

感知無線電中導入優先權機制之功率與許可控制

張伯浩、葉力愷、黃煒儒
國立東華大學電機工程學系

摘要— 感知無線電(Cognitive Radio, CR)是能最佳化頻譜使用率的新穎技術。但由於主要使用者(Primary User, PU)跟次要使用者(Secondary User, SU)將操作於相同頻帶，因此主要使用者的訊號干擾雜訊比 SINR(Signal-to-interference-plus-noise-ratio)下降。為了確保主要使用者的服務品質 QoS (Quality-of-Service)，必須對次要使用者做功率控制(Power Control)，並且同時我們結合許可控制(Admission Control)來最大化次要使用者的數量。而為了確保次要使用者的服務品質，我們提出了優先權機制(Priority Mechanism)來避免正在進行傳輸的次要使用者傳輸中斷。

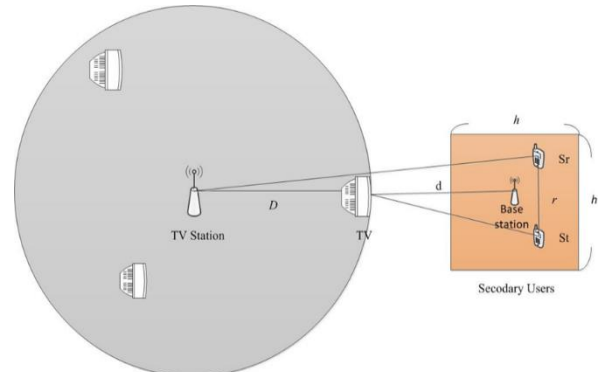
一、簡介

基於現代行動通訊與無線網路的普及，無線服務產業對於影音的傳輸品質要求也越來越高。可是在有限的頻譜資源環境下，讓我們遭遇到頻譜短缺的問題。根據美國聯邦通訊委員會(Federal Communications Commission, FCC)[1]以及 Defense advance Research Projects Agency(DARPA)發表的研究報告，我們可以得知頻譜的使用並沒有完善的規劃且效率不高。因此感知無線電成為目前廣為探討，提高頻譜資源使用率的新興技術。其主要概念藉由頻譜感知偵測註冊頻帶的頻譜洞(Spectrum Holes)，讓更多的次要使用者可以進行資料傳輸，以達到更高的頻譜使用率。

2004年 FCC的頻譜政策工作小組發布了允許非註冊元件(licensed device)於電視頻帶傳輸的政策，目的在希望不影響電視服務品質的前提下，在電視頻帶建立一個以感知無線電為核心的無線網路。要讓無線電網路操作於電視頻帶上，首先要克服的問題就是感知使用者如何避免對主要使用者造成嚴重的干擾進而影響到主要使用的服務品質，同時感知使用者又必須保持一定的服務品質。此時需要架設感知無線基地台，收集每一個感知使用者的通道狀態資訊(Channel State Information, CSI)。基地台經由這些收集到的資料，對感知使用者們進行輸出的功率控制，設定限制的訊號干擾雜訊比，提升整體的服務品質。同時經由基地台進行感知使用者的許可控制，以期在一定的服務品質限制下，能夠讓更多的感知使用者進行傳輸。

本篇論文引用 Joint Admission and Power Control for Ad-hoc and Cognitive Underlay Networks: Convex Approximation and Distributed Implementation [2]中的 Linear Programming Deflation (LPD) 演算法。LPD 演算法結合了功率控制與許可控制，移除對其他感知使用者干擾加上受到其他感知使用者干擾最大值的感知使用者連

結，進而達到趨近最佳化次要使用者數量。然而這樣的移除過程，有可能造成正在進行傳輸的次要使用者傳輸中斷。因此我們提出了包含距離優先權的線性編製程序縮減演算法(Linear Programming Deflation with Distance Priority, LPD - D) 和包含干擾優先權的線性編製程序縮減演算法(Linear Programming Deflation with Interference Priority, LPD - I)演算法，在保障優先權較高的感知使用者傳輸不會中斷的同時，提升次要使用者的數量。



