ISSN 2354-0575

NÂNG CAO DUNG LƯỢNG KÊNH Ở HỆ THỐNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC DỰA TRÊN OFDM

Nguyễn Văn Vinh, Đỗ Ngọc Ước
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

Ngày tòa soạn nhận được bài báo: 22/01/2018
Ngày phản biện đánh giá và sửa chữa: 01/03/2018
Ngày bài báo được chấp nhận đăng: 09/03/2018

Tóm tắt:

Mô hình truy cập chia sẻ phổ tần số ở hệ thống vô tuyến nhận thức bao gồm hai mô hình chính là mô hình lớp phủ (Overlay) và mô hình lớp lót (Underlay). Ở bài báo này, một kịch bản phân bổ công suất theo mô hình lớp phủ được đề xuất dựa trên thuật toán IPW (Iterative Partitioned Water-filling) truyền thống. Kịch bản này áp dụng với điều kiện băng tần được bảo vệ và đặt hợp lý giữa các sub-channel nơi mà người dùng chính PU (Primary User) và người dùng thứ cấp SU (Secondary User) được đặt liền kề. Kịch bản này không những làm tăng tối đa hóa dung lượng kênh của người dùng thứ cấp SU mà còn làm giảm sự rò rỉ công suất của các sub-carrier của người dùng chính PU gây ra.

Từ khóa: *Vô tuyến nhận thức; Ghép kênh phân chia theo tần số trực giao; Phân bổ công suất; Rò rỉ công suất sóng mang con.*

1. Giới thiệu

Sự phát triển nhanh của truyền thông không dây so với nguồn tài nguyên phổ tần là quá chênh lệch, dẫn đến tình trạng khan hiếm về phổ tần và đây cũng chính là một trong những hạn chế của truyền thông không dây và được ví như nút thắt cổ chai cho sự phát triển trong tương lai. Tuy nhiên, việc tái tạo và sử dụng lại phổ tần là hoàn toàn có thể vì đặc điểm của phổ tần. Cụ thể, các phép đo phổ tần cho thấy người dùng chính *PU* sử dụng vẫn còn rất nhiều các lỗ hổng và để giải quyết vấn đề này, gần đây nhiều học giả đã giới thiệu và đề xuất người sử dụng thứ cấp *SU* trong các hệ thống ủy quyền hiện có.

Cơ hội truy cập phổ tần của *PU* đã đạt được nhằm mục đích nâng cao hiệu quả của việc truy cập phổ tần [1]. Xem xét việc bảo vệ hiệu suất thông tin cho người dùng chính *PU*, sự ra đời của *SU* cần phải đảm bảo các tiền đề truyền dẫn của nó và phải đáp ứng các hạn chế can nhiễu của *PU*. Hệ thống vô tuyến nhận thức là kỹ thuật chính để đạt được chức năng đó. Trong hệ thống vô tuyến nhận thức, *SU* được coi như là một môi trường xung quanh của phổ tần; các lỗ hổng của phổ tần được tìm thấy nhờ cảm biến, và bằng cách điều chỉnh các thông số truyền tạo cơ hội truy cập cho *PU* đảm bảo tính ủy quyền và hợp pháp [2, 3].

Kỹ thuật OFDM có cấu trúc tái phân bổ và có thể điều chỉnh được các tham số; các mô hình (modul) biến đổi Fourie nhanh (FFT, Fast Fourier Transformation) cũng có thể được sử dụng cho cảm biến phổ tần. Với những ưu điểm và lợi thế trên, kỹ thuật OFDM trở thành một trong những công nghệ có ứng dụng lý tưởng cho hệ thống vô tuyến cảm nhận [4]. Công nghệ chủ chốt áp dụng phân bổ công suất cho hệ thống này tương tự như một hệ thống OFDM truyền thống, với các nguyên tắc cơ bản là hạn chế công suất truyền tải tối đa hệ thống máy phát dựa trên thông tin trạng thái kênh (CSI, Channel State Information) giữa các sub-carriers để tối ưu hóa khả năng liên kết giữa chúng. Trong các hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM, *SU* hoạt động ở băng tần số có thể bao gồm nhiều băng tần của *PU* được cấp phép, mỗi một *PU* cấp phép được coi như một sub-channel của *SU*. Để bổ sung cho kịch bản này, các đề án phân bổ công suất không những đáp ứng các hạn chế công suất của máy phát mà còn đáp ứng các hạn chế can thiệp của *PU* trên mỗi sub-channel.

