

# ĐỀ XUẤT PHƯƠNG PHÁP PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG MỚI CHO MẠNG MIMO HAI CHẶNG CHUYỂN TIẾP THU THẬP NĂNG LƯỢNG

Nguyễn Anh Tuấn\*, Võ Nguyễn Quốc Bảo<sup>+</sup>, Lê Quốc Cường<sup>§</sup>

\*Cục Tần Số Vô Tuyến Điện

<sup>+</sup>Học Viện Công Nghệ Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở Thành Phố Hồ Chí Minh

<sup>§</sup>Sở Thông Tin Truyền Thông Thành Phố Hồ Chí Minh

**Tóm tắt**—Bài báo này đề xuất một phương pháp phân tích xác suất dừng của hệ thống chuyển tiếp hai chặng với nút nguồn và nút đích được trang bị nhiều anten với nút chuyển tiếp sử dụng năng lượng thu thập vô tuyến để chuyển tiếp dữ liệu nhận từ nút nguồn. Phương pháp phân tích mới cho phép xấp xỉ tốt hơn xác suất dừng hệ thống so với phương pháp phân tích xấp xỉ truyền thống, vốn chỉ phù hợp cho mạng với nút mạng đơn anten. Các kết quả phân tích đề xuất được kiểm chứng với kết quả mô phỏng. Đồng thời đặc tính của mạng nghiên cứu cũng được nghiên cứu và kiểm chứng.

**Từ khóa**—chuyển tiếp, hai chặng, MIMO, kênh truyền fading, thu thập năng lượng vô tuyến

## I. GIỚI THIỆU

Ngày nay, các mạng cảm biến vô tuyến được phát triển một cách mạnh mẽ và được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau trong đời sống xã hội như là: quan trắc môi trường, chăm sóc sức khỏe... bằng các thiết bị với giá thành thấp [1, 2]. Tuy nhiên, các thiết bị này chỉ có thể hoạt động trong một thời gian ngắn và yêu cầu phải định kỳ thay thế hoặc nạp năng lượng để duy trì kết nối bởi nguồn năng lượng giới hạn. Hơn nữa, việc thay thế các nguồn cung cấp cho các thiết bị đó là không thể thực hiện được hoặc là chi phí cao. Vì vậy, việc tìm ra các kỹ thuật thu thập năng lượng từ môi trường xung quanh để các mạng tự duy trì hoạt động mà không ràng buộc vào năng lượng cung cấp đã được các nhà nghiên cứu quan tâm [3, 4].

Các kỹ thuật thu thập năng lượng truyền thống chỉ thu thập năng lượng từ các nguồn năng lượng tự nhiên, ví dụ như năng lượng mặt trời và năng lượng gió, và chuyển hóa thành năng lượng điện để đảm bảo hoạt động thu phát của hệ thống. Các nghiên cứu này được đề cập trong các bài báo [5-7].

Tuy nhiên, hướng tiếp cận mới gần đây là sử dụng kỹ thuật

thu thập năng lượng từ các tín hiệu tần số vô tuyến xung quanh như là giải pháp để truyền thông tin và năng lượng đồng thời [8-11]. Khái niệm truyền thông tin và năng lượng đồng thời được trình bày trong bài báo [9] cho các kênh truyền fading phẳng, trong đó đặc tính cơ bản cho các kịch bản truyền thông tin điểm-điểm là sự đánh đổi chủ yếu giữa tỉ lệ thông tin và năng lượng cần truyền. Ngoài ra, các tác giả còn nghiên cứu kỹ thuật thu thập năng lượng cho các kịch bản truyền thông tin với nhiễu xuyên kênh được trình bày trong bài báo [12] và bài báo [13] trình bày nghiên cứu việc truyền thông tin và năng lượng đồng thời trong các hệ thống đa đầu vào – đa đầu ra với thông tin kênh không hoàn hảo ở tại máy phát.

Tuy vậy, các mạch điện thực tế của mạng thu thập năng lượng không thể nhận dạng dữ liệu và thu thập năng lượng được từ các tín hiệu vô tuyến cùng một thời điểm. Trong bài báo [14], các tác giả đã giới thiệu một kiến trúc máy thu tổng quát, ở đó các mạch điện thực hiện nhiệm vụ dò tìm tín hiệu và thu thập năng lượng hoạt động theo phương thức chia sẻ thời gian hoặc kiểu phân chia năng lượng. Ảnh hưởng việc phân chia năng lượng lên sự đánh đổi giữa tỷ lệ truyền thông tin đạt được và năng lượng thu thập được trình bày trong bài báo [10] và sự khác nhau hiệu năng giữa phân chia năng lượng và chia sẻ thời gian được nghiên cứu ở bài báo [15]. Các hướng tiếp cận này thích hợp với các mạng hợp tác một cách tự nhiên và những ảnh hưởng của chúng lên xác suất dừng cho các mạng chuyển tiếp dùng kỹ thuật khuếch đại và chuyển tiếp (AF) với một cặp nguồn và đích được nghiên cứu trong bài báo [16].

