

Hiệu năng của mạng truyền thông hợp tác truyền năng lượng vô tuyến

Đoàn Thị Phương Châm*, Nguyễn Cẩm Nhung[†], Trương Tiến Vũ[‡], Hà Đắc Bình[‡]

*Trường cao đẳng sư phạm Đà Lạt, Đà Lạt, Việt Nam (phuongchamdl@gmail.com).

[†]Trường THPT Đăk Ô, Bình Phước, Việt Nam (nguyencamnhungdn@yahoo.com).

[‡]Trường Đại học Duy Tân, Đà Nẵng, Việt Nam (hadacbinh@duytan.edu.vn, truongtienvu@dtu.edu.vn).

Tóm tắt nội dung—Truyền năng lượng thông qua sóng vô tuyến (RF) là giải pháp mới nhằm kéo dài thời gian hoạt động của thiết bị cũng như của mạng không dây. Trong bài báo này, chúng tôi khảo sát hiệu năng của hệ thống truyền thông hợp tác với một trạm nguồn vừa phát năng lượng RF vừa truyền thông tin, một máy chuyển tiếp và một máy đích. Máy chuyển tiếp sử dụng cơ chế khuếch đại - chuyển tiếp hợp tác với trạm nguồn chuyển thông tin đến đích nhằm nâng cao hiệu năng của hệ thống. Từ đặc tính thống kê của tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR), chúng tôi xây dựng công thức tính xác suất dừng hệ thống, thông lượng, xác suất lỗi ký tự trung bình dùng để khảo sát và đánh giá hiệu năng của hệ thống này. Ngoài ra, chúng tôi so sánh hiệu năng giữa các phương thức truyền hợp tác, truyền chuyển tiếp và truyền trực tiếp để làm sáng tỏ ưu điểm của mạng hợp tác. Cuối cùng, chúng tôi sử dụng mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng kết quả phân tích này. Sự trùng khớp giữa kết quả phân tích và kết quả mô phỏng đã kiểm chứng tính đúng đắn của kết quả phân tích.

Keywords-năng lượng vô tuyến; truyền thông hợp tác; khuếch đại-chuyển tiếp; Rician fading; Rayleigh fading.

I. GIỚI THIỆU

Trải qua vài thập kỷ, với sự phát triển của mạch thu năng lượng RF, việc truyền năng lượng thấp cho các thiết bị di động trong hệ thống không dây đã thu hút sự chú ý ngày càng tăng của giới khoa học [1-2]. Các tác giả trong [1] đã đề xuất cấu trúc của mạng không dây cho các trạm sạc RF chồng lên mạng tế bào. Trong [2], một giao thức thu năng lượng và truyền (harvest-then-transmit) được đề xuất cho mạng không dây kết hợp với truyền năng lượng. Ngoài ra, có rất nhiều kỹ thuật định hướng ăng-ten mới được triển khai để cải thiện hiệu quả của việc truyền năng lượng không dây cho các ứng dụng di động [2-4]. Cho đến ngày hôm nay, việc sử dụng tín hiệu RF cho hai mục đích truyền năng lượng cũng như truyền thông tin đã được chấp nhận rộng rãi [5-6]. Hệ thống truyền thông tin và năng lượng vô tuyến đồng thời (Simultaneous wireless

information and power transfer – SWIPT) [7] được đề xuất để truyền năng lượng RF, thường trong vùng năng lượng thấp, ví dụ như mạng cảm biến không dây. SWIPT cung cấp một ưu điểm về việc không chế để đảm bảo yêu cầu về truyền năng lượng và thông tin đồng thời với giá thành thấp mà không cần thay đổi nhiều phần cứng của máy phát. Tuy nhiên, những kết quả nghiên cứu mới nhất cho thấy việc tối ưu giữa truyền thông tin và năng lượng vô tuyến phải trả giá cho việc thiết kế hệ thống vô tuyến [5, 8]. Nguyên nhân được cho là tín hiệu RF quyết định chất lượng thông tin, trong khi đó giá trị bình phương trung bình của tín hiệu RF chính là năng lượng truyền. Kết quả là, lượng thông tin truyền và năng lượng truyền không thể đạt cực đại đồng thời. Điều này dẫn đến yêu cầu phải thiết kế lại hệ thống mạng không dây hiện có.

Truyền thông hợp tác là một kỹ thuật mới với thiết bị đầu cuối di động sử dụng một ăng-ten hoạt động trong môi trường nhiễu bao có khả năng tạo ra máy thu phát đa ăng-ten ảo cho phép chúng hợp tác thực hiện việc truyền phân tập rất hiệu quả.

