PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG HỆ THỐNG CHUYỂN TIẾP SONG CÔNG SỬ DỤNG CÔNG NGHỆ THU THẬP NĂNG LƯỢNG TỪ NGUỒN PHÁT

PERFORMANCE ANALYSIS OF ENERGY HARVESTING FULL DUPLEX RELAY SYSTEM WITH POWER BEACON

Nguyễn Anh Tuấn[1], Võ Nguyễn Quốc Bảo[2]

[1]Tập đoàn Bưu chính Viễn thông Việt Nam; nguyenanh.na2011@gmail.com
[2]Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông; baovnq@ptithcm.edu.vn

Tóm tắt - Trong bài báo này nhóm tác giả nghiên cứu hệ thống vô tuyến Bài báo này phân tích hiệu năng của hệ thống vô tuyến chuyển tiếp với nút chuyển tiếp song công (full- duplex) giải mã và chuyển tiếp (DF) dưới dạng xác suất dừng và thông lượng hệ thống ở kênh truyền Nakagami-*m*. Mô hình mạng bao gồm một nguồn và một nút chuyển tiếp, và một nút đích, với tất cả các nút hoạt động dựa trên năng lượng thu thập vô tuyến từ một nguồn ngoài (B). Trong bài báo, chúng tôi đã phân tích thành công biểu thức dạng đóng của xác suất dừng hệ thống và thông lượng hệ thống hoạt động trên kênh truyền fading Nakagami-*m*. Sau đó, khảo sát một số tham số ảnh hưởng hiệu năng của hệ thống như hệ số fading kênh truyền và tỷ số thời gian thu thập năng lượng. Cuối cùng nhóm tác giả sử dụng mô phỏng Monte-Carlo để khẳng định tính đúng đắn những phân tích.

Từ khóa - Chuyển tiếp; song công; xác suất dừng hệ thống

Abstract - In this paper, we investigate the performance of full-duplex (FD) decode-and-forward (DF) relay systems exploiting wireless power transfer in term of system outage probability and throughtput over Nakagami-m fading channels. Against with published works, we consider the network all nodes including the source node, the relay node, and the destination harvest energy from power beacon (B) for transmitting and receiving operations. We derive the exact closed form expresion of the system outage probability and network throughput over Nakagami-*m* fading channels. From these expressions, the system performance is analyzed in various scenarios, such as the impact of *m* parameters and energy harvesting ratio. Finally, we use Monte-Carlo simulations to verify our analysis.

Key words - Relay; full-duplex; outage probability

1. Giới thiệu

Trong thời đại của các thiết bị kết nối vạn vật Internet of Things (IoT), hầu như các thiết bị cá nhân được kết nối với Internet để trao đổi dữ liệu và xử lý thông tin [1, 2]. Kết nối trao đổi dữ liệu không chỉ giới hạn giữa người với người, mà còn mở rộng cho người với thiết bị và thiết bị với thiết bị, hỗ trợ nhiều nền tảng dịch vụ, ví dụ như thành phố thông minh, nhà thông minh, xe hơi tự hành. Các dịch vụ này tạo ra nhiều thách thức về tốc độ truyền dữ liệu cao, độ trễ thấp, số lượng kết nối lớn, hiệu quả phổ tần cao và hiệu quả năng lượng. Để đáp ứng những thách thức này, rất nhiều công nghệ mới được nghiên cứu và đề xuất áp dụng ví dụ như đa truy cập không trực giao (Non-orthogonal multiple access) [3-5], MIMO cỡ lớn (massive MIMO) [6-9], vô tuyến nhận thức (cognitive radio) [10-14], thu thập năng lượng vô tuyến (energy harvesting) [15-19] và truyền song công (full duplex) [20-24].

Trong các công nghệ kể trên, truyền song công với ưu thế cải thiện hiệu suất phổ tần được xem xét là kỹ thuật tiềm năng cho hệ thống thông tin di động (5G) và sau 5G [21, 25]. Bên cạnh kỹ thuật truyền thông song công, kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến là một kỹ thuật hứa hẹn để cung cấp năng lượng hoạt động và kéo dài tuổi thọ pin của thiết bị không dây [26, 27].

Cho đến nay đã có nhiều nghiên cứu đã tập trung vào phân tích hiệu năng của các mạng chuyển tiếp song công ví dụ như [28-30]. Các tác giả đã xác định được biểu thức toán học cho xác suất dừng hệ thống (OP) cũng như chứng minh rằng dưới tác động nhiễu nội dư (RSI), hiệu năng hệ thống đạt đến mức bão hòa trên miền tín hiệu trên nhiễu (SNR) cao. Các nghiên cứu cũng chỉ ra rằng, sử dụng phương pháp tối ưu năng lượng cho chế độ FD có thể cải thiện hiệu năng hệ thống như các bài báo [31]. Ngoài ra, bằng cách sử dụng kỹ thuật loại bỏ nhiễu nội (SIC) cho các thiết bị FD, hệ thống chuyển tiếp FD có thể có hiệu năng cao hơn so với hệ thống chuyển tiếp truyền thống [32].

