Tối ưu thông lượng mạng chuyển tiếp AF hai chiều với phần cứng không lý tưởng cho truyền năng lượng vô tuyến

Throughput Optimization in Two-Way AF Relaying Networks under Non-ideal Hardware for Wireless Energy Transfer

Đỗ Đình Thuấn

Abstract: *In this paper, we investigate the performance of energy harvesting enabled two-way relaying network (TWRN) with amplify- and- forward (AF) protocol. Particularly, this paper also determines effect of hardware impairments on the outage probability and the throughput. To evaluate harvested energy efficiency, we propose energy harvesting policies at relay node and destination node, namely time switching imperfect relay (TSIR), time switching imperfect source (TSIS). Finally, the numerical and simulation results provide practical insights into the impact of transmitted power, level of hardware impairments and energy harvesting time factors on the performance of energy enabled two-way relaying network.*

Keywords*: time switching imperfect relay, time switching imperfect source, energy harvesting, two-way relaying network*

I. GIỚI THIỆU

Gần đây, khái niệm truyền thông xanh đã thu hút các nhà nghiên cứu, nhất là trong các ứng dụng mạng truyền năng lượng vô tuyến [1]. Ngoài ra, nguồn năng lượng vô tuyến có thể thu nhận nhờ năng lượng mặt trời, gió, sự chuyển động hay một vài hiện tượng vật lý khác. Trong các nguồn tín hiệu đó, sóng RF thực hiện truyền dẫn đồng thời thông tin và năng lượng được xem là kỹ thuật hứa hẹn trong các mạng ràng buộc năng lượng như mạng cảm biến không dây, mạng WLAN, thiết bị cầm tay mạng thông tin di động. Trước đây, các năng lượng thu được qua tần số vô tuyến RF đã ứng dụng trong công nghệ RFID. Về nguyên lý, năng lượng thu qua đường vô tuyến tạo ra dòng điện DC cung cấp cho các khối nguồn của thiết bị vô tuyến đặt ở những vị trí không thuận lợi về việc cung cấp nguồn điện, chẳng hạn như các bộ cảm biến vô tuyến đặt trên đường, hay đặt trên núi cao và các địa hình xa xôi hiểm trở khác. Nhờ thu năng lượng vô tuyến này, các thiết bị kéo dài thời gian hoạt động, đảm bảo sự thông suốt dịch vụ hay các ứng dụng mà thiết bị đang cung cấp. Ngay trong mạng thông tin di động phổ biến hiện nay, các thiết bị điện thoại cầm tay trở nên nhanh chóng cạn kiệt nguồn pin khi sử dụng ngày càng nhiều hơn các ứng dụng đa phương tiện. Trong khi đó, nhờ áp dụng nguyên lý mạng chuyển tiếp (mạng chuyển tiếp), các nút trung gian khuếch đại tín hiệu và truyền tín hiệu đến đích giúp mở rộng vùng phủ sóng, cải thiện chất lượng tín hiệu ở vùng biên của trạm thu phát sóng mạng di động hay của thiết bị phát sóng WiFi [2]. Kết hợp mạng chuyển tiếp này với công nghệ truyền năng lượng vô tuyến giúp cải thiện hiệu suất sử dụng và tăng khả năng chia sẻ năng lượng trong các phần tử cùng mạng lưới.

Đặc biệt, trong các loại mạng chuyển tiếp có loại mạng sử dụng tối ưu băng thông truyền dẫn bằng cách truyền tín hiệu song hướng đồng thời, hay còn gọi là mạng chuyển tiếp hai chiều TWRN (Two-way relaying network). Nút chuyển tiếp trung gian trong mạng TWRN được giả sử không có nguồn điện cố định mà năng lượng chủ yếu được thu qua tín hiệu RF từ nút nguồn và đích trong tuyến kết nối của nó. Điểm đặc biệt là các nút trung gian giới hạn về năng lượng

này có thể thu năng lượng và phát thông tin đồng thời.

Gần đây trong công bố [3], các tác giả đã trình bày cách kết hợp tối ưu công suất và cách thức chọn nút trung gian giúp cực đại hóa thông lượng của mạng chuyển tiếp dùng giao thức khuếch đại và chuyển tiếp AF (Amplify-and-Forward) với việc truyền năng lượng vô tuyến cấp cho nút trung gian. Ngoài ra, trong [4] các tác giả phân tích mạng vô tuyến nhận thức, nguyên lý chuyển tiếp tối ưu cho việc cực đại hóa thông lượng của người dùng thứ cấp được cấp nguồn nhờ năng lượng vô tuyến. Các vấn đề về ảnh hưởng tốc độ - năng lượng giữa dung lượng dừng cực đại và năng lượng thu được tối ưu của người dùng thứ cấp được nghiên cứu trong [5]. Đặc biệt hơn trong [6], tác giả trình bày bài toán mạng chuyển tiếp có các phần tử thu nguồn năng lượng từ chính tín hiệu nhiễu đồng kênh. Tác giả trong bài báo này cũng đã đưa ra biểu thức phân tích cho dung lượng dừng dựa trên hàm mật độ xác suất của tỉ số tín hiệu trên nhiễu trên mỗi chặng trong mạng chuyển tiếp. Để so sánh ưu/ nhược điểm của hai giao thức AF và giao thức giải mã và chuyển tiếp DF (Decode-and-Forward) trong mạng chuyển tiếp truyền dẫn song công và bán song công được tính toán, phân tích qua việc chia thời gian thu tín hiệu tối ưu. Bên cạnh đó, các giao thức chuyển tiếp dựa trên chuyển mạch thời gian TSR (time switching-based relaying) và giao thức chuyển tiếp dựa trên phân chia công suất PSR (power splitting-based relaying) áp dụng trong mạng thu năng lượng vô tuyến và xử lý thông tin trình bày chi tiết trong [7].

