

PHÂN TÍCH XÁC SUẤT DỪNG HỆ THỐNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC SỬ DỤNG KỸ THUẬT THU THẬP NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN

Nguyễn Anh Tuấn*, Võ Nguyễn Quốc Bảo#

*Tập Đoàn Bưu chính Viễn thông Việt Nam

Học viện Công nghệ Bưu chính Viễn thông

Tóm tắt- Bài báo này nghiên cứu hệ thống vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng từ nguồn phát năng lượng là máy phát của mạng sơ cấp và một nguồn ngoài độc lập. Nút nguồn phát dữ liệu của mạng thứ cấp không có năng lượng lưu trữ mà sử dụng năng lượng thu thập từ hai nguồn phát năng lượng linh hoạt để cung cấp cho các hoạt động truyền phát thông tin. 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 công suất máy phát sơ cấp và vị trí của mạng thứ cấp ảnh hưởng tới hiệu năng hệ thống.

Từ khóa- Vô tuyến nhận thức, thu thập năng lượng vô tuyến, nguồn phát.

I. GIỚI THIỆU

Vô tuyến nhận thức (Cognitive radio-CR) là công nghệ hứa hẹn, giúp đạt được hiệu quả sử dụng tần số tốt hơn. Gần đây, mạng vô tuyến thứ cấp sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng được nhiều nhà khoa học quan tâm. Tại [1], nhóm tác giả nghiên cứu mạng vô tuyến chuyên tiếp trong môi trường vô tuyến nhận thức. Tại bài báo này, tác giả phân tích hiệu năng hệ thống nhưng chưa xác định được công thức dạng đóng của Xác suất dừng hệ thống. Tại [2], nhóm tác giả đề xuất cơ chế truyền thông hợp tác, hệ thống thứ cấp thu thập năng lượng từ máy phát của hệ thống sơ cấp. Tại [91], kỹ thuật thu thập năng lượng và phương thức sử dụng tần số của hệ thống vô tuyến nhận thức đã được xem xét với giả thiết không hoàn hảo của phần cứng. Xác suất dừng hệ thống đã được cải thiện bằng việc tăng số lượng anten của máy phát và thu của hệ thống thứ cấp. Tại [3], nhóm tác giả nghiên cứu thông lượng tối đa cho trường hợp một máy phát thứ cấp thu thập năng lượng vô tuyến từ môi trường xung quanh. Tại [4], tác giả xem xét mạng chuyên tiếp trong môi trường vô tuyến nhận thức, nút nguồn và nút chuyên tiếp của mạng thứ cấp có thể thu thập năng lượng từ máy phát của mạng sơ cấp để phát thông tin. Tại [5], nhóm tác giả đề xuất phương thức mới cho thu thập năng lượng vô tuyến với mạng vô tuyến nhận thức có nhiều PU. Với đề

xuất này, nút mạng của hệ thống vô tuyến nhận thức có thể thu thập năng lượng từ mạng sơ cấp. Nhóm tác giả cũng xem xét ảnh hưởng của các tham số trong hệ thống đề xuất và xác định được công thức dạng tường minh cho xác suất dừng hệ thống thứ cấp.

Thêm vào đó, nhiều nhà nghiên cứu đã tập trung vào nghiên cứu việc truyền năng lượng không dây từ một nguồn ngoài có nguồn năng lượng vô hạn. Với việc thu thập năng lượng từ một nguồn ngoài ổn định tăng hiệu năng của hệ thống vô tuyến sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng [6-8]. Tại [6], nhóm tác giả xem xét và phân tích hiệu năng hệ thống đa chặng, ở đó các nút thu thập năng lượng vô tuyến từ nhiều nguồn ngoài PB và dùng năng lượng thu thập được để truyền và thu thông tin từ các nút khác. Nút đích có nhiều anten và áp dụng kỹ thuật tổng hợp tối đa để tổng hợp tín hiệu thu được. Tại [7], nhóm tác giả đã đề xuất phương thức thu phát thông tin và truyền năng lượng không dây, ở đó việc thu thập năng lượng từ một nguồn ngoài. Tại [8], nhóm tác giả xem xét lợi ích của hướng tính anten từ nguồn ngoài PB truyền năng lượng vô tuyến. Phương thức điều khiển truyền năng lượng đã được đề xuất để có thể tăng khả năng thu thập năng lượng và kéo dài thời gian hoạt động của hệ thống.