Gần đây, có một số nghiên cứu kết hợp ưu điểm của kỹ thuật truyền chuyển tiếp song công với kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến, ví dụ như [33], [32, 34], với giả thiết rằng các nút mạng vừa thu thập thông tin vừa thu thập năng lượng.

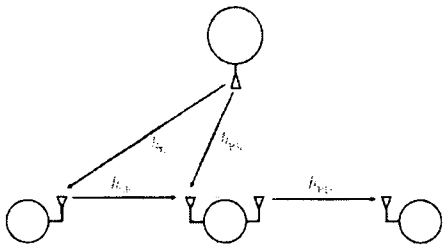
Trong bài báo này, nhóm tác giả nghiên cứu mạng chuyển tiếp một chiều song công thu thập năng lượng mà ở đó nút nguồn và nút chuyển tiếp thu thập năng lượng từ nguồn ngoài ổn định B. Phân tích công thức dạng tường minh của xác suất dừng và thông lượng hệ thống ở kênh truyền tổng quát Nakagami-*m* và đồng thời khảo sát ảnh hưởng của các tham số hệ thống và kênh truyền lên hiệu năng của hệ thống.

2. Mô hình hệ thống

Mô hình hệ thống xem xét là bao gồm nút nguồn (S), nút đích (D) và nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp hoạt động ở chế độ song công, như trình bày ở Hình 1. Quá trình truyền thông tin từ nút nguồn đến nút đích thông qua nút chuyển tiếp với giả sử rằng S và D được trang bị đơn ăng ten và hoạt động ở chế độ đơn công (Half-Duplex). Nút chuyển tiếp do hoạt động ở chế độ song công thu và phát trên cùng một tần số, nên sẽ có hai anten, một anten thu tín hiệu từ S và một anten phát tín hiệu tới D.

Trong bài báo này, chúng ta giả sử rằng các nút trong mạng hoạt động dựa trên năng lượng thu thập vô tuyến từ nguồn ngoài (Power beacon), được ký hiệu là B như trong Hình 1) để phục vụ cho hoạt động truyền phát thông tin.

Cấu hình mạng sử dụng nguồn năng lượng cấp ngoài phù hợp với các mạng cam biến không dây.



Hình 1. *Mô hình hệ thống chuyển tiếp song công thu thập năng lượng*

Gọi T là chu kỳ truyền thông tin từ nguồn S tới D. Khi sử dụng công nghệ thu thập năng lượng với kỹ thuật chuyển tiếp, hệ thống chia chu kỳ truyền thông T thành hai phần thời gian theo tỷ số phân chia thời gian α với $0 \le \alpha \le 1$. Cụ thể, phần thời gian đầu αT dành cho hoạt động thu thập năng lượng và phần thời gian còn lại $(1-\alpha)T$ dành cho hoạt động truyền và nhận thông tin. Gọi α là tỷ số phân chia thời gian, ta có thời gian lần lượt cho pha thời gian đầu là αT.

Xem xét trong phần thời gian đầu αT, các nút thu thập năng lượng vô tuyến từ B để phục vụ hoạt động truyền nhận. Gọi E_h^S và E_h^R lần lượt là năng lượng thu thập tại S và R, ta có:

$$E_h^{\mathrm{S}} = \varepsilon\alpha T P_B |h_{\mathrm{BS}}|^2, \tag{1}$$

$$E_h^{\mathrm{R}} = \varepsilon\alpha T P_B |h_{\mathrm{BR}}|^2 \tag{2}$$

với P_B là công suất phát của B; ε là hiệu suất thu thập năng lượng vô tuyến và có giá trị $0 \le \varepsilon \le 1$. $h_{\mathcal{XY}}$ với $\mathcal{X} \in \{\mathrm{S},\mathrm{R}\}$ và $\mathcal{Y} \in \{\mathrm{R},\mathrm{D}\}$ là hệ số của các kênh truyền vô tuyến từ $\mathcal{X} \to \mathcal{Y}$. Từ (1) và (2), chúng ta có thể xác định công suất phát của S và R từ năng lượng thu thập là như sau:

$$P_{\mathrm{S}} = \frac{\varepsilon\alpha P_B}{1-\alpha}|h_{\mathrm{BS}}|^2, \tag{3}$$

$$P_{\mathrm{R}} = \frac{\varepsilon\alpha P_B}{1-\alpha}|h_{\mathrm{BR}}|^2. \tag{4}$$