圖一：感知無線電操作於電視頻帶示意圖

二、感知無線電系統架構

2.1 感知無線電網路

感知無線電網路分成兩個群組：主要使用者網路：在主要使用者網路中，主要使用者擁有頻道存取的優先權，其只受主要使用者基地台管理。因其擁有頻道存取優先權，因此其他非授權用戶不能對他造成過度的干擾。感知無線電網路：感知無線電網路也被稱為未授權網路、動態頻譜存取網路。感知無線電在授權頻帶中沒有頻譜存取優先權，因此需要經由架設感知無線電基地台來提供感知使用者之間的連結。或是設置頻譜經紀人(Spectrum brokers)，協調環境中的感知使用者分配頻譜。

2.2 功率控制

在感知無線電系統上，功率控制對整體系統效能影響很大，良好的功率控制可以改善無線電環境的連結問題。因此，功率控制不僅要達能夠達到感知使用者所要求的 SINR 限制，同時要避免對主要使用者造成過高的干擾。感知無線電網路中的功率控制方法主要分為兩大類，一種為集中式功率控制方法，另一種為分散式功率控制。接下來介紹在電視頻帶下的功率控制[4]。要解決操作於電視頻帶遇到的干擾問題，我們把感知使用者跟主要使用者接收端(電視收看者)的服務品質表示為 SINR。而主要使用者基地台跟次要使用者基地台間會互相交流環境中偵測到的資訊。假設有 K 個次要使用者

傳送對，他們的傳輸功率表示為 $p_{i,sec}$ ，SINR 表示為 $\gamma_{i,sec}$ 。而最大化效能以及干擾的功率控制問題，可以表示如下：

$$\min \sum_{i=1}^N p_{i,sec} \quad (2.1)$$

$$\text{subject to } \gamma_{m,TV} \geq \gamma_{TV}^{tar}, \forall m \quad (2.2)$$

$$\gamma_{i,sec} \geq \gamma_{i,sec}^{tar}, i = 1, \dots, N \quad (2.3)$$

$$p_{sec}^{min} \leq p_{i,sec} \leq p_{sec}^{max}, i = 1, \dots, N \quad (2.4)$$

其中 γ_{TV}^{tar} 和 $\gamma_{i,sec}^{tar}$ 是主要使用者和次要使用者的目標 SINR，而 p_{sec}^{min} 和 p_{sec}^{max} 為次要使用者傳輸端最大和最小傳輸功率。在感知無線電裡進行功率控制最大的目的就是要最大化能量效能以及抑制對其他使用者的干擾。我們可以經由(2.1)式來達到此目的，加上經由(2.2)跟(2.3)式來確保主要使用者跟次要使用者的品質。

2.3 許可控制

當次要使用者的數量過多，超過網路的能夠容納的數量，導致網路擁塞。此時需要許可控制來限制使用者的數量，藉由排除干擾過大的次要使用者來保證其於使用者的服務要求。在本篇論文中，次要使用者基地台必需去收集環境中使用者的資訊。如果次要使用者的干擾大於主要使用者的門檻時，這樣次要使用者就不被許可進行資料傳輸。而如何允許讓哪些次要使用者進行傳輸達到系統的最大效益，則是次要使用者基地台最主要的任務。當我們進行許可控制時，希望能夠讓更多次要使用者能夠同時進行傳輸，此問題以下列方程式表示為：

$$S_0 = \text{argmax}_{s \subseteq \{1, \dots, k\}, \{p_k \in \mathbb{R}_+\}_{k=1}^k} |S| \quad (2.5)$$

$$\text{subject to } p_k \leq P_k^{MAX}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (2.6)$$

$$\frac{G_{kk}p_k}{\sum_{l=1, l \neq k}^K G_{lk}p_l + G_{0k}p_0 + \sigma_k^2} \geq c_k, \forall k \in S_0 \quad (2.7)$$