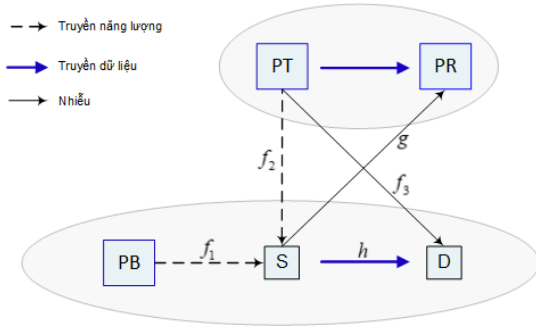
Tuy nhiên, nhược điểm của hệ thống vô tuyến nhận thức tùy thuộc vào mạng sơ cấp. Vì vậy mà hiệu suất thu thập năng lượng từ nguồn sơ cấp là không ổn định. Công suất của PT càng lớn thì hiệu suất thu thập năng lượng tại hệ thống thứ cấp càng cao. Nhưng nó cũng dẫn tới hiệu suất truyền thông tin giảm xuống. Trong trường hợp công suất của PT hệ thống sơ cấp thấp thì hiệu suất thu thập năng lượng giảm xuống và đồng thời giảm nguy cơ gây nhiễu cho hệ thống thứ cấp. Vì vậy, một nguồn năng lượng ngoài ổn định cung cấp năng lượng cho hệ thống thứ cấp sẽ tăng hiệu năng của hệ thống. Để tăng hiệu năng của hệ thống thứ cấp, chúng tôi đề xuất cơ chế thu thập năng lượng của hệ thống thứ cấp, linh động kết hợp của hai nguồn năng lượng đó là PT của hệ thống sơ cấp và nguồn năng lượng ngoài ổn định PB. Bằng phương pháp xấp xỉ mới, chúng tôi xác định được công thức của xác suất dừng hệ thống thứ cấp và xác định các tham số tối ưu để hệ thống có hiệu năng cao nhất.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Tác giả liên hệ: Nguyễn Anh Tuấn

Email: nguyenanh.na2011@gmail.com

Đến toàn soạn: 11/2019, chỉnh sửa 12/2019, chấp nhận đăng: 12/2019



Hình 1. Mô hình hệ thống vô tuyến nhận thức thu thập năng lượng vô tuyến

Hình 1 là mô hình hệ thống. Hệ thống thứ cấp gồm nút phát S và nút đích D . Nút S phát thông tin tới D nhưng S bị hạn chế về năng lượng. Do đó, Nút S sẽ thu thập năng lượng từ PT là máy phát của hệ thống sơ cấp hoặc/ và từ nguồn năng lượng ngoài ổn định PB . Gọi T là chu kỳ truyền thông tin từ nguồn S tới D . Ở mỗi chu kỳ, phần thời gian đầu αT là thời gian S thu thập năng lượng từ PB hoặc/và PT , khoảng thời gian $(1-\alpha) T$ là dùng để phát thông tin từ S tới D , với $0 \leq \alpha \leq 1$.

Chúng tôi đề xuất 03 phương thức thu thập năng lượng của nút S như sau:

Phương thức 1: (BS- Beacon scheme): chỉ nguồn năng lượng ngoài ổn định cung cấp năng lượng cho nút S trong hệ thống thứ cấp. Giả thiết máy phát của hệ thống sơ cấp PT ở xa và nó không gây nhiễu cho hệ thống thứ cấp.

Phương thức 2: (TS -Primary Transmitter Scheme): Chỉ có máy phát PT truyền năng lượng vô tuyến cho nút S . Nhưng máy phát PT của hệ thống sơ cấp gây nhiễu cho hệ thống thứ cấp. Trường hợp này không có nguồn năng lượng ngoài PB .

Phương thức 3: (MBT scheme- Maximize the transmit power of PB and PT Scheme): Có hai nguồn năng lượng đó là máy phát PT và một nguồn năng lượng ngoài PB . Nhưng nút S sẽ lựa chọn nguồn năng lượng có mức cao nhất để thu thập năng lượng.

❖ **Với phương thức BS:**

Năng lượng thu thập tại S là :

$$EH_S = \varepsilon \alpha T P_{PB} |f_1|^2, \tag{1}$$

Với ε là hiệu suất chuyển đổi năng lượng. Công suất phát của S trong khoảng thời gian $(1-\alpha)T$ là:

$$P_S^{EH} = \kappa P_{PB} |f_1|^2, \tag{2}$$

với hệ số κ được định nghĩa $\kappa = \frac{\varepsilon \alpha}{1-\alpha}$.

Hơn nữa, để không ảnh hưởng đến PR trong mạng sơ cấp thì công suất tại S phải nhỏ hơn mức ngưỡng I_p được quy định bởi PR , cụ thể:

$$P_S^I = \frac{I_p}{|g|^2}. \tag{3}$$

Từ (2) và (3), công suất phát tại S được biểu diễn như sau:

$$P_S^{BS} = \min \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2, \frac{I_p}{|g|^2} \right), \tag{4}$$

Với: I_p là mức ngưỡng

cho phép tại PR .