Xem xét trong phần thời gian sau $(1-\alpha)T$, S phát thông tin tới R và đồng thời R chuyển tiếp thông tin tới D dùng kỹ thuật DF khi mà R hoạt động theo chế độ song công. Tín hiệu nhận tại R và D lần lượt như sau:

$$y_{\mathrm{R}} = h_{\mathrm{SR}} x_{\mathrm{S}} + \tilde{h}_{\mathrm{RR}} x_{\mathrm{R}} + n_{\mathrm{R}}, \tag{5}$$

$$y_{\mathrm{D}} = h_{\mathrm{RD}} x_{\mathrm{R}} + n_{\mathrm{D}}, \tag{6}$$

với x_{S} và x_{R} lần lượt là tín hiệu sau điều chế tại S và R. Khi hệ thống sử dụng kỹ thuật DF, x_{R} là tín hiệu mà nút R điều chế lại sau khi giải điều chế tín hiệu nhận tại nút nguồn. Trong (5), $\tilde{h}_{\mathrm{RR}}$ là hệ số kênh truyền tự can nhiễu từ anten phát đến anten thu của R gây ra do chế độ truyền song công. $n_{\mathcal{Y}}$ là nhiễu trắng (Additive White Gaussian Noise) tại máy thu $\mathcal{Y}$ có trung bình bằng không và phương sai bằng N_0. Từ (5), chúng ta có thể xác định được công suất của tín hiệu tự can nhiễu (Self-Interference) tại R như sau:

$$\mathbb{E}\left\{P_{\mathrm{R}}\left|\tilde{h}_{\mathrm{RR}}\right|^2\right\} = \frac{\varepsilon\alpha P_B}{1-\alpha}\mathbb{E}\left\{\left|\tilde{h}_{\mathrm{RR}}\right|^2 |h_{\mathrm{BR}}|^2\right\}. \tag{7}$$

với $\mathbb{E}\{.\}$ là toán tử kỳ vọng thống kê.

Chúng ta giả sử rằng, nút R được trang bị kỹ thuật loại bỏ tín hiệu tự can nhiễu (Self-Interference Cancellation - SIC). Tuy nhiên, trong thực tế tín hiệu tự can nhiễu tại sẽ không bị loại bỏ hoàn toàn do tính không hoàn hảo của phần cứng mà sẽ còn tồn tại một phần, gọi là can nhiễu nội dôi dư (Residual Self-Interference - RSI), gọi là I_{RSI}. Theo [35], I_{RSI} là biến ngẫu nhiên tuân theo phân bố Gauss có phương sai là:

$$\sigma^2_{\mathrm{RSI}} = \kappa\frac{\varepsilon\alpha P_B}{1-\alpha}, \tag{8}$$

với κ là hiệu suất SIC tại nút chuyển tiếp R.

Kết hợp (5) và (8), chúng ta xấp xỉ tín hiệu nhận tại R như sau:

$$y_{\mathrm{R}} = h_{\mathrm{SR}} x_{\mathrm{S}} + I_{\mathrm{RSI}} + n_{\mathrm{R}}. \tag{9}$$

Từ (6) và (9), chúng ta có thể xác định tỷ số tín hiệu trên nhiễu cộng với nhiễu nội tại gây ra tại R và D như sau:

$$\gamma_{\mathrm{SR}} = \frac{P_{\mathrm{B}}|h_{\mathrm{SR}}|^2}{\sigma_{\mathrm{RSI}} + N_0} = \frac{\varepsilon\alpha P_{\mathrm{B}}|h_{\mathrm{BS}}|^2|h_{\mathrm{SR}}|^2}{(1-\alpha)(\sigma^2_{\mathrm{RSI}} + N_0)}, \tag{10}$$

và

$$\gamma_{\mathrm{RD}} = \frac{P_{\mathrm{R}}|h_{\mathrm{RD}}|^2}{N_0} = \frac{\varepsilon\alpha P_{\mathrm{B}}|h_{\mathrm{BR}}|^2|h_{\mathrm{RD}}|^2}{(1-\alpha)N_0} \tag{11}$$

