

Tối ưu hiệu năng của hệ thống truyền thông đa chặng trong môi trường vô tuyến nhận thức dạng nền

Optimal Performance for Underlay Cognitive Multihop Networks

Nguyễn Văn Chính, Võ Nguyễn Quốc Bảo, Nguyễn Lương Nhật.

Abstract: In this paper, we study underlay cognitive multihop networks where both power constraints including the maximum tolerable interference level at primary receivers and the maximum transmit power at secondary transmitters are taken into account. We obtain the exact and approximated closed-form expressions at high and low signal-to-noise ratio (SNR) regime for the system outage probability. Based on the approximated expressions, the optimization problem on relay locations are considered. Numerical results show that underlay multihop networks with optimal relay positions significantly outperform that with randomized or uniform relay positions.

I. GIỚI THIỆU

Vô tuyến nhận thức là công nghệ rất tiềm năng cho phép tận dụng các khoảng tần số nhàn rỗi tạo ra do chính sách quy hoạch tần số tĩnh. Hiện nay, công nghệ vô tuyến nhận thức đang thu hút mạnh mẽ sự quan tâm của rất nhiều nhà khoa học trên thế giới. Các nút mạng sử dụng công nghệ vô tuyến nhận thức có khả năng hoạt động song song với mạng sơ cấp (primary networks), là mạng có bản quyền sử dụng tần số, với điều kiện ràng buộc là hoạt động truyền phát dữ liệu của mạng thứ cấp không gây can nhiễu cho mạng sơ cấp [1].

Cho đến nay, có ba phương pháp chính để thiết kế mạng vô tuyến nhận thức đó là: underlay, overlay và interweave [2]. Trong ba phương pháp này, underlay là phương pháp nhận được sự quan tâm nhiều của các nhà nghiên cứu gần đây khi mà ưu điểm của nó là cho

phép các mạng sơ cấp và mạng thứ cấp có thể tiến hành hoạt động truyền phát song song với nhau. Nhược điểm của phương pháp này là để đảm bảo điều kiện can nhiễu nhận được tại máy thu sơ cấp, công suất phát của các máy phát thứ cấp phải được điều chỉnh phụ thuộc vào độ lợi kênh truyền can nhiễu và kết quả là vùng phủ sóng của mạng thứ cấp thường bị giới hạn.

Để mở rộng vùng phủ sóng, truyền thông đa chặng là một giải pháp đơn giản và đã được chấp nhận sử dụng trong nhiều chuẩn vô tuyến hiện nay cũng như chuẩn vô tuyến thế hệ mới, ví dụ [3-6]. Trong mạng truyền thông đa chặng, hiệu năng của toàn mạng sẽ phụ thuộc vào hiệu năng của chặng yếu nhất [7-10], do đó bài toán tối ưu vị trí hay phân bổ công suất cho các nút chuyển tiếp của mạng thường có vai trò rất quan trọng và cho phép cải thiện đáng kể hiệu năng của mạng mà không cần sử dụng thêm tài nguyên mạng.

Cho đến nay, đã có một số bài báo xem xét bài toán tối ưu hiệu năng của mạng chuyển tiếp trong môi trường vô tuyến nhận thức, ví dụ [11-14]. Bài báo [11] xem xét bài toán tối ưu công suất của mạng truyền thông hợp tác trong môi trường vô tuyến nhận thức sử dụng phương pháp nhân tử Lagrange với giả sử mức ràng buộc can nhiễu trung bình. Bài báo [12] xem xét bài toán phân bổ công suất tối ưu giữa mạng sơ cấp và mạng thứ cấp trong môi trường vô tuyến nhận thức dạng xen kẽ. Gần đây, hai bài báo [13] và [14] lần lượt xem xét bài toán tối ưu của nút chuyển tiếp thứ cấp ở kênh truyền fading Rayleigh và Nakagami- m , tuy nhiên cả hai bài báo đều bỏ qua điều kiện ràng buộc về

công suất phát tối đa của các nút phát thứ cấp, làm kết quả của bài toán tối ưu đạt được có phần không thực tế.

Trong bài báo này, chúng tôi xem xét tối ưu vị trí của các nút chuyển tiếp của mạng thứ cấp đa chặng trong môi trường vô tuyến nhận thức dạng nền với hai điều kiện ràng buộc về công suất chịu đựng can nhiễu tối đa tại máy thu sơ cấp và công suất phát tối đa tại máy phát thứ cấp. Bài toán tối ưu được đề xuất và giải dựa vào biểu thức dạng đóng của xác suất dừng hệ thống được xấp xỉ ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao và thấp và mô hình kênh truyền suy hao đơn giản. Các kết quả số đã xác nhận tính đúng đắn của lời giải và ưu điểm của việc tối ưu vị trí của các nút chuyển tiếp.

II. MÔ HÌNH HỆ THỐNG

Xem xét hệ thống truyền thông nhận thức trong đó một cặp thu (PU-Rx) và phát (PU-Tx) sơ cấp tồn tại cùng với một mạng thứ cấp đa chặng. Quá trình truyền thông tin giữa nút nguồn thứ cấp (CR_1) và nút đích thứ cấp (CR_{K+1}) với kênh truyền fading Rayleigh được thực hiện trong K khe thời gian trực giao với sự hỗ trợ của $K-1$ nút chuyển tiếp vô tuyến nhận thức, ký hiệu $CR_2, \dots, CR_K$. Các nút chuyển tiếp trong mạng sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp (DF: Decode-and-Forward), tức là các nút trung gian này sẽ giải mã tín hiệu nhận được từ các nút trước nó, thực hiện mã hóa lại và sau đó phát tín hiệu đã được mã hóa lại tới nút tiếp theo. Ưu điểm của kỹ thuật chuyển tiếp DF là dễ dàng áp dụng cho các hệ thống có áp dụng mã hóa.

Giả sử rằng nút nguồn thứ cấp và tất cả các nút chuyển tiếp đều có thông tin trạng thái kênh truyền (CSI: Channel State Information) của tất cả các kênh truyền từ CR_k đến PU, còn gọi là kênh truyền can nhiễu. Trong thực tế, các máy phát thứ cấp có được các thông tin trạng thái thông tin kênh truyền này thông qua đường truyền trực tiếp từ PU hoặc gián tiếp từ bên thứ ba có vai trò quản lý nguồn tài nguyên phổ của hệ thống.

