

在感知無線電網路支援差異化服務的研究

陳偉業 黃淑玲 楊于世 朱志達

南台科技大學 資訊管理系

台南、台灣

cwycwy@mail.stut.edu.tw

摘要

感知無線電是以不干擾主要系統傳輸為原則的跨系統資源分享網路。目前研究大多以頻譜偵測、頻譜管理、頻譜分享及媒體存取控制層設計等為主，鮮少探討在感知無線電網路上提供差異化服務的議題。本篇提出一方法研究在 TDMA 排程存取的主要系統中，根據不同服務設定 BV 值並計算出隨機等待時間，來探討感知使用者在語音及數據服務類型下，使用主要系統資源的差異，以確保高優先權使用者的服務品質及避免感知使用者同時使用通道的碰撞問題。研究結果顯示，採用 BV 方式能確保高優先權服務在使用系統資源上的優先性。此外，所提方法能比競爭機制有更高的通道存取率及產出。

關鍵字: 感知無線電網路, 差異化服務, 通道配置

I. 前言

由於無線通訊的蓬勃發展，使用者對無線傳輸需求提高，促使無線電頻譜資源分配已日趨匱乏。主要原因來自於各個無線通訊系統為了防止彼此間相互干擾，系統都各自操作在特定頻帶且對該頻帶均有專屬的使用權。FCC在2002年的一份頻譜使用報告中指出，在美國六個主要都會區中，有部份的頻譜是完全沒有使用的，且平均使用率約為15%。因此，促使各國開始重視「無線電頻譜的使用狀況」。許多研究及量測結果皆顯示，雖然無線頻譜資源有限，但導致資源不敷使用的主要因為靜態式頻譜管理政策[1, 2]。

圖1顯示了美國現今30 MHz至2.9 GHz頻譜配置的使用情形[3]，圖中縱座標(Y軸)為各種服務配置的頻帶，橫座標(X軸)為頻帶使用率。由圖中可看出各種應用皆獨立配置頻帶但使用上分佈並不平均，當中甚至有6個完全未使用頻段，且使用最頻繁的TV 37-51 608-698 MHz 頻帶使用率也僅接近30%。因此，如何更有效率地使用頻譜是研究者面臨的一大挑戰。目前，最被推崇能夠有效提高無線電頻譜資源使用的方法，就是「感知無線電(cognitive radio, CR)」[3]。感知無線電的主要概念是利用智慧型感知偵測，使無線通訊設備於頻譜壅塞時，能夠尋找可替代的臨時頻段，暫時使用此空間頻段來完成通訊，使無線資源利用率達到最佳化的新技術。

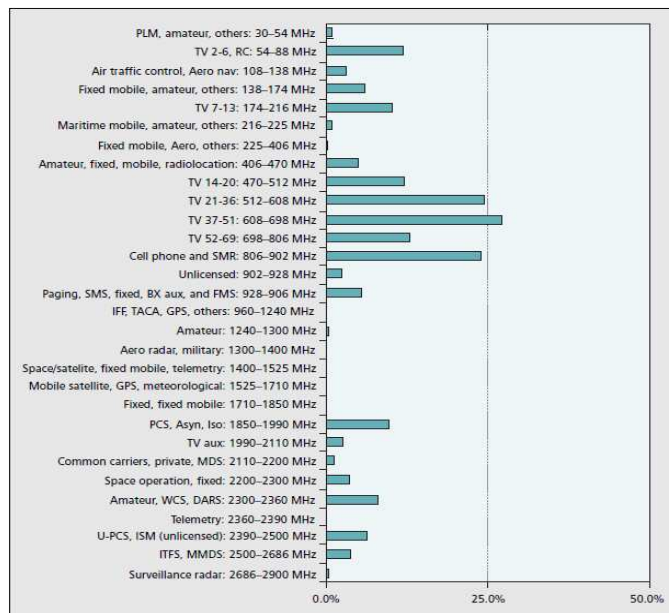


圖 1、30 MHz至2.9 GHz頻譜配置的使用情形[3]

II. 文獻探討

A. 感知無線電網路

為了解決頻譜使用率不佳的問題，學者 Joseph Mitola 等人首先於1991年提出軟體無線電(software-defined radio, SDR) [4]。SDR是一種執行在微處理器上，支援多種數位信號處理、無線傳輸介面、協定和可重新配置組態的一套技術。Mitola 更於1999年延伸了SDR而提出感知無線電概念，感知無線電擁有能依週遭環境狀況，自我重置並決定使用授權或非授權頻帶進行傳輸的智慧型無線電[5, 6]。

