

ĐÁNH GIÁ ẢNH HƯỞNG SAI SỐ ƯỚC LƯỢNG KÊNH TRONG MẠNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC THU NĂNG LƯỢNG VÔ TUYẾN

ON IMPACT OF CHANNEL ESTIMATION ERROR IN COGNITIVE RADIO NETWORK WITH WIRELESS ENERGY HARVESTING

Nguyễn Tấn Lợi, Nguyễn Thị Khánh Tuyền, Đỗ Đình Thuận
 Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật TP. Hồ Chí Minh

Ngày tòa soạn nhận bài 29/01/2016, ngày phản biện đánh giá 28/02/2016, ngày chấp nhận đăng 16/03/2016

TÓM TẮT

Trong bài báo này, vấn đề sai số do ước lượng thông tin trạng thái kênh (CSI) cho mạng thu năng lượng vô tuyến được đánh giá thông qua mô hình chia sẻ phổ trong mạng vô tuyến nhận thức. Trong mô hình hệ thống, người dùng thứ cấp đóng vai trò là nút chuyển tiếp có thể thu năng lượng từ tín hiệu sơ cấp nhận được, sau đó dùng nguồn năng lượng thu được để chuyển tiếp tín hiệu sơ cấp còn lại đến đích và phát thông tin thứ cấp của mình đến người dùng thứ cấp khác. Nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật giải mã-chuyển tiếp (decode and forward: DF) để truyền thông tin. Tại nút chuyển tiếp tồn tại nhiễu do sai số ước lượng thông tin trạng thái kênh (CSI). Hiệu năng của mô hình được đánh giá thông qua xác suất dừng. Qua phân tích, bài báo đưa ra được biểu thức chính xác cho xác suất dừng của cả mạng sơ cấp và thứ cấp. Bên cạnh đó, bài báo còn cho thấy sự ảnh hưởng của việc phân bố năng lượng lên dung lượng truyền tin. Từ kết quả mô phỏng của xác suất dừng, việc phân bố năng lượng phù hợp cho phép giao thức được đề xuất đạt được hiệu suất tốt hơn so với truyền trực tiếp mà không cần chia sẻ phổ, đồng thời không làm tiêu hao thêm năng lượng được cung cấp cho nút chuyển tiếp.

Từ khóa: CSI; thu năng lượng vô tuyến; chia sẻ phổ; vô tuyến nhận thức; kỹ thuật giải mã-chuyển tiếp; xác suất dừng.

ABSTRACT

In this paper, impact of channel estimation error in wireless energy harvesting network is evaluated through spectrum sharing model for cognitive radio networks. In the model system, the secondary user acting as relay nodes can scavenges energy from the received primary signal, then use the energy obtained to transfer the remaining primary signal to destination and secondary information to other secondary users. Relay node uses decode and forward (DF) to transmit information. In relay node exist interference due to channel state information (CSI) error. Performance of the model was evaluated through outage probability. Through analysis, the paper offers the exact expression of the outage probability for both the primary and secondary network. Besides that, this investigation also shows the influence of the energy distribution to signal transfer capacity. The result of the outage probability, the energy distribution is suitable for the proposed protocol enables achieve better performance compared with direct transmission without spectrum sharing, and do not consume more energy supplied to the relay node.

Keywords: CSI; wireless energy harvesting; spectrum sharing; cognitive radio; decode and forward; outage probability.

1. GIỚI THIỆU

Với nhu cầu ngày gia tăng của các ứng dụng không dây, sự suy hao quang phổ ngày càng nghiêm trọng, trong khi đó phổ tần cho phép lại không được tận dụng triệt để. Để tăng cường việc sử dụng dụng phổ tần, vô tuyến nhận thức là một cải thiện đầy hứa hẹn bằng

cách cho phép chia sẻ phổ, tức là cho phép người dùng không được cấp phép truy cập vào phổ tần trống của người dùng được cấp phép [1]. Hệ thống vô tuyến nhận thức cơ bản được chia thành hai loại mạng: mạng sơ cấp (PU) và mạng thứ cấp (SU) [1]–[3]. Bên cạnh