III. PHÂN TÍCH XÁC SUẤT DỪNG CỦA HỆ THỐNG THỨ CẤP

Xét chặng thứ k của mạng vô tuyến nhận thức đa chặng thứ cấp, ta gọi $h_{D,k}$ và $h_{I,k}$ lần lượt là hệ số kênh truyền của đường truyền từ máy phát thứ cấp thứ k (SU_k) tới máy thu thứ cấp tiếp theo (SU_{k+1}) và từ máy phát thứ cấp thứ k (SU_k) tới máy thu sơ cấp (PU-Rx). Để bảo vệ sự truyền dẫn của hệ thống sơ cấp theo phương pháp dạng nền (underlay), trong hệ thống xem xét, công suất của tín hiệu can nhiễu tạo ra bởi bất kỳ sự truyền dẫn nào của các nút thứ cấp đều phải thấp hơn mức công suất can nhiễu chịu đựng tối đa của máy thu sơ cấp (PU-Rx). Nói cách khác, các máy phát thứ cấp chỉ được phép sử dụng dải phổ đã cấp phép cho hệ thống sơ cấp miễn là nó không gây ảnh hưởng tới quá trình truyền thông của hệ thống sơ cấp, cụ thể là công suất can nhiễu của mạng thứ cấp gây ra tại máy thu sơ cấp phải nhỏ hơn một mức can nhiễu mà máy thu sơ cấp chịu đựng được.

Để đặc trưng cho khả năng chịu đựng can nhiễu tối đa của hệ thống sơ cấp, ta đặt I_p là mức công suất can nhiễu chịu đựng tối đa của máy thu sơ cấp. Do đó, ta dễ dàng nhận thấy rằng bên cạnh công suất truyền tối đa P_m (quy định bởi phần cứng), công suất phát P_k của SU_k còn phải bị ràng buộc bởi I_p . Biểu diễn bằng biểu thức toán học, ta có công suất phát của chặng thứ k như sau [15]:

$$P_k = \begin{cases} P_m, & \frac{I_p}{|h_{I,k}|^2} > P_m \\ \frac{I_p}{|h_{I,k}|^2}, & \frac{I_p}{|h_{I,k}|^2} \leq P_m \end{cases} \quad (1)$$

Viết lại biểu thức (1) ở dạng rút gọn, ta có:

$$P_k = \min \left\{ \frac{I_p}{|h_{I,k}|^2}, P_m \right\} \quad (2)$$

Gọi γ_k là tỷ số tín hiệu trên nhiễu tức thời của đường truyền chặng k , ta có:

$$\begin{aligned}\gamma_k &= P_k |h_{D,k}|^2 / N_0 \\ &= \min \left\{ \frac{I_p}{|h_{I,k}|^2}, P_m \right\} \frac{|h_{D,k}|^2}{N_0}\end{aligned}\quad (3)$$

với N_0 biểu thị phương sai của nhiễu trắng (AWGN) tại máy thu thứ cấp. Theo phương pháp truyền nền, cả hai hệ thống sơ cấp và thứ cấp hoạt động song song với nhau, nên các máy thu thứ cấp sẽ nhận tín hiệu can nhiễu từ máy phát sơ cấp. Khi xem xét can nhiễu gây ra của máy phát sơ cấp đến máy thu sơ cấp, tỷ số tín hiệu trên nhiễu của chạng thứ k có dạng như sau:

$$\begin{aligned}\gamma_k &= \frac{P_k |h_{D,k}|^2}{P_p |h_{P,k}|^2 + N_0} \\ &= \min \left(P_m, \frac{I_p}{|h_{I,k}|^2} \right) \frac{|h_{D,k}|^2}{P_p |h_{P,k}|^2 + N_0},\end{aligned}\quad (4)$$

với P_p là công suất phát của máy phát sơ cấp và $h_{p,k}$ là hệ số kênh truyền từ máy phát sơ cấp đến máy thu thứ cấp chạng k . Ta dễ dàng nhận thấy rằng ở biểu thức (4), tỷ số tín hiệu trên nhiễu tức thời của mỗi chạng sẽ phụ thuộc vào công suất phát tối đa của máy phát thứ cấp (P_m), công suất can nhiễu chịu đựng tối đa của máy thu sơ cấp (I_p) và công suất phát của máy phát sơ cấp (P_p). Tuy nhiên, trong điều kiện mà vùng phủ sóng của máy phát sơ cấp lớn hơn rất nhiều so với vùng phủ sóng của máy phát thứ cấp, ví dụ chuẩn IEEE 802.22 [16], chúng ta có thể xem can nhiễu từ máy phát sơ cấp đến các nút thứ cấp là nhiễu trắng trong mạng thứ cấp. Giả thuyết này được chấp nhận trong nhiều nghiên cứu gần đây, ví dụ [15,17-19], kết quả là ta có thể xấp xỉ tín hiệu trên nhiễu tức thời như biểu thức (3). Kể từ đây, chúng ta sẽ sử dụng biểu thức (3) để thực hiện các phân tích tiếp theo.

Xét kênh truyền fading Rayleigh, $|h_{D,k}|^2$ và $|h_{I,k}|^2$ là hai biến ngẫu nhiên có phân bố hàm mũ với các tham số tương ứng là $\lambda_{D,k} = E\{|h_{D,k}|^2\}$ và

$\lambda_{I,k} = E\{|h_{I,k}|^2\}$, với $E\{\cdot\}$ biểu thị toán tử trung bình kỳ vọng thống kê. Hàm mật độ phân bố xác suất (PDF) và hàm phân bố xác suất tích lũy (CDF) $|h_{Z,k}|^2$ với $Z \in \{D, I\}$ có dạng lần lượt như sau:

$$f_{|h_{Z,k}|^2}(x) = \frac{1}{\lambda_{Z,k}} \exp\left(-\frac{x}{\lambda_{Z,k}}\right) \quad (5a)$$

và

$$F_{|h_{Z,k}|^2}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\lambda_{Z,k}}\right) \quad (5b)$$

Tương ứng với biểu thức tỷ số tín hiệu trên nhiễu ở công thức (3), biểu thức xác suất dừng hệ thống truyền thông đa chạng thứ cấp đã được xác lập ở [20, Eq. (6)]. Tuy nhiên, dạng của biểu thức OP rất phức tạp, và không thể sử dụng giải bài toán tối ưu hiệu năng của hệ thống. Để giải quyết khó khăn này, trong bài báo này, chúng tôi đề xuất sử dụng kỹ thuật xấp xỉ ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp và cao từ hai quan sát quan trọng như sau:

+ **Trường hợp 1:** khi $I_p \gg P_m$ dẫn đến $P_k \approx P_m$.