Trong bài báo này, chúng tôi khảo sát hiệu năng của hệ thống truyền thông hợp tác với một trạm nguồn vừa phát năng lượng RF vừa truyền thông tin, một máy chuyển tiếp và một máy đích. Thông tin được truyền từ trạm nguồn đến máy đích thông qua hai đường: chuyển tiếp và trực tiếp. Dựa vào đặc tính thống kê của tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR), chúng tôi xây dựng công thức tính xác suất dừng hệ thống, thông lượng, xác suất lỗi ký tự trung bình dùng để khảo sát và đánh giá hiệu năng của hệ thống này.

Các phần còn lại của bài báo được trình bày như sau: Phần II giới thiệu về mô hình hệ thống. Phần III phân tích và tính toán tính xác suất dừng hệ thống, thông lượng và xác suất lỗi ký tự trung bình. Phần IV trình bày kết quả mô phỏng, phân tích và thảo luận. Cuối cùng, phần V là phần kết luận.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG VÀ KÊNH TRUYỀN

Trong bài báo này, chúng tôi khảo sát mô hình hệ thống như hình 1. Trong mô hình này, mạng gồm một trạm nguồn (Source-S) vừa truyền thông tin vừa truyền năng lượng, một máy chuyển tiếp (Relay-R) có năng lượng giới hạn bởi khả năng thu được năng lượng vô tuyến từ trạm nguồn và một máy đích (Destination-D). Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất kịch bản như sau:

- Giả sử tồn tại đường truyền trực tiếp giữa trạm nguồn và máy đích, tuy nhiên đường truyền này đôi lúc xấu hoặc tín hiệu yếu nên cần thêm sự giúp đỡ của máy chuyển tiếp R. Máy thu D sử dụng cơ chế thu lựa chọn (selection combining - SC) để thu tín hiệu đến từ S và R.

- Máy chuyển tiếp R thu năng lượng từ trạm nguồn S bằng cách sử dụng các giao thức chuyển tiếp phân chia theo thời gian (time switching-based relaying - TSR) [12] và giúp trạm nguồn truyền thông tin đến máy đích theo phương thức khuếch đại chuyển tiếp AF.

- Trạm nguồn truyền năng lượng và thông tin đến máy chuyển tiếp trên kênh truyền pha-đỉnh Rician (có tia trực tiếp). Trong khi đó, máy chuyển tiếp khuếch đại tín hiệu nhận được và truyền thông tin đến máy đích qua kênh truyền pha-đỉnh Rayleigh. Giả thuyết này là hợp lý vì các máy chuyển tiếp có năng lượng hạn chế thường đến gần trạm truyền năng lượng để thu năng lượng. Trong thực tế, các kênh giữa nguồn và máy chuyển tiếp có tia trực tiếp (LOS), trong khi các kênh giữa các máy chuyển tiếp và máy đích có thể không nhất thiết phải giống nhau. Chúng tôi cũng cho rằng trong mỗi lần thời gian khối T, hệ số các kênh này là hằng số, độc lập và có phân phối đồng nhất (iid).

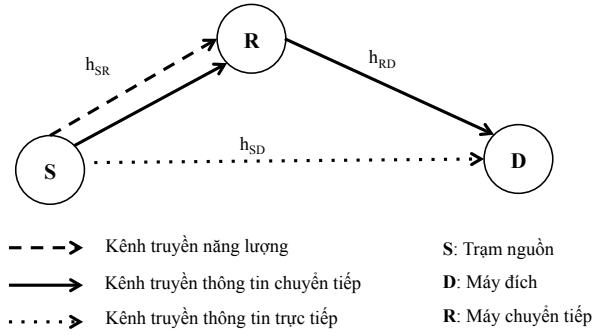
- Tất cả các máy phát và máy thu được trang bị với một ăng-ten duy nhất.

- So với năng lượng được sử dụng để truyền tín hiệu từ máy chuyển tiếp đến đích, năng lượng dùng cho việc xử lý yêu cầu của truyền/nhận tiêu hao trên mạch tại máy chuyển tiếp là không đáng kể. Vì vậy, nó có thể được bỏ qua.