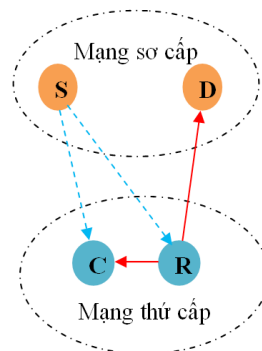
việc chia sẻ phổ, máy thu thứ cấp đóng vai trò là nút chuyển tiếp còn có thể thu năng lượng từ tín hiệu sơ cấp nhận được. Năng lượng thu được trong mạng vô tuyến nhận thức có tiềm năng là một nguồn năng lượng vô tận mà không cần nối với cáp bên ngoài hay thay thế pin định kì, hơn nữa còn cung cấp cơ hội khai thác đúng mức phổ tần số. Việc thu năng lượng dựa trên chính sách cảm biến phổ tối ưu nhằm tối đa hóa tổng thông lượng dự kiến dưới dạng quan hệ nhân quả năng lượng và các liên kết va chạm [4]. Trong [5], phân tích xác suất truyền của bộ phát thứ cấp và mức thu năng lượng cũng như trình bày về thiết kế tối ưu nguồn năng lượng tần số vô tuyến trong mạng vô tuyến nhận thức. Truyền thông tin và thu năng lượng diễn ra cùng một lúc trên các kênh không dây có khả năng cung cấp các tiện ích cao cho người sử dụng thiết bị di động. Tuy nhiên trên thực tế, việc thiết kế máy thu đòi hỏi những kỹ thuật về phần cứng, cụ thể là mạch thu năng lượng từ tín hiệu vô tuyến chưa thể giải mã các thông tin trực tiếp. Kiến trúc thiết kế cho việc thu năng lượng trong các hệ thống vô tuyến point-to-point cũng như hai phương pháp thu năng lượng là chuyển đổi thời gian (TSR) và phân chia theo năng lượng (PSR) đã được đề cập trong [6]. Hai phương pháp này đều nhằm mục đích cho phép giải mã thông tin và thu năng lượng tại nút chuyển tiếp. Trong TSR, nút chuyển tiếp dùng một số khe thời gian để thu năng lượng và số khe còn lại để xử lý thông tin, tùy thuộc vào điều kiện kênh. Trong PSR, các nút chuyển tiếp thu năng lượng từ một phần năng lượng sơ cấp nhận được, phần năng lượng còn lại dùng để giải mã thông tin và truyền đi. Người dùng thứ cấp SU có thể thu năng lượng cũng như truy cập phổ của người dùng sơ cấp. Tuy nhiên, hiệu suất của các SU có thể không hoàn toàn tốt như mong muốn. Đối với các hệ thống vô tuyến hợp tác, phương pháp truyền cho phép thu năng lượng vô tuyến và xử lý thông tin bắt buộc [7]. Trong những năm gần đây, các công trình nghiên cứu tập trung hơn vào việc hợp tác chặt chẽ trong các mạng vô tuyến, tức là giả sử tại nút nhận không có nhiễu do CSI [8]-[12], thêm vào đó việc thu năng lượng trong mạng vô tuyến cũng thu hút sự quan tâm của các nhà khoa học. [13] đề xuất thu năng

lượng và truyền tín hiệu nhận được từ nguồn đến đích, trong khi [14] phát triển giao thức thu năng lượng và truyền thông tin vô tuyến trong mạng chuyển tiếp. Hơn nữa, việc chia sẻ phổ trong mạng nhận thức chuyển tiếp hai chiều cũng được các tác giả đề xuất trong [15], [16].

Bài báo này phát triển giao thức thu năng lượng trong mạng vô tuyến nhận thức tại nút chuyển tiếp. Nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật DF cho việc thu năng lượng và truyền thông tin có sự ảnh hưởng của nhiễu do CSI. Các giao thức được đề xuất cho phép thu năng lượng trong mạng thứ cấp để chia sẻ phổ, hỗ trợ truyền sơ cấp mà không cần tốn thêm năng lượng của mạng thứ cấp. Hiệu năng của mô hình được đánh giá thông qua xác suất dừng. Mục tiêu của bài báo là tìm được biểu thức chính xác của xác suất dừng. Thông qua phân tích, bài báo có được biểu thức chính xác của xác suất dừng của cả hai mạng sơ cấp và thứ cấp. Kết quả mô phỏng cho thấy, giao thức được đề xuất đạt một hiệu suất tốt hơn so với truyền trực tiếp nếu có phân bố năng lượng phù hợp. Bài báo cũng đánh giá sự ảnh hưởng của hệ số phân bố năng lượng lên dung lượng truyền hệ thống.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Bài báo bắt đầu bằng việc mô tả kiến trúc cho việc thu năng lượng trong mạng vô tuyến nhận thức. Mô hình hệ thống được thể hiện như trong hình 1.



Hình 1. Mô hình thu năng lượng vô tuyến của nút chuyển tiếp trong mạng vô tuyến nhận thức. Nút nguồn S và nút đích D đại diện cho người dùng sơ cấp, nút chuyển tiếp R và nút vô tuyến nhận thức C đại diện cho người dùng thứ cấp.

2.1 Mô hình vô tuyến nhận thức thu năng lượng

Bài báo xem xét mô hình vô tuyến nhận thức bao gồm mạng sơ cấp và mạng thứ cấp, trong đó người dùng sơ cấp S muốn truyền tín hiệu của mình đến người dùng sơ cấp D. Bài báo này giả định rằng không tồn tại đường truyền trực tiếp từ S đến D, tức là D không nằm trong phạm vi truyền dẫn của S, do đó đòi hỏi nút chuyển tiếp nào đó sẽ tạo điều kiện giao tiếp giữa S và D. Trong mô hình mà bài báo đã đưa ra thì nút thứ cấp R sẽ đảm nhận vai trò đó. Ngoài việc sẵn sàng truyền dẫn sơ cấp thì nút chuyển tiếp R đồng thời còn có thông tin của mình dành cho người dùng thứ cấp khác là C. Giả sử rằng các kênh bất kì giữa hai nút truyền và nhận đều được mô hình hóa thông qua kênh fading Rayleigh phẳng và độc lập. Thông tin trạng thái kênh (CSI) luôn có sẵn tại nút nhận. Mỗi nút được trang bị một anten đơn và truyền theo chế độ bán song công. Cả hai nút thứ cấp R và C đều có khả năng thu năng lượng từ tín hiệu nhận được. Nút sơ cấp S phát tín hiệu đến nút thứ cấp R, tuy nhiên do tính chất quang bá không dây nên nút thứ cấp C cũng nhận được một phần tín hiệu do S gửi đến. Nút thứ cấp C sẽ phân chia năng lượng từ tín hiệu nhận được thành hai phần, một phần cho việc thu năng lượng vô tuyến và phần còn lại dùng để loại bỏ sự can nhiễu sơ cấp. Riêng về nút R, sau khi thu được một phần năng lượng từ tín hiệu sơ cấp mà S gửi đến, R sẽ dùng năng lượng đó để chuyển tiếp tín hiệu sơ cấp còn lại đến D và phát thông tin thứ cấp của mình đến C.