Tuy nhiên, trong phần lớn các nghiên cứu trước đây [8-14], các tác giả chỉ trình bày các mạng chuyển tiếp dựa trên giả thiết mạng dùng phần cứng lý tưởng. Trong hầu hết các thiết bị vô tuyến thực tế đều bị các ảnh hưởng suy giảm do phần cứng, như nhiễu pha, mất cân bằng bộ điều chế vuông pha, khuếch đại công suất phi tuyến [15]. Theo khảo sát của tác giả, chưa có công bố nào đánh giá suy giảm phẩm chất phần cứng trong mạng chuyển tiếp dùng truyền năng lượng vô tuyến. Các yếu tố suy giảm chất lượng phần cứng này thường thấy trong các thiết bị vô tuyến giá thành rẻ và cụ thể hơn, suy giảm này sẽ làm ảnh hưởng đến việc giảm phẩm chất toàn hệ thống qua các tham số như dung lượng, thông lượng và tốc độ lỗi kí tự SER (symbol error rate). Trong bài báo này, chúng tôi phân tích chất lượng mạng chuyển tiếp hai chiều dùng giao thức AF dưới ảnh hưởng suy giảm phẩm chất phần cứng. Giao thức AF được chọn như là mạng có nút trung gian chỉ khuếch đại tín hiệu thu mà không cần giải mã tín hiệu.

Trong phạm vi nghiên cứu này, bài báo trình bày giao thức chuyển tiếp dựa trên chuyển mạch thời gian TSR (Time Switching based Relay) được áp dụng trong hai trường hợp của suy giảm phẩm chất phần cứng xét tại nút trung gian và nút đích và được gọi là: i) giao thức chuyển mạch thời gian cho máy thu nút trung gian không hoàn hảo TSIR (time switching imperfect relay), ii) giao thức chuyển mạch thời gian cho máy thu nút đích không hoàn hảo TSIS (time switching imperfect source). Bài báo đưa ra công thức tính gần đúng cho tỉ số tín hiệu trên nhiễu và méo tín hiệu SNDR (signal to noise and distortion ratio).

Phần còn lại của bài báo trình bày tín hiệu và mô hình hệ thống mạng chuyển tiếp AF hai chiều trong Phần II. Các biểu thức cho tính gần đúng của tỉ số SNDR được chứng minh trong Phần III. Kế tiếp, Phần IV đưa ra công thức cho xác suất dừng và thông lượng tối ưu được tính dựa trên hàm xác suất của SNDR đã phân tích. Các kết quả mô phỏng và biện luận được nêu ra trong Phần V và một số ý thảo luận cho kết luận trong phần cuối cùng.

II. TÍN HIỆU VÀ MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Bài báo này xem xét mạng chuyển tiếp hai chiều với các nút mạng dùng đơn anten phát. Mạng TWRN bao gồm 2 nút nguồn (A và B) không có khả năng truyền dẫn trực tiếp mà chỉ thu và phát tín hiệu đến đầu xa thông qua nút trung gian (R). Nút trung gian dùng năng lượng có được nhờ thu được từ nút nguồn để khuếch đại và chuyển tiếp tín hiệu đến nút đích.

Trong bài báo này sử dụng các giả thiết như sau:

- Thông tin trạng thái kênh CSI (channel state information) được ước lượng hoàn hảo ở phía thu

nhờ số lượng bit nhỏ dành cho chuỗi huấn luyện và hiệu suất băng thông dành cho tín hiệu có ích thỏa mãn yêu cầu chất lượng mạng vô tuyến.

- Giả sử rằng chỉ có nút trung gian không có nguồn điện riêng và chỉ dùng năng lượng thu qua sóng RF trong pha thứ nhất cho việc xử lý thông tin trong pha thứ hai vì nút này thường đặt nơi thiếu điều kiện vật chất về nguồn điện.
- Các ảnh hưởng suy giảm phần cứng có thể đo được, kí hiệu là τ_A, τ_R ở nút nguồn và đích tương ứng.
- Các kênh trong mạng TWRN là kênh fading chậm và phẳng về tần số, các hệ số kênh truyền là kênh fading Rayleigh độc lập và các kênh không đổi trong thời gian xét T.

