

Ước lượng xác suất dừng mạng chuyển tiếp phân tập hợp tác

Nguyễn Quốc Tuấn^{1,*}, D.T. Nguyen²

¹Trường Đại học Công nghệ, ĐHQGHN, 144 Xuân Thủy, Hà Nội, Việt Nam

²University of Technology Sydney, Australia

Nhận ngày 25 tháng 7 năm 2012

Tóm tắt. Trong môi trường fading chậm, khi một kênh nào đó đang bị fading sâu thì mã tin nhằm nâng cao độ tin cậy truyền tin không có hiệu quả lắm, tuy nhiên khi đó việc truyền tin phân tập hợp tác đã cho thấy khả năng cải thiện đáng kể hiệu năng truyền dẫn. Mạng chuyển tiếp có giao thức khuếch đại-chuyển tiếp (AF) và giao thức giải mã-chuyển tiếp (DF) sử dụng các giao thức chuyển tiếp phân tập hợp tác với độ phức tạp thấp có tính thực hiện cao. Việc phân tích dung lượng các mạng chuyển tiếp với giao thức AF thường dựa trên định lý thông lượng tối đa điểm cắt tối thiểu (max-flow min-cut) nhằm xác định cận trên của dung năng thực (thường là chưa biết). Do việc phân tích thống kê về độ lợi kênh đầu cuối – đầu cuối (e2e) của các giao thức chuyển tiếp là rất phức tạp, mà các nghiên cứu cho tới nay chỉ mới tập trung vào đáng điệu tiệm cận của xác suất dừng của mạng tại các giá trị tỷ lệ tín hiệu-trên-ồn (SNR) hoặc rất thấp hoặc rất cao. Hầu hết các công trình hiện nay đều tránh việc tính toán phức tạp bằng cách trước hết bỏ qua tác động của AWGN rồi sau đó dùng giá trị cận trên $\min(u, v)$ để ước lượng một cách đơn giản tỷ lệ tín hiệu trên ồn. Giá trị cận trên ước lượng $\min(u, v, uvSNR)$ cho toàn bộ SNR đưa ra trong bài này tốt hơn nhiều so với giá trị $\min(u, v)$, cho phép ta thu được các biểu thức chính xác để nghiên cứu tác động của AWGN lên hiệu năng mạng. Độ chính xác của cận dưới khi đó đối với xác suất dừng của mạng sử dụng hàm $\min(u, v, uvSNR)$ đáng tin cậy đối với toàn bộ dải AWGN. Bài báo đưa ra biểu thức chính xác tính xác suất dừng mạng chuyển tiếp sử dụng giao thức DF (có định, tăng cường, lọc lựa) trong môi trường fading Rayleigh.

1. Giới thiệu

Các mạng chuyển tiếp sẽ trở nên thông dụng cho phép mở rộng vùng phủ sóng đối với các mạng di động sử dụng phương pháp tế bào (cell), đảm bảo hiệu năng khi năng lượng trong mạng Ad-hoc bị giới hạn và ứng dụng các giao thức mới cho mạng thế hệ sau [1]. Trước đây từng trạm chuyển tiếp thường khuếch đại (có thể xử lý) rồi truyền đi các tín hiệu chúng nhận

được. Các phương thức truyền với mã lặp phân tập thời gian [2], mã phân tập không gian-thời gian [3]... đã được áp dụng. Khi có nhiều trạm cùng hợp tác chuyển tiếp một tín hiệu phát thì nó sẽ mở ra cơ hội áp dụng nhiều phương thức truyền khác [4, 5]. Chúng ta cũng đã biết rằng trong môi trường fading chậm, khi một kênh nào đó đang fading sâu thì mã tin không còn hiệu quả nữa trong việc nâng cao độ tin cậy truyền tin, và việc truyền tin phân tập hợp tác đã cho thấy khả năng cải thiện đáng kể hiệu năng truyền dẫn [6, 7].

* Tác giả liên hệ. ĐT: 84-913301974.
E-mail: tuannq@vnu.edu.vn

Trong bài báo này, chúng tôi chỉ xem xét mạng chuyển tiếp có sử dụng các giao thức chuyển tiếp phân tập hợp tác không phức tạp lắm để tăng khả năng ứng dụng vào thực tế như trong [7] với

a) Giao thức chuyển tiếp cố định là các loại giao thức trong đó trạm chuyển tiếp (relay) bắt chấp chất lượng kênh, sẽ liên tục hoặc khuếch đại hoặc giải mã – rồi mã hóa lại để chuyển tiếp tin mà nó nhận được. Giao thức chuyển tiếp cố định thường được dùng khi không có thông tin trạng thái kênh (CSI) cho truyền tin. Giao thức chuyển tiếp cố định có hai tùy chọn là AF và DF. Giao thức DF được coi là ưu việt hơn giao thức AF do trạm chuyển tiếp giảm ồn sau khuếch đại.

b) Giao thức chuyển tiếp lọc lựa (SDF) hay thích nghi (SR) được dùng chủ yếu để khắc phục nhược điểm của chuyển tiếp DF cố định khi SNR (tức là có CSI) tại trạm chuyển tiếp thấp đến độ không có khả năng giải mã tin. Khi SNR đo được tụt thấp dưới ngưỡng, trạm chuyển tiếp sẽ dừng chức năng chuyển tiếp và trạm nguồn truyền tin trực tiếp đến trạm đích, sử dụng mã lặp hoặc các loại mã khác công hiệu hơn. Còn khi SNR đo được cao hơn ngưỡng, trạm chuyển tiếp lại tiếp tục chức năng chuyển tiếp của nó đối với những gì nó nhận từ trạm nguồn sử dụng giao thức AF hoặc DF, và như vậy thực hiện độ lợi phân tập.

c) Giao thức chuyển tiếp tăng cường (IR-DF) là giao thức trong đó relay chỉ chuyển tiếp tin khi có phản hồi âm (không tích cực) từ trạm đích. Trong các mạng IR thì trạm đích sẽ gửi một-bit ACK tới trạm nguồn và relay nếu nó có thể giải mã thành công tin từ trạm nguồn thông qua tuyến trực tiếp, lúc này relay không làm gì cả. Ngược lại nó gửi NACK để thông báo không giải mã được tin, relay khi nhận được NACK nó sẽ chuyển tiếp tin. Phản hồi hạn chế

này từ trạm đích có thể thực hiện theo từng kí hiệu, như vậy sẽ cải thiện hiệu năng so với chuyển tiếp cố định hoặc lựa chọn.

Chuyển tiếp cố định và lọc lựa không có hiệu quả lắm khi truyền tin với tốc độ cao do quá trình chuyển tiếp thực phải liên tục và nhất là khi điều kiện kênh truyền tốt thì chuyển tiếp là không cần thiết. Khi đó trạm đích sẽ sử dụng phương thức tổ hợp tỷ số tối đa (MRC) các tín hiệu nhận trực tiếp từ trạm nguồn và các tín hiệu nhận được qua trạm chuyển tiếp để tái tạo SNR cho đến khi nó có thể giải mã thành công tin.

Thực ra trạm chuyển tiếp có thể xử lí tín hiệu thu được theo các cách khác nhau và trạm đích sử dụng các phương pháp tổ hợp khác nhau để có được độ lợi phân tập tùy theo các giao thức chuyển tiếp, trong khi chuyển tiếp sử dụng giao thức AF sẽ khuếch đại ồn thì một trạm đích dùng cách thù chắc chắn tối đa (ML) sẽ rất hữu dụng so với các loại giao thức khác, đặc biệt khi trạm chuyển tiếp nằm gần trạm đích. Kiểu chuyển tiếp sử dụng giao thức AF phân tập hợp tác ít phức tạp hơn này đã cho thấy có hiệu năng tốc độ bit lỗi (BER) tương đương với kiểu chuyển tiếp DF đối với các kênh Gauss độc lập có độ mất mát tuyến như trong [8]. Tương tự, trong [7] đã chỉ ra rằng dung lượng dừng hoạt động của một hệ thống chuyển tiếp phân tập hợp tác gồm 2 bước có dùng các kênh trực tuyến là tương thích trong 3 kịch bản: không chuyển tiếp, khuếch đại chuyển tiếp và mã hóa chuyển tiếp phụ thuộc vào độ tin cậy của tuyến không dây từ trạm nguồn tới trạm chuyển tiếp.