Đặt h_{SR} , h_{RD} biểu thị hệ số kênh tương ứng giữa S và R, R và D, g_{SC} và g_{RC} là hệ số kênh tương ứng giữa S và C, R và C. Với $h_{SR} \sim CN(0, \Omega_{SR})$, $h_{RD} \sim CN(0, \Omega_{RD})$, $g_{SC} \sim CN(0, \Omega_{SC})$, $g_{RC} \sim CN(0, \Omega_{RC})$; $|h_{SR}|^2$, $|h_{RD}|^2$, $|g_{SC}|^2$, $|g_{RC}|^2$ là các độ lợi công suất đáp ứng. Do h_{XY} là kênh truyền fading Rayleigh nên hàm mật độ phân bố xác suất của $|h_{XY}|^2$ sẽ có phân bố mũ và được cho bởi:

$$f_{XY}(x) = \lambda_{XY} e^{-\lambda_{XY} x} \quad (1)$$

Trong đó $\lambda_{XY} = E\{|h_{XY}|^2\} = d_{X,Y}^\beta d_{X,Y}^\alpha$, với $d_{X,Y}$ là khoảng cách từ X đến Y, β là hệ số suy hao kênh truyền, $XY = \{SR, RD, SC, RC\}$.

2.2 Giao thức thu năng lượng

Trong bài báo này, nút thứ cấp R đóng vai trò là nút chuyển tiếp tín hiệu từ nút sơ cấp S đến nút sơ cấp D. R sử dụng kỹ thuật giải mã - chuyển tiếp (decode and forward: DF) để thực hiện nhiệm vụ này. Kỹ thuật DF được biết đến như là kỹ thuật chuyển tiếp tái tạo, về cơ bản nó thực hiện xử lý số tín hiệu. Trong mô hình mạng vô tuyến nhận thức trên, R đóng vai trò như một bộ lặp (repeater) thông minh và giải mã/giải điều chế tín hiệu nhận được từ nút sơ cấp S. Tuy nhiên, quá trình xử lý tín hiệu số ở nút chuyển tiếp R chịu nhiều ảnh hưởng của hiệu năng truyền dẫn nút nguồn-nút chuyển tiếp. Nếu mã CRC không được sử dụng, việc giải mã tín hiệu thu từ nguồn đến đích sẽ không đạt hiệu quả tốt nhất. Rất khó để nút R giải mã tín hiệu mà không xảy ra lỗi và lỗi sẽ được tích lũy qua nhiều chặng, hay nói cách khác, chuyển tiếp hệ thống chịu ảnh hưởng của thông tin trạng thái kênh (channel state information: CSI). Cụ thể, cách thức hoạt động của DF hệ thống như sau:

Người dùng sơ cấp S có nguồn năng lượng cố định là P_S , trong khi nút R không có nguồn cung năng lượng cố định mà phải thu năng lượng từ tín hiệu nhận được để duy trì hoạt động. Như đã nói, S gửi tín hiệu sơ cấp đến R, đồng thời C cũng nhận được một phần tín hiệu từ S. Các tín hiệu mà R và C nhận được từ S có thể được biểu diễn bằng các công thức sau:

$$y_R = \sqrt{P_S} (h_{SR} + \Delta h_{SR}) x_D + n_R \quad (2)$$

$$y_C = \sqrt{P_S} g_{SC} x_D + n_C \quad (3)$$

với

+ y_R, y_C là tín hiệu nhận được tương ứng tại R và C,

+ x_D là tín hiệu sơ cấp mà S muốn gửi đến D,

+ n_R, n_C biểu thị nhiễu Gaussian hẹp do các anten đơn tại R và C gây ra,

$$n_R \sim CN(0, \sigma_R^2) \text{ và } n_C \sim CN(0, \sigma_C^2)$$

+ Δh_{SR} biểu thị sai số do ước lượng kênh với giá trị trung bình bằng 0 và phương sai là σ_{SR}^2

$$\Delta h_{SR} \sim CN(0, \sigma_{SR}^2)$$

Từ tín hiệu nhận được, nút R và nút C có thể thu lấy năng lượng cho mình. Cụ thể, α_R và α_C biểu thị tương ứng cho hệ số chia công suất dành cho việc thu năng lượng của R và C. Ta được biểu thức thu năng lượng của R và C như sau:

$$\sqrt{\alpha_R} y_R = \sqrt{P_S \alpha_R} (h_{SR} + \Delta h_{SR}) x_D + \sqrt{\alpha_R} n_R \quad (4)$$

$$\sqrt{\alpha_C} y_C = \sqrt{P_S \alpha_C} g_{SC} x_D + \sqrt{\alpha_C} n_C \quad (5)$$

Trong đó, $0 < \alpha_R < 1, 0 < \alpha_C < 1$.