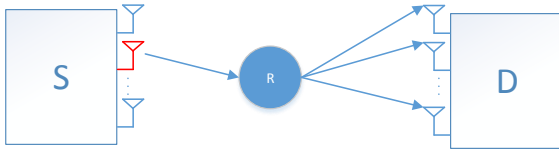
Một phương thức không những hiệu quả để mở rộng vùng phủ sóng của mạng vô tuyến, mà còn có khả năng trong việc chống lại các ảnh hưởng xấu của các kênh fading mà không cần sử dụng nhiều tài nguyên mạng hơn, đó là truyền thông đa chặng hay còn gọi là chuyển tiếp [17, 18]. Nguyên lý cơ bản của hệ thống truyền thông chuyển tiếp là cho phép sử dụng các nút ở giữa nút nguồn và nút đích giúp chuyển tiếp dữ liệu của nút nguồn. Gần đây, kỹ thuật chuyển tiếp được áp dụng cho mạng vô tuyến thu thập năng lượng với mục đích cải thiện vùng phủ sóng và/hoặc nâng cao hiệu năng của mạng [19-29]. Để phân tích hiệu năng của mạng, các nghiên cứu kể trên đều

sử dụng kỹ thuật xấp xỉ hợp lý ở vùng tỷ lệ trên nhiều cao dựa trên hàm BesselK đề xuất bởi Nasir và các cộng sự trong [19]. Nhược điểm của kỹ thuật này là độ sai lệch sẽ tăng nhanh ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiều thấp, đặc biệt là các chặng không đối xứng.

Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất một kỹ thuật phân tích mới dựa vào phân tích chuỗi của hàm mũ và các kết quả phân tích cho kết quả chính xác hơn phương pháp truyền thống của Nasir và có thể áp dụng cho hệ thống sử dụng nhiều anten.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Ta xem xét mô hình như Hình 1 bao gồm một nút nguồn (S), một nút chuyển tiếp (R) và một nút đích (D). Giả sử rằng nút nguồn và nút đích lần lượt có  $N_s$  và  $N_d$  anten trong khi nút chuyển tiếp chỉ có một anten. Giả sử rằng nút nguồn và nút đích hoạt động dựa trên năng lượng được cung cấp.



Hình 1 Mô hình hệ thống chuyển tiếp hai chặng MIMO sử dụng năng lượng thu thập.

Giả sử không tồn tại kênh truyền trực tiếp từ nút nguồn S tới nút đích D, do vùng phủ sóng của nút nguồn giới hạn hoặc do có vật cản giữa nút nguồn và nút đích. Gọi  $h_{1,i}$  với  $i = 1, \dots, N_s$  và  $h_{2,j}$  với  $j = 1, \dots, N_d$  lần lượt là hệ số kênh truyền của kênh truyền từ anten thứ  $i$  của nguồn và từ nút chuyển tiếp đến anten thứ  $j$  của nút đích.

Xem xét ở kênh truyền fading Rayleigh, độ lợi kênh truyền  $|h_{1,i}|^2$  và  $|h_{2,j}|^2$  có phân bố hàm mũ với tham số  $\lambda_1$  và  $\lambda_2$ , cụ thể  $\lambda_1 = E\{|h_{1,i}|^2\}$  với mọi  $i$  và  $\lambda_2 = E\{|h_{2,j}|^2\}$  với mọi  $j$  trong đó  $E\{\cdot\}$  là toán tử trung bình thống kê.

Giả sử rằng hệ thống sử dụng kỹ thuật bán song công và nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp (decode-and-forward) để chuyển tiếp dữ liệu đến nút đích, sử dụng kiến trúc phân chia năng lượng theo thời gian. Đặt  $T$  là chu kỳ phát của một symbol, quá trình truyền bán song công diễn ra theo ba pha thời gian như trình bày ở Hình 2.

**Pha 1:** là pha thu thập năng lượng của nút chuyển tiếp, diễn ra trong khoảng thời gian  $\alpha T$  với  $\alpha$  là tỷ lệ thời gian thu thập năng lượng,  $0 < \alpha < 1$ . Khi đó, năng lượng mà nút chuyển tiếp thu thập được là

$$E_H = \varepsilon P_S |h_{1,i^*}|^2 \alpha T, \tag{1}$$

với  $\varepsilon$  là hệ số hiệu năng chuyển đổi năng lượng  $0 < \varepsilon < 1$  và  $P_S$  là công suất phát tại nút nguồn S. Trong (1),  $i^*$  là chỉ số

của anten có tỷ số tín hiệu trên nhiều lớn nhất của chặng 1, cụ thể

$$i^* = \arg \max_{1, \dots, N_s} |h_{1,i}|^2. \tag{2}$$

**Pha 2:** là pha quảng bá dữ liệu của nút nguồn, diễn ra trong khoảng thời gian  $(1 - \alpha)T/2$ . Với kỹ thuật lựa chọn anten phát tại nút nguồn, nên anten có tỷ số tín hiệu trên nhiều lớn nhất của chặng 1, sẽ được chọn để truyền dữ liệu về nút chuyển tiếp với giả sử rằng kênh truyền là không đổi trong pha 1 và pha 2 dẫn đến tỷ số tín hiệu của chặng 1 như sau

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= \frac{P_S |h_{1,i^*}|^2}{N_0} \\ &= \frac{P_S}{N_0} \max_{1, \dots, N_s} |h_{1,i}|^2 \end{aligned} \tag{3}$$

với  $N_0$  là công suất nhiễu AWGN tại các máy thu.