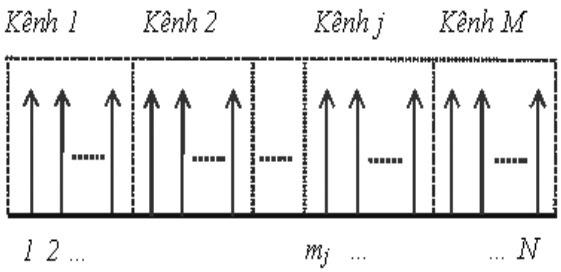
Ở tài liệu tham khảo số [5], thông qua phân tích nhiễu của *PU* đối với sự rò rỉ công suất sub-carriers, vấn đề phân bổ công suất ở hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM được xây dựng như một bài toán tối ưu hóa lồi. Ở bài báo này, tác giả chỉ ra rằng các đề án phân bổ công suất tối ưu nhằm mục tiêu tối ưu hóa công suất sub-channel liên kết có thể thu được bằng cách giải quyết các vấn đề bằng phương pháp số, cụ thể, tác giả đề xuất hai kịch bản điển hình bằng cách thay đổi các biến liên quan có tính đến rò rỉ công suất và thay đổi các biến liên quan không tính đến rò rỉ công suất của các sub-carriers liền kề dựa trên thuật toán IPW.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: phần 2 trình bày mô hình hóa hệ thống phổ, phần 3 trình bày về kịch bản phân bổ công suất tối ưu dựa trên thuật toán IPW, phần 4 trình bày kết

quả mô phỏng và thảo luận, và cuối cùng là kết luận được trình bày trong phần 5.

2. Mô hình hóa hệ thống phổ

Phần này chủ yếu xem xét mô hình phổ tần số của người sử dụng ở hệ thống vô tuyến nhận thức như được biểu diễn trong Hình 1 [7]. Hình 1, giả định rằng băng tần được cấp phép của người dùng nhận thức được chia thành *M* channels, và mỗi sub-channels tương ứng với dải tần được cấp phép là của một người dùng chính. Người dùng nhận thức sử dụng kỹ thuật OFDM, tổng số sub-carriers là *N*, khoảng cách giữa hai sub-carrier là Δf, và trong khi m_i được định nghĩa là "nhãn" của sub-carrier đầu tiên trong sub-channel thứ *j*. Đồng thời, để tạo điều kiện thuận lợi cho việc phân tích, nhóm tác giả còn giả định rằng băng thông của mỗi sub-channel là một số nguyên của khoảng cách giữa các sub-carriers và ở hệ thống này, *SU* yêu cầu phải được biết trước thông tin trạng thái kênh (CSI, Channel State Information) của *PU* chiến dụng thông qua cảm biến phổ với mục đích giúp *PU* hạn chế can thiệp của các sub-carriers lân cận và hiệu suất truyền của *PU* trước khi truyền. Do vậy, đây chính là tiền đề để tối đa hóa khả năng liên kết giữa *SU* và *PU*.



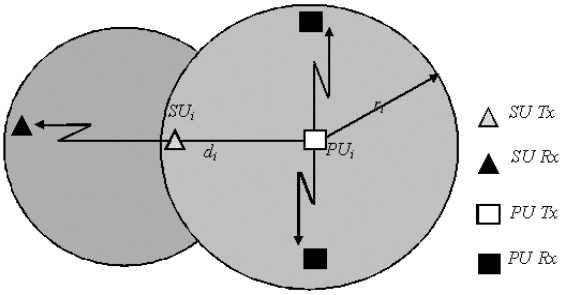
Hình 1. *Phổ tần của SU ở hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM*

Sử dụng lược đồ mã hóa lý tưởng và theo định lý của Shannon, tỷ lệ truyền trên sub-channel thứ *j* của người sử dụng thứ cấp có thể được biểu diễn như sau:

$$R_j(p_j, h_j) = \ln\left[1 + \frac{|h_j|^2 \times p_j}{N_0}\right] \quad (1)$$

trong đó h_j là kênh phức đạt được trên sóng mang thứ *j*; N_0 là công suất nhiễu trắng (Gauss) trên mỗi sub-carrier; P_j biểu thị cho tổng công suất phát hạn chế.