Mục đích của hệ thống là thông qua R để gửi tín hiệu đến D. Nếu $\sqrt{\alpha_R} y_R$ là đại lượng được R dùng để thu năng lượng thì từ (2), bài báo có $\sqrt{1 - \alpha_R} y_R$ là phần tín hiệu còn lại từ tín hiệu sơ cấp mà R sẽ gửi đến D. Tất cả năng lượng mà R thu được của S sẽ được chuyển đổi thành năng lượng phát. Do đó,

$$P_R = \eta \alpha_R P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \quad (6)$$

$0 < \eta < 1$ là hiệu suất chuyển đổi năng lượng.

Trong toàn bộ năng lượng phát P_R , R dùng μP_R để chuyển tín hiệu sơ cấp còn lại đến D, và $(1 - \mu) P_R$ được dùng để truyền thông tin thứ cấp đến C (μ hệ số phần trăm thu năng lượng. Như vậy, sau khi thu năng lượng, tín hiệu phát đi tại R sẽ bao gồm phần tín hiệu truyền đến D và phần tín hiệu thứ cấp đến C, được cho bởi:

$$x_R = \varepsilon \sqrt{\mu P_R} (\sqrt{1 - \alpha_R} y_R + n_{R1}) + \sqrt{(1 - \mu) P_R} x_C \quad (7)$$

Trong đó:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{(1 - \alpha_R) (P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) + \sigma_R^2) + \sigma_{R1}^2}} \approx \frac{1}{\sqrt{(1 - \alpha_R) P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2)}} \quad (8)$$

+ ε là hệ số khuếch đại tín hiệu của R.

+ $n_{R1} \sim CN(0, \sigma_{R1}^2)$ biểu thị nhiễu Gauss trắng tại R.

+ x_C là thông tin thứ cấp gửi đến C.

Tại C, phần tín hiệu nhận được từ S là y_C và phần năng lượng thu được là $\sqrt{\alpha_C} y_C$. Phần tín hiệu còn lại $\sqrt{1 - \alpha_C} y_C$ được dùng để xử lý thông tin can nhiễu.

Tín hiệu truyền từ R đến C được viết như sau:

$$\begin{aligned} y_{RC} &= g_2 x_R + n_{C1} \\ &= \sqrt{(1 - \alpha_R) \mu P_R P_S} \varepsilon g_{RC} (h_{SR} + \Delta h_{SR}) x_D \\ &\quad + \sqrt{(1 - \alpha_R) \mu P_R} \varepsilon g_{RC} n_R \\ &\quad + \sqrt{(1 - \mu) P_R} g_{RC} x_C + n_{C1} + \sqrt{\mu P_R} \varepsilon g_{RC} n_{R1} \end{aligned} \quad (9)$$

$n_{C1} \sim CN(0, \sigma_{C1}^2)$ đại diện cho nhiễu tại C.

Do có sự can nhiễu từ tín hiệu x_D nên phần thông tin $\sqrt{1 - \alpha_C} y_C + n_{C2}$ sẽ được dùng để xử lý can nhiễu. Kết quả thu được:

$$\begin{aligned} y'_C &= \sqrt{(1 - \alpha_R) \mu P_R} \varepsilon g_{RC} n_R \\ &\quad + \sqrt{(1 - \mu) P_R} g_{RC} x_C + \sqrt{\mu P_R} \varepsilon g_{RC} n_{R1} \\ &\quad - (\sqrt{1 - \alpha_C} n_C + n_{C2}) \sqrt{\frac{\mu \eta \alpha_R}{1 - \alpha_C} \frac{g_{RC}}{g_{SC}}} (h_{SR} + \Delta h_{SR}) \end{aligned} \quad (10)$$

với $n_{C2} \sim CN(0, \sigma_{C2}^2)$ biểu thị nhiễu trắng tại C.

Trong trường hợp α_C khác 1, tức là C sẽ thực hiện xóa bỏ thông tin sơ cấp thì tỷ số công suất tín hiệu trên nhiễu SNR tại C được viết như sau:

$$\gamma_C = \frac{(1 - \mu) \eta \alpha_R P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) |g_{RC}|^2}{\sigma_{C2}^2 + \mu \eta \alpha_R |g_{RC}|^2 \left(\sigma_R^2 + \frac{\sigma_{R1}^2}{1 - \alpha_R} + P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \right)} \quad (11)$$

Trường hợp C dự trữ toàn bộ năng lượng và không thực hiện xóa can nhiễu thì SNR tại C được cho bởi:

$$\gamma_C = \frac{(1 - \mu) \eta \alpha_R P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) |g_{RC}|^2}{\sigma_{C1}^2 + \mu \eta \alpha_R |g_{RC}|^2 \left(\sigma_R^2 + \frac{\sigma_{R1}^2}{1 - \alpha_R} + \frac{(|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2)}{|g_{SC}|^2} \left(\sigma_C^2 + \frac{\sigma_{C2}^2}{1 - \alpha_C} \right) \right)} \quad (12)$$

Tại mỗi nút R và C đều có một anten đơn. Do công suất nhiễu anten nhỏ hơn rất nhiều so với nhiễu năng lượng nên giả định nhiễu anten

bằng 0. Do đó, $\sigma_R^2 = \sigma_C^2 = 0$ và để đơn giản, đặt $\sigma_{C1}^2 = \sigma_{R1}^2 = \sigma_{C2}^2 = \sigma_0^2$.