$$\frac{G_{00}p_0}{\sum_{l \in S_0} G_{l0} + \sigma_0^2} \geq c_0 \quad (2.8)$$

$|S|$ 是集合 S 的元素數目，(2.7)式是次要使用者的 SINR 限制，(2.8)式為主要使用者的 SINR 限制。 P_k^{MAX} 為次要使用者最大傳輸功率限制， G_{kk} 為次要使用者 k 傳送對之間的通道增益， G_{lk} 為其他次要使用者到次要使用者 k 的通道增益。 G_{00} 為主要使用者的通道增益， G_{l0} 為次要使用者到主要使用者接收端的通道增益。 $G_{0k}p_0$ 是主要使用者對次要使用者 k 的干擾。 σ_0^2 和 σ_k^2 分別為主要使用者跟次要使用者接收端的雜訊。而次要使用者子集合的選擇是一個 NP - hard 問題。

2.4 結合功率控制與許可控制

本篇論文同時考慮了功率控制與許可控制，以期能最佳化次要使用者的數目。此時必須滿足下列條件：(1) 主要使用者必須保證擁有優質的服務品質。(2) 次要使用者如果被許可傳輸，也必須確保擁有一定的服務品質。(3) 在最大化被許可傳輸的次要使用者數量的同時，最小化服務這些次要使用者的功率消耗。

三、凸逼近及演算法

3.1 單一層面整合

本章引用[2]，[3]和[5]論文中凸逼近應用。因為功率控制和許可控制有各自運算的公式。要把兩者做結合，勢必要重新改寫方程式。我們把(2.1)~(2.4)跟(2.5)~(2.9)兩個層面的問題統整改寫成為一個等效單一層面最佳化問題。讓我們考慮如何解決下列的問題：

$$\min_{\{p_k \in \mathbb{R}_+, s_k \in \{-1, 1\}\}_{k=1}^K} \epsilon \sum_{k=1}^K p_k + (1 - \epsilon) \sum_{k=1}^K \lambda_k (s_k + 1)^2 \quad (3.1)$$

$$\text{subject to } p_k \leq P_k^{MAX}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.2)$$

$$\frac{G_{kk}p_k + \delta_k^{-1}(s_k + 1)^2}{\sum_{l=1, l \neq k}^K G_{lk}p_l + G_{0k}p_0 + \sigma_k^2} \geq c_k, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.3)$$

$$\frac{G_{00}p_0}{\sum_{l=1}^K G_{l0}p_l + \sigma_0^2} \geq c_0 \quad (3.4)$$

我們在式子加入了二元排程變量 s_k 。當其值為 -1 ，則次要使用者被許可進行傳輸；而當其值為 1 ，次要使用者不被允許進行傳輸。當 δ_k 的數值為很小且 $s_k = 1$ ，則第 k 個次要使用者並未達到 SINR 的限制，所以第 k 個次要使用者不能進行傳輸。而當 $s_k = -1$ ，第 k 個次要使用者的 SINR 達到要求的標準，則可以進行資料的傳送。公式(3.1)同時包含了功率控制與許可控制，其中表達許可控制部份的消耗是離散的值。而功率控制部份的消耗值因為(3.2)的限制有其上限值。當我們選擇把 ϵ 設為很小的值，則可以確保許可控制絕對優先於功率控制，以提升我們在選擇次要使用者個數時的準確度。我們可以經由柯西不等式(Cauchy-Schwartz inequality)很直觀的得到下列結果：

For $\lambda_k = 1, \forall k \in \{1, \dots, K\}$, and

$$0 < \epsilon < \frac{4}{\sum_{k=1}^K P_k^{MAX} + 4} \quad (3.5)$$

$$\delta_k \leq \frac{4}{c_k (\sum_{l=1, l \neq k}^K G_{lk} P_l^{MAX} + G_{0k} p_0 + \sigma_k^2)} \quad (3.6)$$