Trong các kênh fading chậm, fading được giả thiết là không đổi trong suốt độ dài của khối tin, tức là kênh sẽ nhớ các khối (block) kém hơn, và dung lượng Shannon của kênh sẽ được xác định chính xác có thể đạt tới được. Trong

hầu hết mọi tình huống thực tế, kênh này sẽ là non-ergodic và dung lượng là một biến ngẫu nhiên, do vậy sẽ không có tốc độ truyền nào đáng tin cậy. Trong trường hợp này, xác suất dừng sẽ được xác định bằng xác suất khi dung lượng ngẫu nhiên tức thời rơi xuống dưới ngưỡng cho trước, và dung lượng trên xác suất dừng hoạt động sẽ là phép đo hiệu năng dựa trên lý thuyết thông tin [9]. Để tính toán dung lượng dừng này, vì mức độ phức tạp của bài toán phân tích xác suất liên quan nên hầu hết các tác giả phải viện đến định lý max-flow min-cut (dòng tối đa, điểm cắt tối thiểu) [8, 9] để tìm được cận trên cho dung lượng dừng của kênh chuyển tiếp. Việc phân tích hiệu năng chính xác của giao thức AF rất phức tạp về mặt toán học và hầu hết các tác giả đều tránh né bằng cách bỏ qua ồn cộng tính tại trạm chuyển tiếp hoặc dùng hàm $\min(u, v)$ làm cận trên ước lượng đối với tỷ lệ SNR truyền giữa hai đầu cuối của mạng hoặc theo [7, 9].

Ta biết rằng trong nhiều ứng dụng thực tế, kể cả các mạng cảm nhận không dây, công suất truyền tin được hạn chế và SNR thường rất thấp do vậy hiệu năng của các mạng chuyển tiếp trở nên cần thiết. Trong chế độ SNR thấp như vậy, dung lượng Shannon thường coi như bằng zero khi SNR có xu hướng giảm về zero và dung lượng không còn là một phép đo hữu ích nữa. Do vậy trong [8, 9], một cách đo hợp lý hơn được gọi là dung lượng dừng được định nghĩa như là tốc độ truyền tối đa mà đối với nó xác suất dừng sẽ không vượt quá một giá trị ngưỡng cho trước. Mặt khác khi trạng thái thông tin kênh (CSI) không cho phép để truyền tin thì việc truyền dẫn không thể được cho dù có truyền song công (full-duplex) hay không, do vậy không thể nâng cao được tổng dung lượng Shannon của cả mạng. Như vậy trong bài này, chúng tôi tập trung vào phương thức truyền tin đơn công (half-duplex). Trọng tâm nghiên cứu

của bài báo là tìm ra các biểu thức chính xác hơn tính xác suất dừng của giao thức AF và DF so với các biểu thức đã được biết đến.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: phần 2 trình bày mô hình mạng kênh được giả định trong mạng chuyển tiếp phân tập hợp tác. Phần 3 giới thiệu dung lượng thông tin của kênh hợp tác chuyển tiếp, tính toán độ lợi kênh và đề xuất biểu thức tính toán xác suất dừng của giao thức AF. Phần 4 đưa ra biểu thức tính toán xác suất dừng cho các giao thức DF. Cuối cùng là các kết luận thu được liên quan đến các kết quả được tính toán.

2. Mô hình kênh

Khi chuyển tiếp phân tập hợp tác (hình 1), để giảm ảnh hưởng của nhiễu, các kênh chuyển tiếp được phân tách, hoặc phân tập thời gian hoặc phân tập không gian nhờ các anten định hướng hoặc phân tập tần số nhờ OFDM. Trong bài này chúng tôi chỉ xem xét trường hợp phân tập thời gian và giả thiết:

(i) Các trạm chuyển tiếp làm việc ở chế độ phân chia thời gian (TD) theo 2 giai đoạn: giai đoạn trạm chuyển tiếp thu và giai đoạn trạm chuyển tiếp phát, mỗi giai đoạn kéo dài trong khoảng thời gian $T/2$.

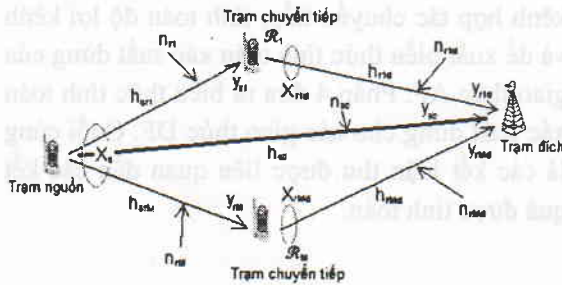
(ii) Các trạm chuyển tiếp làm việc ở chế độ đơn công, đối xứng, thời gian phát bằng thời gian nhận.

(iii) Không có sự tương quan giữa tín hiệu phát từ nguồn với tín hiệu phát từ trạm chuyển tiếp (không đồng bộ), với $E[x_s[N] x_r[N]^*] = 0$ để tối đa hóa dung lượng thông tin kênh.

(iv) Mỗi bản tin từ nguồn được mã hóa thành N kí hiệu; mỗi kí hiệu chiếm một đơn vị thời gian truyền tin $T/2$ (khoảng khe thời gian dành cho mỗi bản tin). Giả sử rằng trạm nguồn

và trạm chuyển tiếp truyền trực giao với nhau tại mỗi nửa của các khe thời gian với hạn chế công suất

$$\frac{1}{T} \sum_{n=1}^T P_s[n] \leq P_s \text{ và } \frac{1}{T} \sum_{n=1}^T P_{r_i}[n] \leq P_{r_i}.$$



Hình 1. Mô hình mạng chuyển tiếp phân tập hợp tác.

Trong giai đoạn trạm chuyển tiếp thu, tại các thời điểm $n=1, 2, \dots, T/2$, trạm nguồn phát tin (N kí hiệu) tới cả trạm đích lẫn tới các trạm chuyển tiếp (phát quang bá) trong cả trường hợp AF lẫn DF. Tín hiệu nhận được tại trạm đích y_{sd} và trạm chuyển tiếp y_{sr} có dạng

$$\begin{aligned} y_{sd}[n] &= \sqrt{P_s[n]} h_{sd} x_s[n] + n_{sd}[n] \\ y_{sr_i}[n] &= \sqrt{P_s[n]} h_{sr_i} x_s[n] + n_{sr_i}[n] \end{aligned} \quad (1)$$

Chỉ số i tương ứng trạm chuyển tiếp thứ i . Giai đoạn trạm chuyển tiếp phát, tại các thời điểm $n = T/2+1, T/2+2, \dots, T$ tất cả trạm chuyển tiếp (có thể cả trạm nguồn) đều gửi tín hiệu đến trạm đích (đa truy cập). Tín hiệu thu được tại trạm đích từ trạm chuyển tiếp y_{rd} và từ trạm nguồn y_{sd} có dạng:

$$\begin{aligned} y_{sd}[n] &= \sqrt{P_s[n]} h_{sd} x_s[n] + n_{sd}[n] \\ y_{r,d}[n] &= \sqrt{P_{r_i}[n]} h_{r,d} x_{r_i}[n] + n_{r,d}[n] \end{aligned} \quad (2)$$

trong đó x, y, n và P là các tín hiệu phát, tín hiệu thu tương quan, ồn trắng cộng tính Gauss (AWGN) có trung bình zero, phương sai σ^2 tức là $n \sim N(0, \sigma^2)$ và công suất phát trung bình được chuẩn hóa (tức là $E(|x|^2) = 1$). Các tham số i, j là số liên kết nút i với nút j , h_{ij} là độ lợi (hay

suy hao) kênh fading không lọc lựa tần số giữa trạm i và trạm j và được mô hình hóa là các biến ngẫu nhiên phức Gauss, độc lập, đối xứng vòng, độ lệch μ_{ij} . Như vậy $|h_{ij}|^2$ phân bố theo hàm mũ với trung bình μ_{ij} . Lưu ý rằng AWGN tác động từng kênh, ví dụ trạm đích khi nhận tín hiệu từ 2 trạm như vậy có 2 nguồn ồn.

Trường hợp tổng quát với mô hình fading Rician, tức là tầm nhìn thẳng (LOS) và có tính đến tán xạ ngẫu nhiên thì:

$$h_{ij} = \sqrt{\mu_{ij}^2 \frac{K_{ij}}{1+K_{ij}}} + \tilde{h}_{ij} \sqrt{\mu_{ij}^2 \frac{1}{1+K_{ij}}}$$

Trong đó \tilde{h}_{ij} là hàm ngẫu nhiên phức Gauss với trung bình zero và phương sai bằng 1. Tín hiệu thu được thay đổi một lượng $\mu_{ij}^2 / (1 + K_{ij})$. Với kênh Rayleigh fading, tham số Rician $K_{ij}=0$.