+ **Trường hợp 2:** khi $I_p \ll P_m$ dẫn đến $P_k \approx \frac{I_p}{|h_{I,k}|^2}$.

Do đó, bài toán tối ưu hiệu năng hệ thống sẽ được chia ra hai trường hợp tương ứng như trên. Tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu tức thời của chạng k của từng trường hợp sẽ viết lại như sau:

$$\gamma_k \approx \begin{cases} \frac{P_m}{N_0} |h_{D,k}|^2, & \text{TH 1} \\ \frac{I_p}{N_0} \frac{|h_{D,k}|^2}{|h_{I,k}|^2}, & \text{TH 2} \end{cases} \quad (6)$$

Việc chia thành hai trường hợp riêng biệt (TH 1 và TH 2) sẽ giúp cho việc giải bài toán tối ưu sẽ trở nên đơn giản hơn. Chú ý rằng trường hợp 1 (TH 1) là tương ứng với trường hợp mạng truyền thông đa chạng dạng truyền thông, nghĩa là công suất phát của máy phát thứ cấp chỉ chịu ảnh hưởng phần lớn bởi giá

trị P_m . Sau đây, chúng tôi sẽ đánh giá hiệu năng của hệ thống theo từng trường hợp.

Xác suất dừng là một tham số hiệu năng quan trọng cho bất kỳ hệ thống vô tuyến nào, cho phép chúng ta đánh giá hiệu năng của một hệ thống vô tuyến mà không cần biết kiểu điều chế cụ thể của hệ thống. Xác suất dừng thường được định nghĩa là xác suất mà tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu của hệ thống nhỏ hơn một ngưỡng dừng cho trước, thường là mức tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu hệ thống giải điều chế đúng [2].

Trong phần này, chúng ta sẽ đánh giá xác suất dừng của hệ thống đang xem xét sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp. Với hệ thống truyền thông đa chặng dạng giải mã và chuyển tiếp, hệ thống được xem là dừng khi và chỉ khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu của chặng yếu nhất nhỏ hơn một giá trị ngưỡng cho trước, γ_{th} . Điều này tương ứng với xác suất mà tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương của hệ thống γ_{e2e} của K chặng thấp hơn γ_{th} , cụ thể là

$$OP = \Pr \left[\frac{1}{K} \log_2 (1 + \gamma_{e2e}) < \gamma_{th} \right] \quad (7)$$

Theo [10, 21], tỷ số tín hiệu trên nhiễu tương đương của hệ thống, γ_{e2e} , có thể biểu diễn theo γ_k như sau:

$$\gamma_{e2e} = \min_{k=1, \dots, K} \gamma_k \quad (8)$$

Giả sử rằng các kênh truyền của các chặng là độc lập với nhau, khi đó từ công thức (8) có thể được suy ra như sau:

$$\begin{aligned} OP &= 1 - \prod_{k=1}^K \Pr(\gamma_k > \gamma_{th}) \\ &= 1 - \prod_{k=1}^K 1 - \Pr(\gamma_k \leq \gamma_{th}) \\ &= 1 - \prod_{k=1}^K [1 - F_{\gamma_k}(\gamma_{th})] \end{aligned} \quad (9)$$

Để có thể xác định OP, ta cần xác định $F_{\gamma_k}(\gamma_{th})$ trong (9) tương ứng với hai trường hợp 1 và 2.

Trường hợp 1: Ta viết lại biểu thức tỷ số tín hiệu trên nhiễu tức thời của chặng thứ k như sau:

$$\gamma_k = \frac{P_m}{N_0} |h_{D,k}|^2 \quad (10)$$

Ở kênh truyền fading Rayleigh, hàm CDF của γ_k có dạng

$$F_{\gamma_k}(\gamma) = 1 - e^{-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_k}} \quad (11)$$

với $\bar{\gamma}_k = \frac{P_m \lambda_{D,k}}{N_0}$. Thay thế (11) vào (9), ta tìm được biểu thức dạng đóng của xác suất dừng hệ thống như sau :

$$OP = 1 - e^{-\mathcal{X}\gamma_{th}} \quad (12)$$

$$\text{với } \mathcal{X} = \sum_{k=1}^K \frac{1}{\bar{\gamma}_k}$$

Trường hợp 2: Cũng tương tự như Trường hợp 1, ta bắt đầu từ tỷ số tín hiệu trên nhiễu của chặng thứ k , có dạng như sau:

$$\gamma_k = \frac{I_p}{N_0} \frac{|h_{D,k}|^2}{|h_{I,k}|^2} \quad (13)$$

Để tìm hàm CDF của γ_k , ta sử dụng khái niệm xác suất điều kiện, cụ thể như sau:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_k}(\gamma) &= \Pr \left(\frac{I_p}{N_0} \frac{|h_{D,k}|^2}{|h_{I,k}|^2} < \gamma \right) \\ &= \int_0^\infty \Pr \left(|h_{D,k}|^2 < \frac{\gamma x}{\frac{I_p}{N_0}} \right) f_{|h_{I,k}|^2}(x) dx \\ &= \int_0^\infty \left[1 - \exp \left(-\frac{\gamma x}{\frac{I_p}{N_0} \lambda_{D,k}} \right) \right] \frac{1}{\lambda_{I,k}} e^{-\frac{x}{\lambda_{I,k}}} dx \end{aligned} \quad (14)$$

Sau khi thực hiện tích phân theo x , ta có

$$F_{\gamma_k}(\gamma) = \frac{\gamma}{\gamma + \alpha_k} \quad (15)$$

với $\alpha_k = \frac{I_p}{N_0} \frac{\lambda_{D,k}}{\lambda_{I,k}}$. Thay thế biểu thức (15) vào (9), ta

có xác suất dừng của hệ thống trong trường hợp này có dạng như sau

$$OP = 1 - \prod_{k=1}^K \frac{\alpha_k}{\gamma_{th} + \alpha_k} \quad (16)$$

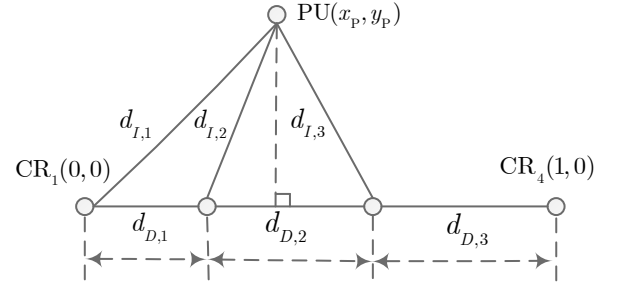
Kết hợp hai biểu thức (12) và (16), xác suất dừng của hệ thống được viết lại như sau :

$$OP = \begin{cases} 1 - e^{-\gamma_{th}}, & \text{TH 1} \\ 1 - \prod_{k=1}^K \frac{\alpha_k}{\gamma_{th} + \alpha_k} & \text{TH 2} \end{cases} \quad (17)$$