而解決(3.1)~(3.4)等同於同時解決了(2.1)~(2.4)和(2.5)~(2.8)。事實上，當(2.5)~(2.8)有很多組解的時候，解決(3.1)~(3.4)可以產生一組最小功率合。其線性推導跟[5]相似。而式子中加入 λ_k 這個變量是作為每個次要使用者判斷使否可以使用的權重值，以提升公平性或是社會福利。當設定 λ_k 成比例分配給第 k 個次要使用者的排隊長度，將會最佳化系統的輸出[8]；設定其跟使用者服務品質成相反比例，將會提升公平性。值得注意的是，當次要使用者的 λ 不相等時。(2.1)~(2.4)和(2.5)~(2.8)也失去平衡。因此(3.1)~(3.4)依然是個 NP - Hard 問題。

3.2 孤立非凸面 (Isolating Non-convexity)

在(3.1)~(3.4)的問題並非直接符合凸逼近。因此以下我們重新改寫公式，把非凸面的部份明確的顯示出來，然後讓我們得到更接近能夠最佳化的公式：

$$\min_{\{p_k \in \mathbb{R}_+, S_k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}\}} \varepsilon \sum_{k=1}^K p_k + (1 - \varepsilon) \sum_{k=1}^K \lambda_k \text{Tr}(1_{2 \times 2} S_k) \quad (3.7)$$

$$\text{subject to } p_k \leq P_k^{\text{MAX}}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.8)$$

$$\frac{G_{kk} p_k + \delta_k^{-1} \text{Tr}(1_{2 \times 2} S_k)}{\sum_{l=1, l \neq k}^K G_{lk} p_l + G_{0k} p_0 + \sigma_k^2} \geq c_k, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.9)$$

$$\frac{G_{00} p_0}{\sum_{l=1, l \neq k}^K G_{l0} p_0 + \sigma_0^2} \geq c_0 \quad (3.10)$$

$$S_k \geq 0, \text{rank}(S_k) = 1, S_k(1,1) = S_k(2,2) = 1, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } (s_k + 1)^2 &= \left(\begin{bmatrix} s_k & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right)^2 \\ &= \text{Tr} \left(\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_k & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \right) = \text{Tr}(1_{2 \times 2} S_k) \end{aligned} \quad (3.12)$$

$\text{Tr}(\cdot)$ 表示矩陣的 trace, $S_k := s_k s_k^T$ 和 $s_k := [s_k \ 1]^T$ 。而 $S_k \geq 0$ 表示矩陣 S_k 是一個正半定矩陣。它的對角線元素的值為 1, 非對角元素的值保持原本設定的參數 s_k , 矩陣 $1_{2 \times 2}$ 為一個 2×2 的單位矩陣。由於 $\text{rank}(S_k) = 1, S_k(1,1) = S_k(2,2) = 1$, 因此 S_k 只有兩種可能性:

$$S_k = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \text{Tr}(1_{2 \times 2} S_k) = 4; \text{ or}$$

$$S_k = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \text{Tr}(1_{2 \times 2} S_k) = 0$$

由於 rank 的值限制為 1, 因此 $s_k \in \{-1, 1\}$ 。這是唯一會導致(3.7)~(3.11)成為非凸面的唯一來源。

3.3 半定編製程序放寬

當我們移除 $\text{rank} = 1$ 的限制時, 代表 s_k 可以在 $[-1, +1]$ 間取值, 此時得到一個半定編製程序(Semidefinite Programming, SDP)問題。在[9]中, 描述此 rank 放寬會產生一個拉格朗日 bi-dual 問題, 在意義上是最接近解決(3.7)~(3.11)。任意一個實對稱的 2×2 矩陣 S_k , 其單位對角線元素可以寫作 $\begin{bmatrix} 1 & x_k \\ x_k & 1 \end{bmatrix}$ 。只有當 $x_k \in \{-1, 1\}$ 時, 兩個行向量的值成比例。行列式為非負值, 其充要條件為 $x_k \in [-1, 1]$ 。值得注意的是, 在(3.7)~(3.11)裡面的矩陣 S_k 只有經由 $t_k := \text{Tr}(1_{2 \times 2} S_k)$ 和經過參數化的值 $t_k = 2(1 + x_k)$ 才能開始運作。因為我們刪除 $\text{rank} = 1$ 的限制, 所以我們可以將原本 x_k 的限制範圍 $[-1, 1]$, 轉換成等效的參數 t_k , 其限制範圍為 $[0, 4]$ 。由此我們可以得到下列的線性公式:

$$\min_{\{p_k \in \mathbb{R}_+, S_k \in \mathbb{R}^{2 \times 2}\}} \varepsilon \sum_{k=1}^K p_k + (1 - \varepsilon) \sum_{k=1}^K \lambda_k t_k \quad (3.13)$$

$$\text{subject to } p_k \leq P_k^{\text{MAX}}, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.14)$$

$$\frac{G_{kk} p_k + \delta_k^{-1} t_k}{\sum_{l=1, l \neq k}^K G_{lk} p_l + G_{0k} p_0 + \sigma_k^2} \geq c_k, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.15)$$

$$\frac{G_{00} p_0}{\sum_{l=1, l \neq k}^K G_{l0} p_0 + \sigma_0^2} \geq c_0 \quad (3.16)$$

$$0 \leq t_k \leq 4, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.17)$$

當我們解決(3.13)~(3.17)的問題, 產生的解答可以得到(3.7)~(3.11)下界(lower bound), 由此我們得到(3.7)~(3.11)亞最佳(suboptimal)解答。

3.4 優先權機制演算法

我們主要的想法是縮小(3.13)~(3.17)找的次要使用者數目的可能解。因此當我們在解決(3.13)~(3.17)時, 先確定全部的主要使用者跟次要使用者的 SINR 是否滿足限制。如果不滿足的話, 則選擇一個優先權標記較低的次要使用者, 使其不能進行傳輸。重複上述步驟, 直到所有使用者都滿足限制為止。

演算法 1:

導入距離優先權的線性編製程序縮減演算法

(Linear Programming Deflation with Distance Priority)

1. 有一集合 U 的次要使用者要求傳輸, $U \leftarrow \{1, \dots, K\}$
2. 次要使用者基地台根據前一次的優先權標記和其他次要使用者到基地台的距離由近到遠給予優先權, 距離較近的次要使用者擁有較高的優先權。經過排序後得到新的集合 $U_d \leftarrow \{1_d, \dots, K_d\}$
3. 經由公式(3.13) ~ (3.17)對集合 U_d 內的次要使用者進行運算。
4. 假如全部的次要使用者都達到目標 SINR 值, 則中斷運算。如果有次要使用者 SINR 值未滿足, 則從優先權較高的次要使用者判斷起: 滿足則判斷下一個次要使用者; 不滿足則剔除優先權次於他、同時對他造成最大干擾值 ($G_{lk} p_l$) 的次要使用者連結。

演算法 2:

導入干擾優先權之線性編製程序縮減演算法 (Linear Programming Deflation with Interference Priority)

1. 集合 U 的次要使用者要求傳輸, $U \leftarrow \{1, \dots, K\}$
2. 次要使用者基地台根據前一次的優先權標記和其他次要使用者對主要使用者接收端干擾 ($G_{l0} p_l$) 的大小排序, 干擾越小的次要使用者優先權越高。得到新集合 $U_l \leftarrow \{1_l, \dots, K_l\}$ 。
3. 經由公式(3.13) ~ (3.17)對集合 U_l 內的次要使用者進行運算。
4. 假如全部的次要使用者都達到目標 SINR 值, 則中斷運算。如果有次要使用者 SINR 值未滿足, 則從優先權較高的次要使用者判斷起: 滿足則判斷下一個次要使用者; 不滿足則剔除優先權次於他、同時對他造成最大干擾值 ($G_{lk} p_l$) 的次要使用者連結。