Mitola以感知循環(cognitive cycle) [7]來說明感知無線電的結構與過程，如圖2所示。首先，外界環境提供刺激(stimuli)。接者，觀察階段(Observe stage)先分析從外界環境得到的刺激，以辨識出目前環境的各項資訊。定位階段(Orient stage)則依據分析後所得的環境資訊來決定執行哪個事件程序，包含了立即(immediate)、緊急(urgent)及正常(normal)等三種事件。立即事件是指當偵測到外在因素的影響可能導致程序或動作停止時，如電池鬆動或卸除，則由定位階段直接進入行動階段來儲存重要資訊，使得下次開機時使用者還能保有其資訊。緊急事件則例如當在無線射頻網路中有突發的載波遺失時，會即刻進入緊急決策階段透過其它網路(如3G網路)來恢復其流量。

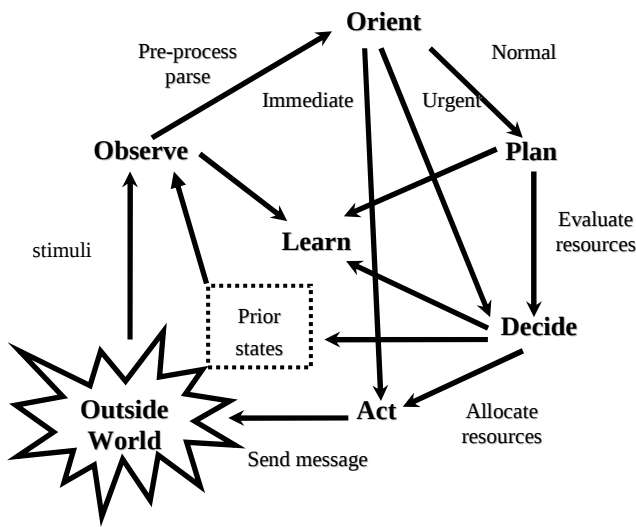


圖 2、感知循環[7]

其餘正常事件則依圖 2 中的 Plan-Decide-Act 流程。計劃階段(Plan stage)是在不干擾主要使用者的情況下，評估是否有資源可配置給感知使用者使用。決策階段(Decide stage)則是無線電資源的配置與計算，例如感知使用者的傳輸功率、頻率、執行時間及排程等參數。最後行動階段(Act stage)是在所排程的時間內，利用指定的資源來執行傳輸。另外，感知循環在學習(learn)部分包含了機器學習表格，用來記錄感知使用者各項經驗。

B. 感知無線電標準

FCC 重新審視頻譜管理，認為要解決頻譜不足的問題及提供使用者最佳服務品質，感知無線電的發展是一項重要的技術[8,9]。有鑑於此，美國先進國防研究計劃局(DARPA)提出 neXt Generation (xG) 計畫[10,11]，來實現動態頻譜存取[12]。此外，國際電機電子工程師協會(IEEE)亦陸續著手於感知無線電網路相關標準的制定及研究，主要有 IEEE 802.22 [13,14] 及 SCC-41 兩個標準[15]。

IEEE 802.22 標準：IEEE 802 委員會於 2004 年成立了 802.22 工作群組，稱為 WRAN (wireless regional area network)，是全球第一個基於感知無線電的無線標準，主要以電視頻帶做為運作環境。FCC 允許其它無線技術在不干擾電視頻譜廣播前提下，操作未使用的電視頻帶，充分利用閒置頻帶來實現高頻譜使用率。

SCC-41 標準：是以研發下一代無線寬頻網路的處理技術、方法及無線電頻譜資源管理辦法為發展目標，探討並制定一套跨網路間頻譜資源分享的相關概念及技術。SCC-41 目前包含六個工作群組及一個準群組：

- P1900.1：感知無線電相關詞彙的嚴謹定義和描述，例如感知無線電網路、策略無線電(policy-defined radio)、適應性無線電(adaptive radio)、軟體無線電等。
- P1900.2：分析運作於相同頻率或頻帶間無線系統可能的共存，干擾並提供技術指南。

- P1900.3：定義感知無線電通訊上所需的參數。
- P1900.4：制定感知無線電的系統架構，並最佳化異質性無線存取網路的資源使用[16]。
- P1900.5：定義感知無線電相關法規。
- P1900.6：相關無線感測的制定。
- Sensing technology：主要在建立頻譜感測介面。