Trong mô hình tổng quát của các hệ thống vô tuyến, tín hiệu thu ở nút trung gian và nút đích thường mô tả bằng biểu thức sau

$$y_R(t) = h_i x_i(t) + v_R(t) + n_R(t), \quad i = A, B \qquad (1)$$

và

$$y_i(t) = h_i x_R(t) + v_i(t) + n_i(t), \quad i = A, B \qquad (2)$$

trong đó h_i là kênh truyền fading Rayleigh và n_i là nhiễu Gaussian, t là chỉ số thời gian, v_i là méo tín hiệu do suy giảm phẩm chất phần cứng trong các thiết bị thu phát vô tuyến. Bài báo này đánh giá ảnh hưởng của suy giảm do phần cứng trên cả nút đích và nút trung gian (gọi là nút đích không hoàn hảo, và nút trung gian không hoàn hảo). Kí hiệu h_A, h_B như là các hệ số kênh từ nút A đến nút trung gian R và nút B đến nút R tương ứng và $\Omega_i = \mathbb{E}_{h_i}\left\{|h_i|^2\right\}$ là độ lợi kênh trung bình, hay $h_i \sim \mathrm{CN}(0, \Omega_i), i = A, B$. Biểu thức sau trình bày hàm mật độ xác suất PDF (probability density function) và hàm mật độ tích lũy CDF (cumulative density function) tương ứng của kênh truyền fading Rayleigh phân bố theo hàm mũ [16]

$$f_{|h_i|^2}(x) = \frac{1}{\Omega_i} e^{-\frac{x}{\Omega_i}}, \quad x \geq 0 \qquad (3)$$

$$F_{|h_i|^2}(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\Omega_i}}, \quad x \geq 0 \qquad (4)$$

III. CHÍNH SÁCH THU NĂNG LƯỢNG CHO CÁC NÚT MẠNG CÓ PHẦN CỨNG KHÔNG LÝ TƯỞNG

III.1. Giao thức TSIR

Trong TSIR, nút trung gian dùng một phần khung thời gian tín hiệu cho việc thu năng lượng, phần khung thời gian còn lại cho xử lý thông tin. Khung thời gian tín hiệu dài T chia thành 3 giai đoạn sau:

- Giai đoạn đầu tiên, αT dành cho nút trung gian thu năng lượng từ các nút nguồn, trong đó α là hệ số tỉ lệ thời gian. Mạng chuyển tiếp không thu năng lượng vô tuyến tương ứng với trường hợp $\alpha = 0$.
- Giai đoạn 2, $(1-\alpha)T/2$ là thời gian cho phát thông tin từ nút nguồn đến nút trung gian.
- Giai đoạn sau cùng thời gian dành cho truyền thông tin đã khuếch đại từ nút trung gian đến nút đích là $(1-\alpha)T/2$.

Kí hiệu P_A, P_B tương ứng là công suất phát từ 2 nút nguồn A, B. Năng lượng vô tuyến thu qua sóng RF sẽ tạo ra dòng điện DC dẫn đến sạc cho acquy hay khối nguồn của thiết bị ở nút trung gian. Nguồn năng lượng thu được này được tính bằng

$$E_h = \eta\left(P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2\right)\alpha T, \qquad (5)$$

trong đó $0 < \eta \leq 1$ là hiệu suất chuyển đổi năng lượng phụ thuộc nguyên lý mạch nắn điện và cấu tạo mạch thu năng lượng. Vì thế, công suất phát ở nút trung gian sẽ là

$$P_R = \frac{E_h}{(1-\alpha)T/2} = \left(P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2\right)\frac{2\eta\alpha}{1-\alpha} \qquad (6)$$

Trong TSIR, giả sử ảnh hưởng suy giảm phẩm chất phần cứng chỉ diễn ra ở nút trung gian, nên tín hiệu

thu ở nút trung gian có thể mô tả bằng biểu thức sau

$$y_R(t) = \sqrt{P_A} h_A x_A(t) + \sqrt{P_B} h_B x_B(t) + v_R(t) + n_R(t), \quad (7)$$

Trong đó h_A, h_B kí hiệu là kênh fading Rayleigh giữa nút nguồn A, B và nút trung gian tương ứng, v_R là thành phần méo tín hiệu do suy giảm phẩm chất phần cứng trong thiết bị của nút trung gian, $v_R \sim CN\left(0, \tau_R^2\left(P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2\right)\right)$.

Tín hiệu sau khi thu được ở nút trung gian sẽ được khuếch đại với độ lợi biến đổi là:

$$G^{-2} = \left(P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2\right)\left(1+\tau_R^2\right) + \sigma^2 \quad (8)$$

Dựa trên nguyên lý mạng TWRN, tín hiệu thu ở hai nút nguồn lần lượt là (để cho đơn giản trong kí hiệu từ phần này trở về sau kí hiệu thời gian t được lược bỏ):

$$\begin{aligned} y_A &= \sqrt{P_R} h_A G\left(\sqrt{P_A} h_A x_A + \sqrt{P_B} h_B x_B + v_R + n_R\right) + n_A \\ &= \sqrt{P_R}\sqrt{P_A} G|h_A|^2 x_A + \sqrt{P_R}\sqrt{P_B} h_A h_B G x_B + \\ &+ \sqrt{P_R} G h_A v_R + \sqrt{P_R} G h_A n_R + n_A, \end{aligned} \quad (9)$$

và

$$\begin{aligned} y_B &= \sqrt{P_R} h_B G\left(\sqrt{P_A} h_A x_A + \sqrt{P_B} h_B x_B + v_R + n_R\right) + n_B \\ &= \sqrt{P_R}\sqrt{P_B} G|h_B|^2 x_B + \sqrt{P_R}\sqrt{P_A} h_A h_B G x_A + \\ &+ \sqrt{P_R} G h_B v_R + \sqrt{P_R} G h_B n_R + n_B. \end{aligned} \quad (10)$$