❖ **Với phương thức TS:**

Tương tự như phương thức BS, công suất tại S sau khi thu thập năng lượng được xác định như sau :

$$P_S^{EH} = \kappa P_{PT} |f_2|^2, \tag{5}$$

Công suất tối đa cho phép tại S để không gây can nhiễu lên PR được xác định như sau:

$$P_S^I = \frac{I_p}{|g|^2}, \tag{6}$$

Do đó, công suất phát tại S được biểu diễn như sau:

$$P_S^{TS} = \min \left(\kappa P_{PT} |f_2|^2, \frac{I_p}{|g|^2} \right) \tag{7}$$

❖ **Với phương thức MBT:**

Một cách tương tự, công suất tại S sau khi thu thập năng lượng là tại S như sau:

$$P_S^{EH} = \max \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2, \kappa P_{PT} |f_2|^2 \right), \tag{8}$$

Công suất tối đa cho phép tại S để không gây can nhiễu lên PR là

$$P_S^I = \frac{I_p}{|g|^2}. \tag{9}$$

Do đó, công suất phát tại S được biểu diễn như sau:

$$P_S^{MBT} = \min \left(\max \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2, \kappa P_{PT} |f_2|^2 \right), \frac{I_p}{|g|^2} \right) \quad (10)$$

III. PHÂN TÍCH HIỆU NĂNG HỆ THỐNG

Xác suất dừng hệ thống được xác định như sau:

$$P_{out}^{sch} = \Pr \left[(1 - \alpha) \log_2 (1 + \gamma_S^{sch}) < R_{th} \right], \quad (11)$$

với $sch \in \{BS, TS, MBT\}$.

$$P_S^{EH} = \kappa P_{PT} |f_2|^2,$$

Giả sử các hàm và biến như sau:

$$\Theta(a, b, c) = \int_0^{+\infty} \frac{ab}{x+a} \exp\left(-\frac{c}{x} - bx\right) dx$$

$$\Upsilon(a, b, c) = \int_0^{\infty} \frac{abx}{1+ax} \exp\left(-\frac{c}{x} - bx\right) dx$$

Ta đặt các tham số như sau:

$$\zeta = \frac{I_p}{\kappa P_{PT}}, \quad \Omega = \frac{\lambda_h \gamma_{th}}{\kappa \lambda_{f_3}}, \quad \phi = \frac{\Omega}{\zeta};$$

$$\theta = \frac{\lambda_h \gamma_{th} \lambda_{f_1}}{\kappa P_{PB}}, \quad \vartheta = \frac{\lambda_g \lambda_{f_1} I_p}{\kappa P_{PB}},$$

$$\text{và } \chi(x) = 2\sqrt{x} K_1(2\sqrt{x}).$$

Để xác định xác suất dừng của hệ thống theo từng phương thức, Nghiên cứu sinh xác định lần lượt như dưới đây.

a. Phương thức BS

Với trường hợp chỉ có PB là truyền năng lượng không dây cho hệ thống thứ cấp, ta có SNR được xác định như sau:

$$\gamma_S^{BS} = \min \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2, \frac{I_p}{|g|^2} \right) |h|^2, \quad (12)$$

$$\text{Với } \kappa = \frac{\varepsilon \alpha}{1 - \alpha}.$$

Xác suất dừng hệ thống OP được xác định như sau:

$$\begin{aligned} OP = F_{\gamma_S}(\gamma_{th}) &= \Pr \left[\min \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2 |h|^2, \frac{I_p |h|^2}{|g|^2} \right) < \gamma_{th} \right] \\ &= \Pr \left[|g|^2 < \frac{I_p}{\kappa P_{PB} |f_1|^2}, |h|^2 < \frac{\gamma_{th}}{\kappa P_{PB} |f_1|^2} \right] + \\ &\Pr \left[|f_1|^2 > \frac{I_p}{\kappa P_{PB} |g|^2}, |h|^2 < \frac{\gamma_{th} |g|^2}{I_p} \right] \\ &= \int_{I_1}^{+\infty} F_{|g|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PB} x} \right) F_{|h|^2} \left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa P_{PB} x} \right) f_{|f_1|^2}(x) dx + \\ &\int_{I_2}^{+\infty} \left[1 - F_{|f_1|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PB} x} \right) \right] F_{|h|^2} \left(\frac{\gamma_{th} x}{I_p} \right) f_{|g|^2}(x) dx \end{aligned} \quad (13)$$