演算法 1 和演算法 2 的差別在於優先權給定的依據。演算法 1 是根據次要使用者到次要使用者基地台的距離, 而演算法 2 則是根據次要使用者對主要使用者干擾值的大小。本論文在次要使用者基地台如何針對次要使用者的優先權做剔除的動作, 提出了兩種方式: 1. 相對優先權 (Relative Priority): 次要使用者基地台會優先滿足優先權較高的次要使用者, 而其他優先權較低的次要使用者都有可能被剔除。2. 絕對優先權 (Absolute Priority): 當優先權較高的使用者其 SINR 值未達到目標, 則次要使用者基地台會優先剔除優先權最低的次要使用者。

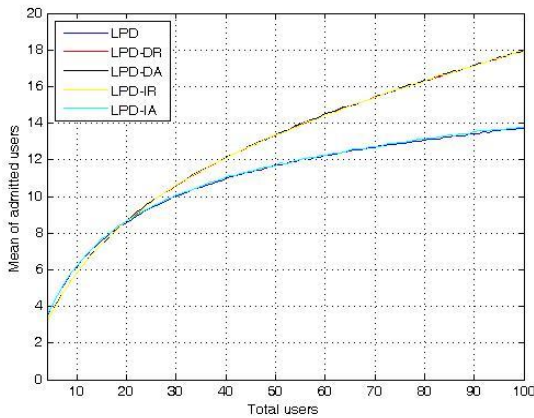
四、模擬與分析

本篇論文模擬環境為圖一之感知無線電網路架構, 我們假設次要使用者基地台擁有完整的通道狀態資訊。而感知無線電區域為邊長 2 公里的正方形區域, 在此區域中心點有一次要使用者基地台, 與電視基地台直線距離 2 公里處有一主要使用者接收端。感知使用者傳送的所需的最小功率 P_k^{MIN} 為: 在沒有其他次要使用者干擾的情況下, 滿足 SINR 限制所需的功率。次要使用者的功

率預算可以表示為 $P_k^{MAX} = bP_k^{MIN}$ 。主要使用者的傳輸功率為 100 千瓦進行電視訊號傳輸。通道增益可以表示為 $G_{ij} = 1/d_{ij}^\alpha$ ， d_{ij} 為傳送端 i 和接收端 j 之間的歐幾里得距離。 α 為路徑損耗指數，因為電視傳送端為一高天線設計，相對於感知使用者位於地面上，所以感知使用者在距離方面損耗比電視傳送端快速。因此電視基地台的損耗指數設為 3，而次要使用者環境的損耗指數設為 4。對於放寬演算法而言，我們把 δ_k 分別乘以 0.999，而 ϵ 設為原本的十分之一。

表 I 模擬參數

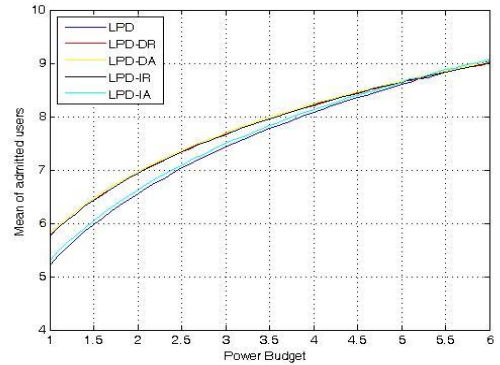
| | |
|---------------|------------------|
| $h \times h$ | $2 \times 2(km)$ |
| d | $2(km)$ |
| P_{TV} | $100kW$ |
| R | $70km$ |
| r | $400m$ |
| σ^2 | $-70dBm$ |
| α_{TV} | 3 |
| α_k | 4 |
| b | 5 |
| δ_k | $\times 0.999$ |
| ϵ | $\times 0.1$ |



