Technology on Information and Communications, no. 1, pp. 50-56% V 1, 2017-09-19 2017.*
- [16] 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.*
- [17] Q. N. Le, N. T. Do, V. N. Q. Bao, and B. An, "Full-duplex distributed switch-and-stay networks with wireless energy harvesting: design and outage analysis," *EURASIP*

- Journal on Wireless Communications and Networking*, journal article vol. 2016, no. 1, p. 285, December 15 2016.
- [18] Q. N. Le, V. N. Q. Bao, and B. An, "Full-duplex distributed switch-and-stay energy harvesting selection relaying networks with imperfect CSI: Design and outage analysis," *Journal of Communications and Networks*, vol. 20, no. 1, pp. 29-46, 2018.
- [19] N. T. Do, D. B. da Costa, T. Q. Duong, V. N. Q. Bao, and B. An, "Exploiting Direct Links in Multiuser Multirelay SWIPT Cooperative Networks With Opportunistic Scheduling," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 8, pp. 5410-5427, 2017.
- [20] N. T. Van, T. N. Do, V. N. Q. Bao, and B. An, "Performance Analysis of Wireless Energy Harvesting Multihop Cluster-Based Networks Over Nakagami- $m$  Fading Channels," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3068-3084, 2018.
- [21] N. P. Le, "Throughput Analysis of Power-Beacon-Assisted Energy Harvesting Wireless Systems Over Non-Identical Nakagami- $m$  Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 4, pp. 840-843, 2018.
- [22] C. R. Valenta and G. D. Durgin, "Harvesting Wireless Power: Survey of Energy-Harvester Conversion Efficiency in Far-Field, Wireless Power Transfer Systems," *Microwave Magazine, IEEE*, vol. 15, no. 4, pp. 108-120, 2014.
- [23] A. Costanzo and D. Masotti, "Smart Solutions in Smart Spaces: Getting the Most from Far-Field Wireless Power Transfer," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 17, no. 5, pp. 30-45, 2016.
- [24] Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and H. V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 4, pp. 938-953, 2016.
- [25] B. Rankov and A. Wittneben, "Achievable rate regions for the two-way relay channel," in *Information Theory, 2006 IEEE International Symposium on*, 2006, pp. 1668-1672: IEEE.
- [26] P. Popovski and H. Yomo, "Physical Network Coding in Two-Way Wireless Relay Channels," in *Communications, 2007. ICC '07. IEEE International Conference on*, 2007, pp. 707-712.
- [27] H. V. Toan and V. N. Q. Bao, "Opportunistic relaying for cognitive two-way network with multiple primary receivers over Nakagami- $m$  fading," in *2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2016, pp. 141-146.
- [28] H. V. Toan, V. N. Q. Bao, and K. N. Le, "Performance analysis of cognitive underlay two-way relay networks with interference and imperfect channel state information," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, journal article vol. 2018, no. 1, p. 53, March 06 2018.
- [29] T. H. Van, B. Vo-Nguyen, and N.-L. Hung, "Cognitive Two-Way Relay Systems with Multiple Primary Receivers: Exact and Asymptotic Outage Formulation," (in En), *IET Communications*, 2017.
- [30] F. Jameel, S. Wyne, and Z. Ding, "Secure Communications in Three-step Two-way Energy Harvesting DF Relaying," *IEEE Communications Letters*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.
- [31] Z. Zhang, Z. Ma, Z. Ding, M. Xiao, and G. Karagiannidis, "Full-Duplex Two-Way and One-Way Relaying: Average Rate, Outage Probability and Tradeoffs," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2016.
- [32] Y. Gu, H. Chen, Y. Li, L. Song, and B. Vucetic, "Short-Packet Two-Way Amplify-and-Forward Relaying," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 25, no. 2, pp. 263-267, 2018.
- [33] J. Zhang, Q. Li, K. J. Kim, Y. Wang, X. Ge, and J. Zhang, "On the Performance of Full-Duplex Two-Way Relay Channels With Spatial Modulation," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 64, no. 12, pp. 4966-4982, 2016.
- [34] D. K. Nguyen, M. Matthaiou, T. Q. Duong, and H. Ochi, "RF energy harvesting two-way cognitive DF relaying with transceiver impairments," in *IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, 2015, no. Jun. , pp. 1970-1975.
- [35] K. Tutuncuoglu, B. Varan, and A. Yener, "Throughput Maximization for Two-Way Relay Channels With Energy Harvesting Nodes: The Impact of Relaying Strategies," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 63, no. 6, pp. 2081-2093, 2015.
- [36] W. Li, M. L. Ku, Y. Chen, K. J. R. Liu, and S. Zhu, "Performance Analysis for Two-Way Network-Coded Dual-Relay Networks with Stochastic Energy Harvesting," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2017.
- [37] N. T. P. Van, S. F. Hasan, X. Gui, S. Mukhopadhyay, and H. Tran, "Three-Step Two-Way Decode and Forward Relay With Energy Harvesting," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 4, pp. 857-860, 2017.
- [38] R. Boris and W. Armin, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay

- channels," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, 2007.
- [39] S. Atapattu, J. Yindi, J. Hai, and C. Tellambura, "Relay Selection Schemes and Performance Analysis Approximations for Two-Way Networks," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 3, pp. 987-998, 2013.
- [40] K. Hwang, M. Ju, and M. Alouini, "Outage Performance of Opportunistic Two-Way Amplify-and-Forward Relaying with Outdated Channel State Information," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, pp. 1-10, 2013.
- [41] I. Krikidis, Z. Gan, and B. Ottersten, "Harvest-use cooperative networks with half/full-duplex relaying," in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2013 IEEE*, 2013, pp. 4256-4260.
- [42] T. T. Thanh and V. N. Quoc Bao, "Wirelessly Energy Harvesting DF Dual-hop Relaying Networks: Optimal Time Splitting Ratio and Performance Analysis," *Journal of Science and Technology: Issue on Information and Communications Technology*, no. 2, pp. 16-20%V 3, 2017-12-31 2017.
- [43] B. Vo Nguyen Quoc and K. Hyung Yun, "Error probability performance for multi-hop decode-and-forward relaying over Rayleigh fading channels," in *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conference on*, 2009, vol. 03, pp. 1512-1516.
- [44] I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, A. Jeffrey, and D. Zwillinger, *Table of integrals, series and products*, 7th ed. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2007, pp. xlv, 1171 p.
- [45] M. Abramowitz, I. A. Stegun, and Knovel (Firm). (1972). *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables (10th printing, with corrections. ed.)*. Available: <http://www.convertit.com/Go/GovCon/Reference/AMS55.ASP?Res=200&Page=-1>

#### EXACT CLOSED-FORM EXPRESSION OUTAGE PROBABILITY OF DECODE-AND- FORWARD TWO-WAY RELAYING SYSTEM WITH POWER-BEACON-ASSISTED ENERGY HARVESTING

**Abstract:** This paper investigates two-way decode-and-forward relay networks with power beacon assisted energy harvesting. All nodes are assumed to have limited power supply and harvest energy from RF signals to support operation. We propose a new derivation approach to obtain the exact close form of system outage probability over Rayleigh fading channels. Monte Carlo simulations are used to verify

the correctness of the analysis results and pointing out that the positions of power beacon and relay have significant effect on the system performance.

**Keywords-** *relaying, two-way relaying, fading Rayleigh, energy harvesting, power beacon.*



**Nguyễn Anh Tuấn** nhận bằng kỹ sư và bằng thạc sĩ tại Trường Đại Học Bách Khoa Hà Nội năm 2002 và năm 2006. ThS. Tuấn hiện đang công tác tại Cục Tần Số Vô Tuyến Điện – Bộ Thông tin và Truyền thông và là nghiên cứu sinh của Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông. Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: thông tin vô tuyến, quy hoạch tần số, kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, phân tích hiệu năng mạng vô tuyến.



**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.