Biểu thức I_1 của công thức (5.13) được xác định như sau:

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^{+\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda_g I_p}{\kappa P_{PB} x}\right) \right] \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda_h \gamma_{th}}{\kappa P_{PB} x}\right) \right] \\ &\lambda_{f_1} \exp(-\lambda_{f_1} x) dx \\ &= 1 - \chi(\theta) - \chi(\vartheta) + \chi(\theta + \vartheta) \end{aligned} \quad (14)$$

Tiếp theo, xác định được I_2 như sau:

$$\begin{aligned} I_2 &= \int_0^{+\infty} \exp\left(-\frac{\lambda_{f_1} I_p}{\kappa P_{PB} x}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda_h \gamma_{th} x}{I_p}\right) \right] \\ &* \lambda_g \exp(-\lambda_g x) dx \\ &= \chi(\vartheta) - \frac{\lambda_g I_p}{\lambda_h \gamma_{th} + I_p \lambda_g} \chi(\theta + \vartheta). \end{aligned} \quad (15)$$

Thay (14) và (15) vào (13) có thể xác định được xác suất dừng của hệ thống.

b. Phương thức TS

Với trường hợp này, hệ thống thứ cấp thu thập năng lượng từ nguồn phát PT của hệ thống sơ cấp. Nghiên cứu sinh xác định SNR của hệ thống thứ cấp như sau:

$$\gamma_S^{TS} = \min \left(\kappa P_{PT} |f_2|^2, \frac{I_p}{|g|^2} \right) \frac{|h|^2}{P_{PT} |f_3|^2} \quad (16)$$

Xác suất dừng hệ thống OP được xác định như sau

$$\begin{aligned}
 OP &= F_{\gamma_s^s}(\gamma_{th}) \\
 &= \Pr \left[\min \left(\kappa P_{PT} |f_2|^2, \frac{I_p}{|g|^2} \right) \frac{|h|^2}{P_{PT} |f_3|^2} < \gamma_{th} \right] \\
 &= \Pr \left[X < \frac{\gamma_{th}}{\kappa |f_2|^2}, |g|^2 < \frac{I_p}{\kappa P_{PT} |f_2|^2} \right] + \\
 &\quad + \Pr \left[X < \frac{\gamma_{th} P_{PT} |g|^2}{I_p}, |f_2|^2 > \frac{I_p}{\kappa P_{PT} |g|^2} \right], \quad (17) \\
 &= \int_0^{+\infty} F_X \left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa x} \right) F_{|g|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) f_{|f_3|^2}(x) dx \\
 &\quad + \int_0^{+\infty} \left[1 - F_{|f_2|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) \right] F_X \left(\frac{\gamma_{th} P_{PT} x}{I_p} \right) f_{|f_3|^2}(x) dx,
 \end{aligned}$$

với $X = |h|^2 / |f_3|^2$.

Hàm CDF của X được tính như sau:

$$\begin{aligned}
 F_X(y) &= \Pr \left[\frac{|h|^2}{|f_3|^2} < y \right] \\
 &= \int_0^{+\infty} F_{|h|^2}(yx) f_{|f_3|^2}(x) dx \quad (18) \\
 dx &= \frac{\lambda_h y}{\lambda_{f_3} + \lambda_h y}
 \end{aligned}$$

Thay (18) vào (17) xác định được I_3 như sau:

$$\begin{aligned}
 I_3 &= \int_0^{+\infty} \frac{\Omega \lambda_{f_2} \exp(-\lambda_{f_2} x)}{x + \Omega} dx - \\
 &\quad - \int_0^{+\infty} \frac{\Omega \lambda_{f_2}}{x + \Omega} \exp\left(-\frac{I_p \lambda_g}{\kappa P_{PT} x} - \lambda_{f_2} x\right) dx \quad (19)
 \end{aligned}$$

Áp dụng biến đổi (3.383.10) tại [40] để xác định I_3 như sau:

$$I_3 = \Omega \lambda_{f_2} \exp(\Omega \lambda_{f_2}) \Gamma(0, \Omega \lambda_{f_2}) - \Theta(\Omega, \lambda_{f_2}, \lambda_g \zeta) \quad (20)$$

Tương tự như vậy, I_4 được xác định:

$$I_4 = \int_0^{\infty} \frac{\phi \lambda_g x}{1 + \phi x} \exp\left(-\frac{\lambda_{f_2} \zeta}{x} - \lambda_g x\right) dx = \Upsilon(\phi, \lambda_g, \lambda_{f_2} \zeta) \quad (21)$$

Sau đó, thay thế (20) và (21) vào (17), ta xác định được xác suất dừng hệ thống OP.

c. Phương thức MBT:

Trường hợp này, nguồn năng lượng cung cấp cho hệ thống thứ cấp bao gồm cả PT và PB. Nguồn năng lượng được chọn là nguồn năng lượng có mức cao hơn. SNR của hệ thống thứ cấp được xác định như sau:

$$\gamma_s^{MBT} = \min \left(\max \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2, \kappa P_{PT} |f_2|^2 \right), \frac{I_p}{|g|^2} \right) \frac{|h|^2}{P_{PT} |f_3|^2}$$

Xác suất dừng hệ thống OP được xác định như sau:

$$\begin{aligned}
 OP &= F_{\gamma_s^{MBT}}(\gamma_{th}) \\
 &= \Pr \left[\max \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2, \kappa P_{PT} |f_2|^2 \right) \frac{|h|^2}{P_{PT} |f_3|^2} < \gamma_{th}, \right. \\
 &\quad \left. \max \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2, \kappa P_{PT} |f_2|^2 \right) < \frac{I_p}{|g|^2} \right] \\
 &\quad + \Pr \left[\frac{I_p}{|g|^2} \frac{|h|^2}{P_{PT} |f_3|^2} < \gamma_{th}, \max \left(\kappa P_{PB} |f_1|^2, \kappa P_{PT} |f_2|^2 \right) > \frac{I_p}{|g|^2} \right]
 \end{aligned}$$

Đặt I_5 là biểu thức của công thức (23) như sau:

$$\begin{aligned}
 I_5 &= \Pr \left[\frac{|h|^2}{|f_3|^2} < \frac{\gamma_{th}}{\kappa Y}, |g|^2 < \frac{I_p}{\kappa P_{PT} Y} \right] \quad (24) \\
 &= \int_0^{+\infty} F_X \left(\frac{\gamma_{th}}{\kappa x} \right) F_{|g|^2} \left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x} \right) f_Y(x) dx
 \end{aligned}$$

với $\mu = \frac{P_{PB}}{P_{PT}}$, $X = \frac{|h|^2}{|f_3|^2}$ and $Y = \max(\mu |f_1|^2, |f_2|^2)$

Xác định CDF và PDF của Y như sau:

$$\begin{aligned}
 F_Y(z) &= \Pr \left[\max \left(\mu |f_1|^2, |f_2|^2 \right) < z \right] \\
 &= F_{|f_1|^2} \left(\frac{z}{\mu} \right) F_{|f_2|^2}(z) \\
 &= 1 - \exp(-\lambda_{f_2} z) - \exp\left(-\frac{\lambda_{f_1} z}{\mu}\right) \\
 &\quad + \exp\left(-\frac{\lambda_{f_1} z}{\mu} - \lambda_{f_2} z\right) \quad (25)
 \end{aligned}$$

và

$$\begin{aligned}
 f_Y(z) &= \lambda_{f_2} \exp(-\lambda_{f_2} z) + \frac{\lambda_{f_1}}{\mu} \exp\left(-\frac{\lambda_{f_1} z}{\mu}\right) \\
 &\quad - \left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2} \right) \exp\left(-\left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2}\right) z\right) \quad (26)
 \end{aligned}$$

Thay thế CDF của X, và PDF của Y vào công thức (24), ta có:

$$I_5 = \int_0^{+\infty} \left[\frac{\Omega}{x + \Omega} \lambda_{f_2} \exp(-\lambda_{f_2} x) + \frac{\Omega}{x + \Omega} \frac{\lambda_{f_1}}{\mu} \exp\left(-\frac{\lambda_{f_1} x}{\mu}\right) - \frac{\Omega}{x + \Omega} \left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2} \right) \exp\left(-\left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2}\right) x\right) \right] dx$$

$$- \int_0^{+\infty} \left[\frac{\Omega}{x + \Omega} \lambda_{f_2} \exp\left(-\frac{\lambda_g \zeta}{x} - \lambda_{f_2} x\right) + \frac{\Omega}{x + \Omega} \frac{\lambda_{f_1}}{\mu} \exp\left(-\frac{\lambda_g \zeta}{x} - \frac{\lambda_{f_1} x}{\mu}\right) - \frac{\Omega}{x + \Omega} \left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2} \right) \exp\left(-\frac{\lambda_g \zeta}{x} - \left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2}\right) x\right) \right] dx \quad (27)$$

