ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG HỆ THỐNG TRUYỀN THÔNG ĐA CHẶNG SỬ DỤNG KỸ THUẬT LỰA CHỌN CHUYỂN TIẾP TỪNG PHẦN TRONG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC DẠNG NỀN

Nguyễn Trung Tấn[1*], Trần Mạnh Hoàng[2], Dương Mạnh Thành[2]

Tóm tắt: *Trong bài báo này, chúng tôi đề xuất phương thức chuyển tiếp đa chặng phân tập cho mạng thứ cấp (SU) với điều kiện ràng buộc can nhiễu tối đa cho phép của mạng sơ cấp (PU). Trong mô hình đề xuất, nút chuyển tiếp cho chặng kế tiếp được xác định dựa trên phương pháp lựa chọn nút chuyển tiếp từng phần. Dựa vào tỷ lệ công suất tín hiệu trên nhiễu (SNR) trên toàn tuyến, chúng tôi đánh giá hiệu năng hệ thống thông qua các đại lượng xác suất dừng, tỷ lệ lỗi bít trung bình và dung lượng kênh trung bình dưới tác động của kênh truyền fading Rayleigh. Các kết quả phân tích và mô phỏng Monte Carlo đã minh chứng rằng, hệ thống thứ cấp với lựa chọn nút chuyển tiếp từng phần có thể đạt độ lợi hiệu năng đáng kể so với hệ thống truyền thông đa chặng truyền thống.*

Từ khóa: Vô tuyến nhận thức; Truyền thông đa chặng; Giải mã chuyển tiếp; Phân tích phẩm chất hệ thống.

1. GIỚI THIỆU

Phương thức phân tập hợp tác trong các mạng vô tuyến đã được nghiên cứu nhiều bởi các nhà khoa học trên thế giới. Độ lợi phân tập đạt được thông qua mạng ảo được khảo sát trong [1]. Sử dụng các giao thức phân tập kết hợp phân nhóm trong các mạng vô tuyến đa chặng đã được đề xuất trong [2, 3], phẩm chất của hệ thống được cải thiện do kết hợp các ưu điểm của độ lợi phân tập và truyền thông đa chặng.

Lựa chọn chuyển tiếp từng phần với phương thức xử lý tín hiệu AaF (Amplify-and-Forward) cho hệ thống hai chặng đã được đề xuất trong [4]. Trong đó, chỉ một phần thông tin kênh truyền được biết ở đầu phát. Mô hình đề xuất đáp ứng tốt cho các hệ thống vô tuyến có tài nguyên hạn chế – đặc biệt là mạng adhoc và mạng cảm biến. Ngoài ra, phương thức lựa chọn này giảm được chi phí hồi tiếp và đạt được độ lợi phân tập là 3dB như kết quả khảo sát ở trong [4].

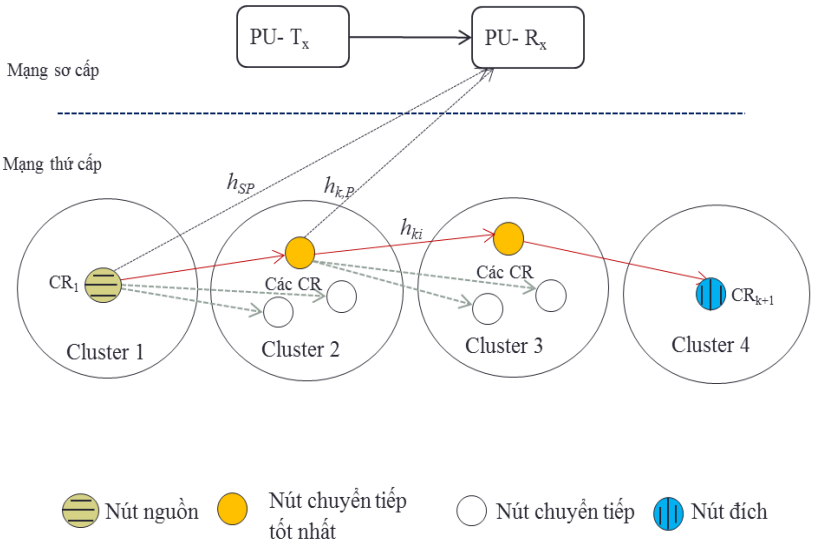
Tài nguyên về tần số vô tuyến được biết đến là loại tài nguyên hữu hạn, nhưng chính sách phân bổ phổ tần hiện nay là cố định cho các hoạt động của nhà nước cũng như các doanh nghiệp viễn thông trên thế giới cũng như trong nước. Dẫn đến hiệu quả sử dụng phổ tần chưa cao. Để giải quyết vấn đề trên, vô tuyến nhận thức (cognitive radio) được xem là một giải pháp tiềm năng. Ý tưởng cơ bản của hệ thống vô tuyến nhận thức là cho phép các hệ thống không được cấp phép sử dụng tần số (còn gọi là hệ thống thứ cấp) cùng sử dụng chung phổ tần với hệ thống có giấy phép sử dụng tần số (còn gọi là hệ thống sơ cấp) với điều kiện ràng buộc là hoạt động truyền phát dữ liệu của hệ thống thứ cấp không được gây can nhiễu cho hệ thống sơ cấp [5, 6]. Hiện nay, về cơ bản có hai mô hình hệ thống vô tuyến nhận thức bao gồm: dạng ràng buộc ngưỡng và dạng sử dụng đan xen theo sự phân loại của giáo sư Goldsmith. Bên cạnh đó, còn có phương pháp chồng chập (kết hợp của hai phương pháp trên). Với dạng đan xen, hệ thống thứ cấp hoạt động xen kẽ với hệ thống sơ cấp; hệ thống thứ cấp chỉ được phát khi hệ thống sơ cấp không truyền. Còn đối với phương pháp ràng buộc ngưỡng thì hai hệ thống có thể hoạt đông song song. Phương thức hoạt động song song cả hệ thống được cấp phép sử dụng và không được cấp phép sử dụng tần số gọi là hệ thống vô tuyến nhận thức dạng nền. Do hoạt động đồng thời nên mô hình can nhiễu được áp dụng để ràng buộc công suất phát của mạng thứ cấp phải nhỏ hơn khả năng chịu đựng can nhiễu của mạng sơ cấp. Từ điều kiện ràng buộc về công suất phát, hệ thống thứ cấp chỉ liên lạc hiệu quả trong phạm vi ngắn. Nếu người sử dụng sơ cấp hoạt động theo một chế độ