C. 挑戰及相關研究

如同其它新興科技，感知無線電的發展過程中亦面臨許多的挑戰及必須解決的難題，以下分成三方面做說明。

頻譜偵測 (spectrum sensing) 方面：

主要在探討如何有效率的偵測週遭頻譜使用並發展適用於 CR 環境下的 MAC 設計及解決隱藏終端機問題等。Ganesan 等學者研究指出，藉由交換感知裝置間彼此資訊的合作式頻譜偵測，比個別偵測可以縮短 35% 的偵測時間並能降低隱藏終端的發生，提高感知系統靈活性[17]。在感知無線電 MAC 設計上，Lee 等學者提出一個調適性 MAC 協定[18]。調適性 MAC 協定藉由量測傳輸者 MAC 層的訊框錯誤率判斷出通道狀態。若通道狀態量測結果高於門檻值，則使用雙傳輸模式 (dual transmit mode) 讓兩條鏈路傳送不同資料來增加產出。若量測結果低於門檻值，則使用錯誤修復模式 (error recovery mode) 讓兩鏈路傳送相同資料來降低因錯誤而重傳的次數。

移動 (mobility) 方面：

當感知使用者移動或使用主要系統資源而主要使用者出現，必須歸還佔用頻帶並切換到其它閒置頻帶時皆必須考慮頻譜移交的議題，以便使用者能在服務不中斷情況下維持通訊暢通。Gozupek 等學者[19]提出一個以衛星輔助感知無線電網路的移交協定，利用衛星通訊範圍大的特性，以衛星做為頻譜分配及管理的配置者。當移動節點提出與另一個基地台的移交程序後，衛星會選擇其中一個候選通道當作移動節點初始使用，並在基地台的頻譜佔用表中，標注這個候選通道為"保留"及回傳移交預備回覆 (handover preparation response) 訊息，透過基地台告知移動節點下一個基地台通訊範圍的可用通道，並釋放移動節點於原本基地台的頻譜佔用。

頻譜管理 (spectrum management) 方面：

頻譜管理主要在研究資源配置及通訊服務品質(QoS)等議題。在頻譜資源配置上，主要有兩種配置架構：集中式控管 (centralized control) [19] 及分散式控管 (distributed control) [20]。

集中式控管：頻譜分配權掌握在某個裝置，通道的使用皆由配置者分配，如前述的衛星控管方式。頻譜配置者角色亦可由感知使用者擔任。

分散式控管：此種控管如同 802.11 的 DCF (distributed coordination function) 模式，以競爭方式來決定通道的使用者。

在通訊服務品質(QoS)方面，Inwhee 等學者提出一個支援 QoS 的動態頻譜配置 MAC 協定(DSA-MAC)[21]。在 DSA-MAC 協定中，當感知節點執行完週遭環境的頻譜偵測後，會定期交換包含頻譜狀態表的 ACK-hello 訊框，來提高感知節點間的頻譜分享。共有兩類 hello 訊息，一個是為了節點間彼此合作偵測來提高頻譜分享而定期交換；另一個是當資料通道上的資料傳輸完成時，由來源端和目的端所傳送的 ACK-hello 訊框，用來通知鄰居節點已完成所有傳輸，無後續資料要傳送並釋放原本所佔用的通道。

III. 差異化服務

在主要系統架構中，每個細胞(cell)皆以基地台做為頻譜資源管理的中控者。基地台採用分時多重存取(TDMA)排程存取方式且至少有一個以上控制通道用來週期性的廣播通道配置情形、頻率校正或同步等信號。假設感知使用者有能力監聽主要系統基地台所廣播的控制訊息，且主要系統中未使用的通道，皆可為感知使用者所使用。感知使用者可依據控制通道上的控制訊息做同步及初始化等設定，再依通道配置找出閒置通道來使用。次要系統方面，採用類似 802.11e 競爭機制的作法來區分使用者服務優先權及存取系統資源。

在[22]研究中將細胞內預計可用的頻譜數量以下列公式表示：

$$\sum_{i=1}^N [\prod_{k \in K_i(j)} P_i^{\text{off}}(k)] \quad (1)$$

其中 N 為所有頻譜數量的總合， $K_i(j)$ 表示在細胞 j 內頻譜 i 主要活動區域 (primary active region)， $P_i^{\text{off}}(k)$ 為在主要活動區域(k)中頻譜 i 閒置的機率。

由於語音服務具有時限性，而數據服務較不具時限性。因此，我們將欲傳送數據的感知使用者設為低優先權的使用者，而欲傳送語音的感知使用者設為高優先權使用者。感知使用者使用閒置通道前，需根據優先權設定一 BV (basic value) 值，並計算一段隨機等待的 WT 時間。當 WT 倒數結束再監聽通道是否閒置；若是，則可使用該閒置通道，否則不可使用。在 BV 的選擇上會因服務類型而不同，語音使用者由於優先權較高，因此選擇的 BV 值將會小於數據使用者的 BV 值，使得 WT 時間相對也較數據使用者短。由於服務類型的差異，不同服務間不會發生 WT 時間相同而產生碰撞問題。但同類型服務中，若因 WT 時間相同而發生碰撞時，則須在下個閒置通道重新競爭。