IV. BÀI TOÁN TỐI ƯU HIỆU NĂNG CỦA HỆ THỐNG

Do mạng nghiên cứu là mạng truyền thông đa chặng thứ cấp dạng nền, công suất phát của các máy phát thứ cấp sẽ bị giới hạn bởi P_m và bởi mức can nhiễu chịu đựng tối đa, I_p . Do đó, bài toán tối ưu công suất phát là không khả thi khi mà công suất phát, P_k , của chặng thứ k , phụ thuộc vào độ lợi kênh truyền can nhiễu $|h_{I,k}|^2$. Kết quả là P_k thực tế là một biến ngẫu nhiên phụ thuộc biến ngẫu nhiên $|h_{I,k}|^2$. Do đó, để cải thiện hiệu năng hệ thống (giảm xác suất dừng hệ thống), thì cách khả thi là thay đổi độ lợi kênh truyền trung bình, hay nói chính xác hơn là tối ưu vị trí của các nút chuyển tiếp.

Trong phần này, chúng tôi tập trung vào cực tiểu hóa xác suất dừng hệ thống bằng cách tìm vị trí nút chuyển tiếp tối ưu. Cụ thể, cho trước các tham số của mạng truyền thông đa chặng thứ cấp sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp (DF) hoạt động dựa trên giao thức dạng nền bao gồm tọa độ của của nút thu sơ cấp, nút nguồn thứ cấp, nút đích thứ cấp và số lượng các chặng. Vấn đề đặt ra là xác định những vị trí tối ưu cho các nút chuyển tiếp sao cho xác suất dừng hệ thống là nhỏ nhất.



Hình 1. Mô hình mạng vô tuyến nhận thức ba chặng DF chuyển tiếp dạng nền cùng nằm trên một đường thẳng.

Để đơn giản, ta xem xét mô hình mạng được minh họa như trong Hình 1, ở đây tất cả các nút mạng thứ cấp được kết nối trên một đường thẳng từ nút nguồn đến nút đích của mạng thứ cấp. Lý do của việc chọn mô hình này là tính phổ dụng (được lựa chọn nhiều trong nghiên cứu mạng đa chặng) và tính đơn giản. Đồng thời mô hình này dễ dàng mở rộng ra các mô hình phức tạp khác mà không thay đổi bản chất mô hình. Ta giả sử rằng toàn bộ khoảng cách từ nguồn tới đích chuẩn hóa bằng một, cụ thể

$$d_{D,1} + d_{D,2} + \dots + d_{D,K} = 1 \quad (18)$$

với $d_{D,k}$ biểu thị chiều dài của chặng thứ k . Cho trước vị trí của máy thu sơ cấp (x_p, y_p) và cố định số chặng thứ cấp K , bài toán tối ưu được phát biểu ở dạng toán học như sau:

$$\min OP \text{ s.t. } d_{D,1} + d_{D,2} + \dots + d_{D,K} = 1 \quad (19)$$

Ta dễ dàng nhận thấy rằng công thức xác suất dừng chính xác của hệ thống, trình bày ở công thức (17) ở dạng phức tạp nên để thực hiện giải quyết bài toán tối ưu, ta thực hiện xấp xỉ biểu thức (17) như sau:

$$OP \rightarrow \begin{cases} \gamma_{th} \left(\frac{1}{\gamma_1} + \dots + \frac{1}{\gamma_K} \right), & \text{TH 1} \\ \gamma_{th} \left(\frac{1}{\alpha_1} + \dots + \frac{1}{\alpha_K} \right), & \text{TH 2} \end{cases} \quad (20)$$

Với TH 1, ta sử dụng xấp xỉ $e^x \approx 1 - x$ khi x nhỏ, trong khi với TH 2, ta sử dụng xấp xỉ $(1+x)^{-1} \approx 1 - x$

và $\prod_{k=1}^K (1 - x_k) \approx 1 - \sum_{k=1}^K x_k$ với x và x_k nhỏ.

Sử dụng mô hình kênh truyền suy hao đơn giản, [2], i.e., $\lambda_{Z,k} = d_{Z,k}^{-\eta}$, với $d_{Z,k}$ là khoảng cách vật lý của kênh truyền loại Z chặng k và $\eta \geq 2$ biểu thị số mũ suy hao đường truyền. $\eta = 2$ khi môi trường truyền là không gian tự do và $\eta = 5$ và 6 với môi trường truyền là vùng đô thị nhà cao tầng, bài toán tối ưu ở công thức (19) viết lại ở dạng rõ hơn như sau:

$$\min \sum_{k=1}^K \frac{1}{P_m d_{D,k}^{-\eta}} \text{ s.t. } \sum_{k=1}^K d_{D,k} = 1 \quad (21)$$

cho Trường hợp 1 và

$$\min \sum_{k=1}^K \left(\frac{d_{I,k}}{d_{D,k}} \right)^{\eta} \text{ s.t. } \sum_{k=1}^K d_{D,k} = 1 \quad (22)$$

cho Trường hợp 2.