Ở hệ thống vô tuyến nhận thức, cần phải đưa ra công suất phát của sub-channel vì sự truyền tải của người dùng thứ cấp phải đáp ứng sự hạn chế nhiễu của người dùng chính, Hình 2.



Hình 2. *Mô Hình hệ thống vô tuyến cảm nhận*

Để đảm bảo chất lượng truyền dẫn của người dùng chính, máy phát của người dùng thứ cấp chỉ có thể phát hiện sự hiện diện của máy thu của người dùng chính trong khoảng cách là *d*. Công suất phát truyền tải P_{Ti} của người sử dụng thứ cấp thứ *i* phải đảm bảo rằng công suất tín hiệu trong khoảng *d* không lớn hơn ngưỡng gây nhiễu tối đa cho phép của người dùng chính. Trong tình huống này, theo [1] PU_i định nghĩa là một khu vực được bảo vệ có bán kính là r_i và đòi hỏi phải có sự can thiệp công suất ở đường biên (lề) của khu vực này thấp hơn một giá trị η_i nhất định. Vì thế, công suất truyền tải của *SU* trong kênh này phải chịu một hạn chế công suất F_i, và được cho bởi

$$F_i \le \eta_i (d_i - r_i)^{\beta_i} \quad (2)$$

ở đây: d_i là khoảng cách giữa máy phát PU_i và *SU*; β_i biểu diễn các yếu tố tổn hao trên đường truyền. Giới hạn đã nói ở trên sẽ làm ảnh hưởng đến công suất can thiệp của mỗi PU_i và có thể được chuyển đổi sang *SU*, và làm hạn chế công suất truyền trên mỗi sub-channel. Sau đây, giả sử G_i biểu thị hạn chế công suất truyền trên kênh con thứ *i*, và khó để tìm thấy nếu khoảng cách giữa máy phát *SU* và PU_i là rất nhỏ, thậm chí là trong khu vực bảo vệ của PU_i, do đó *SU* trên sub-channel truyền hạn chế công suất tương ứng sẽ là rất nghiêm ngặt.

Đối với *SU* sử dụng điều chế OFDM, công suất phân bổ truyền tải thực tế trên một subchannel của hệ thống không chỉ bao gồm một subchannel phụ thuộc vào công suất subcarriers mà bao gồm cả công suất rò rỉ subchannel ngoài của subcarriers. Với mô tả ngắn gọn, như định nghĩa ở đây, ma trận *J* bao gồm phần tử hàng *i*, cột thứ *j* và được viết là $(J_{i,j})$; $(J_{i,j})$ đại diện cho một đơn vị phân bổ công suất của các subcarriers thứ *j*, và của subchannels truyền thứ *i*. Theo [6], ta có:

$$J_{i,j} = \frac{1}{\Delta f} \int_{m_i - \frac{1}{2}\Delta f}^{m_{i+1} - \frac{1}{2}\Delta f} \left(\frac{\sin \frac{\pi}{\Delta f}(f - j\Delta f)}{\frac{\pi}{\Delta f}(f - j\Delta f)} \right)^2 df \quad (3)$$

$$J_{i,j} = \int_{m_i - \frac{1}{2}\Delta f}^{m_{i+1} - \frac{1}{2}\Delta f} \left(\frac{\sin \pi(x - j)}{\pi(x - j)} \right)^2 dx$$

ở đây: i dùng biểu diễn cho subchannels, $i = 1, 2, \ldots, M$; m_i biểu diễn kênh thứ i; j biểu diễn cho các subcarriers, $j = 1, 2, \ldots, N$; và Δf là khoảng cách giữa hai subcarriers.

