Một số giải pháp nâng cao dung lượng hệ thống vô tuyến nhận thức đa người dùng

Methods To Improve the Capacity of the Mutiuser OFDM-based Cognitive Radio System

Lê Văn Tuấn, Nguyễn Tiến Hòa, Nguyễn Thành Hiếu, Nguyễn Viết Kính

Abtract: *In this paper, we study the problem of improving capacity of multiuser OFDM - FDMA cognitive radio (CR) system. We propose new algorithms, namedly Interference Inversion Allocation (IIA) and Quantized-Interference Inversion Allocation (Q-IIA) to allocate subcarrier to users of the multiuser CR system. These techniques allocate subcarrier to users inverserly proportional to its interference to primary user (PU). In addition, we also propose to use windowing technique, a technique being used widely in 802.11 family(WiFi) systems, to multiuser CR system to improve its capacity. The computer simulation is carried out for comparison for three cases of allocation such as IIA, Q-IIA and uniform subcarrier allocation, both with and without windowing. The simulation results show that new algorithms IIA, Q-IIA provide better system capacity than uniform subcarrier allocation does. Among IIA and Q-IIA algorithms, IIA brings system capacity higher than Q-IIA does. Relating windowing technique, the multiuser CR system can achieve much higher capacity (2.6 times)in case of using windowing than without using it, applicable to all IIA, Q-IIA, and uniform subcarrier allocation cases.*

Keywords*: Cognitive radio, subcarrier power allocation, windowing, sidelobe suppression, OFDM, Interference Inversion Allocation.*

I. MỞ ĐẦU

Trong hơn hai thập kỷ gần đây, với sự phát triển nhanh chóng của các hệ thống thông tin vô tuyến, đi kèm theo yêu cầu về băng thông lớn hơn, nhu cầu sử dụng phổ tần số vô tuyến ngày càng cao, dẫn đến nguồn tài nguyên này ngày càng trở nên khan hiếm và có giá trị.

Trong khi đó, kết quả đo khảo sát cho thấy nhiều băng tần, mặc dù đã được cấp phép cho các hệ thống vô tuyến, nhưng tại nhiều nơi các băng tần đó vẫn còn ít được sử dụng trong phần đáng kể thời gian [1]. Việc các đoạn tần đã được cấp phép cho người dùng chính (primary user – PU) nhưng lại bị để trống, không được sử dụng đã dẫn đến khái niệm về khoảng trống tần số (spectrum hole) hay khoảng trắng tần số (white space).

Vô tuyến nhận thức (cognitive radio - CR) là một hướng đi mới về công nghệ vô tuyến nhằm tận dụng các khoảng trống tần số, qua đó nâng cao hiệu quả sử dụng phổ tần số vô tuyến điện. Vô tuyến nhận thức có thể tạm thời sử dụng các khoảng trống tần số mà người dùng được cấp phép đang không sử dụng.

Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao (OFDM) là kỹ thuật được thừa nhận rộng rãi để dùng cho CR nhờ hiệu quả trong việc truyền tin qua các kênh truyền pha-đinh (fading channel) [2,4].

Do CR sử dụng các khoảng tần trống, trong nhiều trường hợp là nằm cạnh các đoạn tần đang được sử dụng bởi người dùng chính, nên xuất hiện nhiễu qua lại giữa CR và PU, làm ảnh hưởng tới chất lượng của hai hệ thống. Là hệ thống không được cấp phép nên CR sẽ phải bảo vệ PU, nghĩa là không được phép gây cho PU mức nhiễu vượt ngưỡng quy định trước I_{th}. Như được trình bày trong các nghiên cứu [5-12] dung lượng của hệ thống CR phụ thuộc vào mức công suất phân chia cho từng sóng mang con của nó và mức

nhiễu mà PU gây ra cho từng băng của CR. Về phần mình, mức công suất phân chia cho các sóng mang con của CR phải đảm bảo tổng mức nhiễu chúng gây ra không vượt quá giá trị I_{th}. Do vậy, việc nâng cao dung lượng của hệ thống trong khi đảm bảo điều kiện bảo vệ PU về nhiễu là bài toán cần nghiên cứu và có nhiều nghiên cứu đã thực hiện liên quan tới chủ đề này.

Giải pháp nén phát xạ phụ (side lobe suppression) đã được đề xuất trong [14] nhằm giảm mức nhiễu sang băng lân cận. Giải thuật max-min được các tác giả đề xuất trong [15] để phân chia công suất, bít và kênh cho hệ thống vô tuyến nhận thức đa người dùng dựa trên OFDM với kết quả mô phỏng cho thấy chất lượng của hệ thống CR đã được nâng lên so với trường hợp sử dụng băng bảo vệ đối với các hệ thống PU đang hoạt động. Trong nghiên cứu [13] các tác giả đã đề xuất áp dụng kỹ thuật windowing cho hệ thống CR dựa trên OFDM nhằm làm giảm nhiễu từ CR sang PU.

Bên cạnh đó, chúng ta có thể thấy nhiễu do một sóng mang con của CR gây ra cho PU phụ thuộc vào mức công suất phát của nó và khoảng cách tần số giữa nó với PU. Trong nghiên cứu [5], hai giải pháp phân chia công suất sóng mang con với các bước phân chia khác nhau đã được đề xuất. Trong nghiên cứu [6], các tác giả đã đề xuất giải thuật phân chia công suất tối ưu cho sóng mang con nhằm đạt được dung lượng đường xuống cao nhất cho người dùng CR. Theo đó, phương thức tối ưu cho kết quả dung lượng hệ thống đạt kết quả cao nhất nhưng đổi lại là độ phức tạp tính toán cao, khó khả thi đối với hệ thống công suất hạn chế. Do đó, các tác giả đã đề xuất một số phương án cận tối ưu với tên gọi Scheme A, Scheme B dựa trên cách thức tính tỷ lệ nghịch với với độ nhiễu do CR gây ra cho PU. Ảnh hưởng của việc tắt sóng mang con (sub-carrier nulling) và chất lượng của các giải pháp truyền thống về phân chia công suất cho sóng mang con (kỹ thuật water-filling, phân chia đều công suất) cũng đã được nghiên cứu.