Trường hợp 1: Để giải bài toán tối ưu (21), khi $d_{Z,k}$ là các số dương và P_m là một tham số quy định trước của hệ thống (khi thiết kế chế tạo), ta áp dụng bất đẳng thức Cauchy như sau

$$\sum_{k=1}^K \frac{1}{d_{D,k}^{-\eta}} \geq K \left(\prod_{k=1}^K \frac{1}{d_{D,k}^{-\eta}} \right)^{1/K} \quad (23)$$

Dấu “=” trong (23) xảy ra khi và chỉ khi

$$\frac{1}{d_{D,1}^{-\eta}} = \frac{1}{d_{D,2}^{-\eta}} = \dots = \frac{1}{d_{D,K}^{-\eta}} \quad (24)$$

Kết hợp điều kiện ràng buộc ở (21) với (24), ta có thể tính được giá trị $d_{D,k}$ với $k=1, \dots, K$ như sau:

$$d_{D,1} = d_{D,2} = \dots = d_{D,K} \quad (25)$$

Trường hợp 2: Với bài toán tối ưu (22), ta cũng áp dụng bất đẳng thức Cauchy dẫn đến

$$\sum_{k=1}^K \left(\frac{d_{I,k}}{d_{D,k}} \right)^{\eta} \geq K \left(\frac{d_{I,k}}{d_{D,k}} \right)^{\frac{\eta}{K}} \quad (26)$$

OP của hệ thống sẽ cực tiểu khi dấu “=” diễn ra, khi đó

$$\frac{d_{I,1}}{d_{D,1}} = \frac{d_{I,2}}{d_{D,2}} = \dots = \frac{d_{I,K}}{d_{D,K}} \quad (27)$$

Sử dụng định lý Pytago, $d_{I,k}$, có dạng như sau :

$$d_{I,k}^2 = y_p^2 + \left(x_p - \sum_{\ell=1}^{k-1} d_{D,\ell} \right)^2 \quad (28)$$

Kết hợp (27) và (28), ta được hệ K phương trình không tuyến tính cho K biến $d_{D,1}, \dots, d_{D,K}$ được cho như sau

$$\begin{cases} d_{D,1} + \dots + d_{D,K} - 1 = 0 \\ \left(x_p - d_{D,1} \right)^2 - \left(x_p^2 + y_p^2 \right) \left(\frac{d_{D,2}}{d_{D,1}} \right)^2 + y_p^2 = 0 \\ \vdots \\ \left(x_p - \sum_{k=1}^{K-1} d_{D,k} \right)^2 - \left(x_p^2 + y_p^2 \right) \left(\frac{d_{D,K}}{d_{D,1}} \right)^2 + y_p^2 = 0 \end{cases} \quad (29)$$

Hệ phương trình trên là hệ phương trình không tuyến tính có thể giải bằng các phương pháp thông thường, ví dụ Levenberg-Marquardt, như đề cập ở [22]. Trong thực tế, hệ phương trình (29) có thể giải bằng các phần mềm tính toán thông dụng, ví dụ như Matlab với hàm *fsolve* hoặc Mathematica với hàm *Solve*. Trong trường hợp số chặng bằng hai, tức là $K = 2$, hệ phương trình (29) có thể rút gọn về phương trình bậc 4 như sau

$$d_{D,1}^4 - 2x_p d_{D,1}^3 + 2(x_p^2 + y_p^2)d_{D,1} - (x_p^2 + y_p^2) = 0 \quad (30)$$

Dễ dàng chứng minh rằng phương trình bậc 4 ở (30) luôn luôn có nghiệm trong khoảng $[0,1]$. Thật vậy, đặt

$$g(d_{D,1}) = d_{D,1}^4 - 2x_p d_{D,1}^3 + 2(x_p^2 + y_p^2)d_{D,1} - (x_p^2 + y_p^2),$$

ta có

$$g(1) = 1 - 2x_p + 2(x_p^2 + y_p^2) - (x_p^2 + y_p^2) = y_p^2 + (x_p - 1)^2 > 0$$

$\forall (x_p, y_p)$ và $g(0) = -(x_p^2 + y_p^2) \leq 0 \forall (x_p, y_p)$ dẫn đến $g(0)g(1) \leq 0$. Phương trình bậc 4 ở trên có nghiệm như sau:

$$d_{D,1}^* = \frac{x_p}{2} \frac{1}{2} \sqrt{\Phi_0 + \Phi_4} + \frac{1}{2} \sqrt{2\Phi_0 - \Phi_4 - \frac{\Phi_3}{2\Phi_0 + \Phi_4}} \quad (31)$$

$$\Phi_0 = x_p^2,$$

$$\Phi_1 = 12d_{sp}^2(x_p - 1),$$

$$\Phi_2 = 108d_{I,1}^4 - 108d_{I,1}^2 x_p^2,$$

$$\Phi_3 = 8x_p^3 - 16d_{I,1}^4,$$

và

$$\Phi_4 = \frac{\Phi_1}{3} \sqrt[3]{\frac{2}{\Phi_2 + \sqrt{\Phi_2 - 4\Phi_1}}} + \frac{1}{3} \sqrt[3]{\frac{\Phi_2 + \sqrt{\Phi_2 - 4\Phi_1}}{2}}$$

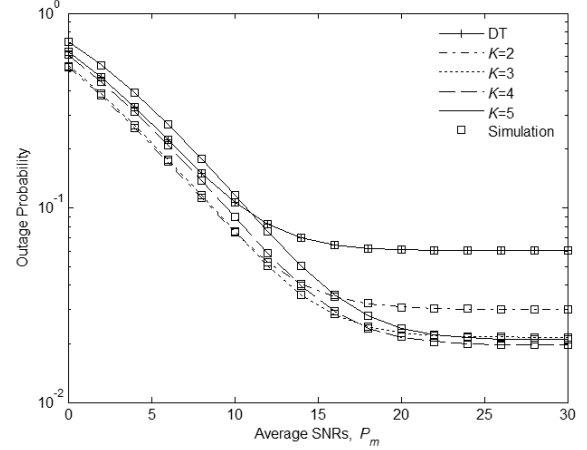
Kết hợp lời giải của hai trường hợp 1 và 2, ta có lời giải tổng quát cho bài toán tối ưu hệ thống truyền thông đa chặng thứ cấp cho cả hai trường hợp $P_m \ll I_p$ và $P_m \gg I_p$. Về cơ bản, khi $P_m \ll I_p$ thì hệ thống thứ cấp không bị ràng buộc về mức can nhiễu của hệ thống sơ cấp nên các nút chuyển tiếp đặt cách đều nhau sẽ cho hiệu năng mạng thứ cấp tối ưu. Ngược lại, khi $P_m \gg I_p$, thì hệ thống thứ cấp sẽ tối ưu nếu các chặng có tỷ số độ lợi kênh truyền dữ liệu và kênh truyền can nhiễu là như nhau. Trong phần tiếp theo, tôi sẽ trình bày một số kết quả số để chứng minh tính đúng đắn của kết quả đạt được cũng như ưu điểm việc tối ưu vị trí của các nút chuyển tiếp so với trường hợp không tối ưu.