Xác định phần bên phải của sự bất bình đẳng trong phương trình (2) như là giới hạn công suất truyền tải thứ cấp của G_i trên kênh phụ thứ i và có thể được biểu diễn bằng

$$G_i = \eta_i (d_i - r_i)^{\beta_i} \quad (4)$$

Có thể dễ dàng suy luận rằng nếu máy phát của người dùng thứ cấp nằm ở khoảng cách nhỏ từ máy phát người dùng chính và ngay cả trong khu vực được bảo vệ của người dùng chính thì công suất truyền tải thứ cấp của người dùng trên sub-channels tương ứng sẽ bị giới hạn ở mức rất nghiêm ngặt. Ngoài ra, công suất phát trên sub-channel thứ i có thể được biểu diễn như sau:

$$F_i = \sum_{j=m_i}^{m_{i+1}-1} P_j; \quad (5)$$

$$i = 1, 2, 3, \ldots, M; j = 1, 2, 3, \ldots, N$$

trong đó P_j biểu thị công suất được phân bổ bởi người sử dụng thứ cấp trên sub-carriers thứ j, và $P = [P_1, P_2, \ldots, P_N]^T$.

Do đó, theo công thức (2), để bảo vệ hiệu năng của tất cả người dùng chính, việc phân bổ công suất của người sử dụng thứ cấp cần đáp ứng các hạn chế về công suất truyền tải của M kênh tại cùng một thời điểm và có thể được biểu diễn như sau:

$$F \le G \quad (6)$$

ở đây: $F = [F_1, F_2, \ldots, F_N]^T$; $G = [G_1, G_2, \ldots, G_M]^T$.

3. Kịch bản phân bổ công suất tối ưu dựa trên thuật toán IPW

Mục tiêu phân bổ công suất trong các hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM, ngoài hạn chế tổng công suất phát, đề án phân bổ công suất phải tuân thủ điều kiện hạn chế của subchannel truyền và phải thỏa mãn công thức (6). Do vậy, vấn đề phân bổ công suất tối ưu ở hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM, có thể được mô hình hóa như sau:

$$P^* = \text{argmax} \sum_{j=1}^{N} R_j \quad (7)$$

$$s.t. \begin{cases} P \ge 0 \\ \sum_{j=1}^{N} P_j \le P_{tot} \\ F \le G \end{cases} \quad (8)$$

$P_k = 0, k \in \{k|$ số sub-carriers theo tỷ lệ 1: 2 thuộc SU gần nhất với $PU\}$

trong đó: P_{tot} đại diện cho tổng công suất truyền tải của người sử dụng thứ cấp. Ngoài ra, cần lưu ý rằng người dùng thứ cấp trong hệ thống này cũng sẽ bị can thiệp bởi những người dùng chính, và những nhiễu này có thể là nhiễu Gaussian trắng bổ sung bởi người nhận thứ cấp. Điều này không ảnh hưởng đến các mô hình toán học trong phần này. Thuật toán cải tiến được đề xuất trong phần này dựa trên mô hình đã được thiết lập như sau:

Khởi tạo:

$A=\{i \mid i=1, 2, \ldots, M\}$, $B=0$, $P_i=P_{tot}$, $k=1$

$C \in \{j \mid$ số sub-carrier thứ j của sub-channel thứ i, $j \in A\}$

Bắt đầu:

(1) Thiết lập sub-carrier gần nhất với sub-channel nơi mà người dùng chính được coi là người dùng thứ cấp như sub-carrier bảo vệ mà không phân bổ công suất, và cập nhật C;

(2) Thực hiện phân bổ công suất theo thuật toán IPW truyền thống cho các sub-carrier còn lại thuộc C với công suất $P_k = P_{tot}$, và thu được công suất P_j bởi các sub-carrer tương ứng;

(3) Với $i \in A$, so sánh F_i và G_i, ta nhận được $D = \{i \mid F_i \ge G_i, i \in A\}$;

(4) Cập nhật $A=A \backslash D$, $B=B \cup D$, $P_{k+1}=P_k - \sum_{i \in D} G_i$;

(5) Nếu $D \notin 0$, $k = k+1$, quay lại bước 2;