圖 3 為不同服務的 BV 值區間示意圖，以語音服務及數據服務分割成 Voice-BV 及 Data-BV 兩區間。其中，Voice-BV 為語音服務 BV 值的挑選區間，而 Data-BV 則為數據服務的挑選區間。圖 4 為主要系統的訊框(frame)結構及感知使用者使用通道的情形。一個訊框分為 8 個時槽 (time slot)。當時槽為閒置時，時槽前端再畫多個迷你時

槽(minislot)作為避免碰撞及服務區隔的隨機等待時間用。時槽後端則為感知使用者用來傳輸的資料時槽。圖中網狀部份為主要使用者佔用的時槽，分別為 Slot 0、2、3、7；其它為閒置時槽。Slot 1 是感知使用者通道使用情形。

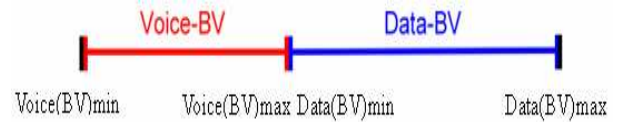
感知使用者傳輸前，須依照基地台廣播週期做同步監聽，來取得通道配置狀況並隨機選擇一個欲使用的閒置通道。在閒置時槽時間開始後，感知使用者等待一 WT 時間。由於高優先權使用者的 WT 時間短，能較早倒數結束而發送通道使用請求。當低優先權使用者倒數結束而進行通道狀態監聽時，會偵測到高優先權使用者的傳輸信號而無法使用通道，必須持續監聽基地台廣播找尋其它閒置通道。感知使用者使用主要系統資源可分為四個階段：

階段一：與主要系統基地台做同步，週期地監聽基地台廣播訊息以取得主要系統的通道(時槽)使用情形。

階段二：根據階段一取得之資訊隨機選擇一個閒置通道，並於閒置時槽開始後，等待具隨機性、優先性的 WT 時間。當 WT 倒數完若通道依然閒置則進入階段三；若此時通道為忙碌則回到階段一持續監聽基地台廣播。

階段三：感知使用者於閒置通道發送識別 ID、服務類型等資訊給基地台，提出通道使用請求。

階段四：若此通道於下個訊框仍無主要使用者要求使用，基地台暫時將此閒置通道配置給該感知使用者並廣播含感知使用者的通道配置資訊。新進感知使用者可藉由監聽此訊息得知其他感知使用者使用通道的情形。於階段三提出通道使用請求的感知使用者，可根據此階段的通道配置情形判斷出是否與其它感知使用者發生碰撞。



Voice-BV：為語音使用者選擇的BV區間
Data-BV：為數據使用者選擇的BV區間

圖 3、BV 值區間示意圖

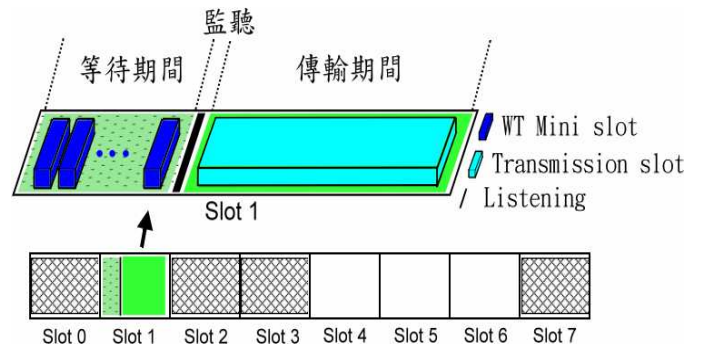


圖 4、訊框結構及感知使用者通道使用情形

圖 5 為感知使用者使用主要系統資源的過程。圖中的網狀部份為主要使用者使用的時槽。感知使用者藉由監聽基地台廣播得知閒置通道，並於閒置通道開始後等待隨機的 WT 時間來競爭通道。實心圓點為語音使用者 WT 倒數結束時間點，空心圓點為數據使用者 WT 倒數結束時間點。由於語音使用者 WT 時間短，能比數據使用者較早使用閒置通道。當數據使用者倒數結束時會偵測到語音使用者信號而無法使用通道。語音使用者此時會傳送通道使用請求給基地台要求通道使用，基地台收到請求後，若此通道於下個訊框仍無主要使用者要求使用，基地台暫時將閒置通道配置給該感知語音使用者並廣播含感知使用者的通道配置資訊。反之，若有主要使用者要求使用，基地台則配置閒置通道給主要使用者，感知使用者須在其它閒置通道重新競爭。