V. KẾT QUẢ PHÂN TÍCH

Phần này bao gồm hai mục tiêu. Đầu tiên chúng tôi cung cấp các kết quả mô phỏng để xác nhận phương pháp phân tích đề xuất ở các phần trên là đúng đắn, đồng thời chỉ ra rằng hiệu năng của mạng (xác suất dừng hệ thống) thứ cấp sẽ cải thiện khi tối ưu vị trí của các nút chuyển tiếp.

Kênh truyền sử dụng trong toàn bộ chương trình mô phỏng là kênh truyền fading Rayleigh. Giả sử rằng vị trí của nút nguồn và nút đích của mạng thứ cấp lần lượt tại tọa độ (0,0) và (1,0). Đồng thời giả sử thêm rằng tọa độ của nút thu sơ cấp là (x_p, y_p) với tất cả các người dùng của mạng thứ cấp có vị trí cùng nằm trên một đường thẳng và khoảng cách giữa nút nguồn và nút đích được chuẩn hóa bằng một. Để kiểm chứng ưu điểm của bài toán tối ưu hiệu năng, phân bố nút chuyển tiếp ngẫu nhiên và đều sẽ được dùng để so sánh. Khi các nút mạng chuyển tiếp thứ cấp được chọn theo phương pháp ngẫu nhiên nghĩa là tọa độ x của

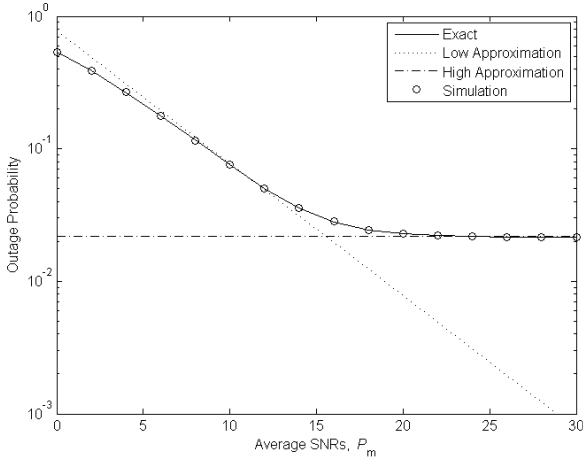
nó sẽ được chọn ngẫu nhiên trong khoảng từ (0,1) và tọa độ y của nó cố định ở 0. Khi các nút mạng chuyển tiếp thứ cấp được chọn theo phương pháp phân bố đều, thì khoảng cách giữa các nút sẽ là $1/K$.



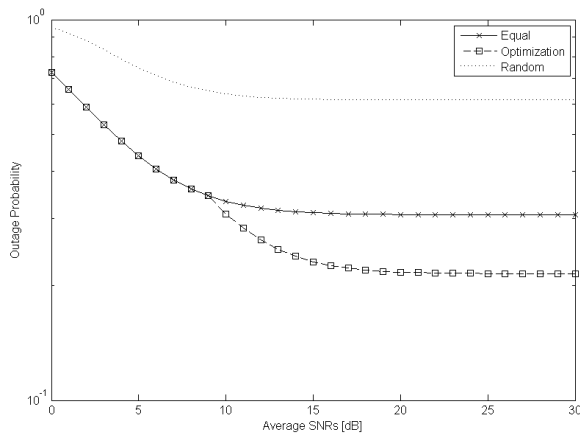
Hình 2. Xác suất dừng hệ thống theo P_m với $I_p/N_0 = 10$ dB, $\eta = 4$, và $(x_p, y_p) = (0.5, 1)$.

Trong Hình 2, chúng tôi khảo sát xác suất dừng của hệ thống khi thay đổi số lượng các chặng của hệ thống thứ cấp từ 1 đến 5. Chú ý rằng trường hợp $K=1$ tương ứng với trường hợp hệ thống truyền trực tiếp. Để đảm bảo tính công bằng trong so sánh, công suất phát của hệ thống là không đổi khi tăng số chặng. Như quan sát trên Hình 2, trong điều kiện ràng buộc về công suất phát và can nhiễu ở máy thu sơ cấp, thì mạng với số chặng lớn hơn không phải luôn luôn cho hiệu năng tốt hơn. So sánh mạng với số chặng từ 1 đến 5 ta thấy mạng có số chặng bằng $K=3$ cho hiệu năng tốt nhất và mạng có 5 chặng cho hiệu năng kém nhất. Khi tỷ số tín hiệu trên nhiễu nhỏ hơn 10 dB, truyền thông trực tiếp cho hiệu năng tốt hơn cả trường hợp mạng có 5 chặng. Chú ý rằng các kết luận như trên là không còn đúng ở vùng tỷ số tín hiệu trên nhiễu cao, cụ thể là trên 15 dB. Ở vùng tỷ số tín hiệu trên nhiễu này thì mạng có 4 chặng sẽ cho hiệu năng tốt nhất, kế tiếp theo là mạng có 5 chặng. Do đó, có thể kết luận rằng mối quan hệ giữa số chặng và hiệu năng của hệ thống đa chặng thứ cấp không phải là một hàm tuyến tính.

Khi ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu thấp, tỷ số tín hiệu trên nhiễu tăng thì xác suất dừng của hệ thống tăng theo, tuy nhiên xác suất dừng của hệ thống sẽ trở nên bão hòa (không tăng) ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao. Hiện tượng này dễ dàng lý giải khi quan sát công thức xác định công suất phát của các máy phát thứ cấp.



Hình 3. Kiểm chứng công thức (17) với $I_p/N_0 = 10$ dB, $\eta = 4$, và $(x_p, y_p) = (0.5, 1)$.



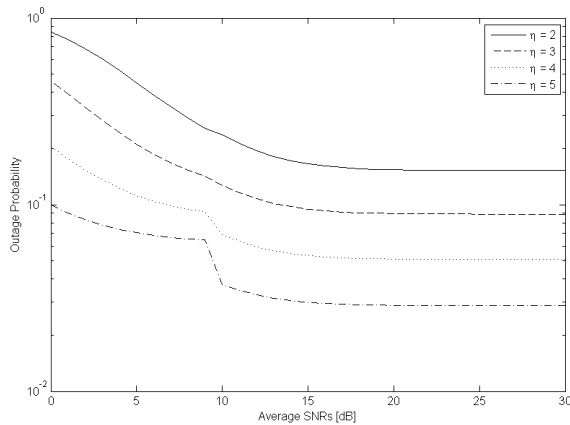
Hình 4. So sánh các phương pháp phân bổ nút chuyển tiếp thứ cấp với $I_p/N_0 = 10$ dB, $\eta = 4$, và $(x_p, y_p) = (0.8, 0.4)$.