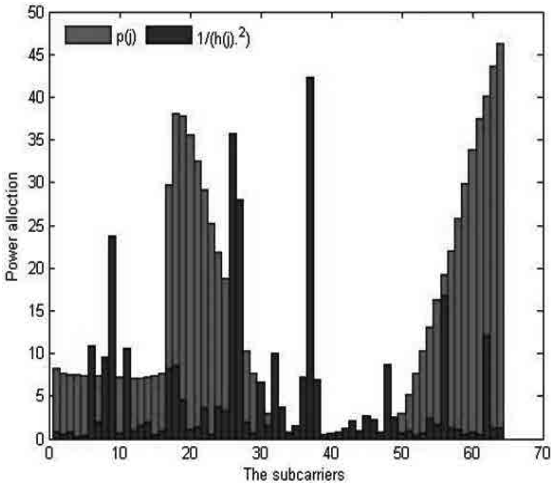
(6) Đối với kênh thứ i, $i \in D$, thực hiện việc phân bổ công suất theo thuật toán IPW truyền thống với công suất G_i cho các sub-carrier tương ứng, và thu được công suất P_j tương ứng, $J \in \overline{C}$.

4. Kết quả mô phỏng và thảo luận

Ở phần mô phỏng này, nhóm tác giả sử dụng mô hình kênh Đô thị điển hình (TU Model, Typical Urban Model) bằng cách tạo phading chon lọc tần số; mô hình gồm 6 sub-channels truyền dẫn, trong đó đường kính của các tham số trễ tương ứng là: *[0.0, 0.2, 0.5, 1.6, 2.3 và 5.0]μs*; tham số phân bổ công suất là: *[0.189, 0.379, 0.239, 0.095, 0.061 và 0.037]* tương ứng; *SU* có băng thông tần số là 5MHz và được chia thành 4 sub-channels, mỗi sub-channel tương ứng với một *PU* và được cấp phép về mặt phổ tần; tổng sub-carriers là 64, tương ứng với mỗi sub-channel là 16 sub-carriers; P_t là tổng hạn chế công suất truyền, N_0 là công suất nhiễu, và trong trường hợp này tác giả sử dụng các giá trị là 640 và 1 cho P_t và N_0 tương ứng; hạn chế công suất truyền trên mỗi sub-channel là: G_i = *[80, 480, 1.8 và 480]*^{T} [8].

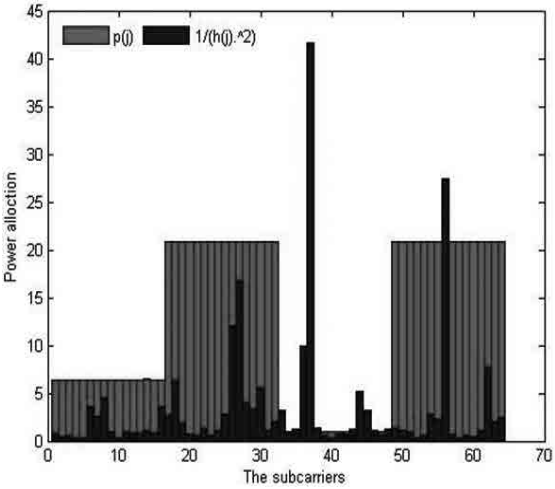
Ở bài báo này, nhóm tác giả sử dụng tín hiệu (symbol) OFDM trên sub-channels bằng cách thay đổi các giá trị của các biến liên quan có tính đến rò rỉ công suất để giải quyết các vấn đề tối ưu hóa (5), kết quả mô phỏng được thể hiện ở Hình 3. Và để so sánh, đề tài cũng đưa ra kết quả mô phỏng khi thay

đổi giá trị của các biến liên quan dựa trên thuật toán IPW, tuy nhiên kết quả này bỏ qua sự rò rỉ công suất sub-carriers, Hình 4 tương ứng.