Bởi vì mỗi nút nguồn biết được tín hiệu phát của chính nó và nhờ có thông tin trạng thái kênh truyền (CSI) được ước lượng chính xác nên tại bộ thu nút nguồn sẽ loại bỏ được thành phần tự nhiễu như $\sqrt{P_R} G|h_A|^2 x_A, \sqrt{P_R} G|h_B|^2 x_B$ trong (9), (10) tương ứng, giả sử mức nhiễu ở các nút mạng tương đương nhau và phương sai nhiễu bằng σ^2. Đáng chú ý là tín hiệu thu ở mỗi nút nguồn trong mạng TWRN có biểu diễn biểu thức toán tương tự như nhau. Để đơn giản, trong bài báo này chỉ trình bày tính toán SNDR ở nút nguồn A như sau

$$\begin{aligned} \gamma_A &= \frac{P_R P_B G^2 |h_A|^2 |h_B|^2}{P_R G^2 |h_A|^2 \left(P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2\right)\tau_R^2 + \\ &+ \sigma^2 G^2 P_R |h_A|^2 + \sigma^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Trong trường hợp mạng dùng thiết bị phần cứng lý tưởng ở nút trung gian, SNDR sẽ được biểu diễn bằng [17]

$$\gamma_A = \frac{P_R P_B G^2 |h_A|^2 |h_B|^2}{\sigma^2\left(P_R G^2 |h_A|^2 + 1\right)} \quad (12)$$

Thay giá trị của P_R từ (5) vào (11), biểu thức SNDR được viết lại ở dạng

$$\begin{aligned} \gamma_A &= \frac{P_B |h_A|^2 |h_B|^2}{|h_A|^2\left(P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2\right)\tau_R^2 + |h_A|^2\sigma^2 + \\ &+ \sigma^2\left(1+\tau_R^2\right)\frac{1-\alpha}{2\eta\alpha} + \frac{\sigma^4}{P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2}\frac{1-\alpha}{2\eta\alpha} \end{aligned} \quad (13)$$

Việc tính xác suất dừng bằng công thức toán chính xác dựa trên biểu thức (13) rất phức tạp, nên để đơn giản trong tính toán, bỏ qua thành phần rất nhỏ $\frac{\sigma^4}{P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2}\frac{1-\alpha}{2\eta\alpha} \approx 0$ (khi SNR cao) nên biểu thức gần đúng để biểu diễn SNDR là:

$$\begin{aligned} \gamma_A^* &= \frac{P_B |h_A|^2 |h_B|^2}{|h_A|^2\left(P_A|h_A|^2 + P_B|h_B|^2\right)\tau_R^2 + |h_A|^2\sigma^2 + \\ &+ \sigma^2\left(1+\tau_R^2\right)\frac{1-\alpha}{2\eta\alpha}} \\ &= \frac{|h_A|^2 |h_B|^2}{\tau_R^2\frac{P_A}{P_B}|h_A|^4 + \tau_R^2|h_A|^2|h_B|^2 + \frac{\sigma^2}{P_B}|h_A|^2 + \\ &+ \sigma^2\left(1+\tau_R^2\right)\frac{1-\alpha}{2P_B\eta\alpha}} \end{aligned} \quad (14)$$

III.2. Giao thức TSIS

Trong giao thức TSIS, giả sử rằng ảnh hưởng suy giảm phẩm chất phần cứng chỉ xảy ra ở thiết bị của nút đích. Tín hiệu thu ở 2 nút đích tương ứng lúc này

được biểu diễn như sau

$$\begin{aligned} y_A &= \sqrt{P_R} h_A G\left(\sqrt{P_A} h_A x_A + \sqrt{P_B} h_B x_B + n_R\right) + \\ &+ v_A + n_A \\ &= \sqrt{P_R}\sqrt{P_A} G\left|h_A\right|^2 x_A + \sqrt{P_R}\sqrt{P_B} h_A h_B G x_B + \\ &+ \sqrt{P_R} G h_A n_R + v_A + n_A, \end{aligned} \tag{15}$$

và

$$\begin{aligned} y_B &= \sqrt{P_R} h_B G\left(\sqrt{P_A} h_A x_A + \sqrt{P_B} h_B x_B + n_R\right) + \\ &+ v_B + n_B \\ &= \sqrt{P_R}\sqrt{P_B} G\left|h_B\right|^2 x_B + \sqrt{P_R}\sqrt{P_A} h_A h_B G x_A + \\ &+ \sqrt{P_R} G h_B n_R + v_B + n_B, \end{aligned} \tag{16}$$

với v_A, v_B là méo tín hiệu do suy giảm phẩm chất phần cứng gây ra trong các nút đích A, B tương ứng và suy giảm phẩm chất phần cứng phân bố theo $v_A \sim CN\left(0, \tau_A^2 P_R \left|h_A\right|^2\right)$, $v_B \sim CN\left(0, \tau_B^2 P_R \left|h_B\right|^2\right)$.