Đối với hệ thống chuyển tiếp giải mã và chuyển tiếp cố định, hiệu năng của hệ thống phụ thuộc vào chặng có tỷ số tín hiệu trên nhiễu nhỏ nhất, do đó ta có thể mô hình hóa tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương của hệ thống như sau [36, 37]:

$$\gamma_e = \min(\gamma_{\mathrm{SR}}, \gamma_{\mathrm{RD}}). \tag{12}$$

Xem xét ở kênh truyền fading Nakagami-m và giới hạn cho trường hợp m nguyên, ta có hàm CDF và PDF của $\gamma_{\mathcal{XY}}$ lần lượt có dạng như sau [38]:

$$f_{\gamma_{\mathcal{XY}}}(\gamma) = \frac{(\lambda_{\mathcal{XY}} m_{\mathcal{XY}})^{m_{\mathcal{XY}}}}{(m_{\mathcal{XY}}-1)!}\gamma^{m_{\mathcal{XY}}-1}\exp\left(-m_{\mathcal{XY}}\lambda_{\mathcal{XY}}\gamma\right), \tag{13}$$

$$F_{\gamma_{\mathcal{XY}}}(\gamma) = 1 - \exp\left(-\lambda_{\mathcal{XY}} m_{\mathcal{XY}}\gamma\right)\sum_{k=0}^{m_{\mathcal{XY}}-1}\frac{\left(\lambda_{\mathcal{XY}} m_{\mathcal{XY}}\gamma\right)^k}{k!}, \tag{14}$$

trong đó $m_{\mathcal{XY}}$ là tham số Nakagami và $\lambda_{\mathcal{XY}} = 1/\mathbb{E}\{|h_{\mathcal{XY}}|^2\}$

3. Phân tích xác suất dừng hệ thống

Trong phần này, chúng ta sẽ phân tích xác suất dừng của hệ thống ở kênh truyền fading Nakagami-*m*. Từ tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu tương đương của hệ thống γ_e, xác suất dừng của hệ thống theo định nghĩa như sau:

$$\begin{aligned} \mathrm{OP} &= \Pr\left[(1-\alpha)\log_2(1+\gamma_e) < R\right] \\ &= \Pr\left(\gamma_e < \gamma_{\mathrm{th}}\right), \end{aligned} \tag{15}$$

với R là tốc độ truyền mong muốn của hệ thống và $\gamma_{\mathrm{th}} = 2^{\frac{R}{1-\alpha}} - 1$. Kết hợp (11) và (12), OP được viết lại như sau:

$$\mathrm{OP} = \Pr\left[\min(\gamma_{\mathrm{SR}}, \gamma_{\mathrm{RD}}) < \gamma_{\mathrm{th}}\right] \tag{16}$$

Quan sát γ_{SR} và γ_{RD} ở công thức (10) và (11), ta có thể thấy rằng, γ_{SR} và γ_{RD} độc lập thống kê với nhau khi các nút mạng thu thập năng lượng từ nguồn phát bên ngoài B. Do đó, ta có thể triển khai (16) như sau

$$\begin{aligned} \mathrm{OP} &= 1 - \Pr\left[\min(\gamma_{\mathrm{SR}}, \gamma_{\mathrm{RD}}) > \gamma_{\mathrm{th}}\right] \\ &= 1 - \Pr\left(\gamma_{\mathrm{SR}} > \gamma_{\mathrm{th}}\right)\Pr\left(\gamma_{\mathrm{RD}} > \gamma_{\mathrm{th}}\right) \\ &= 1 - \left[1 - F_{\gamma_{\mathrm{SR}}}(\gamma_{\mathrm{th}})\right]\left[1 - F_{\gamma_{\mathrm{RD}}}(\gamma_{\mathrm{th}})\right] \end{aligned} \tag{17}$$

với $F_{\gamma_{xy}}(\gamma)$ là hàm phân bố xác suất tích lũy của γ_{xy}.

Chúng ta cũng thấy rằng, γ_{SR} và γ_{RD} ở công thức (10) và (11) có cùng một dạng, nên chúng ta có thể tìm hàm CDF của γ_{SR} và từ đó suy ra dạng của γ_{RD}.

Hàm CDF của γ_{SR}, $F_{\gamma_{\mathrm{SR}}}(\gamma_{th})$, viết lại như sau:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{\mathrm{SR}}}(\gamma_{th}) &= \Pr\left(\gamma_{\mathrm{SR}} < \gamma_{th}\right) \\ &= \Pr\left(\frac{\varepsilon\alpha P_{\mathrm{B}}|h_{\mathrm{BS}}|^2|h_{\mathrm{SR}}|^2}{(1-\alpha)(\sigma^2_{\mathrm{RSI}} + N_0)} < \gamma_{th}\right) \end{aligned} \tag{18}$$