Đầu tiên, máy chuyển tiếp thu năng lượng từ trạm phát năng lượng (tức trạm nguồn) trong khoảng thời gian αT . Từ đó, công suất truyền từ máy chuyển tiếp là [14]:

$$P_r = \frac{E_h}{(1-\alpha)T/2} = \frac{2\eta P_s |h_{sr}|^2 \alpha}{(1-\alpha)d_1 \sigma_1} = a P_s \gamma_1, \quad (1)$$

trong đó, $E_h = \frac{\eta P_s |h_{sr}|^2 \alpha T}{d_1 \sigma_1}$ là năng lượng thu được tại máy chuyển tiếp, $0 < \eta \leq 1$ là hiệu suất chuyển



Hình 1: Mô hình hệ thống truyền thông hợp tác truyền năng lượng vô tuyến

năng lượng, nó phụ thuộc quá trình chỉnh lưu và mạch thu năng lượng; P_s là công suất truyền của trạm nguồn; T là thời gian khối mà trong đó thông tin của khối được truyền từ trạm nguồn đến máy đích; α là hệ số biểu thị tỉ lệ của thời gian khối dùng để truyền năng lượng cho máy chuyển tiếp, $0 < \alpha \leq 1$. Đối với kênh truyền từ trạm nguồn đến máy chuyển tiếp, $|h_{sr}|^2$ là độ lợi công suất kênh truyền, d_1 là khoảng cách truyền, σ_1 là hệ số suy hao đường truyền; $a = \frac{2\eta\alpha}{(1-\alpha)}$; $\gamma_1 = \frac{|h_{sr}|^2}{d_1 \sigma_1}$.

Trong khoảng thời gian $(1-\alpha)T/2$, trạm nguồn truyền tín hiệu $x(t)$ đến máy chuyển tiếp và đến máy đích. Tín hiệu nhận được ở máy đích lúc này là:

$$y(t) = \frac{\sqrt{P_s} h_{sd}}{\sqrt{d_0 \sigma_0}} x(t) + n_0, \quad (2)$$

trong đó, d_0 và σ_0 lần lượt là khoảng cách và hệ số suy hao đường truyền từ máy nguồn đến máy đích; n_0 là nhiễu trắng phức Gaussian có trung bình bằng 0 và công suất là N_0 .

Ta được tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu SNR ở máy đích là:

$$\gamma_d = \frac{P_s |h_{sd}|^2}{N_0 d_0 \sigma_0} = \gamma \gamma_0, \quad (3)$$

trong đó, $\gamma = \frac{P_s}{N_0}$, $\gamma_0 = \frac{|h_{sd}|^2}{d_0 \sigma_0}$.

Trong khi đó, tín hiệu nhận được ở máy chuyển tiếp là:

$$y'(t) = \frac{\sqrt{P_s} h_{sr}}{\sqrt{d_1 \sigma_1}} x(t) + n_1, \quad (4)$$

trong đó, d_1 và σ_1 lần lượt là khoảng cách và hệ số suy hao đường truyền từ máy nguồn đến máy chuyển tiếp; n_1 là nhiễu trắng phức Gaussian có trung bình bằng 0 và công suất là N_1 .

Trong khoảng thời gian còn lại $(1 - \alpha)T/2$, máy chuyển tiếp khuếch đại tín hiệu nhận từ trạm nguồn và truyền lại cho máy đích. Giả sử hệ số kênh truyền từ nguồn đến máy chuyển tiếp là h_{sr} được biết trước ở máy chuyển tiếp. Tín hiệu nhận được ở máy đích là:

$$z(t) = \sqrt{\frac{P_r}{E(|y'(t)|^2)}} \frac{h_{rd}}{\sqrt{d_2^{\sigma_2}}} y'(t) + n_d, \quad (5)$$

trong đó, d_2 và σ_2 lần lượt là khoảng cách và hệ số suy hao đường truyền từ máy chuyển tiếp đến máy đích. n_d là nhiễu trắng phức Gaussian có trung bình bằng 0 và công suất là N_0 . Để đơn giản, chúng tôi giả sử $N_1 = N_2 = N_0$; $E(\cdot)$ là toán tử kỳ vọng của biến ngẫu nhiên.