Lưu ý rằng trong TSIS, hệ số khuếch đại tín hiệu thay đổi như trong biểu thức (17):

$$G^{-2} = P_A\left|h_A\right|^2 + P_B\left|h_B\right|^2 + \sigma^2 \tag{17}$$

Tương tự TSIR, bài báo chỉ trình bày công thức tính SNDR ở nút đích A trong mạng vô tuyến chuyển tiếp truyền dẫn hai chiều như sau:

$$\gamma_A = \frac{P_R P_B G^2 \left|h_A\right|^2 \left|h_B\right|^2}{P_R G^2 \left|h_A\right|^2 \sigma^2 + P_R \left|h_A\right|^2 \tau_A^2 + \sigma^2} \tag{18}$$

Thay P_R từ biểu thức (5) vào (18), công thức tính SNDR lại được biểu diễn dưới dạng:

$$\begin{aligned} \gamma_A = &\frac{P_B \left|h_A\right|^2 \left|h_B\right|^2}{\left|h_A\right|^2 \sigma^2 + P_A \tau_A^2 \left|h_A\right|^4 + P_B \tau^2 \left|h_A\right|^2 \left|h_B\right|^2 + \tau_A^2 \sigma^2 \left|h_A\right|^2 + + \frac{1-\alpha}{2\eta\alpha}\sigma^2 + \frac{\sigma^4}{P_A\left|h_A\right|^2 + P_B\left|h_B\right|^2}\frac{1-\alpha}{2\eta\alpha}} \end{aligned} \tag{19}$$

Hoàn toàn tương tự các phân tích ở mục III.1, công thức gần đúng cho SNDR được viết lại như sau:

$$\begin{aligned} \gamma_A^* &= \frac{P_B \left|h_A\right|^2 \left|h_B\right|^2}{\left|h_A\right|^2 \sigma^2 + P_A \tau_A^2 \left|h_A\right|^4 + P_B \tau_A^2 \left|h_A\right|^2 \left|h_B\right|^2 + \tau_A^2 \sigma^2 \left|h_A\right|^2 + \frac{1-\alpha}{2\eta\alpha}\sigma^2} \\ &= \frac{\left|h_A\right|^2 \left|h_B\right|^2}{\tau_A^2 \frac{P_A}{P_B}\left|h_A\right|^4 + \tau_A^2 \left|h_A\right|^2 \left|h_B\right|^2 + \left(1+\tau_A^2\right)\frac{\sigma^2}{P_B}\left|h_A\right|^2 + \frac{1-\alpha}{2P_B\eta\alpha}\sigma^2} \end{aligned} \tag{20}$$

IV. PHÂN TÍCH XÁC SUẤT DỪNG VÀ THÔNG LƯỢNG CỰC ĐẠI

IV.1. Xác suất dừng

Trước hết, bài báo trình bày biểu thức tính xác suất theo phân tích lý thuyết qua bổ đề 1 như bên dưới.

Bổ đề 1: cho giá trị các biến m, n, k là hằng số dương, ω_1, ω_2 là các biến ngẫu nhiên không âm, λ là giá trị SNDR ngưỡng và $\Omega_i = \mathbb{E}_{h_i}\left\{\omega_i\right\}$ là độ lợi trung bình, biểu thức tính xác suất dừng sẽ được tính bằng

$$\begin{aligned} &\Pr\left(\frac{\omega_1\omega_2}{m\omega_1^2 + m\omega_1\omega_2 + n\omega_1 + k} \le \lambda\right) \\ &= 1 - \frac{2}{\Omega_1} e^{-\frac{n\lambda}{\Omega_2(1-\lambda m)}} \times \\ &\times \sqrt{\frac{k\lambda}{\Omega_2(1-\lambda m)} \frac{\Omega_1\Omega_2(1-\lambda m)}{\lambda m(\Omega_1 - \Omega_2) + \Omega_2}} \\ &\times K_1\left(2\sqrt{\frac{k\lambda}{\Omega_2(1-\lambda m)} \frac{\lambda m(\Omega_1 - \Omega_2) + \Omega_2}{\Omega_1\Omega_2(1-\lambda m)}}\right), \end{aligned} \tag{21}$$

trong đó $K_1(.)$ kí hiệu là hàm Bessel chuyển đổi bậc 1 loại 2.

Chứng minh: Xem phụ lục

Kế tiếp, việc tính xác suất cho các tỉ số SNDR trong giao thức TSIR, TSIS chỉ áp dụng bổ đề bằng cách thay biến như sau

$$m = \tau_R^2, n = \frac{\sigma^2}{P}, k = \sigma^2\left(1+\tau_R^2\right)\frac{1-\alpha}{P\eta\alpha}$$, TSIR

$$m=\tau_A^2, n=\left(1+\tau_A^2\right)\frac{\sigma^2}{P}, k=\frac{\sigma^2\left(1-\alpha\right)}{2\eta P\alpha}, \text{TSIS}$$

IV.2. Thông lượng cực đại

Trong nghiên cứu này, mô hình truyền tín hiệu trong mạng TWRN áp dụng nguyên lý truyền trễ giới hạn (delay-limited transmission). Trong đó, tín hiệu thu ở nút đích cần giải mã tín hiệu thu theo từng khối tín hiệu một và độ dài từ mã nhỏ hơn thời gian khung tín hiệu truyền dẫn. Ngoài ra, tốc độ bit tín hiệu phát tại các nút nguồn được xem là cố định. Khi đó, biểu thức tính thông lượng hoàn toàn xác định căn cứ trên giá trị xác suất dừng và SNDR vừa tính được trong phần III của bài báo này.

$$C^{TS}=\frac{\left(1-\alpha\right)T/2}{T}\times \times\left\{\left[1-P_{out}^{A}\left(M_A\right)\right]M_A+\left[1-P_{out}^{B}\left(M_B\right)\right]M_B\right\} \quad (22)$$

trong đó C^{TS} kí hiệu thông lượng chung cho cả 2 giao thức TSIR và TSIS; P_{out}^{A}, P_{out}^{B} là xác suất dừng và M_A, M_B kí hiệu như là tốc độ bit cố định ở các nút nguồn A, B tương ứng, và biểu thức tính tốc độ bit lần lượt là $M_A=\log_2\left(1+\gamma_A^*\right)$, $M_B=\log_2\left(1+\gamma_B^*\right)$. Rõ ràng rằng thông lượng C^{TS} phụ thuộc vào các biến $\alpha, P, \tau_R, \tau_A, \sigma^2, \lambda$. Giả sử với mỗi hệ thống TWRN và ứng dụng cụ thể, các tham số sau là xác định $P, \tau_R, \tau_A, \sigma^2, \lambda$, khi đó ta tính được thông lượng cực đại dựa trên việc tìm gia trị tối ưu của hệ số thu năng lượng vô tuyến.