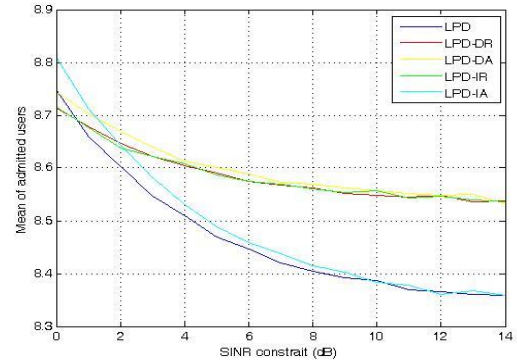
圖二：次要使用者比較圖

圖二中主要使用者的 SINR 值設為 2 dB，次要使用者的 SINR 值設為 2 dB。D 表示距離；I 代表干擾；R 代表相對篩選法；A 代表絕對篩選法。由圖可以看出以距離為優先權的 LPD 中，相對和絕對篩選法對系統表現影響不大，因此我們可以直接選擇使用絕對優先權來確保更多優先權較高的使用者不會傳輸中斷。而在以干擾為優先權的演算法中，在低於 20 個次要使用者時，絕對優先權表現較佳；次要使用者個數超過 20 個時，相對優先權則有較好的效能。因此系統可以設定為當次要使用者人數低於 20 時，使用絕對優先權篩選法；人數大於 20 時，使用相對優先權篩選法其 mean of admitted users 比原本的演算法增加至四人之多。如此一來將可提昇整體系統表現，在確保擁有較高優先權的次要使用者傳輸不會中斷的情形下，同時提昇被基地台許可進行傳輸的次要使用者人數。

圖三比較了功率預算對被許可進行傳輸的次要使用者個數的影響。當功率預算越高時，表示次要使用者的傳輸功率上限值越大，因此次要使用者可以傳輸的功率就越大，提升滿足他們 SINR 要求的可能性。



圖三：功率預算比較圖 (次要使用者個數：20)



圖四：次要使用者 SINR 比較圖 (次要使用者個數：20)

由圖四可以看出，當次要使用者的 SINR 要求越高的時候，被許可進行傳輸的次要使用者數量逐漸下降。

結論

本論文在原本的 LPD 演算法加入優先權的概念，在次要使用者人數低於 20 時，我們提出的演算法可以保護正在進行傳輸的感知使用者傳輸不會中斷，同時維持一定的許可使用者人數。而在感知使用者人數多於 20 時，系統表現優於原本的演算法。

參考文獻

- [1] FCC, Spectrum Policy Task Force Report, ET Docket No. 02-155, Nov.2002.
- [2] Mitliagkas, I.; Sidiropoulos, N.D.; Swami, A., "Joint Power and Admission Control for Ad-Hoc and Cognitive Underlay Networks: Convex Approximation and Distributed Implementation," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.10, no.12, pp.4110,4121, December 2011
- [3] Mitliagkas, I.; Sidiropoulos, N.D.; Swami, A., "Convex Approximation-Based Joint Power and Admission Control for Cognitive Underlay Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2008. IWCMC '08. International*, vol., no., pp.28,32, 6-8 Aug. 2008
- [4] Yan Zhang, Jun Zheng and Hsiao Hwa Chen. *Cognitive radio networks: architectures, protocols and standards*. Taylor & Francis, Boca Raton, 2010.
- [5] Manskani, E.; Sidiropoulos, N.D.; Zhi-Quan Luo; Tassiulas, L., "Convex approximation techniques for joint multiuser downlink beamforming and admission control," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.7, no.7, pp.2682,2693, July 2008
- [6] L. Tassiulas and A. Ephremides, "Stability properties of constrained queueing systems and scheduling for maximum throughput in multihop radio networks," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, no. 12, pp. 1936-1949, 1992
- [7] H. Wolkowicz, "Relaxations of Q2P," Chapter 13.4 in *Handbook of Semidefinite Programming: Theory, Algorithms, and Applications*, ed. by H. Wolkowicz, R. Saigal, and L. Vandenberghe, Kluwer Academic Publishers, 2000.