

# 多重輸入多重輸出無線感知隨意網路之分散式多重通道媒介存取協定

## Distributed Multi-channel MAC Protocol in MIMO Cognitive Radio Ad Hoc Networks

吳建民 南華大學資訊工程系副教授

### 摘 要

多重輸入多重輸出(Multi-input Multi-output, MIMO)和感知無線(Cognitive Radio, CR)都能夠很有效率的克服無線傳輸所產生的干擾問題，並提升無線網路系統輸出量。多重輸入多重輸出是在同一個頻譜通道的媒介競爭期間透過多重空間多工的方式來避免節點間的碰撞。而感知無線則是利用所有空閒無線頻譜來進行資料傳輸，亦即利用跨通道的特性來消除干擾。本論文中，將利用感知無線網路(Cognitive Radio Networks, CRNs)獲得空閒無線頻譜結合MIMO空間多工的技術，去克服隱藏節點及暴露節點的問題，提出一個多重輸入多重輸出無線感知隨意網路之分散式多重通道媒介存取協定(Distributed Multi-channel MAC Protocol in MIMO Cognitive Radio Ad Hoc Networks)，在此稱為DMMAC。本論文將透過次要使用者(Secondary Users, SU)傳送端與SU接收端傳輸資料之前控制訊框間的交換，紀錄控制訊框的傳送與接收時間，達到非同步時間的距離估測來估測SU傳送端與SU接收端的距離。接著再利用確定性傳遞模式計算SU傳送端到SU接收端的傳輸功率，進而調整SU傳送端的傳輸功率，同時解決PU(Primary Users, PU)、SU干擾的問題。

**關鍵詞：**多重輸入多重輸出、感知無線、感知無線網路

Chien-Min Wu, Associate Professor, Depart. of Computer Science and Information Engineering, Nan Hua University

### **Abstract**

Multi-input and multi-output (MIMO) and cognitive radio (CR), can both effectively overcome the transmission interference among links and thus improve the network throughput. MIMO exploits the multiple spatial channels during the medium contention period to avoid medium access collision within the same frequency channel, while CR utilizes all available frequency channels for transmissions. In this paper, we will propose a Distributed Multi-channel MAC Protocol in MIMO Cognitive Radio Ad Hoc Networks, named DMMAC. This protocol will exploit CR to get idle channel and utilize multiplexing of MIMO to get spatial channel and then to combat the hidden terminal problem and exposed terminal problem. In addition, SU sender adjusts the transmit power to decrease interference and save energy by the asynchronous distance estimation technology. This asynchronous distance estimation technology estimates the distance of SU sender and SU receiver by recording the departure time and the arrival time of control messages. This protocol uses the deterministic propagation model to obtain the power of SU sender and then adjusts the SU sender transmit power to solve the interference of PUs and SUs.

**Keywords:** Multi-input Multi-output (MIMO), Cognitive Radio (CR), Cognitive Radio Networks (CRNs)

## 一、前言

感知無線的主要概念是利用無線頻譜上的感知(Sensing)與存取(Access)，主要使用者(Primary Users, PUs)表示經過授權合法使用頻譜的使用者；次要使用者(Secondary Users, SUs)表示一般使用者，且沒有擁有授權合法使用頻譜的使用者。當主要使用者(Primary Users, PUs)的授權頻譜(Licensed Spectrum)空閒時，次要使用者(Secondary Users, SUs)尋找適當的頻譜機會(Spectrum Opportunity)，在不干擾PUs及不與其他SUs互相干擾的情況下，暫時使用此授權頻譜完成通訊的目的，使得整個無線資源的利用率達到最佳化的技術，這個概念被認為是下一代網路(NeXt Generation (xG) Networks)的新技術，也被稱為動態頻譜存取 (Dynamic Spectrum Access)和感知無線網路(Cognitive Radio Networks, CRNs) [1~4]。

在無線感知隨意網路(Cognitive Radio Ad Hoc Networks)中，頻譜會被切割為幾個通道(Channel)，當PUs不使用通道時，或當不會對PUs產生干擾下，SUs如果可以使用PUs的授權通道，對於系統頻譜使用效率的提升將有很大的幫助。然而無線網路中，通道容易受到衰減或干擾，且有節點移動、隱藏節點和暴露節點等問題。且在CRNs環境下的媒介存取協定必須克服兩個碰撞問題：一個是SUs之間的碰撞；另一個是PUs與SUs之間的碰撞。