V. KẾT QUẢ MÔ PHỎNG

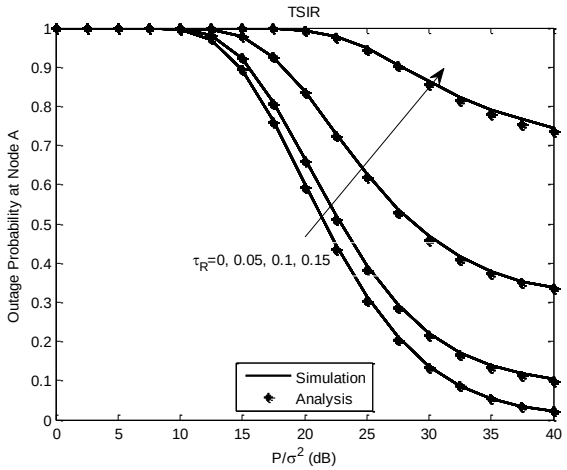
Trong phần này, bài báo trình bày các kết quả mô phỏng để minh họa cho các lý thuyết đã phân tích ở trên qua mô phỏng Monte-Carlo với số lần lặp là 200000 lần, các tham số quan trọng được áp dụng chung trong chương trình mô phỏng gồm $P_A=P_B=P,\quad \sigma_A=\sigma_B=\sigma_R=\sigma=1,\quad \Omega_1=\Omega_2=1.$ Các mô phỏng này áp dụng cho các hệ thống vô tuyến tốc độ cao $\lambda=2^4-1$ (hay 4 bits/ sử dụng kênh). Liên quan đến việc thu năng lượng vô tuyến, vấn đề hiệu suất sử dụng năng lượng thu được hay các ảnh hưởng nhiễu suy giảm do chuyển đổi tín hiệu RF sang tín hiệu băng tần cơ sở nằm ngoài phạm vi phân tích của bài báo này. Do vậy, trong bài báo này có các mô phỏng thiết lập giá trị hiệu suất chuyển đổi năng lượng là $\eta=1$ hay hiệu suất chuyển đổi năng lượng thu vô tuyến là 100%.

Để biểu diễn phẩm chất mạng TWRN, các mô phỏng trong Hình 1, Hình 2 ứng với xác suất dừng cho các giao thức TSIR, TSIS dưới ảnh hưởng của hệ số suy giảm phẩm chất phần cứng khác nhau và hệ số tỉ lệ thời gian thu năng lượng $\alpha=0.5$. Dễ dàng thấy trong các kết quả mô phỏng, hệ số suy giảm phẩm chất phần cứng tăng thì chất lượng hệ thống giảm, đặc biệt càng tăng giá trị này thì hệ thống tiến tới giới hạn dừng (khi $\tau_R=0{,}15$).

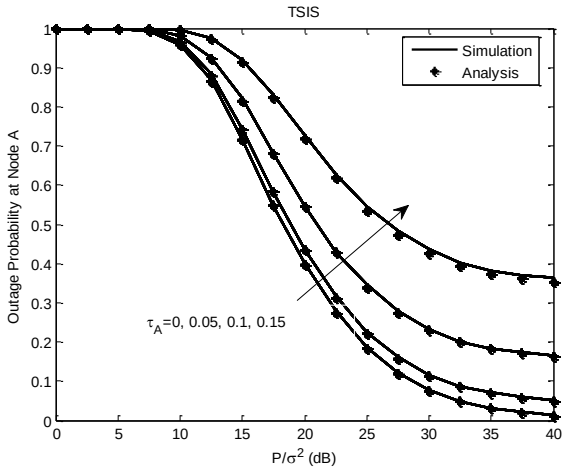
Trong mô phỏng thông lượng cực đại ở Hình 3, bài báo giả sử $P_{out}^{A}=P_{out}^{B}=\mathrm{P}_{out}, R_A=R_B=R$ cho đơn giản trong tính toán và thiết lập SNR trung bình nút nguồn $P/\sigma^2=20\,dB$. Điều đặc biệt là hình vẽ biểu diễn thông lượng cho cả TSIR, TSIS trùng khít nhau thể hiện giá trị bằng nhau, hay nói khác hơn giá trị thông lượng không phụ thuộc vào ảnh hưởng suy giảm phẩm chất phần cứng diễn ra ở bất kỳ nút nào trong mạng TWRN. Điều này được giải thích là khi cố định biến công suất phát P , các tham số quan trọng liên quan đến hàm mũ trong (21) m,n chỉ thay đổi nhỏ khi so sánh TSIR và TSIS, nên ảnh hưởng đến công thức tính xác suất dừng thay đổi nhỏ và dẫn đến thông lượng 2 loại TSIR, TSIS bằng nhau. Hơn nữa, ta thấy thông lượng tăng khi thay đổi α từ giá trị 0 đến giá trị tối ưu. Điều này được giải thích là khi tăng giá trị hệ số thời gian thu năng lượng nhỏ ảnh hưởng tăng công suất thu năng lượng tại nút trung gian và làm tăng thông lượng, nhưng khi giá trị α vượt qua ngưỡng tối ưu thì ta thu hiệu số $\left(1-\alpha\right)$ trong công thức sau giảm và làm giảm thông lượng.