SNR cho nút thứ cấp C được viết lại như sau:

$$\gamma_C = \begin{cases} \frac{(1-\mu)\eta\alpha_R P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) |g_{SC}|^2 |g_{RC}|^2}{\sigma_0^2 |g_{SC}|^2 + \sigma_0^2 \mu \eta \alpha_R |g_{RC}|^2 \left(\frac{1}{1-\alpha_R} |g_{SC}|^2 + \frac{1}{1-\alpha_C} (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \right)}, \alpha_C \neq 1 \\ \frac{(1-\mu)\eta\alpha_R P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) |g_{RC}|^2}{\sigma_0^2 + \mu \eta \alpha_R |g_{RC}|^2 \left(\frac{\sigma_0^2}{1-\alpha_R} + P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) \right)}, \alpha_C = 1 \end{cases} \quad (13)$$

Tốc độ dữ liệu đạt được của người dùng thứ cấp C được biểu diễn bằng:

$$R_C = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_C) \quad (14)$$

Tại điểm thu sơ cấp D, tín hiệu nhận được từ R sẽ bao gồm phần tín hiệu sơ cấp từ S đã qua nút chuyển tiếp R và nhiễu. Cụ thể, tín hiệu nhận được có dạng:

$$\begin{aligned} y_D &= h_{RD} x_R + n_D \\ &= \sqrt{(1-\alpha_R) \mu P_R P_S} \varepsilon (h_{SR} + \Delta h_{SR}) h_{RD} x_D \\ &\quad + \sqrt{(1-\alpha_R) \mu P_R} \varepsilon h + \sqrt{(1-\mu) P_R} h_{RD} x_C \\ &\quad + n_D + \sqrt{\mu P_R} \varepsilon h_{RD} n_{R1} \end{aligned} \quad (15)$$

với $n_D \sim \text{CN}(0, \sigma_D^2)$ biểu thị cho nhiễu tại D.

Công suất tín hiệu trên nhiễu cộng SINR tại D để giải mã ra tín hiệu x_D như sau:

$$\gamma_D = \frac{\eta \alpha_R \mu P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) |h_{RD}|^2}{\eta \alpha_R |h_{RD}|^2 \left(\mu \sigma_R^2 + (1-\mu) P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) + \frac{\mu}{1-\alpha_R} \sigma_{R1}^2 \right) + \sigma_D^2} \quad (16)$$

Tốc độ dữ liệu tại D được cho bởi công thức:

$$R_D = \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_D) \quad (17)$$

Do $\sigma_D^2 = \sigma_{C1}^2 = \sigma_0^2$ nên γ_D được viết lại như sau:

$$\gamma_D = \frac{\eta \alpha_R \mu P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) |h_{RD}|^2}{(1-\mu) \eta \alpha_R P_S (|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2) |h_{RD}|^2 + \frac{\mu \eta \alpha_R}{1-\alpha_R} |h_{RD}|^2 \sigma_0^2 + \sigma_0^2} \quad (18)$$

C. Đánh giá hiệu năng hệ thống

Hiệu quả sử dụng năng lượng thu được đánh giá thông qua xác suất dừng. Trong phần này, bài báo tiến hành phân tích xác suất dừng của các nút D và C.

Xác suất dừng được định nghĩa là xác suất mà giá trị tỷ lệ công suất tín hiệu trên

nhiều nhận được tại nút nhận nhỏ hơn một giá trị ngưỡng cho trước. Nói một cách khác, nút nhận sẽ không thể giải mã thành công dữ liệu nếu SNR tại nút đó nhỏ hơn giá trị ngưỡng. Ngược lại thì nút nhận sẽ giải mã được dữ liệu.

Trong bài báo này, xác suất dừng P_{out} được cho bởi:

$$P_{out}(R_i < Y_i) = P(\gamma_i < \gamma_{th}) = \int_0^{\gamma_{th}} \text{Pr}(\gamma_i) d\gamma_i = \text{Pr}(\gamma_{th})$$

với Y_i là tỷ lệ mục tiêu đặt ra. $i = \{D, C\}$.

γ_{th} là ngưỡng SNR mà tại đó thỏa mãn chất lượng dịch vụ.

Đặt

$$\chi = \mu \eta \alpha_R P_S / \sigma_0^2, \psi = (1-\mu) \eta \alpha_R P_S / \sigma_0^2,$$

$$\delta = \mu \eta \alpha_R / (1-\alpha_R), \nu = \mu \eta \alpha_R / (1-\alpha_C),$$

$$\theta_1 = |h_{SR}|^2, \theta_2 = |h_{RD}|^2, \theta_3 = |g_{SC}|^2, \theta_4 = |g_{RC}|^2,$$

$$\tau_1 = 1/d_{SR}^3, \tau_2 = 1/d_{RD}^3, \tau_3 = 1/d_{SC}^3, \tau_4 = 1/d_{RC}^3.$$

Từ (18), ta được:

$$\gamma_D = \frac{\chi(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_2}{\psi(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_2 + \delta\theta_2 + 1} \quad (19)$$

$$\gamma_D \rightarrow \frac{\mu}{1-\mu} \text{ khi } P_S \rightarrow \infty (*)$$

Mệnh đề 1: Xác suất dừng cho người dùng sơ cấp D và người dùng thứ cấp C khi C không thực hiện xóa can nhiễu sơ cấp.

$$P_{out}^D = \text{Pr}(\gamma_D < \gamma_{th}) = 1$$

$$\text{nếu } \gamma_{th} > \chi / \psi = \frac{\mu}{1-\mu} \quad (20)$$

điều này luôn xảy ra do (*).