Sử dụng xác suất có điều kiện, ta viết lại $F_{\gamma_{\mathrm{SR}}}(\gamma_{th})$ như sau:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{\mathrm{SR}}}(\gamma_{th}) &= \Pr\left(\gamma_{\mathrm{SR}} < \gamma_{th}\right) \\ &= \Pr\left(\frac{\varepsilon\alpha P_{\mathrm{B}}|h_{\mathrm{BS}}|^2|h_{\mathrm{SR}}|^2}{(1-\alpha)(\sigma^2_{\mathrm{RSI}} + N_0)} < \gamma_{th}\right) \\ &= \int_0^{\infty} \Pr\left(|h_{\mathrm{BS}}|^2 < \frac{(1-\alpha)(\sigma^2_{\mathrm{RSI}} + N_0)\gamma}{\varepsilon\alpha P_{\mathrm{B}} x}\right) f_{|h_{\mathrm{SR}}|^2}(x)dx \\ &= \int_0^{\infty} F_{|h_{\mathrm{BS}}|^2}\left(\frac{(1-\alpha)(\sigma^2_{\mathrm{RSI}} + N_0)\gamma}{\varepsilon\alpha P_{\mathrm{B}} x}\right) f_{|h_{\mathrm{SR}}|^2}(x)dx \end{aligned} \tag{19}$$

Thay thế (13) và (14) vào (19) và sử dụng biến đổi số (3.351.3) và (3.471.9) của [39], ta có

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{\mathrm{SR}}}(\gamma_{th}) = 1 &- \frac{(\lambda_{BS} m_{BS})^{m_{BS}}}{\Gamma(m_{BS})} \sum_{k=0}^{m_{SR}-1} \frac{1}{k!}(\lambda_{SR} m_{SR} \chi_1)^k \\ &\times 2\left(\frac{m_{SR}\lambda_{SR}\chi_1}{m_{BS}\lambda_{BS}}\right)^{\frac{m_{BS}-k}{2}} K_{m_{BS}-k}\left(2\sqrt{\frac{\chi_1 m_{SR}\lambda_{SR}}{m_{BS}\lambda_{BS}}}\right), \end{aligned} \tag{20}$$

với $\chi_1 = \dfrac{(1-\alpha)(\sigma_{\mathrm{RSI}} + N_0)\gamma_{th}}{\varepsilon\alpha P_B}$.

Sử dụng phương pháp tương tự, ta có thể tìm được $F_{\gamma_{\mathrm{RD}}}(\gamma_{th})$ như sau:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{\mathrm{RD}}}(\gamma_{th}) &= \Pr\left(\frac{\varepsilon\alpha P_{\mathrm{B}}|h_{\mathrm{BR}}|^2|h_{\mathrm{RD}}|^2}{(1-\alpha)N_0} < \gamma_{th}\right) \\ &= 1 - \frac{(\lambda_{BR} m_{BR})^{m_{BR}}}{\Gamma(m_{BR})} \sum_{l=0}^{m_{RD}-1} \frac{1}{l!}(m_{RD}\lambda_{RD}\chi_2)^l \\ &\quad \times 2\left(\frac{\lambda_{RD} m_{RD}\chi_2}{\lambda_{BR} m_{BR}}\right)^{\frac{m_{BR}-l}{2}} K_{m_{BR}-l}\left(2\sqrt{\frac{\chi_2\lambda_{RD} m_{RD}}{\lambda_{BR} m_{BR}}}\right) \end{aligned} \tag{21}$$

với $\chi_2 = \dfrac{(1-\alpha)N_0\gamma_{th}}{\varepsilon\alpha P_B}$.

Thay thế (20) và (21) vào (17), ta sẽ có được dạng đóng chính xác của xác suất dừng hệ thống.

4. Thông lượng hệ thống

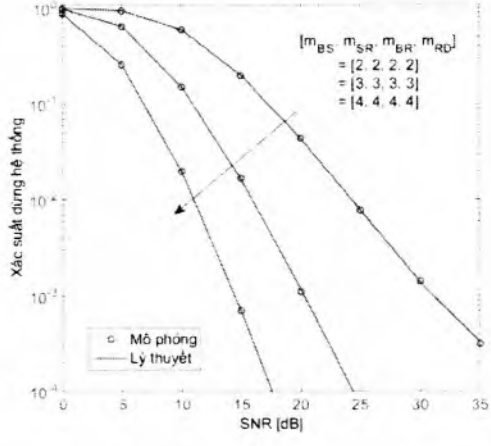
Thông lượng (Throughput) của hệ thống là giá trị quan trọng khi đánh giá hiệu năng hệ thống. Với hệ thống xem xét, thông lượng hệ thống được xác định như sau:

$$\tau = R(1-\alpha)(1-\mathrm{OP}), \tag{22}$$

với R là tốc độ truyền dữ liệu (bit/s/Hz) và OP là xác suất dừng hệ thống tại (17).

