



TỐI ƯU HÓA THUẬT TOÁN IPW Ở HỆ THỐNG VÔ TUYẾN NHẬN THỨC DỰA TRÊN OFDM

Nguyễn Văn Vinh, Đào Văn Đă, Hoàng Hải Hưng, Nguyễn Thị Phương Hòa,
Nguyễn Thị Thắm, Nguyễn Thị Nhung
Trường Đại học Sư phạm Kỹ thuật Hưng Yên

Ngày nhận: 06/4/2016

Ngày sửa chữa: 11/4/2016

Ngày xét duyệt: 24/5/2016

Tóm tắt:

Tối ưu hóa thuật toán IPW (Iterative Partitioned Water-filling) được áp dụng trong việc phân bổ công suất ở hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) với mục đích tối ưu hóa dung lượng kênh (channel) cho hệ thống bằng cách xem xét tổng hạn chế công suất channel và hạn chế công suất ở mỗi kênh con (sub-channel). Công suất rò rỉ ở các sóng mang con (sub-carriers) liên kế đặc biệt được quan tâm khi hạn chế công suất của người dùng chính PU (Primary User) và việc thiết lập các băng tần bảo vệ phổ tần cho người dùng chính PU và phổ tần của người dùng thứ cấp SU (Secondary User) là rất nghiêm ngặt. Tối ưu hóa thuật toán IPW được thực hiện lặp đi lặp lại ở các sub-channels có hạn chế công suất là nghiêm ngặt và được thực hiện dưới dạng bậc thang cho các sub-carriers. Kết quả mô phỏng của thuật toán đã đề xuất cho thấy, nó không chỉ tốt hơn so với kết quả của thuật toán IPW, mà độ phức tạp về tính toán cũng đơn giản hơn.

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. Đặt vấn đề

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 Fourier 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.

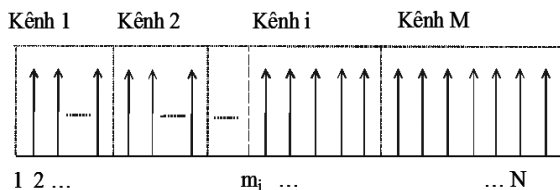
Ở tài liệu tham khảo số [5], thông qua phân tích nhiễu của PU đối với sự rò rỉ công suất sub-carriers, vấn đề phân bổ công suất ở hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM được xây dựng như một bài toán tối ưu hóa lồi. Ở bài báo này, tác giả chỉ ra rằng các đề án phân bổ công suất tối ưu nhằm mục tiêu 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 liên kề dựa trên thuật toán IPW.

Phần còn lại của bài báo được tổ chức như sau: phần 2 trình bày mô hình hệ thống phổ, phần 3 giới thiệu về hạn chế công suất truyền trên kênh, phần 4 trình bày về đề án phân bổ công suất tối ưu dựa trên thuật toán IPW, phần 5 trình bày kết quả mô phỏng số và thảo luận, và cuối cùng là kết luận được trình bày trong phần 6.

2. Mô hình hóa hệ thống phổ

Để sử dụng có hiệu quả các cơ hội phổ bên trái khác nhau của hệ thống PU , một hệ thống vô tuyến cảm nhận cần phải rất linh hoạt đối với hình dạng phổ tần của tín hiệu truyền đi. Điều chế OFDM là một ứng cử viên đầy hứa hẹn cho một hệ thống linh hoạt như vậy, vì cấu hình của nó có thể tái cấu trúc lại sub-carriers. Ngoài ra, các thành phần FFT của OFDM có thể được sử dụng bởi các máy dò năng lượng của SU để phát hiện kênh. Như trong Hình 1, cơ hội truy cập phổ tần của SU ở hệ thống vô tuyến cảm nhận dựa trên OFDM, cơ hội tiếp cận phổ tần của SU (không có giấy phép) được chia thành M sub-channels, mỗi sub-channel tương ứng với phổ ủy quyền của một hệ thống PU . Giả sử rằng tổng số các sub-carriers của SU là N , khoảng cách giữa các subcarrier là Δf , m_i biểu diễn số thứ tự cho subcarrier thứ i của sub-channel đầu tiên. Để đơn giản hóa việc phân tích, mà không mất tính tổng quát, tác giả tiếp tục giả định rằng mỗi băng thông sub-channel là một khoảng cách giữa các sub-carriers (và là số nguyên), cụ thể các sub-channel thông tin thứ i chiếm từ $(m_i - 1)\Delta f$ đến $(m_{i+1} - 1)\Delta f$.