在[5~17]中作者提出一些在感知無線網路的MAC(Medium Access Control)協定，在這些MAC協定中，因存取模式(access mode)的不同考量，有的SUs採免競爭式(Contention free)的時槽式(time slotted)設計，而時槽式的最大問題是系統要如何同步。有些則採取競爭式(Contention-based)的隨機存取MAC協定，這種協定不需要系統同步，而是SUs利用IEEE 802.11 DCF的CSMA/CA(Carrier sense multiple access / collision avoidance)的機制或是其改良版來克服碰撞的問題。另一種則是混合式的

MAC協定設計，這種協定主要是控制通道採取時槽式，而資料通道採取隨機存取式的MAC協定。雖然這些MAC協定都能改善感知無線網路的系統效能，但是仍然無法顯著的提升感知無線網路系統輸出量。其中最大的問題在於這些MAC協定都是運作在單一輸入單一輸出(Single-input and Single-output, SISO)的系統架構。

在SISO的無線網路系統中，每一個無線網路使用者都只有一個天線，因此當一對無線網路使用者取得一個通道之後，在有限的無線頻寬限制下，所能提供的系統輸出量也是有限的。當系統資料流量增加時，系統將因無線通訊設備單一天線的關係，僅能透過一對天線來進行資料傳輸，對系統輸出量的提升也將受到限制。這也說明單一天線面對需要處理大量資料流時，並無法滿足系統的需求。因此隨著無線通訊設備的日益普及，無線網路資料型式也包含了網頁、聲音、影像、網路電話及檔案傳輸等需要高頻寬的傳輸媒介，因此如何在有限的無線頻寬來增加系統輸出量就變成一項很重要的課題。如果一對無線通訊設備能有多對無線天線，在沒有干擾的情況之下，在理論上便有可能將無線網路系統輸出量以倍數成長。而多重輸入多重輸出(Multiple-input and multiple-output, MIMO)就是指具有多對無線天線的通訊設備在互不相干擾的情況下同時進行資料傳輸，MIMO就像是多個獨立的SISO一樣，且每個獨立的SISO都可進行單一資料流。

[18]中作者提出一個群組式無線感測網路(Clustered wireless sensor network)中多重通道協同合作(Multichannel Cooperative)MIMO的MAC協定，稱為MCCMIMO。為了避免干擾問題的產生，不同的群組使用不同的通道。此MAC協定屬於TDMA(Time Division Multiple Access)機制，將時間分割為多個固定大小的訊框間隔。

[19]中作者提出一個無線網路具有多重天線以消除干擾的MAC協定設計(Mitigating

Interference using Multiple Antenna MAC, MIMA-MAC)。在 MIMA-MAC 協定中，假設每個節點都必須同步，利用 MIMO 空間多工的功能來消除相同通道內(within a channel)鄰居節點的干擾，讓競爭區域內的節點能同時進行資料傳輸。這個協定將時間分割成很多個固定大小的訊框間隔，每個訊框間隔包含溝通階段(negotiation period)和免競爭階段(contention-free period)兩個階段。在溝通階段中，每個要進行資料傳輸的節點必須和鄰居節點進行競爭來取得通道；在免競爭階段中，取得通道的節點即可進行資料傳輸。此協定僅適用於一般無線網路中並無法適用於 CRNs。

[20]中作者提出一個 IEEE 802.11 DCF 的 CSMA/CA 機制的改良版，RTS/CTS 控制訊框改為 MIMO-RTS 和 MIMO-CTS 來進行通道取得前的節點間溝通，MIMO-RTS 增加一個要取得的天線位圖(Proposed Antenna Bitmap, PAB)，MIMO-CTS 增加一個確認的天線位圖(Confirmed Antenna Bitmap, CAB)；ACK 控制訊框改為 MIMO-ACK，MIMO-ACK 增加一個確認封包位圖(Acknowledged Packet Bitmap, APB)，這些位圖將用來決定使用天線的個數。