không đổi trong tất cả chu kì thời gian, mô hình dạng nền không yêu hiện phát hiện phổ trống để hoạt động. Phương pháp nền khá linh hoạt vì có thể hoạt động bất cứ lúc nào và không cần phải đồng bộ với băng tần của người sử dụng sơ cấp.

Từ sự hạn chế về công suất phát của mạng thứ cấp, ưu điểm của phương thức lựa chọn chuyển tiếp từng phần (partial relay selection). Để đảm bảo cự ly liên lạc của các mạng vô tuyến, trong bài báo này, chúng tôi đề xuất và phân tích các tham số phẩm chất hệ thống vô tuyến chuyển tiếp đa chặng hoạt đông theo mô hình vô tuyến nhận thức dạng nền. Trong hệ thống đề xuất, các nút chuyển tiếp (relay) sử dụng phương thức xử lý tín hiệu giải mã và chuyển tiếp (Decode-and-Forward). Với đề xuất kết hợp này, hệ thống sẽ tận dụng được ưu điểm của kỹ thuật truyền đa chặng và kỹ thuật lựa chọn chuyển tiếp từng phần, các nút ở mạng thứ cấp được sắp xếp vào các nhóm, cho phép hệ thống thứ cấp mở rộng vùng sóng hoặc giảm công suất phát ở mỗi chặng. Những đóng góp mới của bài báo đó là: Trên cơ sở mô hình truyền thông đa chặng đã đề xuất, bài báo đề xuất thêm phương thức lựa chọn nút chuyển tiếp ở mỗi chặng nhằm cải thiện phẩm chất hệ thống. Từ mô hình đề xuất, bài báo đưa ra công thức tường minh đánh giá phẩm chất hệ thống. Thông qua mô phỏng Monte-Carlo để kiểm chứng kết quả phân tích cũng như các tham số hiệu năng.

2. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Xét hệ thống truyền thông đa chặng thứ cấp (SU) gồm các CR_k được nhóm vào các nhóm như trên hình 1.



Hình 1. *Mô hình hệ thống CR đa chặng.*

Sự truyền thông giữa nguồn thứ cấp (CR_1) và đích thứ cấp (CR_{K+1}) được thực hiện trong các khe thời gian trực giao với sự hỗ trợ của *K-1* các nút chuyển tiếp có khả năng cảm biến phổ tần, với điều kiện ràng buộc mức can nhiễu của hệ thống sơ cấp (cặp PU-T_x và PU-R_x). Các nút trong mạng thứ cấp, giả sử được phân thành các nhóm nhỏ gọi là các cluster bao gồm N_k nút chuyển tiếp. Các nút trong mạng này có khả năng tự cấu hình và sắp xếp vào các cluster. Chúng ta giả sử mô hình mạng có cấu trúc một phân lớp và không có cluster chủ. Để nhóm các nút vào các cluster, các nút trong mạng sẽ thực thi các thuật toán tạo cluster; các nút quyết định tham gia vào các cluster có sẵn hoặc tạo cluster mới dựa vào các nút gần nó hoặc tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu trung bình [7]. Kích thước của cluster được điều khiển bằng công suất phát vô tuyến. Để thuận lợi cho các thuật toán

tạo cluster. Chúng ta giả sử rằng công suất phát là cố định và như nhau trên toàn mạng; thông tin trạng thái kênh (CSI) của tất cả các đường truyền từ CR_k đến PU-R_x là hoàn hảo; can nhiễu từ máy phát sơ cấp (PU) đến các nút thứ cấp (SU) có thể coi tương đương là tạp âm trắng cộng tính.

Phương pháp lựa chọn chuyển tiếp từng phần (partial relay selection) được mô tả ngắn gọn như sau: Nút phát liên tục giám sát chất lượng kết nối từ nó đến các nút chuyển tiếp thông qua đường truyền hồi tiếp cục bộ (từng chặng). Tại mỗi chu kì tín hiệu khi nút chuyển tiếp có SNR lớn nhất được lựa chọn, nút này sẽ thông báo cho nút lân cận biết và hồi tiếp về nút nguồn. Dựa vào thông tin một phần này để lựa chọn kết nối giữa nút phát với nút chuyển tiếp có chất lượng kênh truyền tốt nhất [8].