$$C\left(M_0\right)=\left(1-\alpha\right)M_0\left[1-P_{out}\left(M_0\right)\right] \quad (23)$$

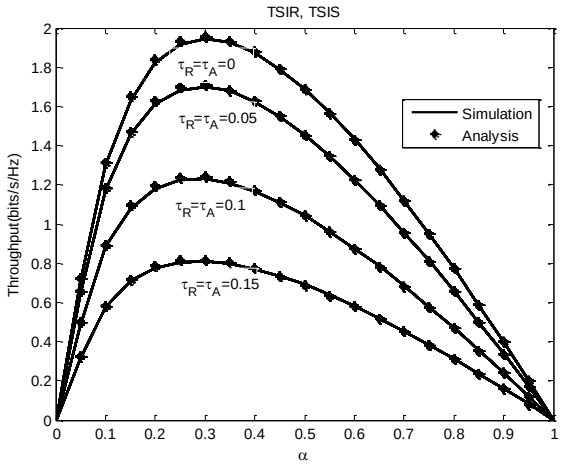
M_0 kí hiệu như là tốc độ bit cố định



Hình 1. Xác suất dừng ở nút mạng A theo P/σ^2 trong giao thức thu năng lượng TSIR



Hình 2. Xác suất dừng ở nút mạng A theo P/σ^2 trong giao thức thu năng lượng TSIS



Hình 3. Thông lượng cực đại cho giao thức TSIR, TSIS

VI. KẾT LUẬN

Bài báo này đã chứng minh biểu thức tính gần đúng cho SNDR áp dụng trong mạng chuyển tiếp AF hai chiều và từ đó tính được biểu thức xác suất dừng. Ngoài ra, bài báo đã đề xuất hai giao thức thu năng lượng và truyền thông tin đồng thời qua mạng vô tuyến, cụ thể hơn bài báo đã phân tích hai chính sách thu năng lượng vô tuyến phụ thuộc tùy vào các trường hợp suy giảm phẩm chất phần cứng xảy ra ở nút mạng nào trong hệ thống TWRN.

Các kết quả mô phỏng cho thấy có thể chọn hệ số thu năng lượng phù hợp để có thông lượng cực đại cho cả hai giao thức đã trình bày TSIR, TSIS. Đóng góp đáng kể khác của bài báo là đánh giá ảnh hưởng của thông số suy giảm phần cứng đến xác suất dừng và thông lượng như thế nào trong mạng có nút chuyển tiếp trang bị khả năng thu năng lượng vô tuyến. Đây là cơ sở để các kỹ sư thiết kế mạng lựa chọn các thiết bị phẩm chất đạt yêu cầu phẩm chất nhất định để đảm bảo chất lượng dịch vụ trong các ứng dụng tốc độ cao của các hệ thống vô tuyến thực tiễn.

PHỤ LỤC

Chứng minh Bổ đề 1:

Xét 2 biến ngẫu nhiên độc lập ω_1, ω_2, dùng qui luật tính tổng xác suất có điều kiện dựa trên $\omega_i, i = 1, 2$.

Giả sử ta tính xác suất có điều kiện cho ω_1, khi đó biểu thức tính xác suất như sau:

$$X \triangleq \Pr\left(\frac{\omega_1\omega_2}{m\omega_1^2 + m\omega_1\omega_2 + n\omega_1 + k} \le \lambda\right) = 1 - \int_0^\infty \Pr\left(\frac{\omega_1\omega_2}{m\omega_1^2 + m\omega_1\omega_2 + n\omega_1 + k} > \lambda \middle| \omega_1\right) f_{\omega_1}(x)\,dx \quad \text{(A.1)}$$

Tiếp tục tính riêng xác suất có điều kiện sau:

$$\Pr\left(\frac{\omega_1\omega_2}{m\omega_1^2 + m\omega_1\omega_2 + n\omega_1 + k} > \lambda \middle| \omega_1\right) = \begin{cases} 1 - F_{\omega_2}\left(\dfrac{\lambda\left(m\omega_1^2 + n\omega_1 + k\right)}{\omega_1\left(1 - \lambda m\right)}\right), & \lambda < \dfrac{1}{m} \\ 0, & \lambda \ge \dfrac{1}{m} \end{cases} \quad \text{(A.2)}$$

Thay thế (A.2) và áp dụng các hàm phân bố xác suất trong (2), (3) vào (A.1), biểu thức trong (A.1) được viết lại là

$$I = 1 - \int_0^\infty e^{-\frac{1}{\Omega_2}\frac{\lambda\left(mx^2+nx+k\right)}{x(1-\lambda m)}} \frac{1}{\Omega_1} e^{-\frac{x}{\Omega_1}} dx$$

$$= 1 - \frac{1}{\Omega_1} e^{-\frac{n\lambda}{\Omega_2(1-\lambda m)}} \int_0^\infty e^{-\left(\frac{\lambda m}{\Omega_2(1-\lambda m)}+\frac{1}{\Omega_1}\right)x - \frac{\lambda k}{\Omega_2(1-\lambda m)}\frac{1}{x}} dx \quad \text{(A.3)}$$

Cuối cùng áp dụng công thức tính tích phân (3.324.1) trong [18] $\int_0^\infty \exp\left(-\frac{\varphi}{4x} - \theta x\right) dx = \sqrt{\frac{\varphi}{\theta}} K_1\left(\varphi\theta\right)$, sau vài biến đổi đại số đơn giản ta đạt được công thức như (21).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] J. PARK and B. CLERCKX, "*Joint wireless information and energy transfer in a two-user MIMO interference channel*," IEEE Trans. Commun., vol. 12, no.8, pp. 4210–4221, 2013.