IEEE 802.11n已經把MIMO的機制加入，但到2014年才正式發行。IEEE 802.11e是802.11的加強版，主要針對品質服務(Quality of Service)的功能作改善。[21]作者提出一個在IEEE 802.11e 為基礎加入 MIMO 功能的 MIMO-based EDCF(M-EDCF) MAC協定，利用共享空間通道(Spatial channels)來消除干擾。想要進行資料傳輸的節點只利用部分的空間通道，當目前進行資料傳輸的空間通道數量不大於空間自由度(Spatial degree of freedom)，接收端就能夠解碼不同傳輸節點的訊號，並進行協調以避免碰撞。空間通道也可用來偵測傳輸媒介是否有其他傳送節點正進行資料傳輸以讓自己保持安靜。

一個蜂巢式多重通道感知無線網路(Cellular Multichannel CRNs)的動態共同控制通道MAC協定

被提出來[22]，作者證明藉由蜂巢式基地台來安排SU節點的資料存取能消除多重通道隱藏節點問題；此方法並藉由SU節點之間的合作互相交換訊息來偵測PU隱藏節點問題來獲得PU空閒通道。並經由交換訊息獲得參與競爭的SU節點數來計算所需MAC競爭之下的最少時槽個數。

感知無線網路(CRNs)是利用無線頻譜空閒階段來進行資料傳輸，屬於不同頻譜之間的利用，即利用跨通道(across channels)的特性來消除干擾；而多重輸入多重輸出(MIMO)則是利用多對無線天線在同一個頻譜經由空間時間(space-time)的處理來進行多重資料傳輸，即在一個通道內(within channel)利用MIMO的特性來消除干擾，因此兩者對系統效能的提升都有很大的助益。CRNs和MIMO本來是兩個獨立的議題，但是如果利用CRNs獲得空閒無線頻譜(Idle spectrum band)，結合MIMO空間多工(Spatial multiplexing)的技術，將能顯著的提升無線網路系統效能，也將能解決無線網路頻寬不足的問題[23]。[23~24]作者提出一個最佳化的數學模式來證明CRNs和MIMO結合將比系統只有CRNs或只有MIMO更有效率。

為了達到 CRNs 和 MIMO 結合所帶來的助益，除了實體層每個無線通訊設備必須具有多對天線以進行 MIMO 的要求之外，媒介存取層也必須要能夠配合才能達成無線感知網路 MIMO 的功能。因此本論文即在提出一個多重輸入多重輸出無線感知隨意網路之分散式多重通道媒介存取協定(Distributed Multi-channel MAC Protocol in MIMO Cognitive Radio Ad Hoc Networks)，在此稱為 DMMAC。

本論文主要貢獻為估測傳送端與接收端的距離進而調整傳送端傳輸功率，降低對 PU 及 SU 的干擾，進而提升系統效。接下來證明 MIMO 因可同時進行多重資料傳輸，其系統效能遠比 SISO 好。

本論文多重輸入多重輸出無線感知隨意網路之分散式多重通道媒介存取協定包含三項議題，第

一：在多重通道運作下，達到不干擾 PU 並解決 PUs、SUs 隱藏節點及暴露節點的問題以提升系統輸出量；第二：透過 MIMO 空間通道的充分利用，降低干擾問題提升系統輸出量，並降低系統能量消耗；第三：透過 SU 傳送端與 SU 接收端傳輸資料之前控制訊框間的交換，紀錄控制訊框的傳送與接收時間，利用非同步時間(Asynchronous Clocks)的距離估測(Distance Estimation)[25]來估測 SU 傳送端與 SU 接收端的距離。接著再利用確定性傳遞模式[26]計算 SU 傳送端到 SU 接收端的傳輸功率，進而調整 SU 傳送端的傳輸功率，同時解決 PUs、SUs 干擾的問題。非同步時間(Asynchronous Clocks)的距離估測主要目的在估測傳送端與接收端的距離進而減少對 PU 及 SU 隱藏式節點及暴露節點的干擾。估測出傳送端與接收端的距離之後，接下來要即可經由確定性傳遞模式估測出傳輸功率，傳送端便依此估測傳輸功率對接收端傳送資料。

接下來透過模擬分析，將本研究方法的 MIMO 與 SISO 比較，探討兩者在通道重複使用率、正規化系統輸出量及 PU 被干擾的機率。

本論文其餘章節安排如下，第二章將介紹分散式多重通道媒介存取協定。第三章說明本論文所提出來的多重輸入多重輸出之分散式多重通道媒介存取協定，第四章介紹模擬環境與結果分析，第五章提出結論。