Căn cứ vào biểu thức (2), tín hiệu trạm chuyển tiếp phát x_{r_i} được tạo theo 2 cách: DF và AF. Trong khi đó theo biểu thức (1) thì tín hiệu theo giao thức AF được khuếch đại với hệ số α_{r_i} trước khi được relay chuyển tiếp, do đó:

$$y_{r,d}^{(2)} = h_{r,d} \alpha_{r_i} (\sqrt{P_s^{(1)}} h_{sr_i} x_s^{(1)} + n_{sr_i}^{(1)}) + n_{r,d}^{(2)} \quad (3)$$

trong đó tham số trong dấu ngoặc trên chỉ giai đoạn truyền tin.

Như vậy, trạm đích nhận được $M+1$ bản sao tín hiệu từ trạm nguồn và dùng phương thức tổ hợp tỷ số tối đa (MRC) để nhận được tín hiệu tốt nhất. Nhờ cơ chế điều khiển tự động hệ số khuếch đại (AGC), trạm chuyển tiếp có công suất phát như trong biểu thức (2) $x_{r_i}^{(2)} = \alpha_{r_i} y_{r_i}^{(1)}$, hệ số độ lợi chuyển tiếp được xác định bằng:

$$\alpha_{r_i} = \sqrt{\frac{P_{r_i}}{P_s^{(1)} \mu_{sr_i}^2 + \sigma_{sr_i}^2}} \quad (4)$$

Tức là chúng ta giả thiết trạm chuyển tiếp có thể ước lượng một cách chính xác độ lợi kênh h_{sr} .

Như vậy tín hiệu tổng cộng nhận được ở trạm đích tại thời điểm T là:

$$y_d^{(2)} = \sqrt{P_s^{(2)}} h_{sd} x_s^{(2)} + n_{sd}^{(2)} + \sum_{i=1}^M (\alpha_{r_i} \sqrt{P_s^{(1)}} h_{sr_i} h_{rd} x_s^{(1)}) + \sum_{i=1}^M (\alpha_{r_i} h_{r_i d} n_{sr_i}^{(1)}) + \sum_{i=1}^M n_{r_i d}^{(2)}$$

Xét trường hợp đơn giản $M = 1$, tổ hợp với (1) dưới dạng ma trận:

$$\begin{pmatrix} y_d^{(1)} \\ y_d^{(2)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{P_s^{(1)}} h_{sd} & 0 \\ \alpha_r \sqrt{P_s^{(1)}} h_{sr} h_{rd} & \sqrt{P_s^{(2)}} h_{sd} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s^{(1)} \\ x_s^{(2)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_r h_{r1} & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_{sd}^{(1)} \\ n_{sr}^{(1)} \\ n_{sd}^{(2)} \\ n_{rd}^{(2)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Hay có dạng $Y_d = AX_s + BN$

Trong đó $N \sim N(0, N_0)$ là vector ồn Gauss phức, vòng đối xứng. Chú ý là trong giai đoạn 2 của biểu thức (5) đã phân biệt rõ ồn chuyển tiếp - đích và ồn nguồn-đích như là ồn tại hai máy thu độc lập và do đó B trở thành ma trận 2×3 .

Chúng ta định nghĩa SNR tức thời của tín hiệu nhận được:

$$\gamma_{ij} = \frac{|h_{ij}|^2 P_i}{\sigma_{ij}^2} = |h_{ij}|^2 \gamma_{ijAWGN} \quad (6)$$

Để thuận tiện, phù hợp với nhiều bài báo về chủ đề này [1-3, 8, 10], trong bài báo này chúng tôi đơn giản sử dụng γ_{AWGN} , có nghĩa là SNR của kênh AWGN không fading. Khi kênh có fading Rayleigh, SNR trong biểu thức (6) là biến độc lập, ngẫu nhiên phân bố hàm mũ (*exponential*) có trung bình được giả định là:

$$\bar{\gamma}_{ij} = \frac{\mu_{ij}^2 P_i}{\sigma_{ij}^2} = \mu_{ij}^2 \gamma_{ijAWGN} \quad (7)$$

3. Xác suất dừng mạng chuyển tiếp giao thức AF

3.1. Độ lợi kênh và SNR giữa hai đầu cuối

Theo hàng thứ hai của biểu thức (5) đối với trường hợp chỉ có hai trạm chuyển tiếp nguồn đích thì

$$y_{rd} = h_{sr} h_{rd} \alpha_r \sqrt{P_s} x_s + n_{rd}$$

trong đó $n_{rd} = h_{rd} \alpha_r n_{sr} + n_{rd}$

Giá trị SNR tức thời tại trạm đích của tín hiệu được chuyển tiếp có thể nhận được khi dùng α_r từ biểu thức (4) là

$$\gamma_R = \frac{|\alpha_r h_{sr} h_{rd}|^2 P_s}{|\alpha_r h_{rd}|^2 \sigma_{sr}^2 + \sigma_{rd}^2} = \frac{\gamma_{sr} \gamma_{rd}}{\gamma_{sr} + \gamma_{rd} + 1} \quad (8)$$

trong đó $\gamma_{sr} = \frac{|h_{sr}|^2 P_s}{\sigma_{sr}^2}$, $\gamma_{rd} = \frac{|h_{rd}|^2 P_r}{\sigma_{rd}^2}$.

SNR tổng cộng của tín hiệu được MRC tại trạm đích là:

$$\gamma_{AF} = \gamma_{sd} + \frac{\gamma_{sr} \gamma_{rd}}{\gamma_{sr} + \gamma_{rd} + 1} = \gamma_{sd} + \gamma_R \quad (9)$$

Trong đó $\gamma_{sd} = \frac{|h_{sd}|^2 P_s}{\sigma_{sd}^2}$ là SNR của trạm đích

thu được tín hiệu trên tuyến trực tiếp nguồn-đích và

$$\gamma_R = \frac{\gamma_{sr} \gamma_{rd}}{\gamma_{sr} + \gamma_{rd} + 1} = \frac{1}{\frac{1}{\gamma_{sr}} + \frac{1}{\gamma_{rd}} + \frac{1}{\gamma_{sr} \gamma_{rd}}} \approx \min\{\gamma_{sr}, \gamma_{rd}\} \quad (10)$$

cho SNRs trung bình và cao như trong [2, 7, 8],

Trong trường hợp M -chuyển tiếp, SNR tổng cộng của tín hiệu được MRC tại trạm đích là tổng của tất cả các SNRs của các tín hiệu lối vào bộ tổ hợp, tức là SNR

$$\gamma_{AF} = \gamma_{sd} + \sum_{i=1}^M \frac{\gamma_{sr_i} \gamma_{rd}}{\gamma_{sr_i} + \gamma_{rd} + 1} = \gamma_{sd} + \sum_{i=1}^M \gamma_{r_i}$$

3.2. Cận trên xấp xỉ của SNR giữa hai đầu cuối

Thông tin tương hỗ giữa các đại lượng theo entropy [11] là:

$$I(u;v) = h(v) - h(v|u) = h(u) - h(u|v)$$

Do entropy là số đo độ không chắc chắn về một biến ngẫu nhiên, vậy $h(u|v)$ được coi là độ

không chắc chắn với u sau khi được biết v . Vì thế thông tin tương hỗ của u và v là sự sụt giảm độ không chắc chắn về u do đã biết về v . Như vậy rõ ràng là thông tin tương hỗ của hai biến độc lập sẽ bằng zero. Chúng ta sẽ dùng thông tin tương hỗ giữa các đại lượng độ lợi kênh h_{sr} giữa trạm nguồn- chuyển tiếp và độ lợi kênh h_{rd} giữa trạm chuyển tiếp-đích. Thông tin tương hỗ $I(h_{sr}|h_{rd})$ thay đổi với tốc độ thông tin I .