**Pha 3:** là pha chuyển tiếp dữ liệu của nút chuyển tiếp đến nút đích diễn ra trong khoảng thời gian  $(1 - \alpha)T/2$  với công suất

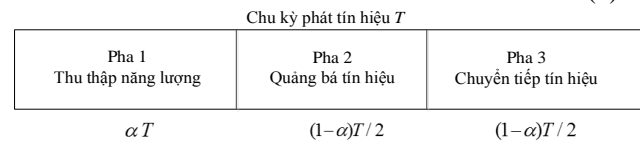
$$P_R = \frac{2\varepsilon\alpha P_S |h_{1,i^*}|^2}{1 - \alpha}. \tag{4}$$

Tỷ số tín hiệu trên nhiều từ nút chuyển tiếp đến anten thứ  $j$  của nút đích được cho như sau:

$$\gamma_{2,j} = \frac{2\eta\alpha P_S |h_{1,i^*}|^2 |h_{2,j}|^2}{(1 - \alpha)N_0}. \tag{5}$$

Giả sử nút đích sử dụng kỹ thuật kết hợp tối ưu (Maximal Ratio Combining – MRC), ta có tỷ số tín hiệu trên nhiều của chặng hai như sau

$$\begin{aligned} \gamma_2 &= \sum_{j=1}^{N_d} \frac{2\varepsilon\alpha P_S |h_{1,i^*}|^2 |h_{2,j}|^2}{(1 - \alpha)N_0} \\ &= \frac{2\varepsilon\alpha P_S |h_{1,i^*}|^2 \sum_{j=1}^{N_d} |h_{2,j}|^2}{(1 - \alpha)N_0}. \end{aligned} \tag{6}$$



Hình 2 Khung thời gian truyền bán song công.

Khi nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp, như đã chứng minh trong [30, 31], hiệu năng của hệ thống sẽ bị quyết định bởi chặng yếu hơn. Biểu diễn theo biểu thức toán học, ta có tỷ số tín hiệu trên nhiều tương đương của hệ thống như sau:

$$\gamma_\Sigma = \min(\gamma_1, \gamma_2). \tag{7}$$

## III. PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG

Biểu thức tính dung lượng  $C$  chuẩn hóa tức thời của hệ thống theo  $\alpha$  là

$$C(\alpha) = \frac{1-\alpha}{2} \log_2 (1 + \gamma_\Sigma) \quad (8)$$

với tiền tố  $\frac{1-\alpha}{2}$  là do quá trình thu thập năng lượng và truyền đơn công. Từ (8), ta có thể viết xác suất dừng của hệ thống như sau

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr \left[ \frac{1-\alpha}{2} \log_2 (1 + \gamma_\Sigma) < \mathcal{R} \right] \\ &= \Pr \left[ \gamma_\Sigma < 2^{\frac{2\mathcal{R}}{1-\alpha}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

với  $\gamma_{th} = 2^{\frac{2\mathcal{R}}{1-\alpha}} - 1$  với  $\mathcal{R}$  là tốc độ truyền mong muốn.

Để dễ dàng phân tích, ta đặt

$$\beta_1 = \max_{i=1, \dots, N_s} |h_{1,i}|^2 \quad (10)$$

và

$$\beta_2 = \sum_{j=1}^{N_D} |h_{2,j}|^2. \quad (11)$$

Khi đó, ta có thể viết lại OP ở (9) như sau

$$\begin{aligned} \text{OP} &= \Pr \left[ \min \left( \frac{P_s}{N_0} \beta_1, \frac{2\eta\alpha P_s}{(1-\alpha)N_0} \beta_1 \beta_2 \right) < \gamma_{th} \right] \\ &= 1 - \Pr \left[ \frac{P_s}{N_0} \beta_1 > \gamma_{th}, \frac{2\eta\alpha P_s}{(1-\alpha)N_0} \beta_1 \beta_2 > \gamma_{th} \right] \\ &= 1 - \Pr \left[ \beta_1 > \frac{\gamma_{th}}{\frac{P_s}{N_0}}, \beta_1 \beta_2 > \frac{\gamma_{th}}{\frac{2\eta\alpha P_s}{(1-\alpha)N_0}} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Để có thể tính toán (12), ta cần biết được hàm CDF và PDF của  $\beta_1$  và  $\beta_2$ . Giả sử kênh truyền là độc lập lẫn nhau, ta có hàm CDF của  $\beta_1$  như sau

$$F_{\beta_1}(x) = \left( 1 - e^{-\frac{x}{\lambda_1}} \right)^{N_s} \quad (13)$$

Triển khai nhị thức Newton, ta có:

$$F_{\beta_1}(x) = \sum_{i=1}^{N_s} \binom{N_s}{i} (-1)^{i-1} \left( 1 - e^{-\frac{x}{\lambda_1}} \right) \quad (14)$$