在 802.11 競爭機制中各種 IFS 時間，例如 SIFS、PIFS、DIFS 等皆是固定的等待時間。在感知系統中監聽完基地台控制通道後，未必僅有一個感知使用者欲使用閒置通道。因此閒置通道開始後立即傳輸或等待固定時間後再傳輸皆會造成碰撞，而本研究所提的方法是根據不同服務等級設定的 BV 值計算一隨機等待時間來避免碰撞。使用者使用通道前的等待時間為：

$$WT = \text{Random}(BV) * aSlotTime \quad (2)$$

若發生碰撞則於下個閒置通道重新競爭。舉例說明不同服務等級的等待時間：語音使用者先從範圍為 0 至 7 的 Voice-BV 區間內隨機選擇一個 BV 值，若選擇的 BV 值為 4，計算後的語音使用者等待時間為 32 微秒（假設 aSlotTime 為 8 微秒）。而數據使用者將從範圍為 8 至 31 的 Data-BV 區間內隨機選擇一個 BV 值，若選擇的 BV 值為 20，計算後的數據使用者等待時間為 160 微秒。

802.11e 競爭機制會因服務類型不同而有不同競爭視窗 (contention window, CW) 大小，但視窗大小仍有重疊部份。高優先權服務，如 AC_VO 雖然能以很高的機率搶得通道，仍有被搶奪機率，而本研究所提出的 BV 方法採

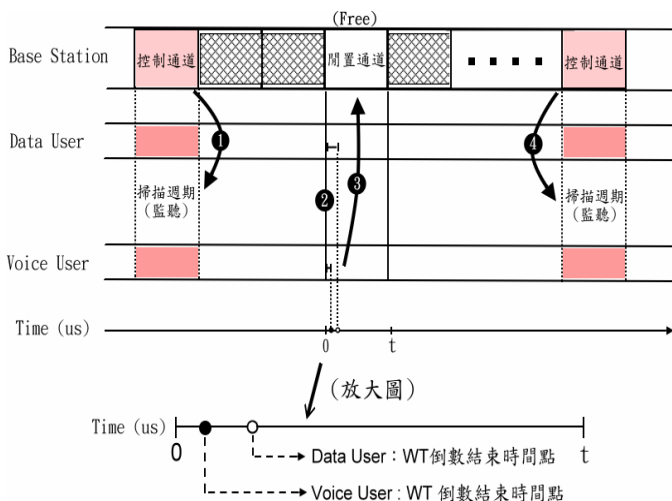


圖 5、感知使用者使用主要系統資源的四個階段

用非重疊方式來確保高優先權使用者的通道使用權。下列以相同參數舉例說明重疊及非重疊作法：

重疊作法：

$$AC_VO \text{ CW}(3) \Rightarrow 0 \sim 3 \text{ 隨機選一個 CW 值}$$

$$AC_BK \text{ CW}(15) \Rightarrow 0 \sim 15 \text{ 隨機選一個 CW 值}$$

非重疊作法：

$$\text{Voice-BV}(0 \sim 3) \Rightarrow 0 \sim 3 \text{ 隨機選一個 BV 值}$$

$$\text{Data-BV}(4 \sim 15) \Rightarrow 4 \sim 15 \text{ 隨機選一個 BV 值}$$

在競爭機制中 CW 括弧內的值表示 CW 的最大值，CW 的最小值為 0。因此，若 AC_VO 的 CW 值為 3，即表示在 0 至 3 間隨機選擇一個值。而 AC_BK 的 CW 值為 15，表示從 0 至 15 間隨機選擇一個值。兩者範圍在 0 至 3 間為重疊部份，故稱為重疊作法。BV 方式括弧內的值為 BV 區間範圍的最小及最大值。若 Voice-BV 的區間範圍為 0~3，即表示在 0 至 3 間隨機選擇一個值。若 Data-BV 的區間範圍為 4~15，即表示在 4 至 15 間隨機選擇一個值。兩者範圍沒有重疊部份，故稱為非重疊作法。競爭機制中當資料傳送完後，使用者會先等待一個 AIFS (arbitration inter frame space) 時間，高優先權服務與低優先權服務會有不同的 AIFS 時間，然後再根據 CW 值隨機挑選一個數值進行倒數，即等待時間為 AIFS + Random(CW) * aSlotTime。若發生碰撞，則發生碰撞的使用者下次競爭時 CW size 會加倍。