$$\text{Nếu } \gamma_{th} < \chi / \psi = \frac{\mu}{1-\mu} \text{ thì theo định}$$

nghĩa về hàm phân phối xác suất và mật độ (PDF và CDF) đã được định nghĩa trong [13], xác suất dừng của SNR tại C được cho bởi công thức sau:

$$\begin{aligned} P_{out}^C &= F_{\gamma_D}(\gamma_{th}) = \text{Pr}(\gamma_D < \gamma_{th}) \\ &= \text{Pr}(\gamma_D < \frac{\mu}{1-\mu}) = \int_0^{\frac{\mu}{1-\mu}} \text{Pr}(\gamma_D) d\gamma_D = \text{Pr}(\gamma_{th}) \\ &= 1 - \exp \left\{ -\frac{\gamma_{th} \delta}{\tau_1 (\chi - \psi \gamma_{th})} \right\} \sqrt{\frac{4\gamma_{th}}{\tau_1 \tau_2 (\chi - \psi \gamma_{th})}} {}_2X_1 \left\{ \sqrt{\frac{4\gamma_{th}}{\tau_1 \tau_2 (\chi - \psi \gamma_{th})}} \right\} \end{aligned} \quad (21)$$

trong đó hàm Bessel $K_n(\cdot)$ được định nghĩa trong [17].

Tương tự, bài báo xác định các biểu thức xác suất dừng cho C như sau:

$$P_{out}^C = \Pr(\gamma_C < \gamma_{th}) \quad (22)$$

$$\gamma_C = \frac{\psi(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_4}{\chi(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_4 + \delta\theta_4 + 1} \quad (23)$$

khi C không thực hiện loại bỏ nhiễu sơ cấp, tức là $\alpha_C = 1$.

Từ đó ta được $\gamma_C \rightarrow \frac{1-\mu}{\mu}$.

Khi $\gamma_{th} \geq \frac{1-\mu}{\mu}$, nhận thấy $P_{out}^C = 1$ (24)

Quan sát những biểu thức trên, bài báo thấy rằng P_{out}^D tăng, P_{out}^C giảm khi μ giảm.

Mệnh đề 2: Xác suất dừng của C khi C thực hiện loại bỏ can nhiễu sơ cấp.

Trong công thức (15) khi $\alpha_C \neq 1$, bài báo có:

$$\gamma_C = \frac{\psi(|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2)|g_{SC}|^2|g_{RC}|^2}{|g_{SC}|^2 + \delta|g_{SC}|^2|g_{RC}|^2 + \nu(|h_{SR}|^2 + \sigma_{SR}^2)|g_{RC}|^2} = \frac{\psi(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_3\theta_4}{\theta_3 + \delta\theta_3\theta_4 + \nu(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_4} \quad (25)$$

Theo định nghĩa về CDF, tương tự [9], bài báo có:

$$F_{\gamma_C}(\gamma_{th}) = \Pr\left(\frac{\psi(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_3\theta_4}{\theta_3 + \delta\theta_3\theta_4 + \nu(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_4} \leq \gamma_{th}\right) = \Pr[(\psi\theta_4 - \nu\gamma_{th})(\theta_1 + \sigma_{SR}^2)\theta_4 \leq \gamma_{th}\theta_3(1 + \delta\theta_4)] = \Pr\left(\theta_1 + \sigma_{SR}^2 \leq \frac{\gamma_{th}\theta_3(1 + \delta\theta_4)}{\theta_4(\psi\theta_3 - \nu\gamma_{th})} \middle| \theta_3 > \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) \Pr\left(\theta_3 > \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) + \Pr\left(\theta_1 + \sigma_{SR}^2 \geq \frac{\gamma_{th}\theta_3(1 + \delta\theta_4)}{\theta_4(\psi\theta_3 - \nu\gamma_{th})} \middle| \theta_3 < \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) \Pr\left(\theta_3 < \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) = \Pr\left(\theta_1 + \sigma_{SR}^2 \leq \frac{\gamma_{th}\theta_3(1 + \delta\theta_4)}{\theta_4(\psi\theta_3 - \nu\gamma_{th})} \middle| \theta_3 > \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) \Pr\left(\theta_3 > \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) + \Pr\left(\theta_3 \leq \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) \quad (26)$$

Ta lại có:

$$\Pr\left(\theta_1 + \sigma_{SR}^2 \leq \frac{\gamma_{th}\theta_3(1 + \delta\theta_4)}{\theta_4(\psi\theta_3 - \nu\gamma_{th})} \middle| \theta_3 > \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) = \int_0^{\frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}} \int_0^{\frac{\gamma_{th}\theta_3(1 + \delta\theta_4)}{\theta_4(\psi y - \nu\gamma_{th})}} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{th}y(1 + n\zeta)}{\tau_3}\right)\right] \times \frac{1}{\tau_3} \exp\left(-\frac{y}{\tau_3}\right) \frac{1}{\tau_4} \exp\left(-\frac{z}{\tau_4}\right) dy dz = \int_0^{\frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}} \frac{1}{\tau_3} \exp\left(-\frac{z}{\tau_4}\right) \int_0^{\frac{\gamma_{th}\theta_3(1 + n\zeta)}{\theta_4(\psi y - \nu\gamma_{th})}} \frac{1}{\tau_3} \exp\left(-\frac{y}{\tau_3} - \frac{\nu\gamma_{th}^2(1 + n\zeta)}{\psi z \tau_1(\psi y - \nu\gamma_{th})}\right) dy dz \quad (27)$$