Nút chuyển tiếp trong chặng thứ *k* có tỉ số công suất tín hiệu trên công suất nhiễu SNR lớn nhất sẽ trở thành nút chuyển tiếp tín hiệu cho chặng kế tiếp, để xác định nút có SNR lớn nhất chúng ta sử dụng đồng hồ định thời tại các nút trong nhóm với thời gian khởi tạo tỉ lệ nghịch với tỉ số tín hiệu trên nhiễu nhận được (Signal-to-noise-ratio), nút có đồng hồ định thời về không trước tiên là nút có SNR lớn nhất trong nhóm. Với mô hình và giả thiết như trên phần tiếp theo của bài báo sẽ đánh giá chất lượng của hệ thống thông qua các tham số tỷ lệ lỗi bít (BER: Bit Error Rate), xác suất dừng hệ thống (OP: Outage Prbaility) và dung lượng trung bình (C: Ergodic Capacity).

3. ĐÁNH GIÁ CHẤT LƯỢNG HỆ THỐNG

a. Xác định hàm phân bố SNR của hệ thống

Xét chặng thứ *k*, ta gọi $h_{k,i}$, h_{SP} và $h_{k,P}$ lần lượt là hệ số kênh của đường truyền từ máy phát thứ cấp thứ *k* (SU_k) tới máy thu thứ cấp tiếp theo *k+1* (SU_{k+1}) và từ nút nguồn thứ cấp thứ *k* (SU_k) tới máy thu sơ cấp (PU), từ nút chuyển tiếp thứ *k* đến máy thu sơ cấp. Để đặc trưng cho khả năng chịu đựng can nhiễu tối đa của hệ thống PU, ta đặt I_P là mức công suất can nhiễu chịu đựng tối đa của PU. Khi đó, ta có biểu thức toán học như sau:

$$P_S \le I_P / \left|h_{S,P}\right|^2, \qquad P_R \le I_P / \left|h_{k,P}\right|^2 \tag{1}$$

trong đó, P_S là công suất phát của nút nguồn, P_R là công suất phát của nút chuyển tiếp thứ *i* trong số N_k nút của cluster thứ *k*.

Nhằm tăng hiệu suất hệ thống người dùng thứ cấp ta chọn

$$P_S = I_P / \left|h_{S,P}\right|^2, \qquad P_R = I_P / \left|h_{k,P}\right|^2 \tag{2}$$

Công suất phát của nút phát thư cấp còn phụ thuộc vào công suất truyền tối đa P_m được quy định bởi phần cứng lúc thiết kế. Do đó, công suất phát P_k có thể biểu diễn bằng biểu thức toán học như sau:

$$P_k = \begin{cases} P_m, & I_P / \left|h_{k,P}\right|^2 > P_m \\ I_P / \left|h_{k,P}\right|^2, & I_P / \left|h_{k,P}\right|^2 \le P_m \end{cases} = \min\left\{I_P / \left|h_{k,P}\right|^2, P_m\right\}, \tag{3}$$

Tuy nhiên, trong thực tế giá trị I_P thường nhỏ hơn rất nhiều so với giá trị P_m dẫn đến kết quả là ở vùng tỷ lệ nhiễu thấp hệ thống hoàn toàn phụ thuộc vào $I_p / \left|h_{k,P}\right|^2$ [9].

Gọi $\gamma_{k,i}$ là tỷ số tín hiệu trên nhiễu tức thời của đường truyền chặng k với $i = 1, \ldots, N_k$, ta có:

$$\gamma_{k,i} = P_k \left|h_{k,i}\right|^2 \Big/ N_0 = \frac{I_p}{N_0} \frac{\left|h_{k,i}\right|^2}{\left|h_{k,P}\right|}, \tag{4}$$

trong đó, N_0 là phương sai của nhiễu trắng (AWGN) tại máy thu, $h_{k,i}$ là biến ngẫu nhiên Gauss phức có giá trị trung bình bằng 0 với biên độ có phân bố Rayleigh. Khi các nút trong cùng một cluster được nhóm theo vị trí lân cận, chúng ta có thể giả sử giá trị trung bình của chúng tương đương nhau, tức là $\overline{\gamma}_{k,i} = \overline{\gamma}_k$ với mọi i.