在研究中修改了 802.11e 競爭機制部份作法來與本研究提出的 BV 方法作產出、取得通道率等方面的比較。修改 802.11e 的部份為，若傳輸發生碰撞則將 CW size 倍增，倍增後的 CW size 即到達 CW size 的最大值而不再倍增。換言之，無論服務優先權高低，CW size 最大值都為初始值兩倍。此外，在使用者退讓(backoff)時間倒數過程中，若偵測到其它使用者正在傳輸，不會凍結退讓時間，而在下次競爭時重新選擇 CW 值，開始新的退讓程序。修改 802.11e 競爭機制的原由，在於感知無線電環境下，感知使用者必須根據主要系統特性作適當調整，才能在不干擾主要使用者前提下來使用系統資源。通常 TDMA 系統的一個時槽長度為數百微秒，而 802.11e 競爭機制中低優先權服務(AC_BK) 的 CW 最大值為 1023。若以最大 CW 值計算後的等待時間，將遠超過主要系統的時槽長度。因此競爭機制必須考量主要系統時槽長度及感知使用者的通道使用請求訊框大小來做適當調整。所以在論文中競爭機制的高優先權及低優先權服務等待時間分別設定如下：

高優先權服務：

$$\text{AIFS}(2 * aSlotTime + \text{SIFS}) + \text{Random}(\text{CW}) * aSlotTime \quad (3)$$

低優先權服務：

$$\text{AIFS}(7 * aSlotTime + \text{SIFS}) + \text{Random}(\text{CW}) * aSlotTime \quad (4)$$

其中 AIFS 是依照 802.11e 對 AC_VO 及 AC_BK 兩類服務所定義的 AIFS 時間[23]。

IV. 模擬與效能分析

我們以非重疊 BV 方式與競爭機制實驗哪種方式較能讓語音使用者以較少競爭次數來存取通道，並探討兩種方式在不同使用者數量下，對語音使用者存取通道率、產出及數據使用者產出的影響，最後則模擬成功傳輸時平均的等待時間。實驗的相關參數如表 1。

感知使用者在存取通道時每多一次競爭，即表示浪費一次閒置通道的存取。因此，確保高優先權服務能夠以最少競爭次數來存取通道，亦是研究中須考慮的問題。圖 6 為 BV 方式與競爭機制在不同語音使用者數量下的通道存取率。主要探討兩種機制在不同語音使用者數量下，對語音使用者通道存取率之影響。實驗結果顯示，當大於一個語音使用者時，採用 BV 方式的語音使用者於第一次競爭即可存取通道的機率皆高於競爭機制，且因為 BV 方式區間較大，能延緩因語音使用者數量增加而導致存取機率下降。例如，當語音使用者數量為 5 個時，BV 方式第一次競爭就能存取通道的機率約為 70%，而競爭機制在第一次競爭就能存取通道的機率只有約 50%。

圖 7 為語音使用者的通道競爭及成功次數分佈圖。此模擬的目的，在於了解採用不同作法的語音使用者需多少次競爭才能成功存取通道的次數分佈。圖中 X 軸為語音使用者在第一次競爭、第二次競爭及三次(含以上)競爭的次數。Y 軸為語音使用者成功存取通道的次數。實驗中，我們以 1000 次成功存取通道為上限值。由圖可以看出語音使用者採用 BV 方式，在第一次競爭就能存取通道的有 872 次，第二次競爭才能存取通道的有 116 次，而須競爭三次以上才能存取通道的僅有 12 次。因此，採用 BV 方式能讓高優先權服務以較少的競爭次數來存取通道。競爭次數越少，相對的產出就會越高。

圖 8 為在 20 個數據使用者環境下 BV 方式與競爭機制在不同語音使用者數量下的語音使用者產出圖。從圖中可以看出，在任何語音使用者數量下，BV 方式的產出皆高於競爭機制。造成產出差異的主要因素是來自於競爭機

制的 AIFS 時間。當語音使用者數量為一個時，競爭機制受 AIFS 時間的影響，平均等待時間高於 BV 方式，所以產出較低。隨著語音使用者數量增加，碰撞機率相對提高，促使競爭機制加大 CW size 來避免碰撞的次數增加，導致使用者的等待時間也隨著 CW size 加大而提高。