Xác suất dùng của tốc độ thông tin đối với một tốc độ ngưỡng cho trước R_{th} được định nghĩa:

$$P_{out}(R_{th}) = P(I < R_{th}) = 1 - P(I \geq R_{th}) \quad (12)$$

Nhiều tác giả đã tính tốc độ thông tin như là tốc độ tối đa khi sử dụng SNR giữa hai đầu cuối (trạm nguồn và trạm đích),

$$I = \frac{1}{M+1} \log_2(1 + \gamma)$$

Trong đó M là số trạm chuyển tiếp còn γ là SNR giữa hai đầu cuối của mạng chuyển tiếp phân tập hợp tác. Vì thế

$$P_{out}^{\gamma}(R_{th}) = \Pr(\gamma < \gamma_{th} = 2^{(M+1)R_{th}} - 1)$$

Hoặc một cách tương đương, khi dùng μ độ lợi kênh fading

$$P_{out}^{\mu}(SNR, R_{th}) = \Pr(\mu < \mu_{th} = \frac{2^{(M+1)R_{th}} - 1}{SNR})$$

Với α_r trong (4), biểu thức tốc độ thông tin khi cho 1 trạm chuyển tiếp ($M=1$), giao thức AF được

xác định trong [10, 5] trở thành

$$I_{AF} = \frac{1}{2} \log_2(1 + |h_{sd}|^2 SNR + \frac{|h_{sr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{sr}|^2 + |h_{rd}|^2 + 1/SNR} SNR) \quad (13)$$

Ở đây chúng ta kí hiệu $SNR = P_s/N_0$ theo các kí tự *italic*. Đặt độ lợi kênh fading tức thời của mạng chuyển tiếp phân tập giữa đầu cuối- đầu cuối là:

$$|h_{AF}|^2 = |h_{sd}|^2 + \frac{|h_{sr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{sr}|^2 + |h_{rd}|^2 + 1/SNR} \quad (14)$$

Thông tin tương hỗ tức thời tối đa của một mạng chuyển tiếp AF theo biểu thức (13) và (14) là

$$I_{AF} = \frac{1}{2} \log_2(1 + |h_{AF}|^2 SNR) \quad (15)$$

Do I_{AF} trong biểu thức (15) là một hàm liên tục, xác suất dùng của mạng chuyển tiếp giao thức AF được xác định bởi

$$P_{AF}^{out}(\mu_{th}) = \Pr(|h_{AF}|^2 < \mu_{th}) \quad (16)$$

Rất rõ ràng rất khó có được lời giải cho biểu thức (14) để có kết quả chính xác đối với phân bố thống kê của $|h_{AF}|^2$ và vì thế hiện nay theo những danh mục đã được công bố, vẫn chưa có dạng nghiệm gần chính xác tính xác suất dùng theo biểu thức (14). Tất cả các nhà nghiên cứu đều bằng lòng sử dụng cận trên xấp xỉ đối với SNR của hai kênh chuyển tiếp cho môi trường SNR cao và trung bình, theo [2, 3, 7-9] viết lại SNR từ biểu thức (14)

$$\gamma_R = \frac{\gamma_{sr} \gamma_{rd}}{\gamma_{sr} + \gamma_{rd} + 1} \leq \min\{\gamma_{sr}, \gamma_{rd}\} \quad (17a)$$

hoặc tương đương

$$|h_R|^2 = \frac{|h_{sr}|^2 |h_{rd}|^2}{|h_{sr}|^2 + |h_{rd}|^2 + 1/SNR} \leq \min\{|h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2\} \quad (17b)$$

Về mặt toán học, biểu thức (14) hoàn toàn có thể tính được dựa trên phân bố thống kê độ lợi kênh fading giữa hai đầu cuối và từ đó có thể tính được xác suất dùng trong biểu thức (14) theo các điều kiện khác nhau. Tuy nhiên, với các điều kiện SNR thấp hay fading sâu thì các biểu thức (17a,b) xấp xỉ trên đây là thiếu chính xác. Chúng ta có thể chứng minh bằng cách viết lại các biểu thức (17a,b) như sau:

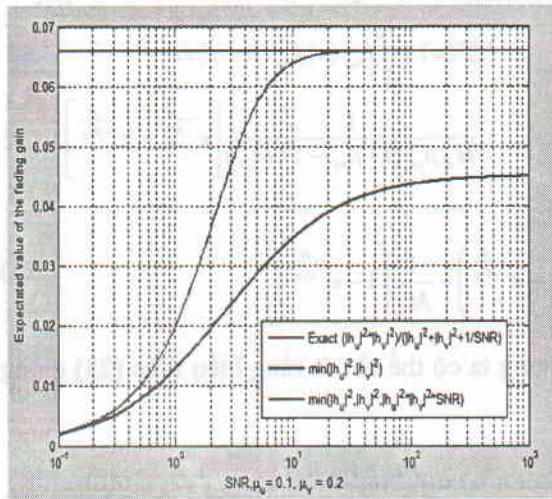
$$\gamma_R = \frac{1}{1/\gamma_{sr} + 1/\gamma_{rd} + 1/(\gamma_{sr}\gamma_{rd})} \quad (18a) \text{ và}$$

$$|h_R|^2 = \frac{1}{1/|h_{sr}|^2 + 1/|h_{rd}|^2 + 1/(|h_{sr}|^2|h_{rd}|^2 SNR)} \quad (18b)$$

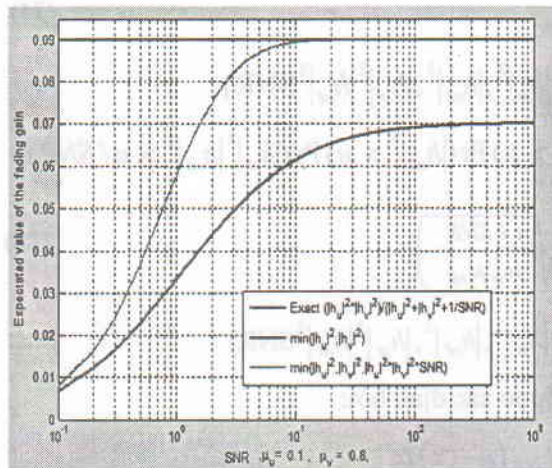
thì đối với toàn bộ dải SNR, chúng ta đưa ra biểu thức xấp xỉ như sau:

$$\gamma_R \leq \min\{\gamma_{sr}, \gamma_{rd}, \gamma_{sr}\gamma_{rd}\} \quad (19a) \text{ tương đương}$$

$$|h_R|^2 \leq \min\{|h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2, |h_{sr}|^2|h_{rd}|^2 SNR\} \quad (19b)$$



(a)



(b)

Hình 2. Giá trị độ lợi fading dự kiến của kênh hai chuyển tiếp (a) gần trạm nguồn và (b) gần trạm đích hơn.

Đồ thị biểu diễn kết quả trong hình 2 dự kiến giá trị độ lợi Fading của mạng chuyển tiếp giao thức AF với M=1. Trong đó đường cong màu đỏ theo biểu thức chính xác (18b) với cận trên hiện hành, xấp xỉ hóa biểu thức (17b) màu xanh da trời và đường cong màu xanh lá cây xấp xỉ hóa biểu thức (19b)

Kết quả trong hình 2 cũng đã chỉ ra rằng: khi các độ lợi kênh nhỏ khi fading sâu, tức là μ_u và μ_v nhỏ (hình 2a), độ chính xác của biểu thức xấp xỉ (19) là rất cao trong cả hai miền SNR cao lẫn SNR thấp. Cũng như vậy, khi vị trí của trạm chuyển tiếp gần với vị trí trạm đích hơn so với trạm nguồn (khi đó độ chênh lệch giữa μ_u và μ_v lớn – hình 2b) thì biểu thức xấp xỉ (19) được đưa ra tốt hơn khi khoảng cách trạm chuyển tiếp với trạm nguồn-đích là tương đương với nhau. Điều này có thể được lí giải bằng cách kiểm tra độ lớn tương quan của các đại lượng dưới mẫu số biểu thức (18b) đối với các vị trí hai trạm chuyển tiếp.

3.3. Xác suất dừng dựa trên SNR giữa hai đầu cuối

3.3.1 Xác suất dừng dựa trên xấp xỉ cận trên $\min\{|h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2\}$

Trước hết, hàm cdf $F(\mu)$ được sử dụng để tính xác suất dừng P^{out} của mạng chuyển tiếp không dây phân tập hợp tác theo điều kiện fading chậm không chọn lọc tần số đối với một ngưỡng, R_{th} , dừng của tốc độ thông tin cho trước được định nghĩa là:

$$P_{\mu_j}^{out}(SNR, R_{th}) = \Pr\{\mu_{ij} < \mu_{th}\} = F_{\mu_j}(\mu_{th})$$

trong đó $\mu_{th} = (2^{(M+1)R_{th}} - 1)/SNR$ và M là bậc phân tập.

Có hai cách xem xét giới hạn của cdf khi $\mu_{th} \rightarrow 0$: một là khi SNR lớn tại một ngưỡng dừng R_{th} , cho trước và hai là khi cả hai SNR và R_{th} đều nhỏ. Trong trường hợp thứ hai, R_{th} nhỏ và chúng ta đặt $\epsilon \equiv R_{th}$, tương ứng với dung

lượng dùng C_ϵ ở mức ϵ . Vì thế giới hạn của cdf khi $\mu_{th} \rightarrow 0$ trong cả hai trường hợp cho kết quả như nhau.