5. Kiểm chứng kết quả phân tích và thảo luận

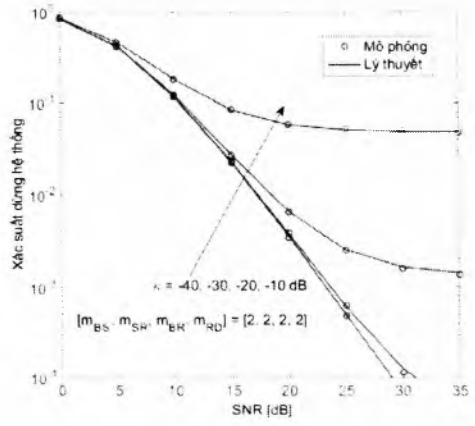
Phần trước đã xây dựng mô hình toán và đã tìm được biểu thức dạng đóng chính xác của xác suất dừng hệ thống OP trên kênh truyền fading Nakagami-*m*. Trong phần này, nhóm tác giả thực hiện mô phỏng Monte-Carlo dựa trên phần mềm Matlab để: (i) kiểm chứng lại tính chính xác của kết quả phân tích và (ii) tìm hiểu đặc tính của hệ thống. Chúng ta thiết lập các tham số hệ thống như sau: $\varepsilon = 0{,}85$ và $R = 1$ bit/s/Hz.



Hình 2. *Khảo sát OP theo SNR với tham số m khác nhau*

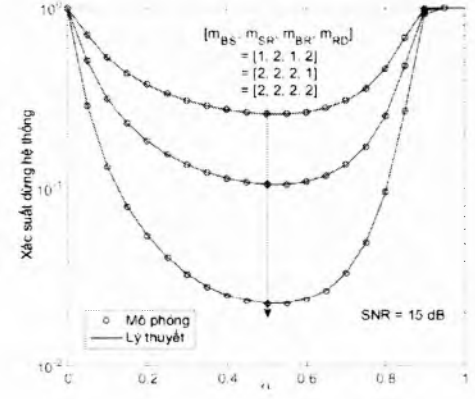
Trong Hình 2, chúng ta khảo sát ảnh hưởng của đặc tính kênh truyền lên hiệu năng của hệ thống. Xem xét 3 trường hợp của giá trị fading là [1 1 1 1], [2 2 2 2], và [3 3 3 3] với tham số hệ thống chọn là $\alpha = 0{,}3$; $\varepsilon = 0{,}85$, $\kappa = -30\,dB$. Xem xét Hình 2, chúng ta thấy rằng khi m tăng thì hiệu

năng của hệ thống tăng. Kết qua mô phong trùng lặp với kết qua phân tích lý thuyết chứng to phương pháp phân tích lý thuyết là hoàn toàn đúng đắn.



Hình 3. *Khao sát anh hương cua SIC tới hiệu năng hệ thống*

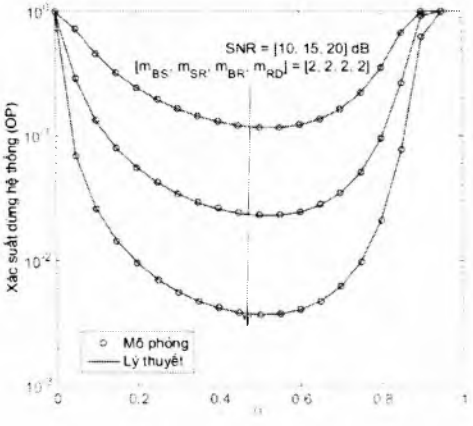
Trong Hình 3, chúng ta khao sát anh hương cua SIC tới xác suất dừng hệ thống bằng cách xem xét 4 giá trị của K từ -40 dB, - 30 dB, -20 dB, và -10 dB. Các tham số hệ thống thiết lập cho Hình 3 là $\alpha = 0,5$ và $[m_{BS}, m_{SR}, m_{BR}, m_{RD}] = [2\ 2\ 2\ 2]$. Quan sát trên đồ thị ta thấy, can nhiễu nội dôi dư có anh hương rất lớn đến hiệu năng hệ thống. Ví dụ như, khi nhiễu dư bằng -10 dB hoặc -20 dB, xác suất dừng hệ thống gần như bão hòa ở giá trị 20 dB. Từ kết qua này ta có thê nhận định rằng, đê đam bao hiệu năng hệ thống thì việc thiết kế hệ thống FD cần thiết phai lựa chọn công suất truyền phù hợp và bộ loại bo can nhiễu (SIC) cần có phâm chất tốt.