Từ (14), ta có hàm PDF của  $\beta_1$  như sau:

$$f_{\beta_1}(x) = \sum_{i=1}^{N_s} (-1)^{i-1} \binom{N_s}{i} \frac{i}{\lambda_1} e^{-\frac{x}{\lambda_1}} \quad (15)$$

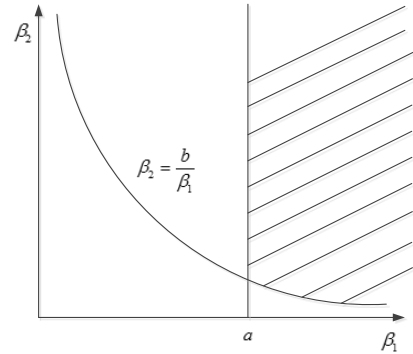
Khi nút đích sử dụng kỹ thuật MRC, ta có hàm CDF và PDF

của  $\beta_2$  như sau:

$$F_{\beta_2}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\lambda_2}} \sum_{j=0}^{N_D-1} \frac{1}{j!} \left( \frac{x}{\lambda_2} \right)^j \quad (16)$$

và

$$f_{\beta_2}(x) = \frac{x^{N_D-1} e^{-\frac{x}{\lambda_2}}}{\Gamma(N_D) \lambda_2^{N_D}} \quad (17)$$



Hình 3 Miền tích phân của công thức (12).

Đặt  $a = \frac{\gamma_{th}}{\frac{P_s}{N_0}}$  và  $b = \frac{\gamma_{th}}{\frac{2\eta\alpha P_s}{(1-\alpha)N_0}}$ , ta có  $\mathcal{I}$  trong công thức

(12) được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(a, b) &= \Pr \beta_1 > a, \beta_1 \beta_2 > b \\ &= \int_a^\infty \left[ 1 - F_{\beta_2} \left( \frac{b}{x} \right) \right] f_{\beta_1}(x) dx \end{aligned} \quad (18)$$

Kết hợp (15) và (16), ta có

$$\begin{aligned} \mathcal{I}(a, b) &= \int_a^\infty \left[ e^{-\frac{b}{\lambda_2 x}} \sum_{j=0}^{N_D-1} \frac{1}{j!} \left( \frac{b}{\lambda_2 x} \right)^j \right] \\ &\quad \times \sum_{i=1}^{N_s} (-1)^{i-1} \binom{N_s}{i} \frac{i}{\lambda_1} e^{-\frac{x}{\lambda_1}} dx \end{aligned} \quad (19)$$

Hoán đổi vị trí của dấu tổng và dấu tích phân trong (19), ta viết lại  $\mathcal{I}(a, b)$  như sau

$$\mathcal{I}(a, b) = \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_D-1} \frac{(-1)^{i-1} i}{j! \lambda_1} \binom{N_s}{i} \left( \frac{b}{\lambda_2} \right)^j \underbrace{\int_a^\infty \frac{e^{-\left( \frac{i}{\lambda_1} x + \frac{b}{\lambda_2} \right) x}}{x^j} dx}_{\mathcal{J}} \quad (20)$$

Tích phân  $\mathcal{J}$  trong (20) không tồn tại dạng đóng. Để giải quyết vấn đề này, ta quan sát thấy rằng tại vùng tỷ lệ trên nhiều lớn thì  $a = \frac{\gamma_{th}}{\frac{P_s}{N_0}} \rightarrow 0$ , nên ta có thể xấp xỉ  $\mathcal{J}$  bằng cách thay

đổi cận từ  $a$  về 0 như sau [19]:

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &\approx \int_0^\infty \frac{e^{-\left(\frac{i}{\lambda_1}x + \frac{b/\lambda_2}{x}\right)}}{x^j} dx \\ &= 2 \left(\frac{i\lambda_2}{\lambda_1 b}\right)^{\frac{j-1}{2}} \text{BesselK} \left[ j-1, 2\sqrt{\frac{ib}{\lambda_1\lambda_2}} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

với  $\text{BesselK}[n,z]$  là hàm Bessel điều chỉnh của loại hai [32].

Sử dụng kết quả từ (20), (21) và (12), ta tính được xác suất dừng của hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &\approx 1 - \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_d-1} \frac{(-1)^{i-1} i \binom{N_s}{i}}{j! \lambda_1} \left( \frac{\gamma_{th}}{2\varepsilon\alpha P_s \lambda_2} \right) \\ &\times \left( \frac{1-\alpha}{2\varepsilon\alpha} \right)^{\frac{j-1}{2}} 2 \text{BesselK} \left[ j-1, 2\sqrt{\frac{\gamma_{th}}{P_s} \frac{\gamma_{th}}{2\varepsilon\alpha P_s}} \right] \end{aligned} \quad (22)$$

Xấp xỉ cho OP mà ta đạt được ở (22) dựa trên giả sử rằng hệ thống hoạt động ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao và chặng đầu tiên yếu hơn chặng thứ 2. Kỹ thuật xấp xỉ này sẽ không hiệu quả cho hệ thống MIMO, mà chúng tôi sẽ trình bày ở phần kết quả mô phỏng ở phần sau. Bên cạnh đó, với công nghệ hiện tại, hệ thống thu thập hoạt động ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp, do đó gây ra những sai lệch lớn cho OP ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp. Trong phần tiếp theo đây, tôi đề xuất một kỹ thuật xấp xỉ mới, cho phép đánh giá chính xác hơn xác suất dừng của hệ thống.