Do độ lợi hai kênh fading là độc lập với nhau do đó hàm cdf của $|h_R|^2$ có thể thu được

$$F_{|h_R|^2}(\mu) = 1 - \Pr(|h_{sr}|^2 \geq \mu) \Pr(|h_{rd}|^2 \geq \mu) \quad (20)$$

Chúng ta thấy rằng, biểu thức (19) có thể dễ dàng tính được cho fading Rayleigh

$$F_{|h_R|^2}(\gamma) = 1 - \exp\left\{-\gamma\left(\frac{1}{\gamma_{sr}} + \frac{1}{\gamma_{rd}}\right)\right\}$$

hay $F_{|h_R|^2}(\mu) = 1 - \exp\left\{-\left(\frac{\mu}{M_r}\right)\right\} \quad (21)$

$$\text{và } F_{|h_{AF}|^2}(\mu) = \frac{1}{(1/\mu_{sd} - 1/M_R)} \left[\frac{1}{\mu_{sd}} \left(1 - e^{-\frac{\mu}{M_R}}\right) - \frac{1}{M_R} \left(1 - e^{-\frac{\mu}{\mu_{sd}}}\right) \right] \quad (23)$$

Khi cho $\mu \rightarrow 0$, bằng cách sử dụng $e^{-x} \approx 1 - x + x^2/2$, chúng ta có thể chỉ ra rằng biểu thức (23) giống như biểu thức

$$\lim_{\substack{\mu_{th} \rightarrow 0 \\ SNR \rightarrow \infty}} \left\{ \frac{P_{AF}^{out}(\mu_{th})}{\mu_{th}^2} \right\} = \frac{1}{2\mu_{sd}} \left(\frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{\mu_{rd}} \right) = \frac{\mu_{rd} + \mu_{sr}}{2\mu_{sd}\mu_{sr}\mu_{rd}}$$

Vì thế $P_{AF}^{out}(SNR, R_{th}) = F_{|h_{AF}|^2}(\mu_{th}) \quad (24)$

3.3.2. Xác suất dùng dựa trên xấp xỉ cận trên $\min\{|h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2, |h_{sr}|^2|h_{rd}|^2 SNR\}$

Theo [5] biểu thức (17) cho $F_{|h_R|^2}(\mu) = 1 - \Pr(|h_{sr}|^2 > \mu) \Pr(|h_{rd}|^2 > \mu) \Pr(|h_{sr}|^2|h_{rd}|^2 > \mu/SNR)$

$$= 1 - e^{-\frac{\mu}{M_r}} 2 \sqrt{\frac{\mu/SNR}{\mu_{sr}\mu_{rd}}} K_1 \left(2 \sqrt{\frac{\mu/SNR}{\mu_{sr}\mu_{rd}}} \right) \quad (25)$$

Trong đó $K_1(x)$ là hàm loại hai và do $|h_{AF}|^2 = |h_{sd}|^2 \{ |h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2, |h_{sr}|^2|h_{rd}|^2 SNR \}$

Mối tương quan chập của tổng hai biến ngẫu nhiên được xác định bởi:

$$F_{|h_{AF}|^2}(\mu) = \int_0^{\mu} f_{|h_{sd}|^2}(x) f_{|h_R|^2}(\mu - x) dx$$

từ đó $F_{|h_{AF}|^2}(\mu) = \int_0^{\mu} \frac{1}{\mu_{sd}} e^{-\frac{x}{\mu_{sd}}} \left\{ 1 - e^{-\frac{\mu-x}{M_r}} 2 \sqrt{\frac{(\mu-x)/SNR}{\mu_{sr}\mu_{rd}}} K_1 \left(2 \sqrt{\frac{(\mu-x)/SNR}{\mu_{sr}\mu_{rd}}} \right) \right\} dx$

Còn $f_{|h_R|^2}(\gamma) = \frac{dF_r(\gamma)}{d\gamma} = \frac{1}{M_r} e^{-\gamma/M_r}$, tức là có sự

thay đổi ngẫu nhiên phân bố hàm mũ với trung bình M_r , trong đó $M_r = \{1/\mu_{sr} + 1/\mu_{rd}\}^{-1}$. Độ lợi kênh fading giữa hai đầu cuối có thể được xấp xỉ nhờ cận trên của nó bằng:

$$|h_{AF}|^2 = |h_{sd}|^2 + \min\{|h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2\} \quad (22)$$

Như vậy, cdf của $|h_{AF}|^2$ trong biểu thức (22) có thể nhận được từ [17] bằng tích chập của hai SNR

$$P_{AF}^{out}(\mu) = \int_0^{\mu} f_{\mu_{sd}}(x) f_{\mu_R}(\mu - x) dx$$

$$= \frac{1}{M_R \mu_{sd} (1/\mu_{sd} - 1/M_R)} \left[e^{-\frac{\mu}{M_R}} - e^{-\frac{\mu}{\mu_{sd}}} \right]$$

Đặt $y = \mu x$ ta có $F_{|h_{AF}|^2}(\mu) = \left(1 - e^{-\frac{\mu}{\mu_{sd}}}\right) - \frac{\mu}{\mu_{sd}} e^{-\frac{\mu}{\mu_{sd}}} \int_0^{\frac{\mu}{\mu_{sd}}} e^{-y} \left(\frac{1}{M, \mu_{sd}}\right) 2 \sqrt{\frac{y / SNR}{\mu_{sr} \mu_{rd}}} K_1 \left(2 \sqrt{\frac{y / SNR}{\mu_{sr} \mu_{rd}}}\right) dy$ (26)

Xác xuất dừng khi đó có thể được tính theo biểu thức (24).

3.3.4. Xác xuất dừng dựa trên cận cut-set

Nhiều tác giả sử dụng lý thuyết thông lượng tối đa điểm cắt tối thiểu “max-flow min-cut” [1, 3] chấp nhận cận trên dung lượng của hệ thống chuyển tiếp song công hoàn toàn với nhiều lối vào, nhiều lối ra (MIMO). Khi đó các tín hiệu thu và tín hiệu phát đồng thời chiếm cùng khe thời gian. Lí do để tính cận trên dung lượng là trong các hệ thống truyền thông không dây hiện

nay, khi các kênh vừa là kênh quảng bá (BC) theo chiều xuống và nó cũng là kênh đa truy cập (MAC) theo chiều lên thì đây là các kênh kết nối hoàn toàn phân tập. Khi đó các kênh chuyển tiếp nói chung là chuyển tiếp AF vì thế chúng tôi sử dụng [1], trong trường hợp không có sự tương quan giữa h_{sr} và h_{rd} và công suất phát từ nguồn và từ trạm chuyển tiếp là như nhau thì cận trên dung lượng là:

$$C^+ = \min \left\{ \frac{1}{2} \log(1 + (\gamma_{sd} + \gamma_{sr})), \frac{1}{2} \log(1 + (\gamma_{sd} + \gamma_{rd})) \right\}$$
 (27)

Độ lợi kênh giữa hai đầu cuối được cắt tại cận tương ứng với biểu thức (27) là:

$$|h_{CSB}|^2 = \min \left\{ (|h_{sd}|^2 + |h_{sr}|^2), (|h_{sd}|^2 + |h_{rd}|^2) \right\}$$
 (28)

Cận dưới tương ứng của xác xuất dừng trong điều kiện fading là:

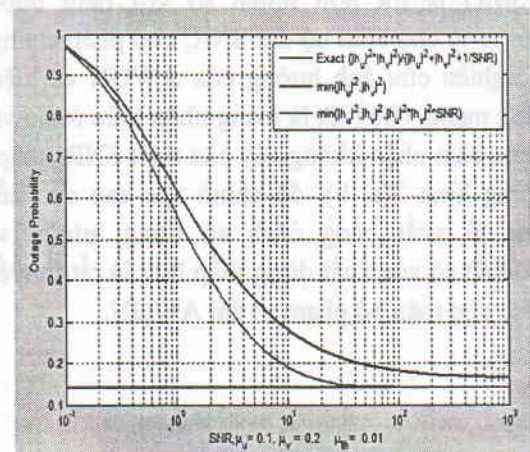
$$P_{CSB}^{out}(\mu_{th}) = 1 - \Pr\left[(|h_{sd}|^2 + |h_{sr}|^2) > \mu_{th} \right] \Pr\left[(|h_{sd}|^2 + |h_{rd}|^2) > \mu_{th} \right]$$

$$= 1 - \frac{1}{\mu_{sd} - \mu_{sr}} \left\{ \mu_{sd} e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}} - \mu_{sr} e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sr}}} \right\} \frac{1}{\mu_{sd} - \mu_{rd}} \left\{ \mu_{sd} e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}} - \mu_{rd} e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{rd}}} \right\}$$
 (29)