Tiếp tục đặt:

$$\mathfrak{R}_1 = \exp\left\{-\frac{\nu\gamma_{th}}{\psi\tau_3}\right\} \quad (28)$$

$$\mathfrak{R}_2 = \int_0^{\frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}} \frac{1}{\psi\tau_3\tau_4} \exp\left\{-\left[\frac{\nu\gamma_{th}}{\psi\tau_3} + \frac{\gamma_{th}(1+n\zeta)}{\psi z \tau_1} + \frac{z}{\tau_4}\right]\right\} \times \sqrt{\frac{4\nu\gamma_{th}^2\tau_3(1+n\zeta)}{z\tau_1}} K_1\left\{\sqrt{\frac{4\nu\gamma_{th}^2(1+n\zeta)}{\psi^2 z \tau_1 \tau_3}}\right\} dz \quad (29)$$

Nhận thấy:

$$\begin{cases} \Pr\left(\theta_3 > \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) = \exp\left\{-\frac{\nu\gamma_{th}}{\psi\tau_3}\right\} = \mathfrak{R}_1 \\ \Pr\left(\theta_3 \leq \frac{\nu\gamma_{th}}{\psi}\right) = 1 - \exp\left\{-\frac{\nu\gamma_{th}}{\psi\tau_3}\right\} = 1 - \mathfrak{R}_1 \end{cases} \quad (30)$$

Từ những nhận định trên, biểu thức xác suất dừng cho SNR tại C khi C thực hiện loại bỏ can nhiễu sơ cấp có dạng:

$$P_{out}^C = 1 + \mathfrak{R}_1^2 - \mathfrak{R}_1\mathfrak{R}_2 - \mathfrak{R}_1 \quad (31)$$

3. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

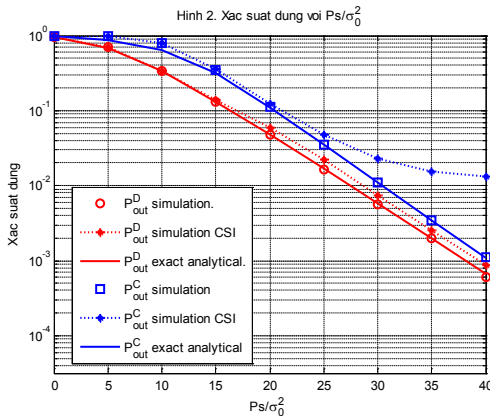
Trong phần này, phương pháp mô phỏng Monte-Carlo được sử dụng để kiểm chứng tính đúng đắn của các biểu thức xác suất dừng đã đề xuất theo ảnh hưởng của đại lượng có trong biểu thức. Bên cạnh đó, sự ảnh hưởng của α_R lên dung lượng Ergodic của D và C cũng được xét đến.

Trong hình 2, xác suất dừng của người dung sơ cấp D và người dùng thứ cấp C được biểu diễn thông qua các giá trị SNR khi có và không có sự ảnh hưởng của nhiễu do CSI, $\sigma_{SR}^2 = 0.1$. Giá trị xác suất dừng khi có mặt nhiễu sẽ lớn hơn giá trị xác suất dừng khi không có mặt nhiễu. Thêm nữa, người dùng sơ cấp D sẽ chịu ảnh hưởng của nhiễu do CSI nhiều hơn người dùng thứ cấp C.

Dựa vào giá trị μ , nút chuyển tiếp R sẽ dùng một phần năng lượng thu của mình để duy trì việc quảng bá thông tin phát đi từ bên sơ cấp S và sử dụng một lượng $1-\mu$ để phát thông tin cho bên thứ cấp C. Trong hình 3, nhận thấy rằng khi μ tăng thì xác suất dừng của bên sơ cấp D giảm còn bên thứ cấp C tăng, bởi vì với giá trị nhỏ hơn μ , có sự suy hao công suất để truyền thông tin sơ cấp. Khi $\mu < 0.74$, giao thức được đề xuất đạt được xác suất dừng bằng 1.

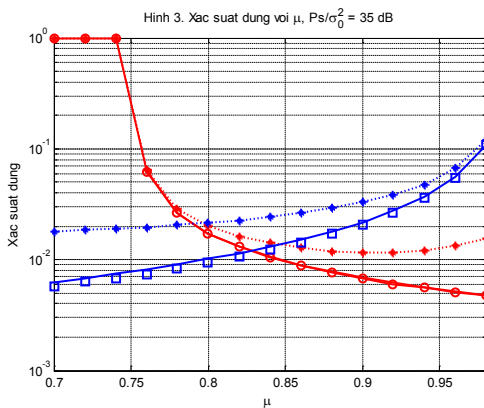
Dung lượng ergodic của C trên kênh fading Rayleigh được cho bởi:

$$C_S = E_{|h_1|^2, |g_1|^2, |g_2|^2} \left\{ \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_C) \right\} \quad (32)$$



Hình 2. Biểu diễn xác suất dừng theo P_S / σ_0^2

tại $d_{SR} = 1/2$, $d_{RD} = 1/4$, $\gamma_{th} = 1$



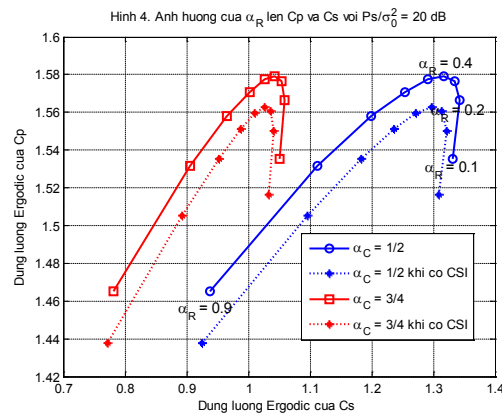
Hình 3. Xác suất dừng theo tỉ lệ phân trăm thu năng lượng μ .