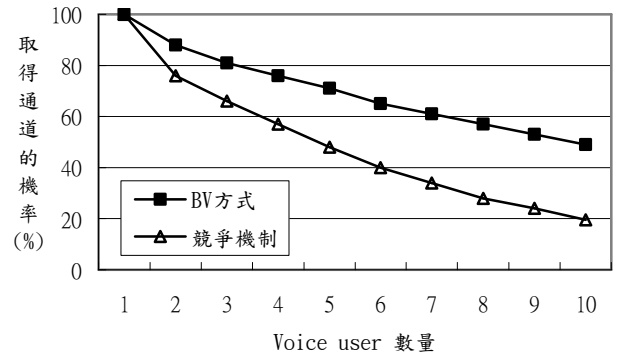


圖 6、不同語音使用者數量下通道存取率

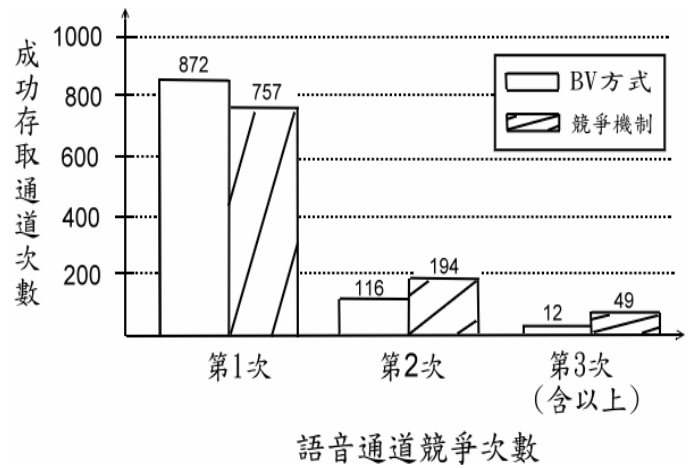


圖 7、語音使用者通道競爭及成功次數

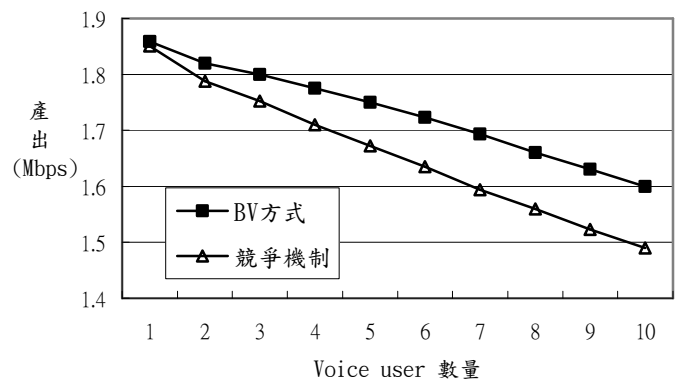


圖 8、語音使用者產出

表 1、模擬參數表

參數	值
Voice user 數量	0 ~ 10
Data user 數量	0 ~ 35
aSlotTime	8 us
aSIFSTime	16 us
傳輸率	10M bps
通道數	32
閒置通道數	6
競爭機制 Voice CW size	3~7
競爭機制 Data CW size	15~31
重疊 Voice- BV size	7
重疊 Data- BV size	31

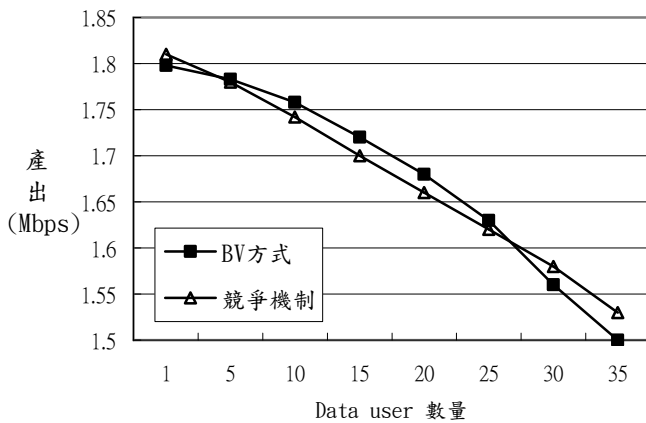


圖 9、數據使用者產出

圖 9 為在無語音使用者情形下 BV 方式與競爭機制在不同數據使用者數量下的產出比較圖。由圖可知，當數據使用者數目少(小於 4 個)時，由於競爭機制使用者的 CW size 初始值加上 AIFS 時間後的平均等待時間，低於 BV 方式的等待時間，因此競爭機制有較高的產出。隨著數據使用者數目增加，碰撞機率提高，加大了 CW size，使得競爭機制使用者的等待時間高於 BV 方式的使用者等待時間，因此 BV 方式的產出高於競爭機制。當數據使用者數目再增加(超過 26 個)，因為 BV 方式數據使用者的 Data-BV 區間範圍小於競爭機制 CW size 最大值的區間範圍，BV 方式受使用者數量影響加劇，產出開始大幅下降。

V. 結論

隨著無線技術與服務的蓬勃發展，致使頻譜資源日趨匱乏而不敷使用。雖然無線頻譜資源有限但導致資源不敷使用的主要因為靜態式頻譜管理政策。然而，現今頻譜規章不允許將未充分利用的授權頻帶分享給非授權使用者使用。