Trong nghiên cứu [16], các tác giả đã đề xuất và đánh giá ảnh hưởng của việc áp dụng kỹ thuật windowing tới việc phân chia công suất sóng mang cho sóng mang convà tới dung lượng hệ thống CR. Theo đó, khi áp dụng windowing, dung lượng hệ thống CR tăng đáng kể do mức suy giảm công suất phát xạ ngoài băng sang PU giảm đi nhanh chóng. Bên cạnh đó, các sóng mang con của CR nằm cách xa PU có thể được phân chia mức công suất tối đa.

Trên cơ sở kết quả của nghiên cứu [16], các tác giả đã đề xuất kỹ thuật phân chia công suất sóng mang con Full-filling trong [17,18]. Kết quả mô phỏng cho thấy việc áp dụng kỹ thuật full-filling đem lại dung lượng hệ thống CR cao hơn, trong khi độ phức tạp tính toán giảm mạnh.

Trong bài báo này, trên cơ sở kết quả tại [16,17,18], chúng tôi nghiên cứu mở rộng cho trường hợp CR đa người dùng dựa trên nền tảng OFDM và phân chia theo tần số giữa người dùng. Chúng tôi đề xuất giải pháp mới để phân chia sóng mang con cho mỗi người dùng CR, sau đó áp dụng kỹ thuật windowing để đánh giá hiệu quả dung lượng hệ thống đạt được khi áp dụng các giải pháp mới so với trường hợp phân chia đều số sóng mang. Dung lượng hệ thống đạt được trong trường hợp áp dụng kỹ thuật windowing và không áp dụng kỹ thuật này cũng được nghiên cứu, so sánh.

Phần tiếp theo của bài báo được bố cục như sau: Phần II là mô tả về hệ thống và bài toán, Phần III là kết quả mô phỏng và nhận xét kết quả thu được, Phần IV là một số kết luận.

II. MÔ TẢ HỆ THỐNG VÀ THIẾT LẬP BÀI TOÀN

II.1. Mô tả tổng quan

Trong bài báo này, chúng ta xem xét hệ thống trong đó PU sử dụng L băng tần được cấp phép. Tổng băng thông xem xét là B, trong đó các đoạn băng tần $B_1, B_2, B_3, \ldots, B_L$ do PU đang sử dụng và có K người dùng CR.

Giả sử phần băng tần trống mà CR chiếm dùng có độ rộng tương đương *N* sóng mang con, mỗi sóng mang con có độ rộng ΔfHz. Trong các bước tiếp theo, hệ thống cần phân chia*N* sóng mang con này cho *K* người dùng CR dựa trên kỹ thuật OFDM-FDMA.Hiện nay, hệ thống OFDM phổ biến nhất là WiFi cũng sử dụng phương thức FDMA cho các AP (Access Point) trong cùng hệ thống. Vì vậy, hoàn toàn hợp lý khi hệ thống CR sẽ áp dụng kỹ thuật này cho người dùng của mình.

II.2. Nhiễu tới hệ thống PU và CR

Như đã đề cập tới trong [13], do cả hai hệ thống CR và PU làm việc trong các đoạn băng tần cạnh nhau nên xuất hiện ba loại hình nhiễu: nhiễu từ hệ thống PU tới CR, nhiễu từ hệ thống CR tới PU và cuối cùng là nhiễu giữa người dùng CR với nhau. Phần tiếp theo dưới đây trình bày cách thức tính nhiễu giữa PU và CR.

II.2.1. Nhiễu từ CR tới PU

Nhiễu từ sóng mang con thứ *i* của người dùng CR tới băng thứ *l* của PU được tính[6]:

$$I_{i,l}^{(k)}\left(d_{i,l}^{(k)},P_i^{(k)}\right)=\left|h_{i,l}^{sp(k)}\right|^2 P_i^{(k)}T_s x\int_{d_{i,l}^{(k)}-Bl/2}^{d_{i,l}^{(k)}+Bl/2}\left(\frac{\sin\left(\pi fT_s\right)}{\pi fT_s}\right)^2 df \quad (1)$$
$$=P_i^{(k)}K_{i,l}^{(k)}.$$

Trong đó, $d_{i,l}^{(k)}$ là khoảng cách phổ tần giữa sóng mang con thứ *i* của người dùng thứ *k* vào băng thứ *l* của PU, $h_{i,l}^{sp(k)}$ là độ lợi kênh truyền giữa sóng mang con thứ *i* của người dùng thứ *k* và băng thứ *l* của PU, T_s là độ dài ký tự OFDM, P_i là công suất phân chia cho sóng mang con thứ *i* của người dùng thứ *k*.

II.2.2. Nhiễu từ CR tới CR

Trong trường hợp hai người dùng CR được phân chia tần số theo FDMA, nhiễu qua lại giữa sóng mang con thứ *n*của người dùng CR thứ *m* với sóng mang thứ *i* của người dùng CR thứ *k* được xác định:

$$M_{n,i}^{(m,k)}\left(d_{n,i}^{(m,k)},P_n^{(m)}\right)=\left|h_{n,i}^{ss(m,k)}\right|^2 P_n^{(m)}T_s x\int_{d_{n,i}^{(m,k)}-\Delta f/2}^{d_{n,i}^{(m,k)}+\Delta f/2}\left(\frac{\sin\left(\pi fT_s\right)}{\pi fT_s}\right)^2 df \quad (2)$$
$$=P_n^{(m)}A_{n,i}^{(m,k)},$$

trong đó, $d_{n,i}^{(m,k)}$ là khoảng cách về phổ tần từ sóng mang con thứ *n* của người dùng thứ *m* với sóng mang con thứ *i* của người dùng thứ *k*,P_n là công suất của sóng mang con thứ *n* của người dùng thứ *m*.