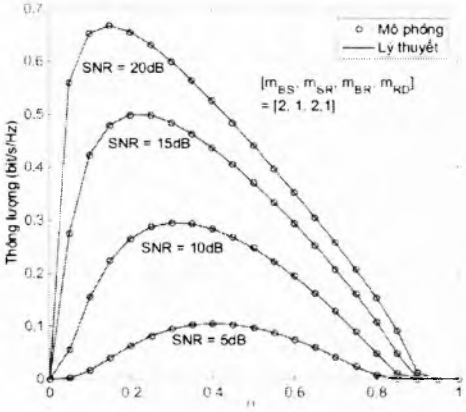
Hình 4. *Khao sát anh hương cua tham số m đến giá trị OP cua hệ thống với SNR = 15 dB.*

Hình 4 trình bày kết qua khao sát xác suất dừng hệ thống theo hệ số phân chia thời gian α. Xem xét ba trường hợp cua hệ số fading lần lượt là [1 2 1 2], [2 2 2 1], và [2 2 2 2]. Hình 4 chỉ ra rằng, tồn tại giá trị α làm cho xác suất dừng hệ thống nhỏ nhất. Với cùng một tỷ số SNR, khi m càng lớn, điêm cực tiêu OP càng nho, hay nói cách khác phâm chất cua hệ thống càng tốt. Hình 4 cũng chỉ ra rằng, đê hiệu năng hệ thống tốt nhất, giá trị hệ số phân chia thời gian tối ưu xấp xỉ 0,5 trong ca 3 trường hợp.

Trong Hình 5, chúng ta khao sát anh hương cua tỷ số tín hiệu trên nhiễu lên giá trị α với cùng một tham số m = [2 2 2 2] bằng cách thay đôi tỷ số tín hiệu trên nhiễu trung bình. Từ Hình 5 ta thấy, xác suất dừng hệ thống cai thiện khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu trung bình tăng, như mong đợi. Tuy nhiên, kết qua mô phong chỉ ra rằng hệ số phân chia thời gian tối ưu có giá trị xấp xỉ ở 0,5.



Hình 5. *Khao sát OP khi thay đôi SNR cua hệ thống*



Hình 6. *Khảo sát thông lượng hệ thống theo α*

Trong Hình 6, chúng ta trình diễn mỗi quan hệ giữa thông lượng hệ thống và α. Kết qua trên đồ thị thê hiện rằng, khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu trung bình tăng sẽ cho thông lượng hệ thống cao. Từ Hình 6, ta có thê quan sát một kết luận quan trọng là giá trị α tối ưu cho thông lượng hệ thống không còn là 0,5 mà có xu hướng giam về 0 khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu trung bình tăng. Hiện tượng này có thê giai thích là khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu cao, hệ thống cần ít thời gian thu thập năng lượng hơn đê cung cấp thông lượng hệ thống lớn nhất.

6. Kết luận

Trong bài báo này, nhóm tác gia đã khao sát hiệu năng hệ thống chuyên tiếp một chiều song công, trong đó nút nguồn và nút đích thu thập năng lượng từ nguồn ngoài trên kênh truyền Nakagami-*m*. Nhóm tác gia đã phân tích được hiệu năng cua hệ thống dưới dạng xác suất dừng và khao sát các đặc tính cua hệ thống. Kết qua phân tích cho thấy, hiệu suất cua bộ SIC, hệ số phân chia thời gian α, và tỷ số tín hiệu trên nhiễu là các tham số quan trọng, quyết định hiệu năng chính cua hệ thống và cần xem xét khi thiết kế và cài đặt hệ thống.

Lời cảm ơn: Nghiên cứu này được tài trợ bơi Quỹ Phát triển Khoa học và Công nghệ Quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 102.02-2018.320

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J. G. Andrews *et al.*, "What Will 5G Be?", *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 32, no. 6, pp. 1065-1082, 2014.

[2] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G", *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, 2014.

[3] Z. Ding, M. Peng, and H. V. Poor, "Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems", *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 8, pp. 1462-1465, 2015.

[4] H. V. Hoa, N. X. Quynh, and V. N. Q. Bao, "On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access schemes in Coordinated Direct with Partial Relay Selection", in *2018 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2018, pp. 337-343.

[5] H. V. Hoa and V. N. Q. Bao, "Outage Performance of Cooperative Underlay Cognitive Radio with Non-Orthogonal Multiple Access", in *2019 25th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC)*, 2019, pp. 527-532.

[6] L. Lu, G. Y. Li, A. L. Swindlehurst, A. Ashikhmin, and R. Zhang, "An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges", *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 742-758, 2014.

[7] T. L. Marzetta, "Massive MIMO: An Introduction", *Bell Labs Technical Journal*, vol. 20, pp. 11-22, 2015.

[8] E. Björnson, E. G. Larsson, and T. L. Marzetta, "Massive MIMO: ten myths and one critical question", *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 2, pp. 114-123, 2016.

[9] D. D. Nguyen, V. N. Q. Bao, and Q. Chen, "Secrecy performance of massive MIMO relay-aided downlink with multiuser transmission", *IET Communications*, vol. 13, no. 9, pp. 1207-1217, 2019.