Trong Hình 3, chúng tôi kiểm tra tính đúng đắn của các xấp xỉ của công thức (17) là cơ sở toán học quan trọng để giải bài toán tối ưu hiệu năng khi mà công thức chính xác dạng đóng của xác suất dừng hệ thống không ở dạng hấp dẫn về mặt toán học để có thể

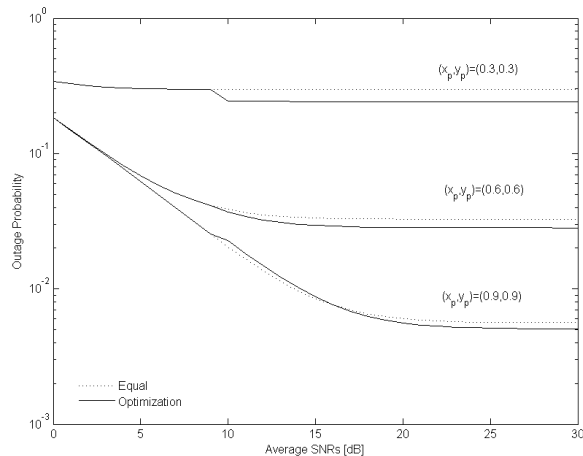
cho lời giải tối ưu ở dạng đóng. Số chặng của mô hình khảo sát là 3, tức là $K = 3$. Trên Hình 3, có 4 đường được thể hiện bao gồm: đường kết quả phân tích chính xác (“Exact”), đường kết quả xấp xỉ ở vùng nhiễu thấp (“Low Approximation”) và đường kết quả xấp xỉ ở vùng nhiễu cao (“High Approximation”) và cuối cùng là đường kết quả mô phỏng (“Simulation”). Ta thấy rằng đường kết quả phân tích chính xác và kết quả mô phỏng là hoàn toàn trùng nhau trong toàn dải tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu đang xem xét. Bên cạnh đó, đường xấp xỉ ở vùng nhiễu thấp và vùng nhiễu cao cũng hội tụ tương ứng với đường kết quả chính xác ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu xem xét. Kết quả này cho phép chúng ta kiểm chứng lại lần nữa tính đúng đắn của xấp xỉ trong công thức (17).

Hình 4 thực hiện so sánh các phương pháp phân bổ nút chuyển tiếp cho mạng có 4 chặng. Ta dễ dàng nhận thấy hiệu quả của phương pháp phân bổ tối ưu khi giá trị tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu lớn hơn 10 dB, là giá trị của I_p . Khi đó, xác suất dừng của hệ thống cho bởi phương pháp phân bổ tối ưu được dịch xuống dưới một khoảng lớn so với phương pháp phân bổ ngẫu nhiên. Bên cạnh đó, chúng ta cũng thấy rằng xác suất dừng của hệ thống sử dụng phương pháp phân bổ đều và phương pháp phân bổ tối ưu ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu nhỏ hơn 10 dB là như nhau do ở phần trên chúng ta chứng minh được rằng ở vùng tỷ lệ tín hiệu nhỏ thì hiệu năng của hệ thống thứ cấp không phụ thuộc vào giá trị I_p và khi đó mạng thứ cấp sẽ đạt hiệu năng tốt nhất khi các chặng là phân bổ đều nhau.

Hình 5 thể hiện ảnh hưởng của môi trường truyền (thông qua hệ số suy hao đường truyền) lên xác suất dừng của hệ thống khi sử dụng phương pháp phân bổ tối ưu. Khi giá trị η tăng lên thì xác suất dừng của hệ thống tăng lên và đồng thời ưu điểm của phương pháp phân bổ tối ưu càng rõ nét. Lý do của việc này là khi hệ số đường truyền tăng lên, ảnh hưởng lớn đến độ lợi kênh truyền trung bình và làm cho tỷ số α_k thay đổi.



Hình 5. Ảnh hưởng của môi trường truyền lên hiệu năng của hệ thống thứ cấp.



Hình 6. Ảnh hưởng của vị trí nút thu sơ cấp $I_p/N_0 = 10$ dB, $\eta = 4$, và $K = 3$.

Trong Hình 6, chúng tôi khảo sát ảnh hưởng của nút thu sơ cấp lên hiệu năng của hệ thống có sử dụng phương pháp phân bổ tối ưu nút chuyển tiếp thứ cấp và đồng thời so sánh với phương pháp phân bổ đều. Ta có thể thấy rằng khi vị trí của nút sơ cấp càng xa hệ thống thứ cấp thì hiệu năng của hệ thống thứ cấp được cải thiện đáng kể. Và đồng thời độ lợi cho bởi phương pháp phân bổ tối ưu so với phương pháp phân bổ đều ở vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao có vẻ giảm khi nút chuyển tiếp tiến ra xa mạng thứ cấp.

VI. KẾT LUẬN

Trong bài báo này, chúng tôi đã phân tích và đánh giá hệ thống truyền thông phân tập đa chặng sử dụng kỹ thuật giải mã và chuyển tiếp ứng dụng công nghệ vô tuyến nhận thức hoạt động dựa trên giao thức dạng nền (underlay). Đóng góp của bài báo là đã giải bài toán phân bổ tối ưu vị trí nút chuyển tiếp của mạng thứ cấp cho trường hợp tổng quát, thích hợp cả vùng tỷ lệ tín hiệu trên nhiễu cao lẫn thấp. Kết quả mô phỏng đã chứng minh ưu điểm của phương pháp phân bổ tối ưu hiệu quả hơn so với phương pháp chia đều khoảng cách hoặc chọn khoảng cách ngẫu nhiên của hệ thống truyền thông phân tập đa chặng ứng dụng công nghệ vô tuyến nhận thức trong điều kiện ràng buộc mức can nhiễu và công suất phát tối đa.