II.2.3. Nhiễu từ PU tới CR

Nhiễu từ tín hiệu của PU thứ *l* tới sóng mang con thứ *i* của người dùng CR thứ *k* được biểu diễn như sau [6]:

$$J_{l,i}^{(k)}\left(d_{l,i}^{(k)},P_{PU}^{l}\right)=\left|h_l^{ps}\right|^2 T_s x\int_{d_{l,i}^{(k)}-B_l/2}^{d_{l,i}^{(k)}+B_l/2} E\left\{I_N\left(\omega\right)\right\}d\omega \quad (3)$$

Trong đó, h_l^{ps}là độ lợi kênh truyền giữa máy phát PU và máy thu CR,P_{PU}^{l} là công suất phát của tín hiệu PU thứ *l*.

II.3. Phân chia sóng mang con

Trong trường hợp CR đa người dùng xuất hiện bài toán phân chia sóng mang con, hay băng thông, cho mỗi người dùng. Trong khuôn khổ bài báo này, chúng tôi xem xét 3 trường hợp phân chia sóng mang con cho mỗi người dùng: phân chia đều (uniform); phân chia nghịch đảo với nhiễu (IIA-interference inversion allocation); phân chia nghịch đảo với nhiễu nhưng qui chuyển về băng thông chuẩn (Q-IIA, Quantized- IIA).

II.3.1. Phân chia đều

Trong trường hợp này, phần phổ tần chiếm dụng sẽ được CR chia đều cho mỗi người dùng, tương đương với số sóng mang con:

$$N\left(k\right)=N/K \quad (4)$$

ở đây *N(k)* là số sóng mang con được chia cho người dùng thứ *k*. *N* là tổng số sóng mang con mà hệ thống CR có.

II.3.2. Phân chia nghịch đảo theo nhiễu-IIA

Phân chia nghịch đảo theo nhiễu IIA là giải pháp trong đó mức độ gây nhiễu cho PU của mỗi người dùng CR là như nhau.

Giả sử tổng mức nhiễu mà PU chấp nhận được từ toàn bộ người dùng CR gây ra là I_{th} và N sóng mang con của CR được phân chia cho K nhóm $N^{(k)}$. Khi đó, nhóm $N^{(k)}$ được tính theo công thức:

$$\sum_{n \in N^{(k)}} I_n \cong \frac{I_{th}}{K} \tag{5}$$

Do khoảng cách phổ tần từ mỗi người dùng CR tới PU có thể khác nhau nên số sóng mang hay băng thông phân chia cho mỗi người khác nhau. Phương pháp IIA chỉ áp dụng để tính toán số sóng mang con cho mỗi người dùng, còn mức công suất phân chia cho mỗi sóng mang con lại được thực hiện với thuật toán water-filling hoặc các thuật toán cận tối ưu khác.

II.3.3. Phân chia nghịch đảo theo nhiễu có quy chuyển về băng thông chuẩn (Q-IIA)

Phương pháp phân chia sóng mang nghịch đảo theo nhiễu nêu trên cho ra kết quả băng thông (số lượng sóng mang con) mà mỗi người dùng CR được phân chia để sử dụng. Băng thông này là một con số phụ thuộc vào các điều kiện như I_{th}.

Tuy nhiên, trong thực tế mọi thiết bị vô tuyến đều làm việc theo những tiêu chuẩn nhất định và sử dụng các kênh tần số có băng thông nhất định đã được xác định từ trước. Ví dụ, hệ thống truyền hình có độ rộng kênh 8MHz, hệ thống bộ đàm vô tuyến dùng kênh có độ rộng tiêu chuẩn chỉ là 11,25 kHz hoặc 25 kHz, hệ thống WiFi OFDM dùng kênh có độ rộng 22 MHz, hệ thống LTE có độ rộng kênh chuẩn là 1,4 MHz, 5 MHz, 15 MHz, 20 MHz. Vì vậy, để đảm bảo tính thực tiễn, kỹ thuật phân chia sóng mang con IIA sẽ được điều chỉnh, theo đó sau khi thực hiện phép tính toán số sóng mang con theo IIA, thuật toán sẽ phân chia sóng mang con cho mỗi người dùng sao cho phần băng tần của mỗi người dùng là số nguyên lần độ rộng kênh cơ sở (như 10, 15 hay 20 MHz). Kỹ thuật này gọi là Q-IIA.

Giả sử dộ rộng băng thông chuẩn lả B_0, số sóng mang con được cấp cho người dùng CR thứ $k$theo thuật toán IIA làN_k thì số sóng mang con được gán cho người dùng thứ k theo thuật toán Q-IIA sẽ là

$$N_k^{Q-IIA} = ROUND\left(\frac{N_k \times \Delta f}{B_0}\right) \tag{6}$$

trong đó, ROUND(•) là hàm làm tròn.

II.3. Thiết lập bài toán

Bài toán đặt ra là bộ điều phối của hệ thống CR cần phải phân chia số sóng mang và công suất cho từng sóng mang cho mỗi người dùng CR sao cho tốc độ truyền của toàn hệ thống K người dùng là cao nhất, trong khi vẫn phải đảm bảo mức nhiễu mà hệ thống gây ra cho PU là nằm trong ngưỡng cho phép [19]. Đối với hệ thống CR được coi là mã hóa lý tưởng, tốc độ truyền dẫn tối đa tại sóng mang con thứ i với công suất phát P_i có thể được tính theo công thức Shannon như sau [21]

$$R_i(P_i, h_i) = \Delta f \log_2\left(1 + \frac{|h_i|^2 P_i}{\sigma_i^2}\right), \tag{7}$$

với h_i là độ lợi kênh Pha-đing và σ_i^2 là nhiễu trắng Gauss trên từng sóng mang con. Mở rộng từ kết quả trên, tác giả trong [19] đã đưa ra tổng dung lượng kênh của hệ thống CR-OFDM đa người dùng như sau

$$C = \max_{P_i^{(k)}} \left\{ \sum_{k=1}^{K} \sum_{i=1}^{N^{(k)}} \Delta f \log_2\left(1 + \frac{\left|h_i^{ss(k)}\right|^2 P_i^{(k)}}{\sigma^2 + \sum_{l=1}^{L} J_{i,l}^{(k)} + \sum_{m=1}^{K} \sum_{n=1}^{N^{(m)}} M_{n,i}^{(m,k)}}\right) \right\} \tag{8}$$

với điều kiện:

$$\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}} I_i^{(l)}\left(d_{i,l},P_i\right) \le I_{th};\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}} P_i^{(k)} \le P_{th} \quad (9)$$

trong đó, K là số người dùng CR, I_{th} là mức độ nhiễu PU có thể chấp nhận được từ toàn bộ người sử dụng CRS; P_{th} là giới hạn tổng công suất phát của CRS; $M_{n,i}^{(m,k)}$ nhiễu qua lại giữa sóng mang con thứ n của người dùng CR thứ m với sóng mang thứ i của người dùng CR thứ k.