Ta bắt đầu từ tích phân  $J = \int_a^\infty \frac{e^{-\left(\frac{i}{\lambda_1}x + \frac{b/\lambda_2}{x}\right)}}{x^j} dx$  ở (20) và sử dụng chuỗi cho hàm mũ [21, (1.211.1)], cụ thể

$$e^x = \sum_{k=0}^\infty \frac{x^k}{k!}, \quad (24)$$

cho thành phần hàm mũ thứ hai của  $J$ , cụ thể

$$e^{\frac{b/\lambda_2}{x}} = \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k}{k!} \left( \frac{b/\lambda_2}{x} \right)^k \quad (24)$$

Sử dụng (24), ta có

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= \int_a^\infty \frac{e^{-\frac{i}{\lambda_1}x} e^{-\frac{b/\lambda_2}{x}}}{x^j} dx \\ &= \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k}{k!} \left( \frac{b}{\lambda_2} \right)^k \int_a^\infty \frac{e^{-\frac{i}{\lambda_1}x}}{x^{j+k}} dx \end{aligned} \quad (25)$$

Áp dụng công thức [33 Eq. (3.351.4)], ta có

$$\begin{aligned} \mathcal{J} &= \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^k}{k!} \left( \frac{b}{\lambda_2} \right)^k \times \left[ (-1)^{j+k} \frac{\left( \frac{i}{\lambda_1} \right)^{j+k-1} \text{Ei} \left( -\frac{ia}{\lambda_1} \right)}{(j+k-1)!} \right. \\ &\left. + \frac{e^{-\frac{ia}{\lambda_1}}}{a^{j+k-1}} \sum_{\ell=0}^{j+k-2} \frac{(-1)^\ell \left( \frac{i}{\lambda_1} \right)^\ell a^\ell}{(j+k-1)(j+k-2)\dots(j+k-1-\ell)} \right] \end{aligned} \quad (26)$$

Từ (20), (26) và (12), ta có thể xấp xỉ xác suất dừng của hệ thống như sau:

$$\begin{aligned} \text{OP} &\approx 1 - \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_d-1} \sum_{k=0}^\infty \frac{(-1)^{i+k-1} \binom{N_s}{i}}{j! k!} \frac{i}{\lambda_1} \left( \frac{\gamma_{th}}{2\varepsilon\alpha P_s \lambda_2} \right)^{k+j} \\ &\times \left[ \frac{(-1)^{j+k}}{(j+k-1)!} \left( \frac{i}{\lambda_1} \right)^{j+k-1} \text{Ei} \left( -\frac{i}{\lambda_1} \frac{\gamma_{th}}{P_s} \right) \right. \\ &\left. + \frac{e^{-\frac{i}{\lambda_1} \frac{\gamma_{th}}{P_s}}}{\left( \frac{\gamma_{th}}{P_s} \right)^{j+k-1}} \sum_{\ell=0}^{j+k-2} \frac{(-1)^\ell \left( \frac{i}{\lambda_1} \right)^\ell \left( \frac{\gamma_{th}}{P_s} \right)^\ell}{(j+k-1)(j+k-2)\dots(j+k-1-\ell)} \right] \end{aligned} \quad (27)$$

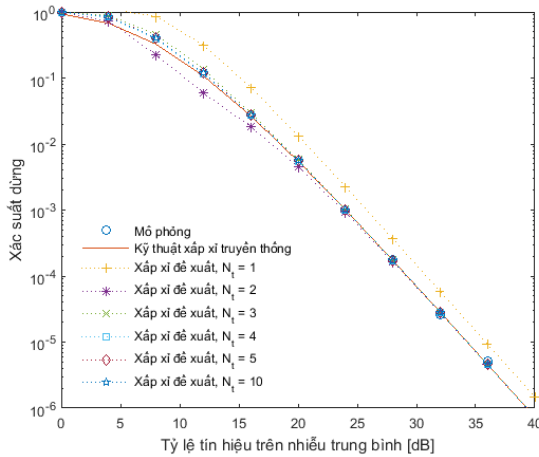
Trong thực tế, chúng ta không thể tiến hành khảo sát với giá trị  $k$  trong (27) tiến tới vô hạn. Khi mà chuỗi vô hạn của  $e^x$  mà ta sử dụng là chuỗi hội tụ, chúng ta có thể sử dụng một số thành phần đầu tiên của chuỗi để xấp xỉ và đạt kết quả mong đợi. Gọi  $N_i$  là số thành phần đầu tiên của chuỗi (27), ta có thể xấp xỉ OP như sau