[10] J. Mitola, III and G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal", *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, 1999.

[11] P. Pradeep, "Research Domains for Cognitive Radio: A Survey", in *IT Convergence and Security (ICITCS), 2015 5th International Conference on*, 2015, pp. 1-5.

[12] N. Q. B. Vo, Q. C. Le, Q. P. Le, D. T. Tran, T. Q. Nguyen, and M. T. Lam, "Vietnam spectrum occupancy measurements and analysis for cognitive radio applications", in *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 135-143: IEEE.

[13] B. Vo Nguyen Quoc, D. Nguyen Tuan, and C. Hoang Dinh, "Incremental cooperative diversity for wireless networks under opportunistic spectrum access", in *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 121-126.

[14] B. Vo Nguyen Quoc, B. Dang Hoai, C. Le Quoc, P. Le Quang, and T. Tran Dinh, "Performance analysis of partial relay selection with multi-antenna destination cooperation", in *ICT Convergence (ICTC), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 101-105.

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

[16] M. Minhong, M. H. Mickle, C. Capelli, and H. Swift, "RF energy harvesting with multiple antennas in the same space", *Antennas and Propagation Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 5, pp. 100-106, 2005.

[17] 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.

[18] B. V. N. Quoc, T. H. Van, and K. Le, "Performance of Two-Way AF Relaying with Energy Harvesting over Nakagami-m Fading Channels", *IET Communications*, Available: http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-com.2018.5090

[19] V. N. Q. Bao and N. A. Tuân, "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.

[20] Z. Zhang, X. Chai, K. Long, A. V. Vasilakos, and L. Hanzo, "Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, 2015.

[21] Z. Zhongshan, C. Xiaomeng, L. Keping, A. V. Vasilakos, and L. Hanzo, "Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection", *Communications Magazine, IEEE*, vol. 53, no. 5, pp. 128-137, 2015.

[22] 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.

[23] 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.

[24] V. Nguyen-Duy-Nhat, T. Bui-Thi-Minh, C. Tang-Tan, V. N. Q. Bao, and H. Nguyen-Le, "Joint phase noise and doubly selective channel estimation in full-duplex MIMO-OFDM systems", in *2016 International Conference on Advanced Technologies for Communications (ATC)*, 2016, pp. 413-418.

[25] Y. Liao, L. Song, Z. Han, and Y. Li, "Full duplex cognitive radio: a new design paradigm for enhancing spectrum usage", *Communications Magazine, IEEE*, vol. 53, no. 5, pp. 138-145, 2015.

[26] S. Ulukus *et al.*, "Energy Harvesting Wireless Communications: A Review of Recent Advances", *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2015.

[27] 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.

[28] L. Chen, S. Han, W. Meng, and C. Li, "Optimal Power Allocation for Dual-Hop Full-Duplex Decode-and-Forward Relay", *Communications Letters, IEEE*, vol. 19, no. 3, pp. 471-474, 2015.

[29] G. Liu, F. R. Yu, H. Ji, V. C. M. Leung, and X. Li, "In-Band Full-Duplex Relaying: A Survey, Research Issues and Challenges", *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 17, no. 2, pp. 500-524, 2015.

[30] S. Goyal, P. Liu, and S. S. Panwar, "User selection and power allocation in full-duplex multicell networks", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, 2017.

[31] X.-T. Doan, N.-P. Nguyen, C. Yin, D. B. da Costa, and T. Q. Duong, "Cognitive full-duplex relay networks under the peak interference power constraint of multiple primary users", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2017, no. 1, p. 8, 2017/01/05 2017.

[32] A. Koc, I. Altunbas, and E. Basar, "Two-Way Full-Duplex Spatial Modulation Systems With Wireless Powered AF Relaying", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 444-447, 2018.

[33] D. Chen and Y. He, "Full-Duplex Secure Communications in Cellular Networks With Downlink Wireless Power Transfer", *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 1, pp. 265-277, 2018.

[34] Z. Hadzi-Velkov, N. Zlatanov, T. Q. Duong, and R. Schober, "Rate Maximization of Decode-and-Forward Relaying Systems With RF Energy Harvesting", *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 12, pp. 2290-2293, 2015.

[35] Y. Jingrui, L. Xuefang, and Y. Qinghai, "Power allocation of two-way full-duplex AF relay under residual self-interference", in *Communications and Information Technologies (ISCIT), 2014 14th International Symposium on*, 2014, pp. 213-217.

[36] 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.

[37] 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.

[38] V. N. Q. Bao, *Mô phỏng hệ thống truyền thông*, Nhà Xuất Bản Khoa Học và Kỹ Thuật, 2020.

[39] 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.

(BBT nhận bài: 31/01/2020, hoàn tất thu tục phan biện: 12/02/2020)