Chúng ta có thể chứng minh công thức xác định dung lượng C. Xét hàm số Lagrange:

$$L\left(P_i^{*(k)},\lambda_1,\lambda_2\right)=\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}}\Delta f\log_2\left(1+\frac{\left|h_i^{ss(k)}\right|^2 P_i^{(k)}}{\sigma^2+\sum_{l=1}^{L}J_{i,l}^{(k)}+\sum_{\substack{m=1\\m\neq k}}^{K}\sum_{n=1}^{N^{(m)}}M_{n,i}^{(m,k)}}\right) - \lambda_1\left(\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}}I_i^{(l)}\left(d_{i,l},P_i\right)-I_{th}\right) - \lambda_2\left(\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}}P_i^{(k)}-P_{th}\right) \quad (10)$$

Điều kiện Karush-Kuhn-Tucker (KKT) có dạng:

$$\begin{aligned}
&\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}} I_i^{(l)}\left(d_{i,l},P_i\right)-I_{th}\le 0\\
&\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}} P_i^{(k)}-P_{th}\le 0\\
&\lambda_1\left(\sum_{l=1}^{L}\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}} P_i^{*(l)}K_i^{(k,l)}-I_{th}\right)=0\\
&\lambda_2\left(\sum_{k=1}^{K}\sum_{i=1}^{N^{(k)}} P_i^{*(l)}-P_{th}\right)=0\\
&\lambda_1,\lambda_2\ge 0\\
&\frac{\partial L\left(P_i^{*(l)},\lambda_1,\lambda_2\right)}{\partial P_i^{*(l)}}=0,
\end{aligned} \quad (11)$$

Bằng cách thay nhântử Lagrange và giải điều kiện KKT, ta có thể có được kết quả tối ưu:

$$P_i^{*(k)}=\frac{1}{\ln 2\times\Delta f\times\left(\lambda_1\sum_{l=1}^{L}K_{i,l}^{(k)}+\lambda_2\right)}-\frac{\sigma^2+\sum_{l=1}^{L}J_{i,l}^{(k)}+M_{th}}{\left|h_i^{ss(k)}\right|^2} \quad (12)$$

III. MÔ PHỎNG TRÊN MÁY TÍNH

Để chạy mô phỏng trên máy tính, chúng tôi sử dụng hệ thống CR với 3 người dùng, sử dụng khoảng trống tần số có độ rộng 30MHz nằm kẹp giữa 2 băng tần của người dùng PU (L=2) có độ rộng phổ tần lần lượt là B_1 = 10 MHz và B_2 =5 MHz. Độ rộng mỗi sóng mang con là Δf = 0,3125 MHz, tương ứng 16 sóng mang con trên mỗi băng thông 5 MHz, khoảng trống tần số mà CR chiếm dùng được chia tương đương thành N =96 sóng mang con.

Giả sử độ dài chu kỳ ký tự là T_s= 4 µs. Các kênh truyền là suy hao Rayleigh có độ lợi bằng 0 dB, thông tin trạng thái kênh CSI (channel state information) là biết trước khi truyền. Ngưỡng nhiễu mà PU chấp nhận được từ hệ thống CR là I_{th}= 1mW và 7 mW, .công suất của PU là P_{PU} = 1W

Mô phỏng được thực hiện cho các trường hợp:

- CR đa người dùng, phân chia sóng mang cho mỗi người dùng CR theo các phương pháp IIA, Q-IIA và chia đều;

- Thực hiện cho cả hai trường hợp: có áp dụng và không áp dụng kỹ thuật windowing.