[2] M. DOHLER AND Y. LI, *Cooperative communications: hardware, channel and PHY.* : John Wiley & Sons, 2010.

[3] I. AHMED, A. IKHLEF, R. SCHOBER, and R. K. MALLIK, "*Joint power allocation and relay selection in energy harvesting AF relay systems*," IEEE Wireless Commun. Lett., vol. 2, no. 2, pp. 239-242, 2013.

[4] S. YIN, E. ZHANG, Z. QU, L. YIN and S. LI, "*Optimal cooperation strategy in cognitive radio systems with energy harvesting*," IEEE Trans. Commun., vol. 13, no. 9, pp. 4693-4707, 2014.

[5] 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 Proc. of International Conference on Communication (ICC), Sydney, Australia, 2014, pp. 4348-4352.

[6] Y. GU and S. AISSA, "*Interference aided energy harvesting in Decode-and-Forward relaying systems*," in Proc. of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, Australia, 2014, pp. 5378-5382.

[7] 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, 2013.

[8] S. LUO, R. ZHANG and T. J. LIM, "*Optimal save-then-transmit protocol for energy harvesting wireless transmitters*," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 12, no. 3, pp. 1196-1217, 2013.

[9] X. ZHOU, R. ZHANG and C. K. HO, "*Wireless information and power transfer: architecture design and rate-energy tradeoff*," IEEE Trans. Commun., vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, 2013.

[10] F. S. AL-QAHTANI, J. YANG, R. M. RADAYDEH and H. ALNUWEIRI, "*On the capacity of two-hop AF relaying in the presence of interference under Nakagami-m fading*," IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 1, pp. 19-22, Jan. 2013.

[11] K.-S. HWANG, M. JU and M.-S. ALOUINI, "*On the outage performance of two-way Amplify-and-Forward relaying with outdated CSI over multiple relay network*," in Proc. of IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Comm., London, UK, 2013, pp. 1-5.

[12] S. S. IKKI and S. AISSA, "*Performance analysis of two-way amplify-and-forward relaying in the presence of co-channel interferences*," IEEE Trans. Commun., vol. 60, no. 4, pp. 933–939, 2012.

[13] R. LOUIE, Y. LI, H. A. SURAWEERA and B. VUCETIC, "*Performance analysis of beamforming in two-hop amplify and forward relay networks with antenna correlation*," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 8, no. 6, pp. 3131–3142, 2009.

[14] ALI A. NASIR, XIANGYUN ZHOU, SALMAN DURRANI, and R. A. KENNEDY, "*Throughput and ergodic capacity of wireless energy harvesting based DF relaying network*," in Proc. of IEEE International Conference on Communications (ICC), Sydney, Australia, 2014, pp. 1-6.

[15] J. LI, M. MATTHAIOU, and T. SVENSSON, "*I/Q imbalance in two-way AF relaying*," IEEE Trans. Commun., vol. 62, no. 7, pp. 2271-2285, 2014.

[16] G. CHEN, O. ALNATOUH and J. CHAMBERS, "*Outage probability analysis for a cognitive amplify-and-forward relay network with single and multi-relay*

selection," IET Commun., vol. 7, no. 7, pp. 1974–1981, 2013.

[17] Y. LIU, L. WANG, M. ELKASHLAN, T. Q. DUONG, and A. NALLANATHAN, "*Two-way relaying networks with wireless power transfer: policies design and throughput analysis*," in Proc. of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'14) Austin, TX, 2014.

[18] I. S. GRADSHTEYN and I. M. RYZHIK, *Table of Integrals, Series, and Products*. New York, NY, USA: Academic, 2000.

Nhận bài ngày: 03/11/2014

SƠ LƯỢC VỀ TÁC GIẢ

ĐỖ ĐÌNH THUẬN

Sinh năm 1980 tại Phú Yên.

Tốt nghiệp kỹ sư, thạc sỹ và tiến sỹ ngành Vô tuyến Điện tử tương ứng vào năm 2003, 2007 và 2012 tại ĐH Quốc gia TP. HCM; thực tập sinh tiến sỹ tại Phòng thí nghiệm Thông tin vô tuyến, ĐH Quốc gia Tsing Hua, Đài Loan 2010.

Hiện giảng dạy tại Trường ĐH Sư phạm Kỹ thuật TP. HCM .

Lĩnh vực nghiên cứu: ước lượng kênh trong truyền thông vô tuyến MIMO, mạng chuyển tiếp, mạng vô tuyến 5G, xử lý tín hiệu trong hệ thống giao thông thông minh.

Điện thoại: 0918 095 094

Email: dodinhthuan@hcmute.edu.vn