Gọi β_k là tỷ số công suất tín hiệu trên công suất nhiễu lớn nhất của chặng thứ *k*, theo phương pháp lựa chọn chuyển tiếp từng phần, có nghĩa là chọn đường kết nối có SNR lớn nhất trên mỗi chặng; đặt $\gamma_{k,i}$ là SNR của đường kết nối thứ *i* ở chặng thứ *k*. Mô hình toán học của β_k được xác định bởi công thức sau:

$$\beta_k = \left|h_{i,k}\right|^2 = \max_{i=1,\ldots,N_k} \gamma_{k,i} \ . \tag{5}$$

Biểu thức (5) thể hiện SNR được lựa chọn với độ lợi kênh truyền lớn nhất ở mỗi chặng. Từ (5), hàm phân bố tích lũy (CDF: cumulative distribution function) của β_k được xác định như sau:

$$F_{\beta_k}(\gamma) = \Pr(\beta_k < \gamma) = \Pr(\max_{i=1,\ldots,N_k} \gamma_{k,i} < \gamma) \ . \tag{6}$$

Để tìm $F_{\beta_k}(\gamma)$, ta dựa vào xác suất có điều kiện và chú ý rằng, các kênh truyền trên từng chặng độc lập với nhau. Thay thế (4) vào (6), $F_{\beta_k}(\gamma)$ được viết lại thành:

$$F_{\beta_k}(\gamma) = \int_0^\infty \left[\prod_{i=1}^{N_k} \Pr\left(\left|h_{k,i}\right|^2 < \frac{\gamma x}{\frac{I_P}{N_0}} \right) \right] f_{\left|h_{k,P}\right|^2}(x) dx \ . \tag{7}$$

Thay thế giá trị $\Pr\left(\left|h_{k,i}\right|^2 < \frac{\gamma x}{\frac{I_P}{N_0}} \right)$ và $f_{\left|h_{k,P}\right|^2}(x)$, vào (7)

trong đó:

$$\Pr\left(\left|h_{k,i}\right|^2 < \frac{\gamma x}{\frac{I_P}{N_0}} \right) = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma x}{\frac{I_P}{N_0}\lambda_{D,k}} \right),$$

$$f_{\left|h_{k,P}\right|^2}(x) = \frac{1}{\lambda_{D,k}} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_{D,k}} \right),$$

và $\lambda_{D,k} = E\left\{ \left| h_{k,i} \right|^2 \right\}$ biểu diễn phép toán trung bình của độ lợi kênh truyền.

Ta có:

$$\begin{aligned} F_{\beta_k}(\gamma) &= \int_0^\infty \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma x}{\frac{I_P}{N_0}\lambda_{D,k}} \right) \right]^{N_k} \frac{1}{\lambda_{D,k}} e^{-\frac{x}{\lambda_{D,k}}} dx \\ &= \sum_{n_k=0}^{N_k} (-1)^{n_k} \binom{N_k}{n_k} \frac{1}{\lambda_{D,k}} \int_0^\infty \exp\left[-x \left(\frac{n_k \gamma}{\frac{I_P}{N_0}\lambda_{D,k}} + \frac{1}{\lambda_{D,k}} \right) \right] dx \end{aligned} \ . \tag{8}$$

Kết quả trên có được là do sử dụng triển khai nhị thức Newton. Áp dụng công thức tích phân trong [Eq. (3.310),10] và đặt $\alpha_k = I_p / N_0$ chúng ta nhận được:

$$F_{\beta_k}(\gamma) = \sum_{n_k=1}^{N_k} (-1)^{n_k-1} \binom{N_k}{n_k} \frac{\frac{\alpha_k}{n_k}}{\gamma + \frac{\alpha_k}{n_k}}. \tag{9}$$

Thực hiện phép tính đạo hàm đối với (9), ta được hàm phân bố xác suất (PDF: probability density function) như sau:

$$f_{\beta_k}(\gamma) = \sum_{n_k=1}^{N_k} (-1)^{n_k-1} \binom{N_k}{n_k} \frac{\frac{\alpha_k}{n_k}}{\left(\gamma + \frac{\alpha_k}{n_k}\right)^2}. \tag{10}$$

Theo kết quả nghiên cứu ở trong [11], chất lượng của toàn hệ thống chuyển tiếp sẽ phụ thuộc vào chặng yếu nhất, mô hình hóa tương đương toàn bộ kênh truyền đa chặng thành kênh truyền một chặng được xấp xỉ:

$$\gamma_{e2e} \approx \min_{k=1,..,K} \beta_k \tag{11}$$

Do các chặng bị ảnh hưởng bởi các kênh Rayleigh độc lập với nhau, khi đó hàm phân bố tích lũy của γ_{e2e} được tính như sau:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{e2e}}(\gamma) &= \Pr(\gamma_{e2e} < \gamma) \\ &= \Pr(\min_{k=1,\ldots,K} \beta_k < \gamma) \\ &= 1 - \Pr\left[\beta_1 > \gamma, \beta_2 > \gamma, \ldots, \beta_K > \gamma\right] \\ &= 1 - \prod_{k=1}^{K} [1 - F_{\beta_k}(\gamma)] \end{aligned} \tag{12}$$

trong đó, $F_{\beta_k}(\gamma)$ là hàm phân bố tích lũy của β_k có được ở biểu thức (9). Sử dụng định nghĩa trong lý thuyết xác suất ta tính được $f_{\gamma_{e2e}}(\gamma)$, như sau:

$$f_{\gamma_{e2e}}(\gamma) = \sum_{k=1}^{K} f_{\beta_k}(\gamma) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} [1 - F_{\beta_j}(\gamma)], \tag{13}$$

Thế (9) và (10) vào (13) và sau khi thực hiện một số biến đổi, hàm mật độ phân bố xác suất của γ_{e2e} được xác định như sau:

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{e2e}}(\gamma) &= \sum_{k=1}^{K} \left[\sum_{n_k=1}^{N_k} (-1)^{n_k-1} \binom{N_k}{n_k} \frac{\frac{\alpha_k}{n_k}}{\left(\gamma + \frac{\alpha_k}{n_k}\right)^2} \right] \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{K} \left[\sum_{n_j=1}^{N_k} (-1)^{n_j-1} \binom{N_j}{n_j} \frac{\frac{\alpha_j}{n_j}}{\gamma + \frac{\alpha_j}{n_j}} \right] \\ &= \sum_{k=1}^{K} \frac{1}{\gamma + B_j} \prod_{j=1}^{N_j} \left[\sum_{n_j=1}^{N_k} (-1)^{n_j-1} \binom{N_j}{n_j} \frac{B_j}{\gamma + B_j} \right] \end{aligned} \tag{14}$$

Thực hiện kỹ thuật phân rã từng phần và chú ý các thành phần tự loại trừ lẫn nhau, ta có thể viết $f_{\gamma_{e2e}}(\gamma)$ ở dưới dạng như sau:

$$f_{\gamma_{e2e}}(\gamma) = \sum_i \sum_j \frac{A_{ij}}{\left(\gamma + B_j\right)^{j+1}} \tag{15}$$

Trong biểu thức (15)), A_{ij} là hệ số khai triển, được xác định bằng phép tính đã đề cập trong [12].

$$A_{i,j} = \frac{1}{(N_k - j)!}\left\{\frac{\partial^{(N_k-j)}}{\partial\gamma^{(N_k-j)}}\left[\gamma + B_j\right]^{N_k} f_{\gamma_{e2e}}(\gamma)\right\}\Bigg|_{\gamma=-B_j}$$

B_j là các giá trị khác nhau của $\frac{\alpha_j}{n_j}$ Với dạng của $f_{\gamma_{e2e}}(\gamma)$ như công thức (15), ta có thể bắt đầu thực hiện việc phân tích hiệu năng của hệ thống nghiên cứu.

b. Xác suất dừng hệ thống

Xác suất dừng hệ thống là xác suất mà tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của hệ thống nhỏ hơn một giá trị cho trước, chú ý rằng, giá trị này có liên hệ chặt chẽ với tốc độ mong muốn của hệ thống. Biểu diễn ở dạng toán học, ta có

$$\mathrm{OP} = \Pr(\gamma_{e2e} < \gamma_{th}) \tag{16}$$

Vì thế, xác suất dừng hệ thống có thể tính được bằng cách lấy tích phân của hàm mật độ phân bố xác suất PDF của tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu tương đương γ_{e2e} theo ngưỡng độ nhạy máy thu được xác định trước γ_{th} [13].

$$\mathrm{OP} = F_{\gamma_{e2e}}(\gamma) = \int_0^{\gamma_{th}} f_{\gamma_{e2e}}(\gamma_{th})d\gamma \tag{17}$$

Thay thế (15) vào (17) và sử dụng cách tính như trong [14] chúng ta nhận được

$$\mathrm{OP} = \sum_i \sum_j \frac{A_{ij}}{(1-j)\left(\gamma + B_j\right)^{j-1}} \tag{18}$$

c. Tỷ lệ lỗi bít trung bình của hệ thống

Theo [15], BER của hệ thống sử dụng phương pháp điều chế tín hiệu M -QAM ($M=2^m$, *m=1,2……)* và dùng mã hóa Gray để mã hóa nhóm bit thành symbol trên kênh truyền nhiễu trắng như sau:

$$P_b(e) = \sum_{j=1}^{\log_2\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{v_j} \phi_n^j \mathrm{erfc}(\sqrt{\omega_n\gamma}) \tag{19}$$

Do công suất phát của hệ thống thứ cấp bị giới hạn bởi ngưỡng nhiễu của mạng sơ cấp. Như vậy, vấn đề là chúng ta phải lựa chọn dạng điều chế để đòi hỏi chỉ phát ở công suất nhỏ. Trong thực tế với hệ thống dung lượng lớn (tốc độ bít lớn), để tiết kiệm phổ tần người ta thường dùng các sơ đồ điều chế bậc cao (M > 64) và do hệ thống M-QAM là hệ thống lợi hơn về công suất nên được sử dụng để đánh giá tỷ lệ lỗi hệ thống.

Tỉ lệ lỗi bit BER của hệ thống trên kênh truyền Rayleigh fading được thành lập tương tự từ tỉ lệ lỗi bit trên kênh truyền AWGN với hàm mật độ phân bố xác suất PDF của tỉ số công suất tín hiệu trên nhiễu tương đương γ_{e2e} trên kênh Rayleigh fading:

$$P_b(e) = \int_0^{\infty} \sum_{j=1}^{\log_2\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{v_j} \phi_n^j \mathrm{erfc}(\sqrt{\omega_n\gamma})\, f_{\gamma_{e2e}}(\gamma)d\gamma \tag{20}$$

trong đó:

$$v_j = (1-2^{-j})\sqrt{M}-1,\ \ \omega_n = \frac{(2n+1)^2.3log_2 M}{(2M-2)},$$

$$\phi_n^j = \frac{(-1)^{\left\lfloor \frac{n2^{j-1}}{\sqrt{M}} \right\rfloor}\left(2^{j-1} - \left\lfloor \frac{n2^{j-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right\rfloor\right)}{\sqrt{M}\log_2\sqrt{M}},\quad \text{erfc(x)} = \frac{\pi}{2}\int_0^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{sin^2\theta}\right)d\theta$$