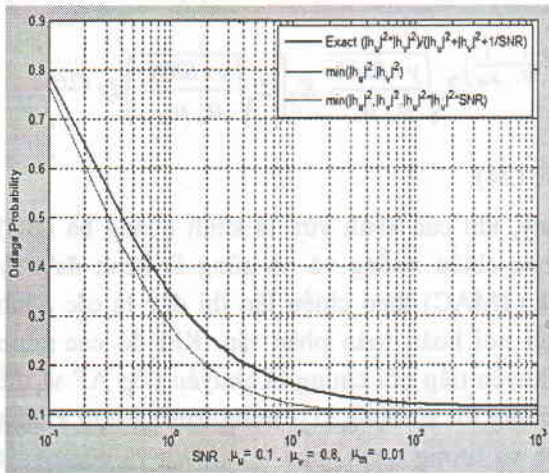
Kết quả trong biểu thức (29) có thể nhận được từ [5], từ đó ta có biểu thức 30 dưới đây:

$$E\left[|h_{sd}|^2 + \min(|h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2) \right] \geq E\left[\min\left\{ (|h_{sd}|^2 + |h_{sr}|^2), (|h_{sd}|^2 + |h_{rd}|^2) \right\} \right] \geq E\left[|h_{sd}|^2 + \min(|h_{sr}|^2, |h_{rd}|^2) SNR \right]$$

Các công trình đã được công bố trước đây đều sử dụng phép xấp xỉ bằng $\min(u, v)$, đã cho kết quả các cận trên không không chính xác. Trong hình 2 trên đây và hình 3a, hình 3b dưới đây không vẽ biểu diễn các kết quả tương ứng với cận cut-set do chúng ta hoàn toàn có thể thấy rằng, cận của biểu thức (30) hoàn toàn giống với cận $\min(u, v)$. Điều này cho thấy biểu thức (17) và (25) chúng ta đề xuất có độ chính xác trong toàn dải SNR tốt hơn nhiều so với các đề xuất trước đó.



(a)



(b)

Hình 3. Ảnh hưởng của tỉ tín hiệu trên ồn AWGN tới xác suất dừng của mạng chuyển tiếp phân tập hợp tác khi sử dụng các cận và xấp xỉ.

Các phân tích thống kê về tỷ lệ tín hiệu trên ồn (SNR) fading tức thời hoặc độ lợi kênh tương ứng với ồn fading tức thời của giao thức chuyển tiếp AF được coi là cực kỳ phức tạp. Hầu hết các nghiên cứu hiện có phá vỡ sự phân tích phức tạp bằng cách bỏ qua các ảnh hưởng của AWGN sau đó bằng cách sử dụng đơn giản xấp xỉ trên ràng buộc $\min(u, v)$ tỷ lệ tín hiệu trên ồn trong biểu thức (17a) hoặc tương đương với kênh fading trong biểu thức (17b).

Chúng ta có thể nhìn thấy từ hình 2 đề xuất xấp xỉ của chúng tôi bị ràng buộc trên $(u, v, uvSNR)$ là tốt hơn nhiều so với ràng buộc $\min(u, v)$ cho toàn bộ dải SNR, cho phép chúng ta nghiên cứu ảnh hưởng của AWGN về hiệu năng mạng, đặc biệt là mạng nhận thức radio và mạng cảm nhận không dây cần thiết SNRs thấp. Trong hình 3(a, b), độ chính xác cao của kết quả đề xuất bằng cách sử dụng $\min(u, v, uvSNR)$ có xác suất dừng thấp hơn là rất thuyết phục cho toàn bộ phạm vi dải AWGN.

4. Xác suất dừng mạng chuyển tiếp giao thức DF

Với chi phí ngày càng giảm và nhờ sự linh hoạt giải mã của kỹ thuật số, giao thức chuyển tiếp DF đã ngày càng trở nên phổ biến hơn và đặc biệt ổn của chuyển tiếp AF sẽ bị giao thức DF loại bỏ.

4.1. Xác suất dừng chuyển tiếp DF không đổi

Thông tin tương hỗ trung bình tối đa giữa lối vào trạm đích và hai tín hiệu lối ra trạm nguồn và trạm chuyển tiếp có các tín hiệu phức phân bố đồng nhất Gauss của mạng chuyển tiếp sử dụng giao thức DF với mã lặp theo [3] là:

$$I_{DF} = \min \left\{ \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{sr}), \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{sd} + \gamma_{rd}) \right\} \quad (31)$$

Đại lượng đầu tiên của biểu thức (31) xác định tốc độ tối đa mà trạm chuyển tiếp có thể giải mã dữ liệu nguồn còn đại lượng thứ hai xác định tốc độ tối đa mà trạm đích có thể giải mã dữ liệu mà nó được trạm nguồn cung cấp và dữ liệu thông qua trạm phát lặp. Khi đòi hỏi cả trạm chuyển tiếp lẫn trạm đích giải mã toàn bộ các từ mã nhận được từ trạm nguồn không có lỗi, đòi hỏi này đạt được nhờ tối thiểu hóa thông lượng thông tin tương hỗ [1]. Điều này hạn chế hiệu năng của DF không đổi tới hiệu năng của liên kết giữa trạm nguồn và trạm chuyển tiếp, tức là độ lợi phân tập có thể không đạt được.

Xác suất dừng tương ứng biểu thức (31) trong điều kiện fading là:

$$\begin{aligned} P_{DF}^{out}(\mu_{th}) &= \Pr(|h_{FDF}|^2 \leq \mu_{th}) \\ &= 1 - \Pr(|h_{sr}|^2 > \mu_{th}) \Pr\left[\left(|h_{sr}|^2 + |h_{rd}|^2\right) > \mu_{th}\right] \\ &= 1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sr}}} \left[1 - \frac{1}{\mu_{sd} - \mu_{rd}} \left\{ \mu_{sd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}} \right) - \mu_{rd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{rd}}} \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (32)$$

Kết quả tại hàng cuối cùng của biểu thức (32) có thể thu được từ phụ lục [13].

Bằng cách áp dụng phương pháp xấp xỉ bậc 1 cho biểu thức $e^{-x} \approx 1-x$, chúng ta có thể nhận được

$$\lim_{\mu_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{P_{FDF}^{out}(\mu_{th})}{\mu_{th}} \right\} = \frac{1}{\mu_{sr}} \quad (33)$$

Ý nghĩa quan trọng của biểu thức (33) là ở chỗ nó đã chỉ ra rằng chuyển tiếp sử dụng giao thức DF không đòi hỏi đạt được độ lợi phân tập, tức là tại SNR cao, đường cong suy giảm xác suất dừng là $1/\text{SNR}$ chứ không phải là $1/\text{SNR}^2$. Nguyên nhân là do nó hoàn toàn phụ thuộc vào liên kết trạm nguồn-trạm chuyển tiếp để giải mã hoàn toàn dữ liệu nguồn như đã được chỉ ra trong [12].