Chúng ta viết lại $z(t)$ như sau:

$$z(t) = \sqrt{\frac{P_r P_s}{\frac{P_s |h_{sr}|^2}{d_1^{\sigma_1}} + N_0}} \frac{h_{sr} h_{rd}}{\sqrt{d_1^{\sigma_1} d_2^{\sigma_2}}} x(t) + \sqrt{\frac{P_r}{\frac{P_s |h_{sr}|^2}{d_1^{\sigma_1}} + N_0}} \frac{h_{rd}}{\sqrt{d_2^{\sigma_2}}} n_1 + n_d, \quad (6)$$

Tỉ số tín hiệu trên nhiễu tức thời SNR ở máy đích được tính bởi $\gamma_{e2e} = \max(\gamma_r, \gamma_d)$. Trong đó,

$$\begin{aligned} \gamma_r &= \frac{P_r P_s \gamma_1 \gamma_2}{(P_r \gamma_2 + P_s \gamma_1) N_0 + N_0^2} \\ &= \frac{a P_s^2 \gamma_1^2 \gamma_2}{(a P_s \gamma_1 \gamma_2 + P_s \gamma_1) N_0 + N_0^2} \end{aligned} \quad (7)$$

trong đó, $\gamma_1 = \frac{|h_{sr}|^2}{d_1^{\sigma_1}}$, $\gamma_2 = \frac{|h_{rd}|^2}{d_2^{\sigma_2}}$. Đối với vùng giá trị SNR cao ($P_s/N_0 \gg 1$), ta được:

$$\gamma_r \approx \frac{a P_s \gamma_1 \gamma_2}{(a \gamma_2 + 1) N_0} \quad (8)$$

Do kênh truyền trực tiếp là kênh fading Rayleigh nên hàm mật độ tích lũy (CDF) của biến ngẫu nhiên (RV) γ_0 được tính như sau:

$$F_{\gamma_0}(x) = 1 - e^{-\lambda_0 x}, \quad (9)$$

trong đó, $\lambda_0 = \frac{d_0 \sigma_0}{E(|h_{sd}|^2)}$.

Từ đây, theo (3) ta được CDF của γ_d :

$$F_{\gamma_d}(x) = 1 - e^{-\frac{\lambda_0}{\gamma} x}, \quad (10)$$

Do kênh truyền chuyển tiếp từ nguồn đến máy chuyển tiếp là kênh fading Rician nên hàm phân bố mật độ xác suất (PDF) của γ_1 là [16]

$$f_{\gamma_1}(x) = p \sum_{l=0}^{\infty} \frac{(qK)^l}{(l!)^2} x^l e^{-qx}, \quad (11)$$

trong đó, $p = \frac{(K+1)e^{-K}}{\lambda_1}$, $q = \frac{K+1}{\lambda_1}$, $\lambda_1 = \frac{E(|h_{sr}|^2)}{d_1^{\sigma_1}}$. K là tham số Rician được tính bởi tỉ số công suất giữa thành phần LOS với các thành phần tán xạ khác.

Hàm CDF của γ_1 là

$$\begin{aligned} F_{\gamma_1}(x) &= \int_0^{\infty} f_{\gamma_1}(x) dx \\ &= 1 - \frac{p}{q} \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \frac{K^l q^m}{l! m!} x^m e^{-qx} \end{aligned} \quad (12)$$

Tương tự, với fading Rayleigh ở kênh truyền từ máy chuyển tiếp đến máy đích, hàm CDF của RV γ_2 là

$$F_{\gamma_2}(x) = 1 - e^{-\lambda_2 x}, \quad (13)$$

trong đó, $\lambda_2 = \frac{d_2 \sigma_2}{E(|h_{rd}|^2)}$.

Từ các kết quả (8), (12) và (13), ta tính CDF $F_{\gamma_r}(x)$ tương tự như công trình [16], kết quả cuối cùng như sau:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_r}(x) &= 1 - \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \sum_{n=0}^m \frac{2pK^l (\lambda_2)^{(n+1)/2}}{q! l! n! (m-n)! a^{\frac{(n+1)}{2}}} \\ &\quad \left(\frac{qx}{\gamma} \right)^{m - \frac{(n+1)}{2}} e^{-\frac{qx}{\gamma}} \mathcal{K}_{n-1} \left(2 \sqrt{\frac{\lambda_2 qx}{a\gamma}} \right). \end{aligned} \quad (14)$$

III. PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG HỆ THỐNG

Để đánh giá hiệu năng của hệ thống vô tuyến, chúng tôi dùng các thông số: xác suất dừng hệ thống, thông lượng và xác suất lỗi ký tự trung bình.