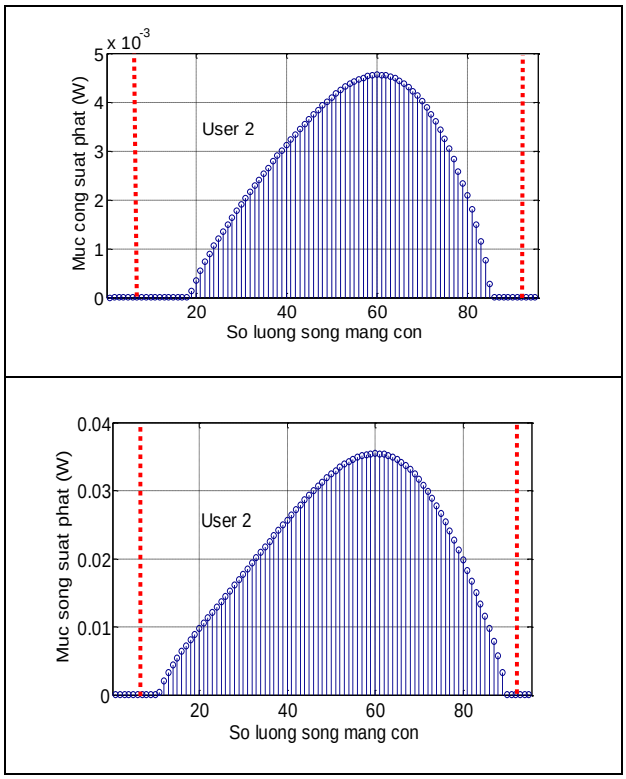
III.1. Kết quả mô phỏng

III.1.1. Khi không sử dụng windowing

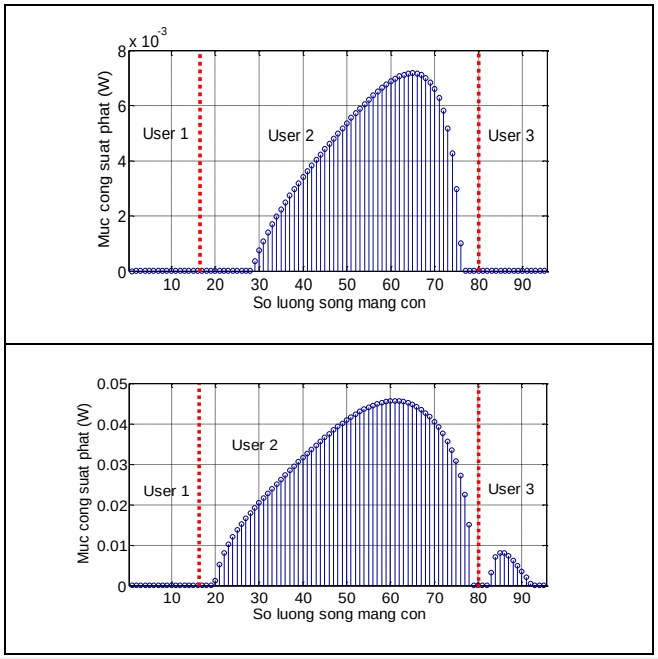
Kết quả phân bố công suất và sóng mang con cho trường hợp áp dụng kỹ thuật IIA, không áp dụng kỹ thuật windowing, với mức ngưỡng nhiễu lần lượt là I_{th} = 1mW, 7mW được thể hiện tại Hình 1.

Kết quả phân bố sóng mang con và công suất sóng mang con trong trường hợp Q-IIA, không có windowing, với I_{th} =1mW và 7 mW được thể hiện tại Hình 2.

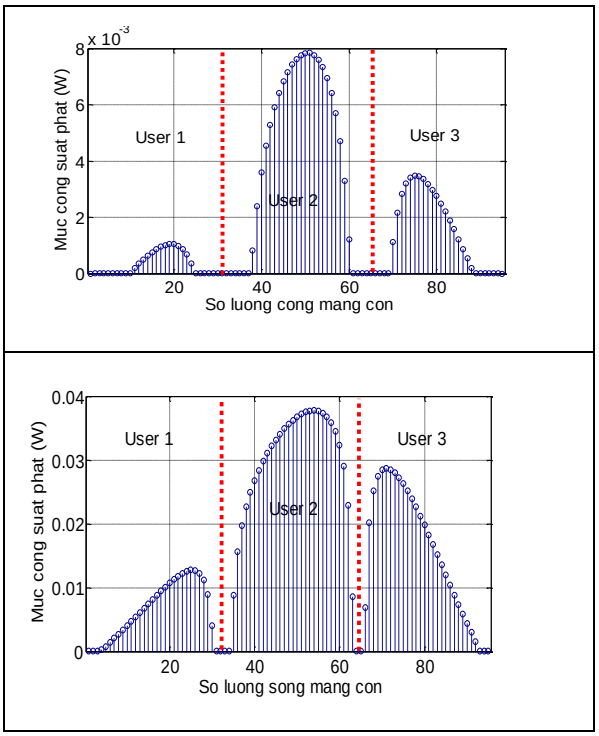
Kết quả mô phỏng cho trường hợp phân chia đều sóng mang con, không sử dụng windowing, với với I_{th} =1mWvà 7 mW được thể hiện tại Hình 3.



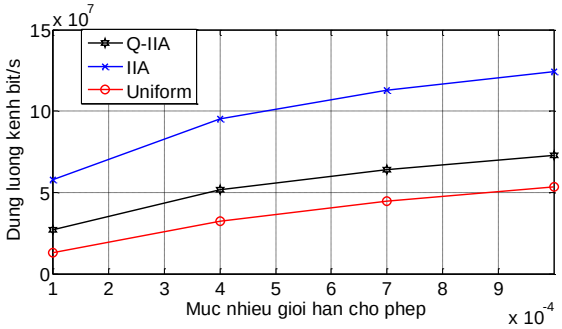
***Hình 1**: phân bố công suất và sóng mang con trong trường hợp IIA, không sử dụng windowing,I_{th} =1mWvà 7 mW.*



***Hình 2**: phân bố sóng mang con và công suất trong trường hợp Q-IIA, I_{th}= 1mW và 7 mW, không sử dụng kỹ thuật windowing.*



***Hình 3**: phân bố công suất và sóng mang con trong trường hợp phân chia đều sóng mang, I_{th} =1mWvà 7 mW.*



***Hình 4**: Tốc độ dữ liệu của CR trong các trường hợp IIA, Q_IIA và phân chia đều, không áp dụng windowing.*

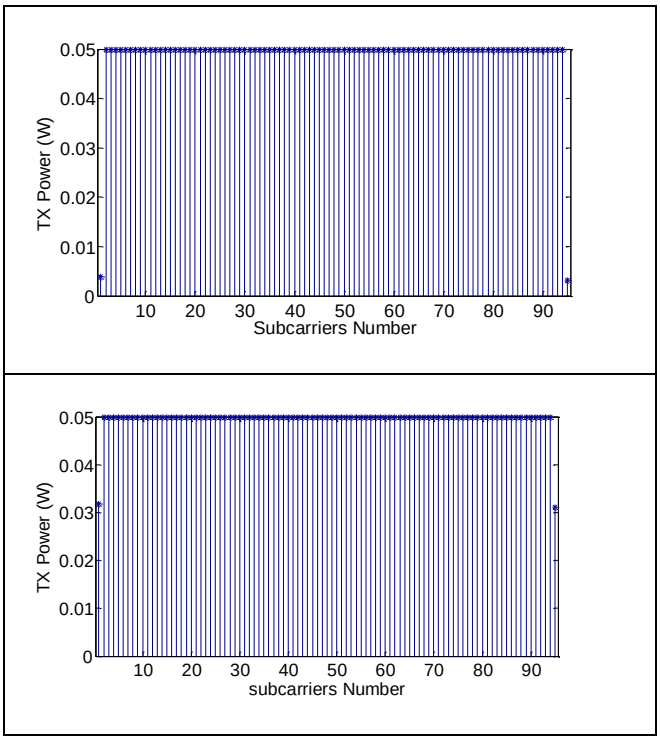
Tốc độ dữ liệu của cả hệ thống khi sử dụng ba kỹ thuật IIA, Q-IIA, uniform với điều kiện không dùng windowing được biểu diễn tại Hình 4. Trong trường hợp sử dụng thuật toán Q-IIA, khi mức can nhiễu cho phép sang PU tăng lên, người dùng CR được tăng công suất phát nên tốc độ dữ liệu sẽ tăng từ 25Mbps

đến 65 Mbps khi mức nhiễu cho phép tăng từ 0,1mW đến 1mW. Hệ thống sử dụng thuật toán IIA đạt tốc độ cao nhất (đường màu xanh blue, dấu x). Tiếp theo là Q-IIA và kém nhất là phân bố đều. Cụ thể, tại mức nhiễu cho phép I_{th}=1mW, thuật toán IIA cho tốc độ đạt 125 Mbps và Q-IIA đạt 65 Mbps so với 52 Mbps của phân bố đều.