Áp dụng (3.383.10) tại [40] xác định được I_5 như sau:

$$I_5 = \lambda_{f_2} \Omega \exp(\lambda_{f_2} \Omega) \Gamma(0, \lambda_{f_2} \Omega) + \frac{\lambda_{f_1}}{\mu} \Omega \exp\left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} \Omega\right) \Gamma\left(0, \frac{\lambda_{f_1}}{\mu} \Omega\right) - \left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2}\right) \Omega \exp\left(\left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2}\right) \Omega\right) \Gamma\left(0, \left(\frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2}\right) \Omega\right) - \Theta\left(\Omega, \lambda_{f_2}, \lambda_g \zeta\right) - \Theta\left(\Omega, \frac{\lambda_{f_1}}{\mu}, \lambda_g \zeta\right) + \Theta\left(\Omega, \frac{\lambda_{f_1}}{\mu} + \lambda_{f_2}, \lambda_g \zeta\right) \quad (28)$$

Biểu thức còn lại của công thức (23) xác định như sau:

$$I_6 = \Pr\left[\max(|\mu|f_1|^2, |f_2|^2) > \frac{I_p}{\kappa P_{PT}} \frac{|h|^2}{|g|^2} \frac{P_{PT}}{P_{PR}} |f_3|^2 < \gamma_{th}\right] = \int_0^{+\infty} \left[1 - F_Y\left(\frac{I_p}{\kappa P_{PT} x}\right) \right] F_X\left(\frac{\gamma_{th} P_{PT} x}{I_p}\right) f_{|s|^2}(x) dx$$

$$= \int_0^{+\infty} \left[\frac{\lambda_g \Omega}{\zeta} \frac{x}{1 + \frac{\Omega}{\zeta} x} \exp\left(-\frac{\lambda_{f_2} I_p}{\kappa P_{PT} x} - \lambda_g x\right) + \frac{\lambda_g \Omega}{\zeta} \frac{x}{1 + \frac{\Omega}{\zeta} x} \exp\left(-\frac{\lambda_{f_1} I_p}{\mu \kappa P_{PT} x} - \lambda_g x\right) - \frac{\lambda_g \Omega}{\zeta} \frac{x}{1 + \frac{\Omega}{\zeta} x} \exp\left(-\left(\frac{\lambda_{f_1} I_p}{\mu \kappa P_{PT}} + \frac{\lambda_{f_2} I_p}{\kappa P_{PT}}\right) \frac{1}{x} - \lambda_g x\right) \right] dx \quad (29)$$

Sau một vài biến đổi, ta có:

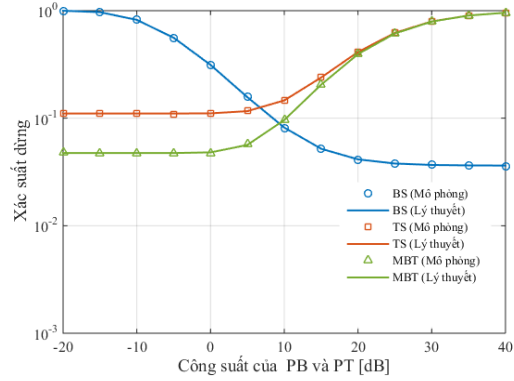
$$I_6 = \Upsilon\left(\frac{\Omega}{\zeta}, \lambda_g, \lambda_{f_2} \zeta\right) + \Upsilon\left(\frac{\Omega}{\zeta}, \lambda_g, \frac{\lambda_{f_1} \lambda_{f_2} \zeta}{\mu}\right) - \Upsilon\left(\frac{\Omega}{\zeta}, \lambda_g, \frac{\lambda_{f_1} \lambda_{f_2} \zeta}{\mu} + \lambda_{f_2} \zeta\right) \quad (30)$$

Thay thế (28) và (30) vào Công thức (23) xác định được xác suất dừng hệ thống.

IV. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

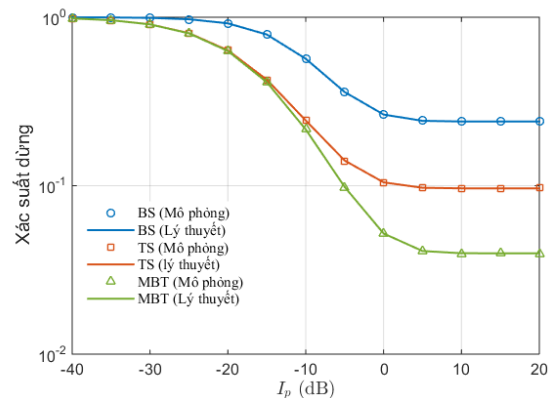
Phần trước đã xác định được công thức tính OP của hệ thống cho hệ thống vô tuyến nhận thức có sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng tại nút nguồn S với nguồn năng lượng từ nguồn năng lượng ngoài PT và PB. Phần này, chúng tôi sẽ khảo sát, mô phỏng để chứng minh tính

đúng đắn của phân tích lý thuyết. Để khảo sát xác suất dừng hệ thống OP, chúng tôi chọn tốc độ dữ liệu tối thiểu là $R=1$ bit/s/Hz.