A. Xác suất dừng hệ thống

Xác suất dừng hệ thống được định nghĩa là xác suất mà tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu tức thời đầu cuối – đầu cuối SNR, γ_{e2e} , thấp hơn giá trị ngưỡng cho trước γ_{th} , được tính bởi:

$$\begin{aligned} P_{out} &= F_{\gamma_{e2e}}(\gamma_{th}) = Pr[\max(\gamma_r, \gamma_d) < \gamma_{th}] \\ &= Pr(\gamma_r < \gamma_{th}) \cdot Pr(\gamma_d < \gamma_{th}) \\ &= F_{\gamma_r}(\gamma_{th}) \cdot F_{\gamma_d}(\gamma_{th}) \\ &= \left[1 - \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{m=0}^l \sum_{n=0}^m \frac{2pK^l (\lambda_2)^{(n+1)/2}}{q! l! n! (m-n)! a^{\frac{(n+1)}{2}}} \right. \\ &\quad \left. \left(\frac{q\gamma_{th}}{\gamma} \right)^{m - \frac{(n+1)}{2}} e^{-\frac{q\gamma_{th}}{\gamma}} \right. \\ &\quad \left. \mathcal{K}_{n-1} \left(2 \sqrt{\frac{\lambda_2 q \gamma_{th}}{a\gamma}} \right) \right] \left(1 - e^{-\frac{\lambda_0 \gamma_{th}}{\gamma}} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

B. Thông lượng hệ thống

Chúng tôi phân tích thông lượng (τ) ở máy đích cho phương thức truyền giới hạn thời gian trễ. Nó được tính toán bằng việc đánh giá xác suất dừng hệ thống ở tốc độ truyền cho trước của trạm nguồn – R bits/s/Hz, trong đó $R = \log_2(1 + \gamma_{th})$. Chúng tôi quan sát trạm nguồn truyền thông tin ở tốc độ R bit/s/Hz và thời gian truyền hiệu dụng từ trạm nguồn đến máy đích trong khoảng thời gian khối T là $(1 - \alpha)T/2$. Khi đó, thông lượng ở máy đích được tính như sau:

$$\tau = (1 - P_{out})(1 - \alpha)R/2. \quad (16)$$

Dựa vào biểu thức của P_{out} như được tính ở phần trước, ta được biểu thức tính τ .

C. Xác suất lỗi ký tự trung bình

Xác suất lỗi ký tự trung bình (ASEP) là một tham số dùng để đánh giá hiệu năng mạng vô tuyến và được tính như sau [15]:

$$ASEP = \frac{\omega}{2\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty F_{\gamma_{e2e}}\left(\frac{t}{\theta}\right) e^{-t/2} t^{-1/2} dt. \quad (17)$$

Trong đó, ω và θ là các hằng số phụ thuộc vào loại điều chế (Ví dụ, với điều chế BPSK: $\omega = 1$ và $\theta = 2$; với QPSK: $\omega = 2$ và $\theta = 1$).

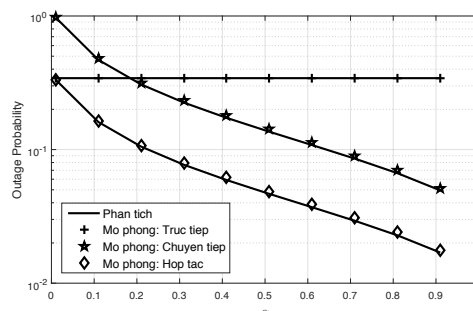
Dựa vào biểu thức $F_{e2e}(\cdot)$ trong (15), ASEP được tính và có kết quả như Phụ lục A.

IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG VÀ THẢO LUẬN

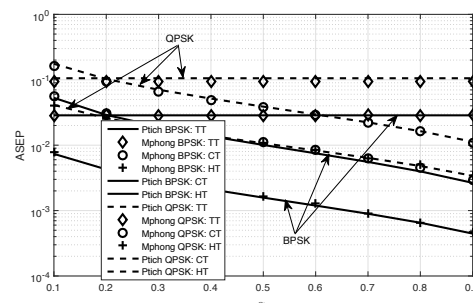
Ở phần này, chúng tôi sẽ làm rõ ảnh hưởng của những tham số hệ thống như hệ số thời gian truyền năng lượng (α) và vị trí của nút chuyển tiếp (d_1) lên các đại lượng được đánh giá là xác suất dừng hệ thống (OP), thông lượng (τ) và xác suất lỗi ký tự trung bình (ASEP). Đồng thời, chúng tôi tiến hành so sánh các phương thức truyền: trực tiếp (không có máy chuyển tiếp), chuyển tiếp (không có kênh trực tiếp) và hợp tác (kết hợp cả hai trực tiếp và chuyển tiếp) để làm rõ ưu điểm của phương thức truyền hợp tác. Để đơn giản cho việc thực nghiệm, kịch bản mô phỏng của chúng tôi là 3 máy S, R và D nằm trên đường tròn có đường kính là SD.