III.1.2. Khi sử dụng windowing

Trong trường hợp này, chúng tôi sử dụng window Tukey cho CR. Các tham số khác của CR được giữ nguyên như trường hợp không sử dụng window, ngoại trừ việc khảo sát với mức nhiễu I_{th} nhỏ hơn.

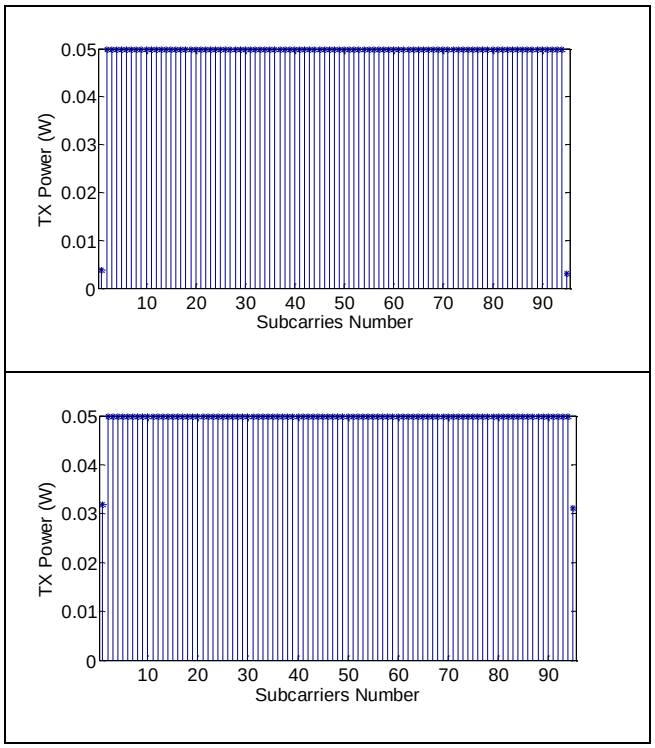
Kết quả phân chia sóng mang con, phân chia công suất trong trường hợp sử dụng kỹ thuật windowing cho IIA được thể hiện tại Hình 5.



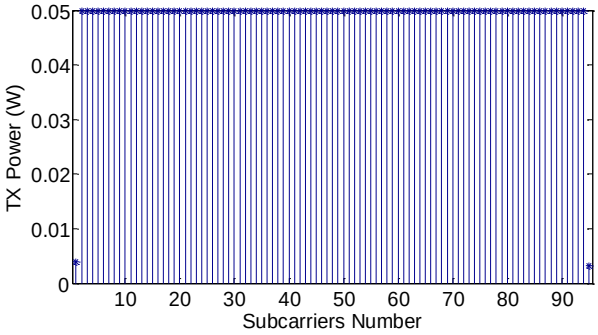
***Hình 5**: Phân chia sóng mang con và công suất cho trường hợp IIA, có sử dụng windowing, I_{th} = 0.1 mW; 0,7 mW*

Với trường hợp Q-IIA, kết quả mô phỏng phân chia sóng mang con và công suất sóng mang con được thể hiện tại Hình 6.

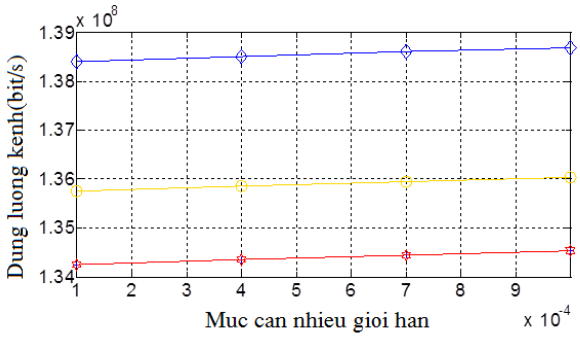
Với trường hợp phân chia đều, có sử dụng windowing, kết quả được biểu hiện tại Hình 7.



***Hình 6**: Phân chia sóng mang con và công suất cho trường hợp Q_IIA, có sử dụng windowing, I_{th} = 1mW và7mW*



***Hình 7**: Phân bố sóng mang và công suất cho trường hợp uniform,I_{th}= 1mW, có sử dụng windowing.*



***Hình 8**: Tốc độ dữ liệu của CR trong các trường hợp IIA, Q-IIA và phân chia đều khi áp dụng windowing131*

III.2. Phân tích, đánh giá kết quả mô phỏng

Kết quả mô phỏng được thể hiện trên Hình 1, Hình 2, Hình 3, Hình 5, Hình 6, Hình 7 cho thấy khi mức nhiễu I_{th} mà PU chấp nhận được lớn hơn thì số lượng sóng mang con được phân chia công suất cao tăng lên, công suất trên mỗi sóng mang con cao hơn.

Khi áp dụng kỹ thuật windowing (Hình 5, Hình 6, Hình 7) thì số lượng sóng mang con được phân chia công suất tối đa tăng mạnh, với 94 trên tổng số 96 các sóng mang con được phân chia công suất tối đa. Trong khi đó, trường hợp không sử dụng windowing, các sóng mang nằm gần kề các băng tần của PU và nằm giữa các người dùng CR được phân chia công suấtrất nhỏ (Hình 1, Hình 2, Hình 3).