4.2. Xác suất dừng chuyển tiếp DF lọc lựa (Selection DF)

Giao thức chuyển tiếp DF lọc lựa sử dụng khi trạm chuyển tiếp không có thể giải mã dữ liệu nguồn, tức là liên kết trạm nguồn-trạm chuyển tiếp ngừng lại, trạm nguồn lặp lại việc phát lại trên liên kết trực tiếp nguồn-đích. Vì thế tốc độ thông tin trung bình tối đa trong trường hợp này là tốc độ mã lặp. Tốc độ thông tin của mạng chuyển tiếp DF lọc lựa có thể biểu diễn như trong [6]

$$I_{SDF} = \begin{cases} \frac{1}{2} \log(1 + 2\gamma_{sd}), & \gamma_{sr} < \gamma_{th} \\ \frac{1}{2} \log(1 + \gamma_{sd} + \gamma_{rd}), & \gamma_{sr} \geq \gamma_{th} \end{cases} \quad (34)$$

Xác suất dừng chuyển tiếp DF lọc lựa trong điều kiện fading là:

$$\begin{aligned} P_{SDF}^{out}(\mu_{th}) &= \Pr(|h_{SDF}|^2 \leq \mu_{th}) = \\ &\Pr(2|h_{sd}|^2 < \mu_{th}) \Pr(|h_{sr}|^2 < \mu_{th}) \\ &+ \Pr(|h_{sr}|^2 > \mu_{th}) \Pr(|h_{sd}|^2 + |h_{rd}|^2 < \mu_{th}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{2\mu_{sd}}}\right) \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sr}}}\right) + \\ &+ \frac{e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sr}}}}{\mu_{sd} - \mu_{rd}} \left\{ \mu_{sd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}}\right) - \mu_{rd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{rd}}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (35)$$

Kết quả tại hàng cuối cùng của biểu thức (35) có thể thu được từ phụ lục [13]. Chúng ta cũng có thể chỉ ra rằng, kết quả của các tác giả trước đây [6] có thể nhận được từ việc lấy xấp xỉ bậc hai của kết quả trong biểu thức (10), tức là:

$$\lim_{\mu_a \rightarrow 0} \left\{ \frac{P_{SDF}^{out}(\mu_{th})}{\mu_{th}^2} \right\} = \frac{1}{2\mu_{sd}} \frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{2\mu_{sd}\mu_{rd}} = \frac{\mu_{rd} + \mu_{sr}}{2\mu_{sd}\mu_{sr}\mu_{rd}}$$

4.3. Xác suất dừng của chuyển tiếp DF tăng cường (IR-DF)

Như đã chỉ ra tại phần giới thiệu, dung lượng thông tin của mạng chuyển tiếp khi sử dụng giao thức DF tăng cường là một biến ngẫu nhiên phụ thuộc vào số các khối con dữ liệu đang sử dụng để truyền tin. Dung lượng thông tin của giao thức này rất khó xác định và vì vậy không có thể xác định một cách đơn giản xác suất dừng cho chuyển tiếp IR-DF. Bởi vậy thay vì chúng ta tính trực tiếp xác suất dừng cho chuyển tiếp IR-DF theo định nghĩa của điều kiện dừng. Hệ thống dừng hoặc khi các liên kết nguồn-đích và liên kết trạm nguồn-trạm chuyển tiếp dừng hoặc liên kết trạm nguồn-trạm chuyển tiếp không dừng (tức là có khả năng DF), nhưng tích lũy SNR tại đích của tín hiệu từ trạm nguồn và các trạm chuyển tiếp không đủ vượt giá trị ngưỡng dừng. Như vậy trong điều kiện fading, xác suất dừng của mạng chuyển tiếp không dây giao thức IR-DF là:

$$\begin{aligned} P_{IR-DF}^{out}(\mu_{th}) &= \Pr(|h_{IR-DF}|^2 \leq \mu_{th}) = \\ &\Pr(|h_{sd}|^2 < \mu_{th}) \Pr(|h_{sr}|^2 < \mu_{th}) + \\ &+ \Pr(|h_{sr}|^2 \geq \mu_{th}) \Pr(|h_{sd}|^2 + |h_{rd}|^2 < \mu_{th}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}}\right) \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sr}}}\right) + \\
 &+ \frac{e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sr}}}}{\mu_{sd} - \mu_{rd}} \left\{ \mu_{sd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}}\right) - \mu_{rd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{rd}}}\right) \right\}
 \end{aligned} \tag{37}$$

Kết quả tại hàng cuối cùng của biểu thức (37) có thể thu được từ phụ lục [13]. Chúng ta cũng có thể chỉ ra rằng, kết quả của các tác giả trước đây [7] có thể nhận được từ việc lấy xấp xỉ bậc hai của kết quả trong biểu thức (37), tức là:

$$\lim_{\mu_{th} \rightarrow 0} \left\{ \frac{P_{IR-DF}^{out}(\mu_{th})}{\mu_{th}^2} \right\} = \frac{1}{\mu_{sd}} \frac{1}{\mu_{sr}} + \frac{1}{2\mu_{sd}\mu_{rd}} = \frac{2\mu_{rd} + \mu_{sr}}{2\mu_{sd}\mu_{sr}\mu_{rd}} \tag{38}$$

4.4. Cận dưới xác suất dừng

Giống như việc sử dụng lí thuyết thông lượng tối đa, điểm cắt tối thiểu chỉ ra trong mục 3.4 và trong [13], khi giữa hai đại lượng γ_{sd} , γ_{sr} không có sự tương quan và công suất phát từ trạm nguồn và từ trạm chuyển tiếp bằng nhau thì cận trên dung lượng là:

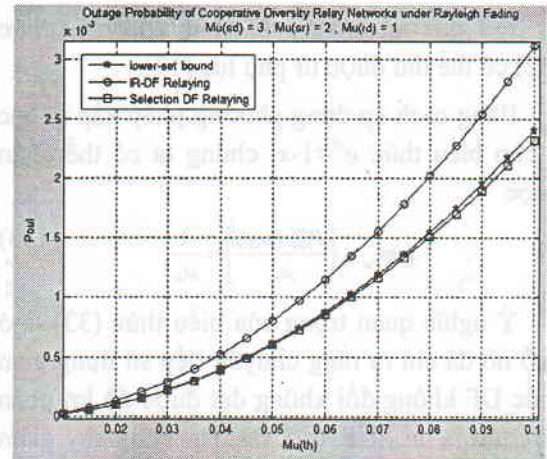
$$C^* = \min \left\{ \frac{1}{2} \log(1 + (\gamma_{sd} + \gamma_{sr})), \frac{1}{2} \log(1 + (\gamma_{sd} + \gamma_{rd})) \right\} \tag{39}$$

Độ lợi kênh giữa hai đầu cuối được cắt tại cận dưới ứng với biểu thức (39) là

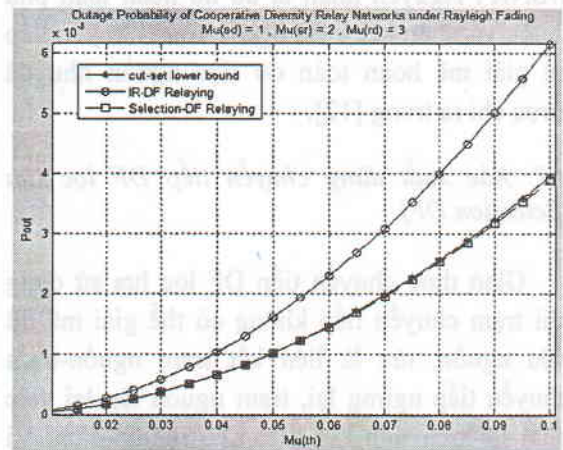
$$|h_{CSB}|^2 = \min \left\{ (|h_{sd}|^2 + |h_{sr}|^2), (|h_{sd}|^2 + |h_{rd}|^2) \right\} \tag{40}$$

Cận dưới tương ứng xác suất dừng trong điều kiện fading là:

$$\begin{aligned}
 P_{CSB}^{out}(\mu_{th}) &= 1 - \Pr \left[(|h_{sd}|^2 + |h_{sr}|^2) > \mu_{th} \right] \Pr \left[(|h_{sd}|^2 + |h_{rd}|^2) > \mu_{th} \right] \\
 &= 1 - \left[1 - \frac{1}{\mu_{sd} - \mu_{sr}} \left\{ \mu_{sd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}}\right) - \mu_{sr} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sr}}}\right) \right\} \right] \left[1 - \frac{1}{\mu_{sd} - \mu_{rd}} \left\{ \mu_{sd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}}\right) - \mu_{rd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{rd}}}\right) \right\} \right] \\
 &= 1 - \frac{1}{\mu_{sd} - \mu_{sr}} \left\{ \mu_{sd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}}\right) - \mu_{sr} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sr}}}\right) \right\} \frac{1}{\mu_{sd} - \mu_{rd}} \left\{ \mu_{sd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{sd}}}\right) - \mu_{rd} \left(1 - e^{-\frac{\mu_{th}}{\mu_{rd}}}\right) \right\}
 \end{aligned} \tag{41}$$



(a)



(b)

Hình 4. Xác suất dừng của giao thức chuyển tiếp IR-DF, SDF và cận dưới xác suất trong hai trường hợp a) với $(\mu_{sd}, \mu_{sr}, \mu_{rd}) = (1, 2, 3)$ và b) với $(\mu_{sd}, \mu_{sr}, \mu_{rd}) = (3, 2, 1)$.