Trong biểu thức trên, $\lfloor . \rfloor$ và hàm *erfc(.)* được định nghĩa là hàm làm tròn xuống lấy phần nguyên và hàm bù lỗi. Thế các biểu thức trên và các số hạng ở trên vào (19) ta được biểu thức tính xác suất lỗi bít trung bình $P_b(e)$ như sau:

$$P_b(e) = \sum_{j=1}^{\log_2\sqrt{M}} \sum_{n=0}^{v_j} \phi_n^j \frac{\pi}{2} \int_0^{\infty}\int_0^{\pi/2} \sum_i \sum_j \frac{A_{ij}}{(1-j)\left(\gamma + B_j\right)^{j-1}} \exp\left(-\frac{\omega_n \gamma}{\sin^2\theta}\right) d\theta\, d\gamma \qquad (21)$$

Thực hiện tích phân biểu thức trên, ta có được biểu thức tính tỷ lệ lỗi bit của hệ thống.

d. Dung lượng hệ thống

Dung lượng mạng thứ cấp là giá trị trung bình của dung lượng tức thời của các chặng trên kênh truyền Rayleigh pha đinh [16]. Dựa vào lý thuyết xác suất có thể biểu diễn bằng toán học của dung lượng như sau:

$$\begin{aligned} C &= \mathrm{E}_{\gamma_{e2e}}\left\{\frac{1}{K}\log_2(1+\gamma_{e2e})\right\} \\ &= \frac{1}{K}\int_0^{\infty}\log_2(1+\gamma_{e2e}) f_{\gamma_{e2e}}(\gamma)d\gamma \end{aligned} \qquad (22)$$

Chú ý rằng, giá trị 1/*K* trong biểu thức (22) là do hệ thống dùng *K* chặng để truyền từ nguồn đến đích.

Thế hàm PDF của γ_{e2e} vào (22) chúng ta nhận được.

$$C = \frac{1}{K\ln 2}\int_0^{\infty}\ln(1+\gamma) f_{\gamma_{e2e}}(\gamma)d\gamma = \frac{A_{ij}}{K\ln 2}\sum_i\sum_j\int_0^{\infty}\frac{\ln(1+\gamma)}{\left(\gamma+B_j\right)^{j+1}}d\gamma \qquad (23)$$

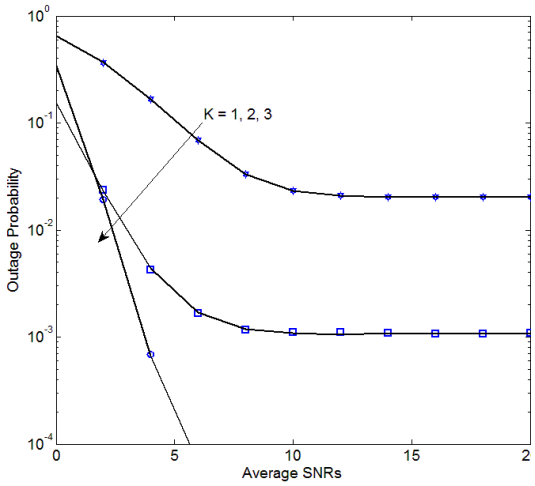
Tiến hành lấy tích phân theo γ đối với (23) ta được dung lượng ergodic của hệ thống.

4. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN VÀ THẢO LUẬN

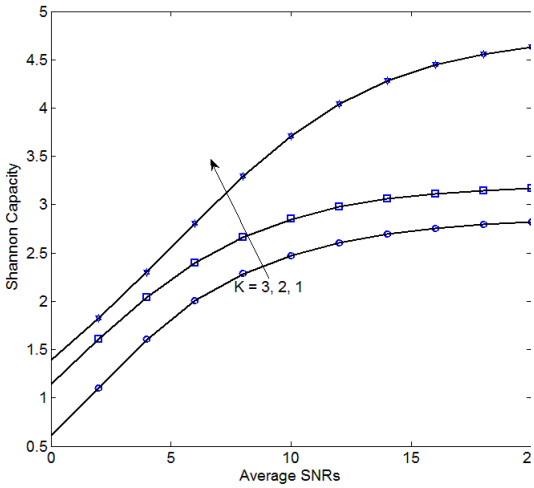
Trong phần này, chúng tôi trình bày kết quả mô phỏng để chúng minh rằng, sử dụng kỹ thuật chuyển tiếp có thể đạt được hiệu suất cao hơn so với phương thức truyền thông truyền thống. Các trường hợp mô phỏng tương ứng với hệ thống có số chặng *K* = 1, 2, 3. Trường hợp *K*=1 hệ thống tương đương với hệ thống truyền thông trực tiếp, trường hợp *K*=3 hệ thống trở thành mạng truyền thông 3 chặng. Xem xét hệ thống truyền thông tuyến tính bao gồm nhiều cluster, mỗi cluster có 3 nút. Khoảng cách truyền tín hiệu của toàn tuyến được chuẩn hóa là 1, nghĩa là $\sum_{k=1}^{K} d_k = 1$. Kênh truyền sử dụng trong toàn bộ chương trình mô phỏng là kênh truyền fading Rayleigh. Hệ số suy hao môi trường giả sử là 3.