$$\begin{aligned} \text{OP} &\approx 1 - \sum_{i=1}^{N_s} \sum_{j=0}^{N_d-1} \sum_{k=0}^{N_i} \frac{(-1)^{i+k-1} \binom{N_s}{i}}{j! k!} \frac{i}{\lambda_1} \left( \frac{\gamma_{th}}{2\varepsilon\alpha P_s \lambda_2} \right)^{k+j} \\ &\times \left[ \frac{(-1)^{j+k}}{(j+k-1)!} \left( \frac{i}{\lambda_1} \right)^{j+k-1} \text{Ei} \left( -\frac{i}{\lambda_1} \frac{\gamma_{th}}{P_s} \right) + \frac{e^{-\frac{i}{\lambda_1} \frac{\gamma_{th}}{P_s}}}{\left( \frac{\gamma_{th}}{P_s} \right)^{j+k-1}} \right. \\ &\left. + \sum_{\ell=0}^{j+k-2} \frac{(-1)^\ell \left( \frac{i}{\lambda_1} \right)^\ell \left( \frac{\gamma_{th}}{P_s} \right)^\ell}{(j+k-1)(j+k-2)\dots(j+k-1-\ell)} \right] \end{aligned} \quad (28)$$

Độ chính xác của biểu thức xấp xỉ (28) tương quan với giá trị  $N_t$  sẽ được khảo sát trong phần tiếp theo.

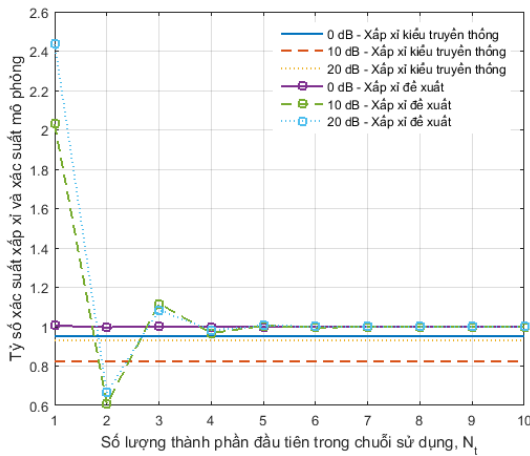
IV. KẾT QUẢ SỐ VÀ KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

Mục đích của phần này bao gồm: i) Kiểm chứng tính đúng đắn của các phân tích ở trên, ii) Khảo sát ưu và nhược điểm của giao thức đề xuất, iii) Khảo sát ảnh hưởng của các tham số hệ thống và kênh truyền lên hiệu năng hệ thống. Các tham số mô phỏng sử dụng như sau:  $\lambda_1 = 1$ ,  $\lambda_2 = 1$ ,  $\mathcal{R} = 1$ ,  $\alpha = 0.3$  và  $\varepsilon = 0.75$ .

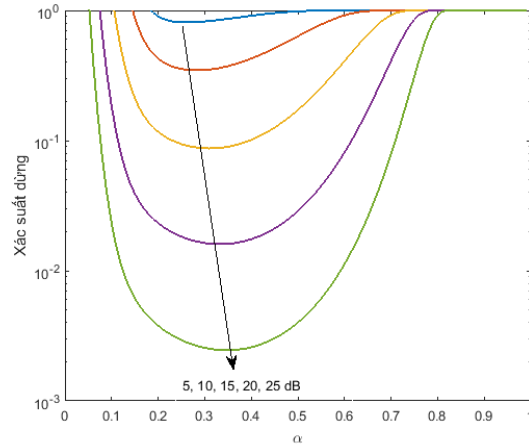


Hình 4 So sánh kỹ thuật xấp xỉ đề xuất và kỹ thuật xấp xỉ truyền thống.

Trong Hình 4, chúng tôi đánh giá kỹ thuật xấp xỉ đề ra bằng cách thay đổi số lượng thành phần trong chuỗi từ 1 đến 10 và đồng thời so sánh với kết quả mô phỏng (là kết quả chính xác) và với kết quả của kỹ thuật xấp xỉ truyền thống. Như chỉ ra trên Hình 4, chỉ cần số lượng thành phần là 3 trở lên là cho kết quả tốt hơn kỹ thuật truyền thống trong vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu từ 0 đến 40 dB. Các kết quả này được xác nhận một lần nữa trong Hình 4, so sánh tỷ số của xác suất dừng xấp xỉ theo kỹ thuật truyền thống với xác suất dừng mô phỏng và tỷ số của xác suất dừng xấp xỉ theo kỹ thuật đề xuất với xác suất dừng mô phỏng.

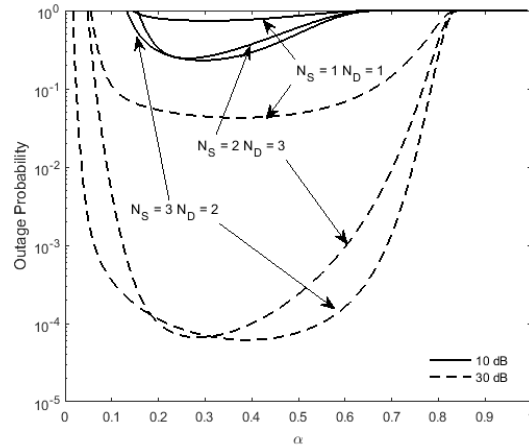


Hình 5 Tỷ số xác suất dừng xấp xỉ và xác suất dừng mô phỏng



Hình 6 Xác suất dừng theo theo hệ số thời gian thu thập năng lượng với các trường hợp tỷ số tín hiệu trên nhiễu khác nhau.