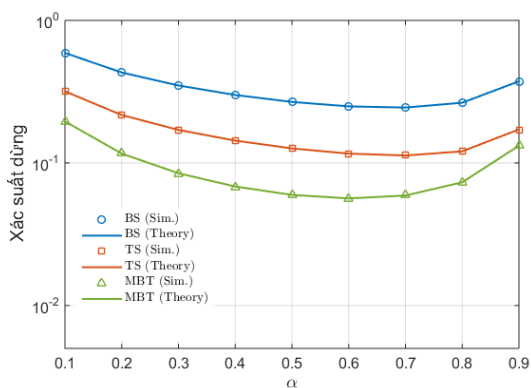
Hình 2. Xác suất dừng hệ thống theo công suất máy phát PT và nguồn năng lượng ngoài PB

Tại Hình 2, công suất máy phát PB từ -20 tới 40 dB trong phương thức MBT. Trong khi đó, công suất máy phát của PT thay đổi từ -20 tới 40 dB trong phương thức TS và BS. Kết quả mô phỏng cho thấy kết quả phân tích lý thuyết và mô phỏng là trùng khớp cho thấy tính đúng đắn của phân tích và xác định biểu thức tính xác suất dừng hệ thống. Có thể nhận thấy, với phương thức MBT và TS, hiệu năng của hệ thống cao khi công suất máy phát của PT và PB thấp từ -20 tới 10 dB. Sau đó hiệu năng hệ thống giảm xuống khi công suất PT và PB tăng lên. Với phương thức BS thì ngược lại, hiệu năng hệ thống thấp khi nguồn năng lượng PB có công suất thấp và hiệu năng tăng lên khi công suất lớn từ 10 dB tới 40 dB. Nguyên nhân là trong các phương thức MBT và TS, nút nguồn thu thập năng lượng từ cả PB và PT, do đó khi công suất PT tăng lên sẽ tỷ lệ thuận với công suất nhiễu gây ra cho hệ thống. Kết quả là hiệu năng hệ thống giảm. Trong khi đó với phương thức BS, nút nguồn chỉ thu thập năng lượng từ PB nên khi tăng công suất PB sẽ kéo theo sự cải thiện hiệu năng hệ thống.



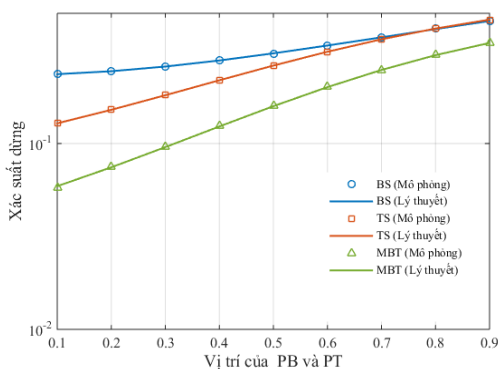
Hình 2. Xác suất dừng hệ thống theo I_p (dB)

Hình 3 mô phỏng xác suất dừng hệ thống theo I_p . Xác suất dừng của tất cả các phương thức đạt bão hòa khi I_p cao hơn 5 dB. Nguyên nhân là tỷ lệ công suất tín hiệu trên nhiễu (SNR) của tất cả các phương thức đều bị giới hạn bởi ràng buộc về mức can nhiễu tối đa, thể hiện như trong (2), (6), và (12) đối với phương thức BS, TS, và MBT, tương ứng. Hơn nữa, Hình 3 còn thể hiện hiệu năng của phương thức MBT tốt nhất trong tất cả các phương thức đề xuất khi xét cùng trong một yêu cầu về ngưỡng nhiễu I_p của mạng vô tuyến nhận thức. Nguyên nhân vì phương thức MBT lựa chọn nguồn năng lượng bức xạ lớn nhất để thu thập, dẫn đến hiệu năng của hệ thống vượt trội hơn so với các phương thức BS và TS.



Hình 4. Xác suất dừng hệ thống theo hệ số α

Hình 4, xác suất dừng của hệ thống là một hàm phức tạp theo biến α và hàm có đặc tính “hàm lồi” (convex function). Do đó tồn tại một giá trị tối ưu làm cho xác suất dừng đạt cực tiểu. Đối với phương thức MBT, giá trị α tối ưu khoảng 0.6 trong khi của phương thức BS và TS lần lượt là khoảng 0.65 và 0.7, tương ứng. Như vậy là hiệu năng của hệ thống tối ưu khi hệ thống tiêu tốn khoảng 60% thời gian của một chu kỳ thời gian để thu thập năng lượng tại nút nguồn S. Một lần nữa cho thấy, hiệu năng của phương thức MBT là tối ưu nhất trong các phương pháp đề xuất.