Trong hình 2a biểu diễn xác suất dừng của hệ thống với số chặng chuyển tiếp khác nhau. Với giả sử rằng, khoảng cách giữa các cluters là như nhau (d_k/K với mọi *k*, *k* =1,2,3), số lượng nút chuyển tiếp ở cluters là 3 nút *(N_k=3)* ; điều kiện ràng buộc mức ngưỡng nhiễu tại

máy thu sơ cấp là 15 dB. Từ kết quả hình 2a ta thấy, phẩm chất của hệ thống được cải thiện khi tăng số chặng chuyển tiếp. Có nghĩa là khi chia nhỏ đường truyền thành nhiều chặng, chất lượng kênh truyền được cải thiện. Ngoài ra, xác suất dừng của hệ thống bị bão hòa bởi ngưỡng ràng buộc can nhiễu của mạng sơ cấp. Tuy nhiên, sự đánh đổi này là sử dụng hiệu quả tần số vô tuyến và có thể sử dụng các phương pháp kĩ thuật khác kết hợp lại để cải thiện hiệu năng vẫn có thể đảm bảo để hệ thống hoạt động bình thường.

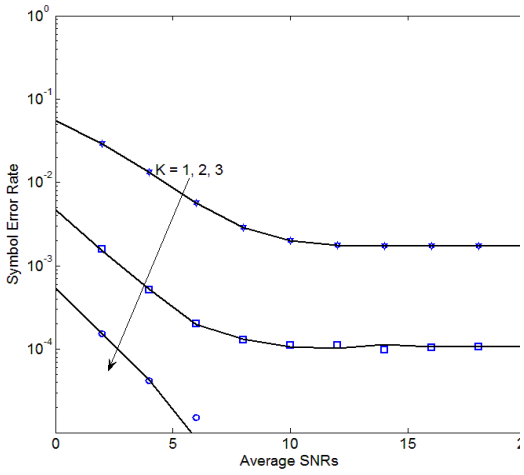


Hình 2a. *Xác suất dừng hệ thống.*

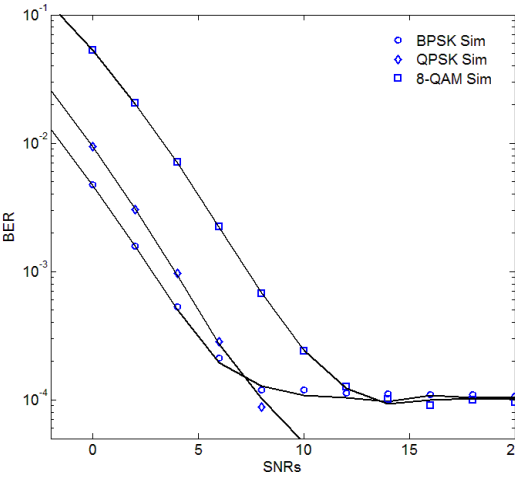


Hình 2b. *Dung lượng hệ thống.*

Hình 2b, thể hiện đường dung lượng của hệ thống theo số chặng khác nhau, từ đồ thị thấy rằng, khi tăng số chặng, dung lượng trung bình của hệ thống giảm đáng kể, do chia nhỏ kênh truyền thành các đoạn nhỏ, dẫn đến tốc độ đạt được trên toàn mạng giảm đi. Ở đây chứng tỏ có sự trả giá giữa các ưu điểm đó là giảm suy hao đường truyền và hiệu suất sử dụng băng thông của hệ thống khi số chặng tỉ lệ nghịch với dung lượng.



Hình 3a. *SER của hệ thống với điều chế BPSK.*



Hình 3b. *BER với các dạng điều chế.*

Trên hình 3a, thể hiện hiệu năng hệ thống theo tiêu chuẩn SER với số chặng K = 1, 2, 3. (Trong kết quả này chỉ mô phỏng cho SER, vì điều chế BPSK thì SER và BER là như

nhau). Tương tự như kết quả xác suất dừng hệ thống, khi tăng số chặng phẩm chất được cải thiện đáng kể do thực hiện giao thức giải mã và chuyển tiếp ở mỗi chặng dẫn đến hệ thống có thể loại bỏ được lỗi trong quá trình giải mã tại mỗi chặng. Trên đồ thị thấy rằng, khi tăng SNR phẩm chất của hệ thống bị bão hòa, hiện tượng này có thể giải thích do ràng buộc ngưỡng can nhiễu của mạng sơ cấp. BER của hệ thống bị bão hòa khi SNR trung hơn 10 dB với số chặng K = 1, 2, tuy nhiên, mức phẩm chất này có thể chấp nhận được.