Trong Hình 6, chúng tôi khảo sát giá trị  $\alpha$  tối ưu, nghĩa là giá trị mà xác suất dừng của hệ thống nhỏ nhất. Ta có thể thấy rằng, khi tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của hệ thống tăng thì giá trị  $\alpha$  tối ưu cũng thay đổi và có xu hướng tăng.

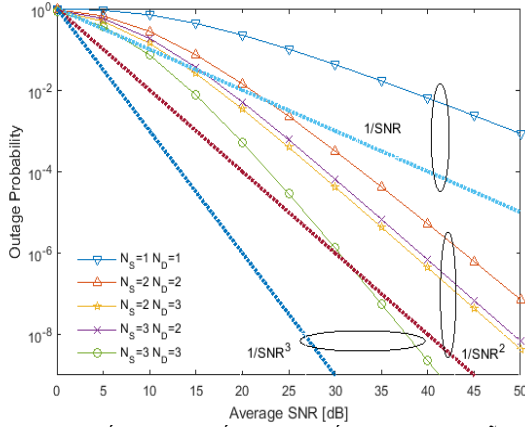


Hình 7 Xác suất dừng hệ thống theo hệ số thời gian thu thập năng lượng với cấu hình nút nguồn và nút đích khác nhau.

Mục đích của Hình 7 là khảo sát ảnh hưởng của cấu hình nút nguồn và cấu hình nút đích (số lượng anten) lên giá trị tối ưu của  $\alpha$ . Ta khảo sát ba cấu hình tiêu biểu, cụ thể  $N_s = 1, N_d = 1$ ,  $N_s = 2, N_d = 3$ , và  $N_s = 3, N_d = 2$ . Ta có thể kết luận rằng giá trị  $\alpha$  là một hàm phức tạp của số lượng anten nút phát và thu cũng như tỷ số tín hiệu trên nhiễu của hệ thống.

Trong hình cuối cùng, Hình 8, tôi khảo sát độ lợi phân tập của hệ thống bằng cách xem xét 5 cấu hình tiêu biểu và đồng thời vẽ các đường tham chiếu  $1/\text{SNR}^1$ ,  $1/\text{SNR}^2$ ,  $1/\text{SNR}^3$ . Ta quan sát thấy rằng, độ lợi phân tập của các hệ thống là  $\min(N_s, N_d)$  khi mà độ dốc của các đường xác suất dừng là

bằng độ dốc của các đường tham chiếu, cụ thể độ lợi phân tập của các hệ thống  $N_s = 1, N_D = 1$ ,  $N_s = 2, N_D = 2$ ,  $N_s = 2, N_D = 3$ ,  $N_s = 3, N_D = 2$ ,  $N_s = 3, N_D = 3$  lần lượt là 1, 2, 2, 2, và 3. Đến đây ta có thể kết luận rằng độ lợi phân tập của hệ thống thu thập năng lượng là tương đương với độ lợi phân tập của hệ thống chuyên tiếp tương tự truyền thống.



Hình 8 Xác suất dừng hệ thống theo tỷ số tín hiệu trên nhiễu với các cấu hình khác nhau của nút nguồn và nút đích.

V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã có những đóng góp sau: (i) Xây dựng mô hình toán cho hệ thống thu thập năng lượng chuyên tiếp với kỹ thuật TAS ở nút nguồn và kỹ thuật MRC ở nút đích (ii) Đề xuất kỹ thuật tính toán xác suất dừng hệ thống tốt hơn phương pháp truyền thống và (iii) Chứng minh rằng độ lợi phân tập của hệ thống là tương đương với hệ thống tương tự truyền thống (không dùng thu thập năng lượng). Dựa trên mô hình, đề xuất và các kết quả đạt được, đề tài có thể phát triển theo các hướng sau, ví dụ như, phát triển mô hình cho kỹ thuật truyền song công, phát triển và nghiên cứu mô hình PS, nghiên cứu phân tích các tham số hiệu năng khác, BER, Capacity, và nghiên cứu và giải bài toán với mô hình lựa chọn nút chuyên tiếp tối ưu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] I. F. Akyildiz, S. Weilian, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, 2002.

[2] M. Ilyas and I. Mahgoub, *Handbook of sensor networks : compact wireless and wired sensing systems*. Boca Raton: CRC Press, 2005, p. 1 v. (various pagings).

[3] S. Sudevalayam and P. Kulkarni, "Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 13, no. 3, pp. 443-461, 2011.

[4] P. D. Mitcheson, E. M. Yeatman, G. K. Rao, A. S. Holmes, and T. C. Green, "Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices," *Proceedings of the IEEE*, vol. 96, no. 9, pp. 1457-1486, 2008.

[5] 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.

[6] S. Suja and T. Sathish Kumar, "Solar based wireless power transfer system," in *Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 93-99.

[7] D. Gunduz, K. Stamatiou, N. Michelusi, and M. Zorzi, "Designing intelligent energy harvesting communication systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 1, pp. 210-216, 2014.