Điều này được giải thích là do các sóng mang càng nằm gần các băng của PU thì gây nhiễu càng cao đối với PU, nên các sóng mang nằm liền kề PU được phân chia công suất rất thấp. Kết quả này cũng phù hợp với các kết quả đã thực hiện mô phỏng trong trường hợp CR đơn người dùng [16]. Trong trường hợp CR đơn người dùng, các sóng mang có khoảng cách phổ xa với các băng PU, mức độ gây nhiễu là không đáng kể tới PU nên được phân chia công suất tối đađể tăng dung lượng hệ thống [16,17,18].

Đối với trường hợp CR đa người dùng, chúng ta thấy các sóng mang nằm giữa 2 người dùng CR, dù nằm xa băng của PU, cũng không được phân chia công suất (Hình 1, Hình 2, Hình 3). Điều này được lý giải là do yếu tố nhiễu $M_{n,i}^{(m,k)}$ giữa các người dùng của hệ thống CR đa người dùng, vốn không xuất hiện trong bài toán CR đơn người dùng. Để tối ưu về tốc độ truyền, hệ thống CR đa người dùng phải tắt (không phân chia công suất) cho các sóng mang đó để hạn chế nhiễu giữa 2 người dùng CR kề nhau.

Trong trường hợp sử dụng windowing, do windowing làm giảm phát xạ phụ của sóng mang con [16], tức giảm $M_{n,i}^{(m,k)}$ giữa các người dùng, nên hệ thống CR có thể phân chia công suất cho các sóng mang con nằm giữa 2 người dùng CR. Việc 94 trong tổng số 96 sóng mang hơn được phân chia công suất là lý do dẫn đến dung lượng hệ thống CRS trong trường hợp áp dụng windowing (Hình 8) tăng lên lên 134Mbps so với 51 Mbps trường hợp không sử dụng windowing (Hình 4).

Trong trường hợp IIA (Hình 1), do thuật toán chỉ quan tâm đến đạt được kết quả tối đa về quả dung lượng nên băng thông của từng người dùng CR được phân chia trên bài toán tối ưu mà không theo các kênh tiêu chuẩn đã được định nghĩa trước (ví dụ: 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz).

Kỹ thuật Q-IIA có ưu điểm là sát thực tế vì băng thông của mỗi người dùng CR được quy về các kênh tiêu chuẩn, tuy nhiên quá trình quy chuẩn băng thông này làm giảm tác dụng tối ưu hóa của kỹ thuật IIA.Vì vậy, trong cả hai trường hợp áp dụng windowing và không áp dụng windowing, tốc độ dữ liệu của hệ thống CR sử dụng Q-IIA đều thấp hơn trường hợp IIA (Hình 4, Hình 8).Trong khi đó, cả hai kỹ thuật IIA, Q-IIA đều cho dung lượng hệ thống tốt hơn trong trường hợp phân chia đều sóng mang con. Sự khác biệt này đến từ khác biệt mức công suất mà hệ thống phân chia cho trường hợp IIA (Hình 1, Hình 4) hay Q-IIA (Hình 2, Hình 6) so với trường hợp phân chia đều (uniform) (Hình 3, Hình 7).

IV. KẾT LUẬN

Bài báo đã nghiên cứu việc nâng cao dung lượng cho hệ thống vô tuyến nhận thức đa người dùng dựa trên kỹ thuật OFDM-FDMA. Hai phương pháp mới về phân chia sóng mang con (băng thông) cho từng người dùng CR là IIA và Q-IIA đã được đề xuất. Bên cạnh đó, kỹ thuật windowing cũng được đề xuất sử dụng cho hệ thống CR đa người dùng nhằm nâng cao dung lượng hệ thống.

Kết quả mô phỏng cho thấy, việc sử dụng các giải pháp IIA, Q_IIA được đề xuất trong bài báo đã giúp nâng cao dung lượng tổng của hệ thống CR đa người dùng so với việc phân chia đều sóng mang con. Kỹ thuật IIA đem lại dung lượng cao hơn so với Q-IIA và phân chia đềusóng mang con. Tuy nhiên kỹ thuật Q-IIA khả thi hơn khi qui băng thông người dùng về các băng thông chuẩn.

Khi áp dụng kỹ thuật windowing cho hệ thống CR đa người dùng thì số lượng sóng mang con được phân chia công suất tăng cao, dẫn đến dung lượng tổng của hệ thống tăng hơn 2,6 lần so với trường hợp không sử dụng kỹ thuật windowing.

Các kết quả mô phỏng đã cho thấy các kỹ thuật IIA, Q-IIA và windowing đã giúp nâng cao đáng kể dung lượng tổng của hệ thống CR đa người dùng.

Tuy nhiên, bài báo chưa thực hiện được việc áp dụng kỹ thuật Full-filling cho hệ thống CR đơn người dùng [17,18] sang bài toán đa người dùng. Vấn đề này sẽ được chúng tôi tiếp tục nghiên cứu trong thời gian tới.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1] F. C. COMMISSION, "Spectrum Policy Task Force," *Rep.ET Docket*, vol.02-135, Nov.2002.

[2] MITOLA, J. AND J. MAGUIRE, G. Q, *"Cognitive radio: making softwareradios more personal*," IEEE Pers Commun, vol. 6, no. 4, pp. 13–18,1999.

[3] S. HAYKIN, "*Cognitive radio: brain-empowered wireless communications*,"IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.

[4] I. F. AKYILDIZ, W.-Y. LEE, M. C. VURAN, AND S. MOHANTY, "*A surveyon spectrum management in cognitive radio networks*," IEEE Commun.Mag., vol. 46, no. 4, pp. 40–48, 2008.

[5] G. BANSAL, M. J. HOSSAIN, AND V. K. BHARGAVA, "*Adaptive Power Loadingfor OFDM-Based Cognitive Radio Systems*," in Proc. IEEE Int. Conf.Communications ICC '07, 2007, pp. 5137–5142.

[6] G. BANSAL, M. J. HOSSAIN, AND V. K. BHARGAVA, "*Optimal and Suboptimal Power Allocation Schemes for OFDM-basedCognitive Radio Systems*," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7,no. 11, pp. 4710–4718, 2008.