Hình 3b thể hiện đồ thị biểu diễn BER cho các điều chế được thực hiện trong hệ thống. Từ đồ thị thấy rằng, với điều chế BPSK ở vùng SNR nhỏ cho phẩm chất tốt nhất, trong khi đó, điều chế 8-QAM có phẩm chất kém nhất, kết quả này phù hợp với hiệu suất các kiểu điều chế đã thực hiện trên các mô hình truyền thống. Một kết quả cũng tương tự như các đồ thị trên là hiện tượng bảo hòa phẩm chất khi SNR lớn hơn 10 dB.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất được mô hình truyền thông hợp tác chuyển tiếp của mạng vô tuyến nhận thức gồm nhiều chặng. Lĩnh vực vô tuyến nhận thức hiện tại đang được nghiên cứu nhiều ở trong và ngoài nước. Đặc biệt khảo sát hệ thống chuyển tiếp đa chặng và lựa chọn chuyển tiếp của mạng vô tuyến nhận thức để đánh giá các tham số hiệu năng mới chỉ được khảo sát trong bài báo. Thông qua kết quả khảo sát cho thấy rằng, có thể áp dụng kĩ thuật lựa chọn chuyển tiếp và truyền đa chặng trong môi trường vô tuyến nhận thức dạng nền để đảm bảo phẩm chất hệ thống.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. J. N. Laneman, D. N. Tse, and G. W. Wornell, *"Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,"* Information Theory, IEEE Transactions on, vol. 50, pp. 3062-3080, 2004.

[2]. J. Boyer, D. D. Falconer, and H. Yanikomeroglu, *"Multihop diversity in wireless relaying channels,"* Communications, IEEE Transactions on, vol. 52, pp. 1820-1830, 2004.

[3]. V. N. Q. Bao and H. Y. Kong, *"Diversity order analysis of dual-hop relaying with partial relay selection,"* IEICE transactions on communications, vol. 92, pp. 3942-3946, 2009.

[4]. I. Krikidis, J. Thompson, S. McLaughlin, and N. Goertz, *"Amplify-and-forward with partial relay selection,"* Communications Letters, IEEE, vol. 12, pp. 235-237, 2008.

[5]. B. Wang and K. R. Liu, *"Advances in cognitive radio networks: A survey,"* Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of, vol. 5, pp. 5-23, 2011.

[6]. A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, *"Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective,"* Proceedings of the IEEE, vol. 97, pp. 894-914, 2009.

[7]. A. Aduwo and A. Annamalai, *"Channel-aware inter-cluster routing protocol for wireless ad-hoc networks exploiting network diversity,"* in Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th, 2004, pp. 2858-2862.

[8]. I. Krikidis, J. Thompson, S. McLaughlin, and N. Goertz, *"Amplify-and-forward with partial relay selection,"* IEEE Communications letters, vol. 12, pp. 235-237, 2008.

[9]. V. N. Q. Bao and T. Q. Duong, *"Outage Analysis of Cognitive Multihop Networks under Interference Constraints,"* IEICE Trans Commun, vol. E95-B, pp. 1019-1022, Mar. 2012.

[10]. O. R. F. E. H. w. L. E. A. Knowledge and D. Zwillinger, Table of integrals, series, and products: Elsevier, 2014.

[11]. M. O. Hasna and M.-S. Alouini, *"Outage probability of multihop transmission over Nakagami fading channels,"* Communications Letters, IEEE, vol. 7, pp. 216-218, 2003.

[12]. H. V. Khuong and H. Y. Kong, *"General Expression for pdf of a Sum of Independent Exponential Random Variables,"* IEEE Communications Letters, vol. 10, pp. 159-161, March 2006.

[13]. P. M. Shankar, *"Fading and shadowing in wireless systems"*: Springer, 2017.

[14]. V. N. Q. Bao, T. Q. Duong, and C. Tellambura, *"On the performance of cognitive underlay multihop networks with imperfect channel state information,"* IEEE Transactions on Communications, vol. 61, pp. 4864-4873, 2013.

[15]. B. Q. Vo-Nguyen and H. Y. Kong, *"A simple performance approximation for multi-hop decode-and-forward relaying over rayleigh fading channels,"* IEICE transactions on communications, vol. 92, pp. 3524-3527, 2009.

[16]. M. K. Simon and M.-S. Alouini, *"Digital communication over fading channels vol. 95"*: John Wiley & Sons, 2005.

ABSTRACT

PERFORMANCE EVALUATION OF THE MULTI-HOP COMMUNICATION WITH RELAY SELECTION DF IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

In this paper, a multi-hop relay scheme for the secondary network under the maximum interference level at primary receivers is proposed. In the proposed scheme, the relay node at each hop is selected by using the partial relay selection method. Based on the end-to-end signal-to-noise ratio (SNR), the system performance in terms of outage probability (OP), average bit error rate (BER) and average channel capacity, under Rayleigh fading channel is evaluated. Numerical result and Monte-Carlo simulations presented that the proposed scheme obtains a high performance gain, as compared with the conventional multi-hop transmission one.

Keywords: Cognitive radio; Multi-hop transmission; Decode and forward; System performance analysis.

Nhận bài ngày 27 tháng 12 năm 2019
Hoàn thiện ngày 17 tháng 01 năm 2020
Chấp nhận đăng ngày 03 tháng 8 năm 2020

Địa chỉ: [1] Học viện Kỹ thuật quân sự-BQP;
[2]Trường Đại học Thông tin liên lạc.
[*]Email: trungtan68@gmail.com.