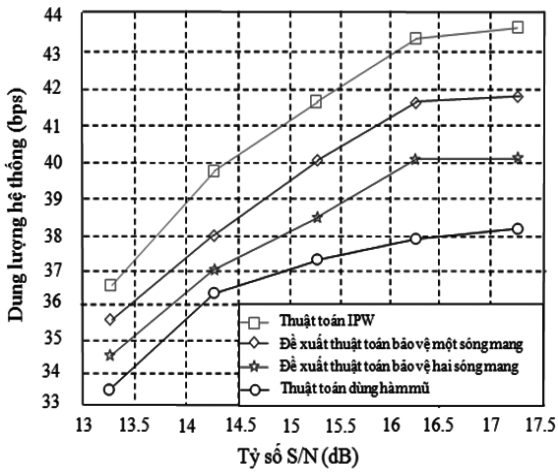
Hình 3. *Kết quả khảo sát sự rò rỉ công suất phân bổ của sub-carrier*

Có thể thấy ở Hình 3, hạn chế công suất truyền trên sub-channel thứ 3 thấp hơn *35dB* so với kênh lân cận, điều này có nghĩa là *SU* có thể là rất gần hoặc thậm chí nằm trong khu vực được bảo vệ của PU_3. Để đáp ứng yêu cầu giới hạn công suất nhiễu của PU_3 gây ra, đòi hỏi phải hạn chế công suất truyền của *SU* ở sub-channel thứ 3 phải rất nghiêm ngặt.

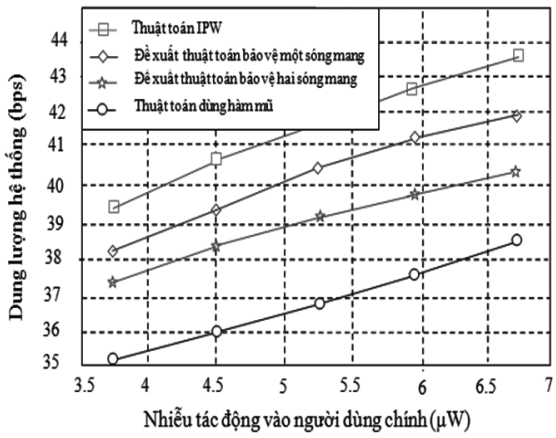


Hình 4. *Kết quả phân bổ công suất dựa trên thuật toán IPW khi đã thay đổi các giá trị*

Ở Hình 4, chúng ta thấy công suất phân bổ cho mỗi sub-channel là ít hơn so với những hạn chế công suất sub-channel truyền tương ứng, nhưng do ảnh hưởng công suất rò rỉ của các sub-cariers ở sub-channels liền kề, do vậy mà công suất truyền ở sub-channel thứ 3 giảm đi khoảng 10 lần, điều này làm cho sự hạn chế công suất nhiễu của PU_3 bị hư hỏng nặng. Như vậy, thuật toán IPW không áp dụng trong trường hợp này. Vì lẽ đó, trong Hình 3 đề án phân bổ công suất không những tối đa hóa dung lượng sub-channel mà còn đáp ứng các yêu cầu về hạn chế công suất phát của từng sub-channel. So sánh với Hình 4, chúng ta có thể thấy rằng ngay cả một lượng sub-channels tốt, phân bổ công suất của các sub-carriers ở sub-channel thứ 3 liền kề cũng bị hạn chế đáng kể, trong khi tại cùng một thời gian, rất nhiều công suất đã được phân bổ trên các sub-carriers rất xa của sub-channel thứ 3. Mặt khác, chúng ta có thể thấy 2 đề án này là gần như giống nhau trong một đề án phân bổ công suất trên sub-channel, điều này chỉ ra rằng trong cùng một bối cảnh hạn chế công suất, và bỏ qua công suất rò rỉ của sub-carriers thì đề án phân bổ công suất tối ưu khi thay đổi giá trị của các biến liên quan dựa trên thuật toán IPW là hiệu quả hơn so với đề án số.



Hình 5. *Mối quan hệ giữa dung lượng hệ thống và tỷ số S/N*



Hình 6. *Mối quan hệ giữa dung lượng hệ thống và nhiễu tác động vào PUs*

Đồng thời, dung lượng hệ thống của một số phương pháp được đưa ra như là một chức năng của sự thay đổi tỷ số *S/N* và so sánh với sự thay đổi nhiễu của *PU*, và được thể hiện trong Hình 5 và Hình 6 tương ứng. Mặt khác, chúng ta có thể thấy rằng hiệu suất hệ thống của các phương án khác nhau tăng dần lên với việc tăng dần tỷ số *S/N*. Tuy nhiên, so với thuật toán IPW, thuật toán số thì thuật toán bảo vệ sub-carrier ở một và hai bên thùy biên đã đề xuất có dung lượng hơn hẳn, điều này được cho bởi giảm ảnh hưởng công suất rò rỉ của các sub-cariers ở sub-channels liền kề, do vậy mà hiệu suất dung lượng kênh được cải thiện đáng kể.