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

Trong 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 subcarriers 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 .

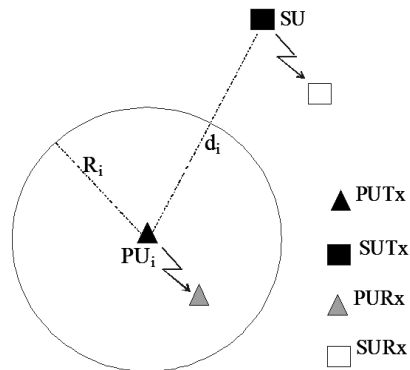
3. Giới thiệu về hạn chế công suất truyền trên kênh

Để đảm bảo sự can thiệp và chấp nhận được giữa PU và SU trong hệ thống vô tuyến nhận thức

dựa trên OFDM, chúng ta xem xét một vài trường hợp, cụ thể:

- Đầu tiên, SU phát hiện trạng thái kênh của PU_i để xác định phổ tần tồn tại và cơ hội truy cập phổ trước khi truyền. Các SU được phép truyền trừ khi tín hiệu của PU_i được xem như vắng mặt. Một xác suất phát hiện có thể đạt được để giảm va chạm gây ra bởi lỗi phát hiện như trong Hình 2, PU_i có thể được phát hiện khi đang hoạt động và do đó các can thiệp gây ra bởi tín hiệu của SU để PU_i nhận và có thể tránh được.

- Thứ hai, kể từ khi PU_i phát là xa SU , SU không thể phát hiện tín hiệu PU_i với việc phát hiện xác suất cần thiết, như trong Hình 2.



Hình 2. Mô hình hệ thống vô tuyến nhận thức

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_p và được cho bởi

$$F_i \leq \eta_i (d_i - R_i)^{\beta_i} \quad (1)$$

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 sub-channel của hệ thống không chỉ bao gồm một sub-channel phụ thuộc vào công suất sub-carriers mà bao gồm cả công suất rò rỉ sub-channel ngoài của sub-carriers. 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_{ij}) ; (J_{ij}) đại diện cho một đơn vị phân bố công suất của các sub-carriers thứ j , và của sub-channels truyền thứ i . Theo [6], ta có:

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

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

ở đây i dùng biểu diễn cho sub-channels, $i=1,2,\dots,M$; m_i biểu diễn kênh thứ i ; j biểu diễn cho các sub-carriers, $j=1,2,\dots,N$; và Δf là khoảng cách giữa hai sub-carriers.

Như vậy, công suất truyền tải thực tế của mỗi sub-channel có thể được thể hiện như

$$F_i = J_{ij} P_i \quad (3)$$

trong đó $F_i = [F_1, F_2, \dots, F_M]^T$; $P_i = [P_1, P_2, \dots, P_M]^T$, P_i là công suất phân bố trên sub-channel thứ i . Do đó, để bảo vệ hiệu suất của tất cả các PU trên M sub-channels thì đề án phân bố công suất cho SU phải đáp ứng được các ràng buộc về điều kiện hạn chế công suất truyền của M sub-channels, và được thể hiện như sau:

$$J_{i,j} P_i \leq G_i \quad (4)$$

trong đó $G_i = [G_1, G_2, \dots, G_M]^T$, dấu " $\leq$ " chỉ ra phía bên trái của mỗi phần tử là vector không lớn hơn so với bất đẳng thức ở đúng vị trí của các phần tử tương ứng.

4. Đề án phân bố công suất tối ưu dựa trên thuật toán IPW

Trong các hệ thống OFDM thông thường, khả năng liên kết để tối đa hóa các đề án phân bố công suất tối ưu bằng thuật toán IPW. Thuật toán IPW có tổng công suất hạn chế phát tối đa được giải quyết bằng vấn đề tối ưu hóa lồi. Trong các hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM, ngoài hạn chế tổng công suất phát, đề án phân bố công suất phải tuân thủ điều kiện hạn chế của subchannel truyền và phải thỏa mãn công thức (4). Do vậy, vấn đề phân bố công suất tối ưu ở hệ thống vô tuyến nhận thức dựa trên OFDM, có thể được mô hình hóa như sau:

$$P^* = \underset{j=1}{\operatorname{argmax}} \sum \lg \left(1 + \frac{|h_j|^2 P_j}{N_0} \right) \quad (5)$$

$$\begin{cases} I^T P_i \leq P_t \\ s.t. \{ J_{i,j} P_i \leq G_i \\ P_i \geq 0 \end{cases}$$