Hình 2, hình 3 và hình 4 mô tả tác động của α lên OP, ASEP và τ . Kết quả ở hình 2 và hình 3 cho thấy rằng, khi α tăng thì OP và ASEP giảm. Điều này là do khi α tăng, sẽ có nhiều thời gian hơn cho việc truyền năng lượng, dẫn đến giá trị SNR thu được càng lớn nên OP và ASEP có giá trị

nhỏ hơn tại nút đích. Đối với thông lượng τ ở hình 4, ta thấy rằng có một giá trị cụ thể của α (chúng tôi gọi là α^*) giúp cho τ đạt giá trị đỉnh. Thông lượng τ tỉ lệ thuận với α trong vùng từ 0 đến α^* và tỉ lệ nghịch trong vùng còn lại của α . Điều này được lý giải như sau, khi α càng nhỏ hơn α^* , thời gian dành cho việc truyền năng lượng càng ít, do đó năng lượng thu được càng nhỏ dẫn đến OP càng cao. Vì vậy, giá trị thông lượng quan sát được tại nút đích sẽ càng nhỏ. Mặt khác, khi α càng lớn hơn α^* , nhiều thời gian sẽ bị lãng phí cho việc truyền năng lượng trong khi thời gian truyền thông tin càng ít đi. Vì vậy, thông lượng đạt được tại nút đích là nhỏ hơn do sự suy giảm của tỷ số $(1 - \alpha)/2$.

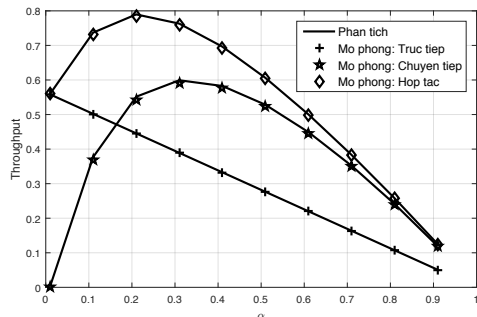


Hình 2: Xác suất dừng hệ thống theo thời gian thu năng lượng α

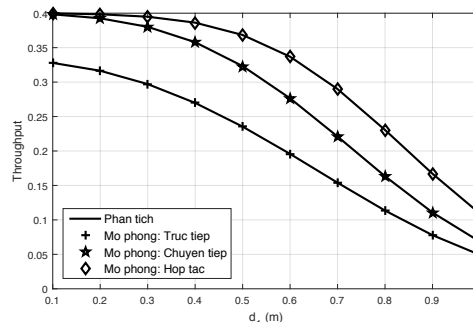


Hình 3: Xác suất lỗi ký tự trung bình theo thời gian thu năng lượng

Ảnh hưởng của vị trí nút chuyển tiếp (d_1) lên OP, ASEP và τ được mô tả trong hình 5, 6 (OP và ASEP) và hình 7 (τ). Ở hình 5, ta nhận thấy rằng, khi d_1 tăng thì OP và ASEP tăng. Thật sự rằng, giá trị của d_1 càng cao sẽ dẫn đến năng lượng thu được cũng như cường độ tín hiệu nhận được ($y(t)$) tại nút chuyển tiếp càng nhỏ. Vì vậy, OP và ASEP lớn cũng như giá trị đạt được của τ giảm như trong



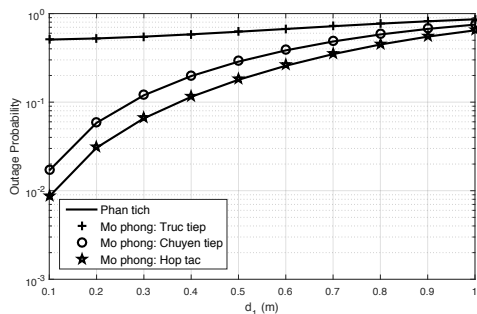
Hình 4: Thông lượng hệ thống theo thời gian thu năng lượng



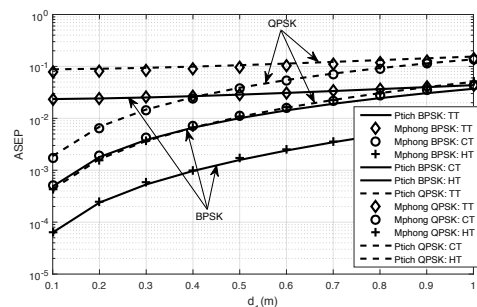
Hình 7: Thông lượng hệ thống theo khoảng cách máy nguồn và máy chuyển tiếp

hình 7 do sự suy giảm của cường độ tín hiệu nhận được tại đích.