5. Kết luận

Ở bài báo này, nhóm tác giả đã chỉ ra rằng hạn chế công suất can thiệp ở mỗi *PU* là tiền đề của phương án phân bổ công suât tối ưu hóa khả năng liên kết và có thể đạt được bằng cách giải quyết bài toán tối ưu hóa lồi. Với thuật toán IPW và các thuật toán hiện tại, cũng như một số các học giả mới chỉ dừng lại ở việc xem xét sự tác động và ảnh hưởng qua lại giữa *PU* và *SU* mà chưa đề cập đến công suất rò rỉ của các sub-carriers. Hai đề án phân bổ công suất ở bài báo này xét về mặt lý thuyết là khá tốt và có thể chấp nhận được, tuy nhiên thuật toán bảo vệ sub-carrier ở một và hai bên thùy biên đã đề xuất có dung lượng hơn hẳn, điều này được cho bởi giảm ảnh hưởng công suất rò rỉ của các sub-cariers ở sub-channels liền kề, do vậy mà hiệu suất dung lượng kênh được cải thiện đáng kể. Tương lai, vấn đề vẫn tiếp tục được xem xét dưới tập hợp các ứng dụng và có thể kết hợp cùng với thuật toán IPW cũng như các thuật toán khác nhằm bảo vệ các sub-channels. Tuy nhiên, việc thực hiện các đề án phân bổ công suất tối ưu phải có độ phức tạp là vừa phải.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trung tâm Nghiên cứu Ứng dụng Khoa học và Công nghệ, trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, với số tài trợ: UTEHY.T013.P1718.02.

Tài liệu tham khảo

[1]. Zhao Q, Sadler B., A survey of dynamic spectrum access, signal processing, networking, and regulatory policy. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, **55 (5)**, pp. 2294-2309.

[2]. Haykin S., Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications. *IEEE Journal on Selected A reas in Communications*, 2005, **23 (2)**, pp. 201- 220.

[3]. Mitola J., Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications. *Proc IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications*, San Diego: IEEE Press. 1999, pp. 3-10.

[4]. Weiss T, Jondral F., Spectrum pooling: An innovat ive strategy for the enhancement of spectrum efficiency. *IEEE Communications Magazine*, 2004, **42 (3)**, pp. S8-S14.

[5]. Wang P, Zhao M, Xiao L, etal., Power allocation in OFDM-based cognitive radio systems. *Proc IEEE Global Communication Conference Wasshington DC: IEEE Press*, 2007, pp. 4061-4065.

[6]. Weiss T, Hillenbrand J, Krohn A, etal., Mutual interference in OFDM-based spectrum pooling systems. *Proc IEEE Vehicular Technology Conference Spring,* Milan: IEEE Press. 2004, pp. 1873-1877.

[7]. S Boyd, L Vandenberghe, Convex Optimization. *Cambridge, UK: Cambridge University Press,* 2004.

[8]. Nguyễn Văn Vinh, Tối ưu hóa thuật toán IPW ở hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ,* trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên, 2016, **10 (06)**, tr. 45-49.

IMPROVEMENT OF CHANNEL CAPACITY IN COGNITIVE RADIO SYSTEMS BASED ON OFDM

Abstract:

The spectrum-sharing access model in the cognitive radio system consists of two main models, the Overlay model and the Underlay model. In this paper, a power overlay scenario based on the overlay model is proposed based on the traditional Iterative Partitioned Water-filling (IPW) algorithm. This scenario applies to protected and reasonably allocated bandwidth between sub-channels where the Primary User

(PU) and the Secondary User (SU) are placed adjacent. This scenario not only maximizes the user capacity of the secondary SU, but also reduces the power leakage of sub-carrier users of the PU.

Keywords: *Cognitive Radio (CR); Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM); Power Allocation; Subcarrier Side Lobe.*