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_i biểu thị cho tổng công suất phát hạn chế; I biểu thị cho các vector cột với tất cả các tham số là 1. Cần lưu ý rằng hệ thống PU sẽ bị SU tác

động và gây nhiễu, những tín hiệu gây nhiễu của SU có thể được coi là Gauss. Vì vậy, sự can thiệp Gauss khác nhau trên các sub-channels khác nhau có thể làm cho công suất nhiễu trên mỗi subchannel của PU là khác nhau. Tuy nhiên, chúng ta có thể bù đắp bằng cách điều chỉnh biên độ sub-channels tăng lên để tạo ra các hiệu ứng bất bình đẳng, theo đó mô hình toán học đã thành lập trong bài báo này sẽ không bị ảnh hưởng.

Ở tài liệu tham khảo số [5], mô hình tối ưu hóa được các tác giả thành lập bằng cách bỏ qua tác động công suất rò rỉ của các sub-carriers, điều này tương đương với việc xem xét mỗi phần tử khác nhau của ma trận J và thỏa mãn:

$$\begin{cases} J_{i,j} = 1, J \in [m_i, m_{i+1} - 1], \\ J_{i,j} = 0, J \notin [m_i, m_{i+1} - 1]. \end{cases} \quad (6)$$

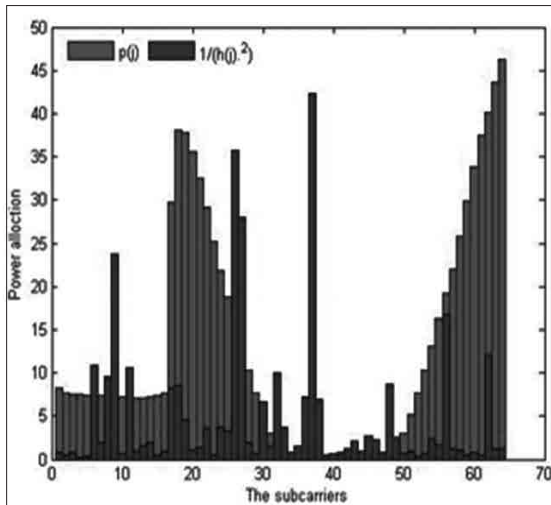
Theo phương trình (2), công suất rò rỉ giữa hai sub-carriers liên kề ở cùng một sub-channel truyền tương ứng có công suất tương đối nhỏ, và nếu so với công suất phát của sub-channel lân cận thì công suất rò rỉ được xem như là rất nhỏ, do vậy, ở tài liệu tham khảo số [5] các phép tính xấp xỉ là hợp lý trong bối cảnh chung. Tuy nhiên, trong tình huống nhất định, chẳng hạn như một sub-channel truyền bị hạn chế công suất trong khi thuật toán IPW được cho là phù hợp và rất chặt chẽ để gán công suất cho một sub-channel lân cận thì việc rò rỉ công suất ở các sub-carriers tương đối cao và không chỉ đơn giản là bỏ qua.

Trong khi đó, theo phương trình (6) có thể nhận thấy rằng sau khi xấp xỉ này được thiết lập, thực tế hạn chế công suất ở M sub-channels được tách rời nhau ở một số biến, và căn cứ vào đặc điểm này, chúng tôi đã cải tiến và đề xuất một thuật toán phân bố công suất mới hiệu quả hơn, cũng như dễ dàng và thuận tiện hơn trong tính toán. Tuy nhiên, khi xem xét sự rò rỉ công suất tác động giữa sub-carrier và vấn đề tối ưu hóa theo (5) thì sự ràng buộc công suất của sub-channel không còn có một cấu trúc tách rời. May mắn thay, các vấn đề (5) vẫn còn là một vấn đề tối ưu hóa tuyến tính ràng buộc lồi. Vấn đề này có thể được giải quyết bằng phương pháp số.