Qua các hình trên, chúng ta nhận thấy rằng kết quả phân tích và kết quả mô phỏng là trùng khớp với nhau. Đồng thời, ở phương thức truyền hợp tác, OP và ASEP có giá trị nhỏ hơn và thông lượng cao hơn so với 2 phương thức truyền trực tiếp và chuyển tiếp. Điều này nói lên ưu điểm của phương thức truyền hợp tác.



Hình 5: Xác suất dừng hệ thống theo khoảng cách máy nguồn và máy chuyển tiếp



Hình 6: ASEP theo khoảng cách máy nguồn và máy chuyển tiếp

V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã thực hiện khảo sát mô hình hệ thống mạng hợp tác hai chặng truyền năng lượng trong môi trường fading không đồng nhất. Các biểu thức về xác suất dừng hệ thống, thông lượng và xác suất lỗi ký tự trung bình đã được chúng tôi đưa ra dựa trên đặc tính thống kê của kênh truyền. Đồng thời, chúng tôi cũng đã thực hiện mô phỏng các đại lượng này trên máy tính để xác minh tính đúng đắn của các kết quả phân tích. Từ các kết quả này, chúng tôi đã làm rõ những ưu điểm của hệ thống truyền thông hợp tác so với hệ thống truyền thông trực tiếp cũng như hệ thống truyền thông chuyển tiếp có xem xét đến yếu tố truyền năng lượng vô tuyến.

PHỤ LỤC A

Ở phần này, chúng tôi sẽ cung cấp những tính toán chi tiết đối với $F_s(e)$ như (15) ở đầu trang sau.

TÀI LIỆU

- [1] V. Raghunathan, S. Ganerwal, and M. Srivastava, "Emerging techniques for long lived wireless sensor networks," IEEE Commun. Mag., vol. 44, no. 4, pp. 108–114, Apr. 2006.
- [2] P. Popovski, A. M. Fouladgar, and O. Simeone, "Interactive joint transfer of energy and information," IEEE Trans. On Commun., vol. 61, no. 5, pp. 2086–2097, May 2013.
- [3] J. Xu and R. Zhang, "Throughput optimal policies for energy harvesting wireless transmitters with non-ideal circuit power," IEEE J. Sel. Area. Commun., vol. 32, no. 2, pp. 322–332, Feb. 2014.
- [4] S. Luo, R. Zhang, and T. J. Lim, "Optimal save-then-transmit protocol for energy harvesting wireless transmitters," IEEE Trans. on Wireless Commun., vol. 12, no. 3, pp. 1196–1207, Mar. 2013.

$$\begin{aligned}
 P_s(e) &= \frac{\omega}{2\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \left[1 - \sum_{l=0}^\infty \sum_{m=0}^l \sum_{n=0}^m \frac{2pK^l(\lambda_2)^{(n+1)/2}}{q!n!(m-n)!a^{(n+1)/2}} \left(\frac{qt}{\theta\gamma}\right)^{m-(n-1)/2} e^{-\frac{qt}{\theta\gamma}} \mathcal{K}_{n-1} \left(2\sqrt{\frac{\lambda_2qt}{a\theta\gamma}} \right) \right] \\
 &\times \left(1 - e^{-\frac{\lambda_0 t}{\theta\gamma}} \right) e^{-t/2} t^{-1/2} dt \\
 &= \frac{\omega}{2} - \frac{\omega p}{2q\sqrt{2\pi}} \sum_{l=0}^\infty \sum_{m=0}^l \sum_{n=0}^m \frac{K^l(\lambda_2)^{n/2}}{l!n!(m-n)!a^{n/2}} \left(\frac{q}{\theta\gamma}\right)^{m-\frac{n}{2}} \left(\frac{q}{\theta\gamma} + \frac{1}{2}\right)^{-m+\frac{(n-1)}{2}} \Gamma\left(m-n+\frac{3}{2}\right) \Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right) \\
 &\times \exp\left(\frac{\lambda_2q}{a(2q+\theta\gamma)}\right) \mathcal{W}_{-m+(n-1)/2, (n-1)/2} \left(\frac{2\lambda_2q}{a(2q+\theta\gamma)}\right) \\
 &- \frac{\omega}{2\sqrt{2}\left(\frac{\lambda_0}{\theta\gamma} + \frac{1}{2}\right)} + \frac{\omega p}{q\sqrt{2\pi}} \sum_{l=0}^\infty \sum_{m=0}^l \sum_{n=0}^m \frac{K^l(\lambda_2)^{(n+1)/2}}{l!n!(m-n)!a^{(n+1)/2}} \left(\frac{q}{\theta\gamma}\right)^{m-\frac{(n-1)}{2}} \frac{\left(\frac{2q+2\lambda_0+\theta\gamma}{2\theta\gamma}\right)^{-\left(m-\frac{(n-1)}{2}\right)}}{2\sqrt{\frac{\lambda_2q}{a\theta\gamma}}} \\
 &\times \Gamma\left(m-n+\frac{3}{2}\right) \Gamma\left(m+\frac{1}{2}\right) \exp\left(\frac{\lambda_2q}{a(2q+2\lambda_0+\theta\gamma)}\right) \mathcal{W}_{-m+(n-1)/2, (n-1)/2} \left(\frac{2\lambda_2q}{a(2q+2\lambda_0+\theta\gamma)}\right). \quad (18)
 \end{aligned}$$