Kết quả tại hàng cuối cùng của biểu thức (41) có thể thu được từ phụ lục [13]. Chúng ta cũng có thể chỉ ra rằng, kết quả của các tác giả trước đây [7] có thể nhận được từ việc lấy xấp xỉ bậc hai của kết quả trong biểu thức (41), tức là

$$\lim_{\mu_{th} \rightarrow 0} \left\{ \frac{P_{CSB}^{out}(\mu_{th})}{\mu_{th}^2} \right\} = \frac{\mu_{rd} + \mu_{sr}}{2\mu_{sd}\mu_{sr}\mu_{rd}}$$

Hình 4 cho thấy xác suất dừng DF cận dưới thấp hơn xác suất dừng DF lọc lựa. Điều này được giải thích lí thuyết do năng lượng cấp một cách liên tục cho DF cận dưới trong khi đó cấp gián đoạn cho DF lọc lựa khi mà kênh nguồn-chuyển tiếp bị dừng. Hình 4(a) tương ứng với trường hợp trạm chuyển tiếp gần trạm nguồn hơn còn hình 4(b) với trường hợp trạm chuyển tiếp gần trạm đích hơn cho thấy rõ ảnh hưởng của khả năng DF trong mạng chuyển tiếp.

5. Kết luận

Trong bài báo này, chúng tôi đã tìm ra biểu thức tính toán các độ lợi kênh và xác suất dừng hệ thống của mạng chuyển tiếp không dây phân tập hợp tác sử dụng các giao thức AF và DF.

Mặc dù các phân tích thống kê về tỷ lệ tín hiệu trên ồn (SNR) fading tức thời hoặc độ lợi kênh tương ứng với ồn fading tức thời của giao thức chuyển tiếp AF được coi là cực kì phức tạp và các nghiên cứu trước đó chỉ xem xét xác suất dừng hệ thống của mạng chuyển tiếp với SNR hoặc rất cao hoặc rất thấp. Trong bài báo này, chúng tôi đã tính toán thành công với một phân tích chính xác hơn các tính toán trước đó trong phạm vi đầy đủ của toàn bộ dải SNR. Xác suất dừng của mạng chuyển tiếp phân tập hợp tác sử dụng giao thức chuyển tiếp AF đã được tính toán như là một hàm của các ngưỡng dừng, μ_{th} , của độ lợi kênh fading giữa hai đầu cuối.

Ưu điểm của phương pháp dùng tham số ngưỡng này là cả hai dải tiệm cận, SNR lớn và SNR nhỏ và có thể nghiên cứu xác suất dừng bằng cách cho $\mu_{th} \rightarrow 0$.

Chúng tôi đã xây dựng thành công biểu thức tính chính xác cho xác suất dừng hệ thống của giao thức DF theo các kiểu chuyển tiếp khác nhau. Hình 4 cho thấy các đường cong xác suất dừng như một hàm của ngưỡng dừng μ_{th} với hai kiểu chuyển tiếp: DF lọc lựa và DF tăng cường. Các đường cong xác suất dừng cho DF cố định không được hiển thị trong hình 4 bởi vì giá trị xác suất dừng của giao thức DF cố định lớn hơn hai bậc so với các giao thức DF lọc lựa và DF tăng cường. Hình 4 cho thấy giao thức DF lọc lựa chỉ chuyển tiếp thông tin qua các liên kết trực tiếp nếu trạm chuyển tiếp dừng (trong giai đoạn truyền chuyển tiếp) có xác suất dừng DF lọc lựa thấp hơn (tức là tốt hơn) hơn so với DF tăng cường. Tuy nhiên, so sánh đơn giản này có thể là không công bằng vì dung lượng thông tin của DF tăng cường là một biến thống kê và định nghĩa của μ_{th} DF tăng cường không có ý nghĩa tương tự như của μ_{th} đối với DF lọc lựa. Hiệu năng DF tăng cường có thể tốt hơn trên cơ sở xét về hiệu năng băng thông và công suất.

Bài báo đã thực hiện một bước quan trọng hướng tới một giải pháp tính xác suất dừng của giao thức chuyển tiếp phân tập hợp tác của AF, nhưng những thách thức cho nghiệm chính xác vẫn còn để tìm kiếm dạng gần đúng đối với biểu thức (25).

Lời cảm ơn

Bài báo này được tài trợ bởi đề tài QG 12.45 trường Đại học Công nghệ, Đại học Quốc gia Hà Nội

Tài liệu tham khảo

- [1] R. Pabst, B. Walke, and G. Fettweis, "Relay-Based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 9, pp. 80-89, September 2004.
- [2] Vijay Ganwani, Bikash Kumar Dey, "Performance Analysis of Amplify and Forward Based Cooperative Diversity in MIMO Relay Channel", *IEEE 70th Vehicular Technology Conference VTC Sep. 2009*
- [3] P. Weitkemper, and K.-D. Kammeyer, "Soft information relaying for wireless networks with error-prone sourcerelay-link," in *7th International ITG Conference on Source and Channel Coding*, Ulm, Germany, Jan. 2008.
- [4] T. Wang, A. Cano, G. Giannakis, "High-Performance Cooperative Demodulation with Decode-and-Forward Relays" *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, pp. 1427-1438, July 2007.
- [5] E. Morgado, I. Mora-Jimenez, J. Vinagre, J. Ramos, and A. J. Caamano, "End-to-End Average BER in Multihop Wireless Networks over Fading Channels," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 9, pp. 2478-2487, 2010.
- [6] L.H. Ozarow et al., "Information theoretic considerations for cellular mobile radio," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 43, no. 2, pp.359-377, May 1994.
- [7] J.N. Laneman et al., "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior," *IEEE Trans. Inform. Theory*, 50 (12), pp. 3062-3080, December 2004.
- [8] Yonglan Zhu et al., "Outage Probability of Rician Fading Relay Channels," *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 4, pp. 2648-2652, July 2008.
- [9] T.M. Cover and J.A. Thomas, *Information Theory*. John Wiley & Sons, 1991.
- [10] T. Renk et al., "Outage Capacity of Incremental Relaying at Low Signal-to-Noise Ratios," *IEEE 70th Vehicular Technology Conference VTC Sep. 2009*.
- [11] Liam Paninski, "Estimation of Entropy and Mutual Information", *Center for Neural Science, New York University, New York, NY 10003, U.S.A.*
- [12] Quoc Tuan Nguyen, D.Thong Nguyen, Lam sinh Cong "Outage Probability Analysis of Amplify-and-Forward Cooperative Diversity Relay Networks". *Conference IEEE Region 10 Tencon'2011 Bali-Indonesia. Nov 2011, page 956-960.*
- [13] D.Thong Nguyen, Quoc Tuan Nguyen, Chung Trang Cong, "Outage Probability Analysis of Cooperative Diversity DF Relaying under Rayleigh Fading", in *4th Conference on Advance Technology on Communications ATC'2011, Danang, Aug. 2011, p.116-119.*

Estimate Outage Probability of Cooperative Diversity Relaying Networks

Nguyen Quoc Tuan¹, D.T. Nguyen²

¹*VNU University of Engineering and Technology, 144 Xuan Thuy, Hanoi, Vietnam*

²*University of Technology Sydney, Australia*

In the slow-fading environment, once a channel is in deep fade, message coding is no longer effective in improving transmission reliability, and *cooperative diversity* transmission has proved to dramatically improve the performance of transmission. The relay network with Amplify-Forward (AF) and Decode-Forward (DF) protocols using low-complexity cooperative diversity relaying protocols for ease of potential implementation analyzing the capacity of relay networks is often based on the max-

flow min-cut theorem providing an upper bound on the true capacity which is generally still unknown. However, the statistical analysis of the fading end-to-end channel gain of the relaying protocols is well known as extremely complex, and research work to date have only studied the asymptotic behavior of the outage probability of the network at either very low or very high signal-to-noise ratios (SNR). Most current works circumvent the analytical complexity in AF protocol by first ignoring the effect of additive white Gaussian noise (AWGN) then by using the simple approximated upper bound $\min(u, v)$ for the signal-to-noise ratio. The approximated upper bound $\min(u, v, uvSNR)$, proposed in this paper, is far better bound than $\min(u, v)$ for the entire SNR, which allows us to derive exact analytical expressions to study the effect of AWGN on the network performance. The accuracy of the resulting lower bound for the network's outage probability using the proposed $\min(u, v, uvSNR)$ function is very convincing for the entire range of AWGN. We present exact analytical expressions for the outage probability of cooperative diversity wireless relay networks operating in various DF protocols (fixed, adaptive, and incremental relaying) under Rayleigh fading conditions. Our analytical results are presented in such a way that they can be used for both asymptotic conditions.