5. Kết quả số và thảo luận

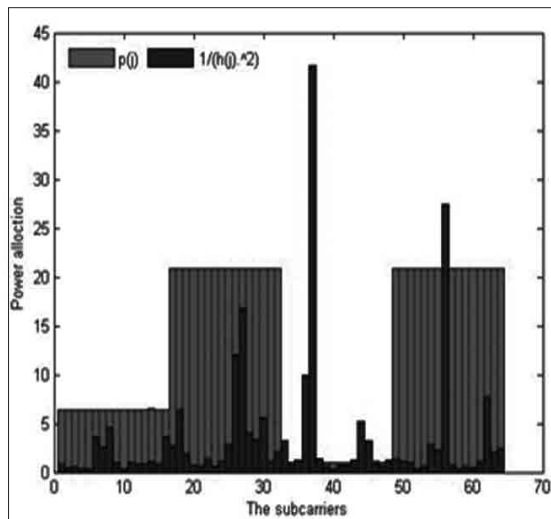
Ở phần mô phỏng này, tác giả sử dụng mô hình kênh Đô thị điển hình (TU Model, Typical Urban Model) bằng cách tạo phading lựa chọn tần số; mô hình gồm 6 sub-channels truyền dẫn, trong đó đường kính của các tham số trễ tương ứng là: $[0.0, 0.2, 0.5, 1.6, 2.3 \text{ và } 5.0]\mu s$; tham số phân bố công suất là: $[0.189, 0.379, 0.239, 0.095, 0.061 \text{ và } 0.037]$ 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: $G_i = [80, 480, 1.8 \text{ và } 480]^T$.



Hình 3. Kết quả khảo sát sự rò rỉ công suất phân bố của sóng mang con

Ở bài báo này, 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, bài báo 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.



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

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.

Ở Hình 4, chúng ta thấy công suất phân bố 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-carriers 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 bố 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 bố 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 bố 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 bố 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 bố 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.

6. Kết luận

Ở bài báo này, tác giả đã chỉ ra rằng hạn chế công suất can thiệp ở mỗi PU là tiền đề của phương án phân bố công suất tối ưu hóa khả năng liên kết và có thể đạt được bằng cách giải quyết bài toán tối ưu hóa lỗi. 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 bố công suất được đề xuất ở bài báo này về mặt lý thuyết là khá tốt và có thể chấp nhận được, tuy nhiên nó đòi hỏi các giải pháp số của một bài toán tối ưu lỗi trong việc thực hiện có độ phức tạp khá cao. 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 nhằm bảo vệ các sub-channels. Tuy nhiên, việc thực hiện các đề án phân bố công suất tối ưu phải có độ phức tạp là vừa phải.

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, vol. 55 (5), pp. 2294-2309, 2007.
- [2]. Haykin S, “*Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications*,” IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23 (2), pp. 201- 220, 2005.
- [3]. Mitola J, “*Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications*,” Proc IEEE International Workshop on Mobile Multimedia Communications. San Diego: IEEE Press, pp. 3-10, 1999.
- [4]. Weiss T, Jondral F, “*Spectrum Pooling: An Innovative Strategy for the Enhancement of Spectrum Efficiency*,” IEEE Communications Magazine, vol. 42 (3), pp. S8-S14, 2004.
- [5]. Wang P, Zhao M, Xiao L, et al., “*Power Allocation in OFDM-based Cognitive Radio Systems*,” Proc IEEE Global Communication Conference Washington DC: IEEE Press, pp. 4061-4065, 2007.
- [6]. Weiss T, Hillenbrand J, Krohn A, et al., “*Mutual Interference in OFDM-based Spectrum Pooling Systems*,” Proc IEEE Vehicular Technology Conference Spring. Milan: IEEE Press, pp. 1873-1877, 2004.

**OPTIMAL IPW ALGORITHM
IN OFDM-BASED COGNITIVE RADIO SYSTEMS**

Abstract:

The optimal of Interactive Partitioned Water-filling (IPW) algorithm is applied in the power distribution in cognitive radio systems based on orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) with the aim at optimizing channel capacity for systems by considering total constraints of channel power, and capacity constraints in each subchannel. Leakage power in sub-carriers adjacent to special attention while limiting the power of major primary user (PU) and the establishment of protection of spectrum bands for the primary user and spectrum of secondary user (SU) is very strict. Optimizing IPW algorithm is performed repeatedly in the sub-channels in which the capacity is limited strictly and are implemented form of steps for the sub-carriers. The results from simulation to propose algorithm showed not only better steps for the IPW algorithm, but also for simpler complexity of calculations.

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