Hình 5. Xác suất dừng hệ thống theo khoảng cách của PB và PT tới nút nguồn S

Hình 5 mô phỏng xác suất dừng hệ thống theo khoảng cách của PT và PB tới Nút nguồn S của hệ thống vô tuyến nhận thức. Cụ lý của PB thay đổi từ 0.1 tới 1. Theo trục X. Trong khi khoảng cách của PT thay đổi $X_{PT} = X_{PB} = 0.1$. Nhận thấy xác suất dừng của hệ thống cải thiện với các phương thức MBT. Hình 5 còn thể hiện sự phụ thuộc quan trọng của hiệu năng hệ thống vào việc định vị các vị trí của các nút PB và PT trong mạng cũng như vị trí của chúng đối với nút nguồn S. Cụ thể, khi các nút PB và PT di chuyển gần về phía nguồn, nghĩa là $X_{PT} = X_{PB} = 0.1$, hiệu năng của các phương thức tăng lên vì nút nguồn có nhiều cơ hội thu thập được một lượng lớn năng lượng. Ngược lại, khi các nút PB và PT di chuyển ra xa nút nguồn, nghĩa là $X_{PT} = X_{PB} = 0.9$, hiệu năng của các phương thức xấu đi vì nút nguồn thu thập năng lượng từ PB và PT một cách hạn chế. Cuối cùng, Hình 5 cũng thể hiện, xác suất dừng của hệ thống là một hàm phức tạp theo hệ số suy hao đường truyền.

V. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã nghiên cứu hệ thống vô tuyến nhận thức sử dụng kỹ thuật thu thập năng lượng vô tuyến từ nguồn ngoài PB và nguồn năng lượng từ máy phát PT của hệ thống sơ cấp. Chúng tôi đã dùng phương pháp giải tích xấp xỉ mới để xác định xác suất dừng hệ thống dưới dạng công thức đóng. Đồng thời đã mô phỏng theo nguyên lý Monte-Carlo để chứng minh tính đúng đắn của công thức xác suất dừng hệ thống, đồng thời đánh giá và tìm các giá trị tham số tối ưu của hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] 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, pp. 1970-1975.
- [2] G. Zheng, Z. K. M. Ho, E. A. Jorswieck, and B. E. Ottersten, "Information and Energy Cooperation in Cognitive Radio Networks," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 62, pp. 2290-2303, 2014.
- [3] T. N. NGUYEN, T. T. DUY, L. Gia-Thien, P. T. TRAN, and M. VOZNAK, "Energy Harvesting-based Spectrum Access With Incremental Cooperation, Relay Selection and Hardware Noises," *RADIOENGINEERING*, vol. 25, p. 11, 2016.
- [4] Z. Wang, Z. Chen, B. Xia, L. Luo, and J. Zhou, "Cognitive relay networks with energy harvesting and information transfer: Design, analysis, and optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, pp. 2562-2576, 2016.
- [5] S. A. Mousavifar, Y. Liu, C. Leung, M. ElKashlan, and T. Q. Duong, "Wireless Energy Harvesting and Spectrum Sharing in Cognitive Radio," in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2014 IEEE 80th*, 2014, pp. 1-5.
- [6] Liu, Yuanwei, et al. "Wireless Energy Harvesting in a Cognitive Relay Network." *IEEE Trans. Wireless Communications* 15.4 (2016): pp.2498-250

- [7] Nguyen Toan Van, Nhu Tri Do, Vo Nguyen Quoc Bao, Beongku An, Performance Analysis of Wireless Energy Harvesting Multihop Cluster-Based Networks over Nakagami- m Fading Channels, *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3068 - 3084, Dec. 2017.
- [8] J. Guo, S. Durrani, X. Zhou, and H. Yanikomeroglu, "Outage probability of ad hoc networks with wireless information and power transfer," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 4, pp. 409-412, 2015.
- [9] ZHANG, Keyi, et al. AP scheduling protocol for power beacon with directional antenna in Energy Harvesting Networks. In: *Applied System Innovation (ICASI), 2017 International Conference on*. IEEE, 2017. p. 906-909.
- [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, 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, 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] 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.
- [40] 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.*
- [41] 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>



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 có 17 năm công tác tại Cục Tần Số Vô Tuyến Điện – Bộ Thông tin và Truyền thông. Hiện đang công tác tại Tập đoàn Bưu chính viễn thông Việt Nam 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

khóa 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.