Trong đó, $\Gamma(\cdot)$ là hàm Gamma, $\mathcal{W}(\cdot)$ là hàm Whittaker[15],

$$\int_0^\infty t^{\mu-1/2} e^{-\alpha t} K_{2\nu} \left(2\beta\sqrt{t} \right) dt = \frac{\alpha^{-\mu}}{2\beta} \Gamma(\mu-\nu+1/2) \Gamma(\mu+\nu+1/2) e^{\frac{\beta^2}{2\alpha}} \mathcal{W}_{-\mu, \nu} \left(\frac{\beta^2}{\alpha} \right) \quad (19)$$

-
- [5] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, "Wireless information transfer with opportunistic energy harvesting," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 1, pp. 288–300, Nov. 2013.
- [6] H. A. Suraweera, G. K. Karagiannidis, and P. J. Smith, "Performance analysis of the dual-hop asymmetric fading channel," IEEE Trans. on Wireless Communi., vol. 8, no. 6, pp. 2783–2788, 2009.
- [7] A. K. Gurung, F. s. AI-Qahtani, Z. M. Hussain, and H. Alnuweiri, "Performance analysis of amplify-forward relay in mixed Nakagami-m and Rician fading channels," in Pro. 2010 International Conference on Advanced Technologies for Communications, Ho Chi Minh City, Vietnam, Oct. 2010, pp. 321–326.
- [8] L. Dong, Z. Han, A. P. Petropulu, and H. V. Poor, "Improving wireless physical layer security via co-operating relays,," IEEE Transactions on Signal Processing, vol. 58(3), pp. 1875–1888, 2010.
- [9] M. R. Bhatnagar, "On the capacity of decode-and-forward relaying over rician fading channels," IEEE Communications Letters, vol. 17(6), pp. 1100–1103, 2013.
- [10] B. Medepally and N. B. Mehta, "Voluntary energy harvesting relays and selection in cooperative wireless networks," IEEE Trans. on Wireless Commun., vol. 9, no. 11, pp. 3543–3553, Nov. 2010.
- [11] B. K. Chalise, Y. D. Zhang, and M. G. Amin, "Energy harvesting in an OSTBC based amplify-and-forward MIMO relay system," in Pro. IEEE Int. Con. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Mar. 2012, pp. 3201–3204.
- [12] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 12, no. 7, pp. 3622–3636, 2013.
- [13] Z. Wang, Z. Chen, L. Luo, Z. Hu, B. Xia, and H. Liu, "Outage analysis of cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer," in Pro. IEEE ICC 2014 - Wireless Communications Symposium, Sydney, Australia, Jun. 2014, pp. 4359–4364.
- [14] I. Gradshteyn and I. Ryzhik, Table of Integrals, Series, and Products, 7th ed. Academic Press, 2007.
- [15] Dac-Binh Ha, Duc-Dung Tran, Vu Tran-Ha and Een-Kee Hong, "Performance of Amplify-and-Forward Relaying with Wireless Power Transfer over Dissimilar Channels," Elektronika ir Elektrotechnika Journal, Vol. 21, No. 5, 2015, pp. 90-95.