LỜI CẢM ƠN

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Quỹ phát triển khoa học và công nghệ quốc gia (NAFOSTED) trong đề tài mã số 102.04-2012.20.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. WELLENS, J. WU, and P. MAHONEN, "Evaluation of Spectrum Occupancy in Indoor and Outdoor Scenario in the Context of Cognitive Radio," in Proc. 2nd Int. Conf. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications CrownCom 2007, 2007, pp. 420-427.
- [2] A. GOLDSMITH, *Wireless communications*, Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2005.
- [3] K. LOA, W. CHIH-CHIANG, S. SHIANN-TSONG, Y. YIFEI, M. CHION, D. HUO, et al., "IMT-advanced relay standards [WiMAX/LTE Update]," IEEE Communications Magazine, vol. 48, pp. 40-48, 2010.
- [4] I. P. CHOCHLIOUROS, A. MOR, K. N. VOUDOURIS, G. AGAPIOU, A. ALOUSH, M. BELESIOTI, et al., "A Multi-Hop Relay Station Software Architecture Design, on the Basis of the WiMAX IEEE 802.16j Standard," in Proc. IEEE 69th VTC Spring Vehicular Technology Conference 2009., 2009, pp. 1-6.

- [5] V. GENC, S. MURPHY, Y. YU, and J. MURPHY, "IEEE 802.16J relay-based wireless access networks: an overview [recent advances and evolution of WLAN and WMAN standards]," IEEE Wireless Communications, vol. 15, pp. 56-63, 2008.
- [6] I. P802.16j, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems: Multihop Relay Specification," in 802.16 Relay Task Group vol. P802.16j/D3, ed. http://ieee802.org/16/relay/docs/80216j-06_026r4.zip, 2008.
- [7] M. O. HASNA and M.-S. ALOUINI, "Optimal power allocation for relayed transmissions over Rayleigh-fading channels," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 3, pp. 1999-2004, 2004.
- [8] M. O. HASNA and M.-S. ALOUINI, "Harmonic mean and end-to-end performance of transmission systems with relays," IEEE Transactions on Communications, vol. 52, pp. 130-135, 2004.
- [9] M. O. HASNA and M.-S. ALOUINI, "End-to-End Performance of Transmission System with Relays over Rayleigh-Fading Channels," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 2, pp. 1126-1131, November 2003.
- [10] W. YUE, B. ZHENG, and Q. MENG, "Optimal power allocation for cognitive relay networks," in Proc. 2009 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP'09), Nanjing, 2009, pp. 1-5.
- [11] L. YIFAN, W. PING, and D. NIYATO, "Optimal power allocation for secondary users in cognitive relay networks," in Proc. 2011 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'11), pp. 862-867.
- [12] T.-T. TRAN, V. N. QUOC BAO, V. DINH THANH, and T. Q. DUONG, "Performance analysis and optimal relay position of cognitive spectrum-sharing dual-hop decode-and-forward networks," in Proc. 2013 International Conference on Computing, Management and Telecommunications (ComManTel'13), 2013, pp. 269-273.
- [13] V. N. Q. BAO, T. T. THANH, N. T. DUC, and V. D. THANH, "Spectrum Sharing-based Multihop Decode-and-Forward Relay Networks under Interference Constraints: Performance Analysis and Relay Position Optimization," Journal of Communications and Networks, vol. 15, pp. 266-275, 2013.
- [14] B. TAE WON, C. WAN, J. BANG CHUL, and S. DAN KEUN, "Multi-user diversity in a spectrum sharing system," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, pp. 102-106, 2009.
- [15] C. CORDEIRO, K. CHALLAPALI, D. BIRRU, AND N. SAI SHANKAR, "IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios," in Proc. 2005 First IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), 2005, pp. 328-337.
- [16] J. LEE, H. WANG, J. G. ANDREWS, AND D. HONG, "Outage Probability of Cognitive Relay Networks with Interference Constraints," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 10, pp. 390-395, 2011.
- [17] Z. CAIJUN, T. RATNARAJAH, AND W. KAI-KIT, "Outage Analysis of Decode-and-Forward Cognitive Dual-Hop Systems with the Interference Constraint in Nakagami-m Fading Channels," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 60, pp. 2875-2879, 2011.
- [18] V. N. Q. BAO AND D. H. BAC, "A Unified Framework for Performance Analysis of DF Cognitive Relay Networks under Interference Constraints," in Proc. 2011 International Conference on ICT Convergence, Seoul, Korea, 2011, pp. 537 – 542.
- [19] 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.
- [20] M. O. HASNA AND M.-S. ALOUINI, "Outage Probability of Multihop Transmission over Nakagami Fading Channels," IEEE Communications Letters, vol. 7, pp. 216-218, May 2003.
- [21] E. K. P. CHONG AND S. H. ZAK, "An introduction to optimization," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 38, p. 60, 1996.

Nhận bài ngày: 9/12/2013

SƠ LƯỢC VỀ TÁC GIẢ



NGUYỄN VĂN CHÍNH

Sinh ngày 31 tháng 7 năm 1968.

Nhận bằng thạc sỹ chuyên ngành vô tuyến điện tử và thông tin liên lạc tại Học Viện Kỹ Thuật Quân Sự vào năm 2000. Hiện là nghiên cứu sinh tại Học Viện Bưu Chính

Viễn Thông.

Hiện công tác tại Trường Sĩ Quan Thông Tin Nha Trang

Lĩnh vực nghiên cứu: thông tin vô tuyến và vô tuyến nhận thức

Điện thoại: 0989689387

E-mail: vanchinhsgtt@gmail.com



NGUYỄN LƯƠNG NHẬT

Sinh ngày 20 tháng 1 năm 1969

Nhận bằng Tiến sỹ chuyên ngành Viễn Thông tại Đại Học Thông Tin Liên Lạc Matxcova.

Hiện công tác tại Khoa Kỹ Thuật

Điện Tử, Học Viện CN Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở TP. Hồ Chí Minh.

Lĩnh vực nghiên cứu: Xử lý số tín hiệu cho thông tin vô tuyến

Điện thoại: +84-8-37305317

E-mail: nhatnl@ptithcm.edu.vn



VÕ NGUYỄN QUỐC BẢO

Sinh ngày 03 tháng 6 năm 1979.

Nhận bằng tiến sỹ chuyên ngành thông tin vô tuyến tại Đại Học Ulsan Hàn Quốc vào năm 2010.

Hiện là giảng viên tại Bộ môn Vô Tuyến, Khoa Viễn Thông, Học Viện CN Bưu Chính Viễn Thông Cơ Sở TP. Hồ Chí Minh.

Lĩnh vực nghiên cứu: thông tin vô tuyến và thông tin số, tập trung vào truyền thông hợp tác, hệ thống MIMO, năng lượng xanh, vô tuyến nhận thức và bảo mật lớp vật lý.

Điện thoại: 0913454446

Email: baovng@ptithcm.edu.vn