感知無線電的頻譜分享概念被認為是能改善頻譜使用效率的可行方法。但相關研究上，鮮少探討服務間的差異化議題。因此，本研究將流量區分語音及數據兩服務，探討感知無線電網路中不同服務間使用資源的差異。

研究中，我們根據不同服務計算出隨機等待時間，來區分服務類型及避免使用者同時使用通道的碰撞問題。藉由基地台定期廣播資訊讓感知使用者得知通道請求訊號是否發生碰撞。研究結果顯示，採用 BV 方式能確保高優先權服務在使用系統資源上的優先性。此外，BV 方式亦能比競爭機制有更高的通道存取率及產出。未來研究將在加入影像服務的多媒體環境下，根據流量負載計算 BV 區間的最適比例。

參考文獻

- [1] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A Survey of Dynamic Spectrum Access," IEEE Signal Processing Magazines, vol. 24, no. 3, pp.79-89, May 2007.
- [2] P. Kolodzy, "Spectrum Policy Task Force Report," ET Docket No.02-135, November 2002.
- [3] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks Requirements, Challenges and Design Trade-offs," IEEE Communications Magazines, vol. 46, no. 4, pp. 32 - 39, April 2008.
- [4] J. Mitola, "Software Radios: Wireless Architecture for the 21st Century," New York: Wiley, 2000.
- [5] E. M. Noam, "Taking the Next Step beyond Spectrum Auctions: Open Spectrum Access," IEEE Communications Magazines, vol. 33, no. 12, pp. 66-73, December 1995.
- [6] F. C. Commission, "Notice of Proposed Rule Making and Order," Rep. ET Docket no. 03-108, December 2003.
- [7] J. Mitola and G. Q. Maquire, "Cognitive Radios: Making Software Radios more Personal," IEEE Personal Communications, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, August 1999.
- [8] J. Mitola, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio," PhD Dissertation, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [9] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications," IEEE JSAC, vol. 23, no. 2, February 2005.
- [10] DARPA XG WG, The XG Architectural Framework V1.0, 2003.
- [11] DARPA XG WG, The XG Vision RFC V1.0, 2003.
- [12] N. Maziari, "Dynamic Spectrum Access with Cognitive Radios: Future Architectures and Research Challenges," in Proc. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications 2006. 1st International Conference, Mykonos, Greece, pp. 1-5, June 2006.
- [13] IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks, <http://www.ieee802.org/22/>.
- [14] C. Stevenson et. al., "IEEE 802.22: The First Cognitive Radio Wireless Regional Area Network Standard," IEEE Communications Magazines, vol. 47, no. 1, pp. 130-138, January 2009.
- [15] M. Sherman et. al., "IEEE Standards Supporting Cognitive Radio and Networks, Dynamic Spectrum Access, and Coexistence," IEEE Communications Magazines, vol. 46, no. 7, pp. 72-79, July 2008.
- [16] S. Buljore et. al., "IEEE P1900.4 System Overview on Architecture and Enablers for Optimised Radio and Spectrum Resource Usage," in Proc. IEEE DySPAN, Chicago, Illinois, pp. 1-8, October 2008.
- [17] G. Ganesan and Y. G. Li, "Agility Improvement Through Cooperative Diversity in Cognitive Radio," in Proc. IEEE GLOBECOM 2005, St. Louis, Missouri, vol. 5, pp. 2505- 2509, December 2005.
- [18] B. Lee and S. H. Rhee, "Adaptive MAC Protocol for Throughput Enhancement in Cognitive Radio Networks," in Proc IEEE ICOIN, Busan, Korea, pp. 1 - 5, January 2008.
- [19] D. Gozupek, S. Bayhan, and F. Alagoz, "A Novel Handover Protocol to Prevent Hidden Node Problem in Satellite Assisted Cognitive Radio Networks," in Proc. ISWPC, Santorini, Greece, pp. 693-696, May 2008.
- [20] A. Gunther, H. Harald, and O. Peter, "Interference Aware Medium Access for Dynamic Spectrum Sharing," in Proc. DySPAN, Dublin, Ireland, pp. 399-402, April 2007.
- [21] J. Inwhee and S. Seonbong, "Dynamic Spectrum Allocation MAC Protocol based on Cognitive Radio for QoS Support," in Proc. IEEE FCST., Nagasaki, Japan, pp. 24-29, December 2008.
- [22] W. Y. Lee and I. F. Akyildiz, "Joint Spectrum and Power Allocation for Inter-Cell Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks," in Proc. IEEE DySPAN, Chicago, Illinois, pp. 1-12, October 2008.
- [23] IEEE 802.11 WG, IEEE 802.11e/D8.0, "Draft Amendment to Standard for Telecommunications and Information Exchange between Systems - LAN/MAN Specific Requirements- Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements," February 2004.