Dung lượng ergodic của nút sơ cấp D được tính với

$$C_P = E_{|h_1|^2, |g_1|^2, |g_2|^2} \left\{ \frac{1}{2} \log_2 (1 + \gamma_D) \right\} \quad (33)$$

Dựa trên công thức (32) và (33), thấy rằng α_C chỉ ảnh hưởng đến dung lượng ergodic của mạng sơ cấp, tuy nhiên, hệ số phân chia

công suất α_R của nút chuyển tiếp R có ảnh hưởng quan trọng đến cả C_P và C_S . Hình 4 đánh giá sự ảnh hưởng của α_R lên C_P và C_S . C_P tăng khi α_R giảm từ 0.9 xuống 0.4 nhưng sau đó nó lại giảm khi α_R giảm dưới 0.4. Giá trị tối ưu của α_R cho bên sơ cấp là 0.4, bên thứ cấp là 0.2, bởi vì α_R là nhỏ trong suy hao công suất truyền dẫn, còn khi α_R lớn sẽ gây suy hao công suất cho thông tin sơ cấp. Dung lượng C_P khi có mặt nhiễu do CSI sẽ nhỏ hơn dung lượng C_P khi không có mặt nhiễu.



Hình 4. Đánh giá sự ảnh hưởng của α_R lên C_P và C_S .

4. KẾT LUẬN

Bài báo này đã phát triển giao thức thu năng lượng tại nút chuyển tiếp trong mạng vô tuyến nhận thức. Nút chuyển tiếp sử dụng kỹ thuật DF dưới sự ảnh hưởng của nhiễu do CSI. Sau khi phân tích, bài báo có được biểu thức dừng chính xác cho mạng sơ cấp và mạng thứ cấp. Trong phần kết quả mô phỏng, dùng phương pháp mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng các biểu thức đã đề xuất. Bài báo cũng cho thấy sự ảnh hưởng của hiệu năng cấp phát lên dung lượng của mạng sơ cấp và thứ cấp.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [2] J. Mitola, G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," IEEE Pers. Commun, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [3] Z. Qing, B. M. Sadler, "A Survey of Dynamic Spectrum Access", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, pp. 79-89, 2007.
- [4] S. Park, H. Kim, and D. Hong, "Cognitive Radio Networks with Energy Harvesting," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 3, pp. 1386– 1397, Mar. 2013.

- [5] S. Lee, R. Zhang, and K. K. Huang, “*Opportunistic Wireless Energy Harvesting in Cognitive Radio Networks*,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 9, pp. 4788–4799, Sept. 2013.
- [6] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, “*Wireless Information and Power Transfer: Architecture Design and Rate-Energy Tradeoff*,” Available: <http://arxiv.org/abs/1205.0618>, May 2012.
- [7] Z. Ding, S. M. Perlaza, I. Esnaola, and H. V. Poor, “*Power Allocation Strategies in Energy Harvesting Wireless Cooperative Networks*,”
- [8] T Himsoon, W Su, K Liu, “*Differential transmission for amplify-and-forward cooperative communications*”, IEEE Signal Process. Lett.12, 597–600 (2005).
- [9] T Himsoon, W Siritwongpairat, W Su, K Liu, “*Differential modulation with threshold-based decision combining for cooperative communications*”, IEEE Trans. Signal Process. 55, 3905–3923 (2007).
- [10] Q Zhao, H Li, Differential modulation for cooperative wireless systems. IEEE Trans. Signal Process. 55, 2273–2283 (2007).
- [11] Q Zhao, H Li, P Wang, *Performance of cooperative relay with binary modulation in Nakagami-m fading channels*. IEEE Trans. Veh. Technol. 57, 3310–3315 (2008).
- [12] D Chen, J Laneman, *Modulation and demodulation for cooperative diversity in wireless systems*. IEEE Trans. Wireless Commun. 5, 1785–1794 (2006).
- [13] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, “*Relaying Protocols for Wireless Energy Harvesting and Information Processing*,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 7, pp. 3622–3636, July 2013.
- [14] Zihao Wang, Zhiyong Chen, Ling Luo, Zixia Hu, Bin Xia, Hui Liu, “*Outage Analysis of Cognitive Relay Networks with Energy Harvesting and Information Transfer*”, Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on, Pages: 4348 – 4353, 2014.
- [15] Q. Li, S. H. Ting, A. Pandharipande, and Y. Han, “*Cognitive Spectrum Sharing with Two-way Relaying Systems*,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 3, pp. 1233–1240, Mar. 2011.
- [16] Y. Li, M. Peng, and W. Wang, “*Spectrum Sharing in Cognitive Two-Way Relay Networks*,” in Proc. IEEE GLOBECOM, Dec. 2012.
- [17] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1991.