[7] G. BANSAL, O. DUVAL, AND F. GAGNON, "*Joint Overlay and UnderlayPower Allocation Scheme for OFDM-Based Cognitive Radio Systems*," in Proc. IEEE 71st Vehicular Technology Conf. (VTC 2010-Spring),2010, pp. 1–5.

[8] G. BANSAL, M. J. HOSSAIN, AND V. K. BHARGAVA, "*Adaptive Power Loadingfor OFDM-Based Cognitive Radio Systems with Statistical InterferenceConstraint*," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 10, no. 9, pp. 2786–2791, 2011.

[9] P. KALIGINEEDI, G. BANSAL, AND V. K. BHARGAVA, "*Power Loading Algorithmsfor OFDM-Based Cognitive Radio Systems with ImperfectSensing*," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 11, no. 12, pp. 4225–4230, 2012.

[10] Y. WANG, W. XU, K. YANG, and j. Lin, "*Optimal Energy-EfficientPower Allocation for OFDM-Based Cognitive Radio Networks*," IEEECommun. Lett., vol. 16, no. 9, pp. 1420–1423, 2012.

[11] Y. TACHWALI, B. F. LO, I. F. AKYILDIZ, AND R. AGUSTI, "*Multiuser ResourceAllocation Optimization Using Bandwidth-Power Product in CognitiveRadio Networks*," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 31, no. 3, pp. 451–463, 2013.

[12] S. WANG, M. GE, AND W. ZHAO, "*Energy-Efficient Resource Allocationfor OFDM-Based*

Cognitive Radio Networks," IEEE Trans. Commun.,vol. 61, no. 8, pp. 3181–3191, 2013.

[13] T. WEISS, J. HILLENBRAND, A. KROHN, AND F. K. JONDRAL, "*Mutual interferencein OFDM-based spectrum pooling systems*," in Proc. VTC 2004-Spring Vehicular Technology Conf. 2004 IEEE 59th, vol. 4, 2004, pp.1873–1877.

[14] H. A. MAHMOUD AND H. ARSLAN, "*Sidelobes suppression in OFDMbasedspectrum sharing systems using adaptive symbol transition*," IEEECommun. Lett., vol. 12, pp. 133–135, 2008.

[15] Y. ZHANG AND C. LEUNG, "*An Efficient Power-Loading Scheme forOFDM-Based Cognitive Radio Systems*," IEEE Trans. Veh. Technol.,vol. 59, no. 4, pp. 1858–1864, 2010.

[16] L.V. TUAN, D. C. HIEU, N. T. HIEU, N. V. KINH, *"Investigation of windows effect to power allocation problem in Cognitive Radio Systems,*"ICCE, Aug. 2012.

[17] LE VAN TUAN, NGUYEN THANH HIEU, NGUYEN VIET KINH, DINH CHI HIEU, "*Full-filling Subcarrier Power Allocation in OFDMA-based Cognitive Radio Systems,*"Wireless Engineering Technology, Aug, 2013.

[18] HIEU NGUYEN, GUAN YONG LIANG, HIEU NGUYEN, GUAN YONG LIANG, "*Full-filling Algorithm for Power Allocation in OFDM-based Cognitive Radio Systems,*"ICICS, Dec.2013.

[19] N. T. HOA, N. T. HIEU, N. V. DUC, G. GELLE, AND H. CHOO, "*Second order suboptimal power allocation for ofdm-based cognitive radio systems,*" International Conference on Ubiquitous Information Management andCommunication, no. 50, February 2013

[20] IEEE, Standard for Information technology Telecommunications and information exchange between systemsLocal and metropolitan area networks Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Laye (PHY) Specifications, IEEE Std.,2007.

[21] S. VERDU AND TE SUN HAN. 2006. A general formula for channel capacity. *IEEE Trans. Inf. Theor.*40, 4 (September 2006), 1147-1157.

Ngày nhận bài: 09/09/2015

SƠ LƯỢC VỀ TÁC GIẢ

LÊ VĂN TUẤN

Sinh năm 1973.

Tốt nghiệp Trường ĐH Bách khoa Hà Nội năm 1995, nhận bằng Thạc sỹ chuyên ngành Kỹ thuật Hàng không Vũ trụ tại Trường ĐH Quốc gia Hàng không Vũ trụ Pháp năm 1998.

Hiện công tác tại Cục Tần số Vô tuyến điện.

Lĩnh vực nghiên cứu: kỹ thuật vô tuyến nhận thức, các công nghệ vô tuyến công suất thấp, công nghệ di động 5G.

Điện thoại: 04.666 40 666; 0904161229

Email: tuanlv@rfd.gov.vn

NGUYỄN TIẾN HÒA

Sinh năm 1982.

Tốt nghiệp ĐH ngành Điện tử và Kỹ thuật Thông tin tại Trường ĐH tổng hợp Hanover vào năm 2010.

Hiện là Giảng viên và Nghiên cứu sinh tại Trường ĐH Bách khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: truyền thông nhận thức, OFDM và Mạng Sensor.

Email: hoa.nguyentien@hust.edu.vn

Điện thoại: 0934516862

NGUYỄN THÀNH HIẾU

Sinh năm 1977.

Tốt nghiệp Trường ĐH Quốc gia Hà nội 1999, nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành Kỹ thuật Điện tử tại Trường ĐH Quốc gia Chungbuk, Hàn Quốc năm 2007.

Hiện công tác tại Trường ĐH Nanyang Technological University, Singapore.

Lĩnh vực nghiên cứu: kỹ thuật vô tuyến nhận thức, thông tin giữa các phương tiện giao thông.

Điện thoại: +65-83817532

Email: nguyenth@ntu.edu.sg

NGUYỄN VIẾT KÍNH

Tốt nghiệp Trường ĐH Tổng Hợp Hà Nội ngành Vật lý Vô tuyến. Nhận bằng tiến sỹ kỹ thuật điện tử tại Ba Lan.

Là Phó Giáo sư tại Bộ môn Thông tin Vô Tuyến, khoa Điện tử viễn thông, Trường ĐH Công nghệ, ĐHQG Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: Lý thuyết thông tin và mã hóa.

Điện thoại: 3.754 3270

Email: kinhnv@vnu.edu.vn