[8] 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.

[9] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *IEEE International Symposium on Information Theory 2008 (ISIT'08)*, 2008, pp. 1612-1616.

[10] L. Liang, Z. Rui, and C. Kee-Chaing, "Wireless Information and Power Transfer: A Dynamic Power Splitting Approach," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 61, no. 9, pp. 3990-4001, 2013.

[11] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," *Pervasive Computing, IEEE*, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, 2005.

[12] L. Liang, Z. Rui, and C. Kee-Chaing, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting," in *Information Theory Proceedings (ISIT), 2012 IEEE International Symposium on*, 2012, pp. 950-954.

[13] X. Zhengzheng and T. Meixia, "Robust Beamforming for Wireless Information and Power Transmission," *Wireless Communications Letters, IEEE*, vol. 1, no. 4, pp. 372-375, 2012.

[14] X. Zhou, R. Zhang, and C. Ho, "Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, pp. 1-14, 2013.

[15] R. Zhang and C. K. Ho, "MIMO Broadcasting for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 5, pp. 1989-2001, 2013.

[16] S. Luo, R. Zhang, and T. J. Lim, "Optimal Save-Then-Transmit Protocol for Energy Harvesting Wireless Transmitters," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 3, pp. 1196-1207, 2013.

[17] M. O. Hasna and M.-S. Alouini, "Outage Probability of Multihop Transmission Over Nakagami Fading Channels," *IEEE Communications Letters*, vol. 7, no. 5, pp. 216-218, May 2003.

[18] V. N. Q. Bao and H. Y. Kong, "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. 3, pp. 1512-1516: IEEE.

[19] 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.

[20] Z. Caijun, H. A. Suraweera, Z. Gan, I. Krikidis, and Z. Zhaoyang, "Wireless Information and Power Transfer With Full Duplex Relaying," *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 10, pp. 3447-3461, 2014.

[21] Z. Chen, B. Xia, and H. Liu, "Wireless information and power transfer in two-way amplify-and-forward relaying channels," in *Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2014 IEEE Global Conference on*, 2014, pp. 168-172.

[22] Z. Yang, Z. Ding, P. Fan, and G. Karagiannidis, "Outage Performance of Cognitive Relay Networks with Wireless Information and Power Transfer," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.

[23] K. H. Liu, "Performance Analysis of Relay Selection for Cooperative Relays Based on Wireless Power Transfer With Finite Energy Storage," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 5110-5121, 2016.

[24] 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.
- [25] N. T. Do, V. N. Q. 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.
- [26] P. V. T. Anh, V. N. Q. Bao, and K. N. Le, "On the performance of wireless energy harvesting TAS/MRC relaying networks over Nakagami-m fading channels," in *Information and Computer Science (NICS), 2016 3rd National Foundation for Science and Technology Development Conference on*, 2016, pp. 1-5: IEEE.
- [27] N. T. Van, H. M. Tan, T. M. Hoang, T. T. Duy, and V. N. Q. Bao, "Exact outage probability of energy harvesting incremental relaying networks with MRC receiver," in *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 120-125: IEEE.
- [28] P. M. Quang, T. T. Duy, and V. N. Q. Bao, "Performance evaluation of underlay cognitive radio networks over Nakagami-m fading channels with energy harvesting," in *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 108-113: IEEE.
- [29] 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*, vol. 2016, no. 1, p. 285, 2016.
- [30] T. Duong and V. N. Q. Bao, "Performance analysis of selection decode-and-forward relay networks," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 20, pp. 1206-1207, 2008.
- [31] V. N. Q. Bao 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.
- [32] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*, 10th printing, with corrections. ed. Washington: U.S. Govt. Print. Off., 1972, pp. xiv, 1046 p.
- [33] D. Zwillinger, *Table of integrals, series, and products*. Elsevier, 2014.

## A NEW DERIVATION APPROACH FOR SIMULTANEOUS WIRELESS INFORMATION AND POWER TRANSFER FOR MIMO DUALHOP RELAY NETWORKS

**Abstract:** This paper proposes a novel derivation approach to derive the system outage probability for Simultaneous Wireless Information and Power Transfer for MIMO dualhop relay networks. The proposed approach is able to provide an excellent approximation for the system OP as compared with the conventional approach, especially for MIMO dualhop relay networks. Simulation results are performed to verify the analysis approach and to investigate the system behaviors.

**Keywords:** relaying, dualhop, MIMO, fading channels, SWIPT.



Nguyễn Anh Tuấn nhận bằng kỹ sư và bằng thạc sĩ tại Trường Đại Học Bách Khoa Hà Nội năm 2002 và năm 2007. 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.



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), and 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 chuyên ngành khoa học kỹ thuật Đại học Viễn thông quốc gia Saint Peterburg, Liên bang Nga. Hiện nay, TS. Cường là phó giám đốc Sở Thông Tin và Truyền Thông TP. Hồ Chí Minh. Hướng nghiên cứu hiện tại đang quan tâm bao gồm: thông tin quang và thông tin vô tuyến chú trọng gần đây là IoT, và vô tuyến nhận thức.