## 二、分散式多重通道媒介存取協定

在本論文中，藉由非同步時間(Asynchronous Clocks)的距離估測(Distance Estimation)估測 SU 傳送端與接收端 SU 距離，確定估測傳輸範圍，再利用確定性傳遞模式估算 SU 傳送端的傳輸功率，解決 PU、SU 干擾的問題。並藉由 SUs 節點增加天線數，提出解決多重通道隱藏節點與暴露節點問題的 MIMO 無線感知隨意網路之媒介存取協定。

在無線感知隨意網路中，時間分割為許多時間

間隔，每一個時間間隔有兩個相位(圖 1)。第一相位稱為感測時槽視窗(Sensing minislot window)，此相位目的在避免與 PU 節點正在使用通道的干擾。每一個 SU 節點維護一個 Beacon 記錄表，此表記錄此 SU 節點發出 Beacon 訊框之成功機率。當此 SU 節點發出 Beacon 訊框發生碰撞時，便進入 Beacon 訊框之倒退機制，在 Beacon 訊框之倒退機制中將把 Beacon 訊框之成功機率列入競爭視窗中。

每一個 SU 節點維護一個鄰居節點表，此表記錄 SU 節點的鄰居節點 PUs、SUs。SU 節點也維護一個通道狀態記錄表，而此表將記錄此 SU 節點在鄰近 PU 節點借用通道的成功機率歷史記錄，成功機率愈高的其優先順序越高；成功機率愈低的其優先順序越低。SU 要進行資料傳送前，將依據通道狀態記錄表通道的優先順序來感測通道，以決定可使用的通道，在此相位中，SUs 並不對每一個通道皆進行感測，而是設定一個成功機率臨界值，當一個通道的成功機率小於成功機率臨界值時，節點並不轉換通道，亦即不進行此通道的感測，以降低能量的消耗。但當所有通道成功機率均小於臨界值時，節點將對每一個通道重新進行感測。每一個 SU 節點也將自主的動態調整成功機率臨界值。

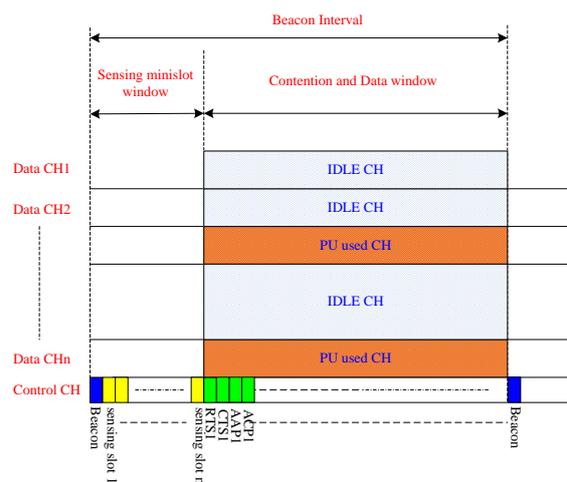


圖 1 多重輸入多重輸出無線感知隨意網路之分散式多重通道媒介存取協定(DMMAC)。

第二相位稱為競爭及資料視窗(Contention and

Data window)。在第一相位中，SU 節點只能盡量避開對 PU 節點的干擾，但並不能完全避開對 PU 節點的干擾。在此相位中將針對無線感知隨意網路中多重通道隱藏節點 PU 與暴露節點 PU 問題，提出解決機制。

在無線感知隨意網路的環境中，資料傳輸屬於多重跳躍，亦即會有 two-hop 碰撞區域內隱藏節點 PU、SU 與暴露節點 SU 的問題，因此必須再透過第二相位的運作，才能同時克服 two-hop 碰撞區域內隱藏節點 PU、SU 與暴露節點 SU 的問題。

在此相位中，要進行資料通訊的 SU 傳送端依據第一相位所挑選的通道，進行 two-hop 碰撞區域內相鄰節點的通道確認。在此相位中包含下列三項功能：

- 第一：RTS 訊框記錄 RTS 訊框的傳送時間及剩餘可使用天線數；CTS 訊框記錄 CTS 訊框的傳送時間、RTS 訊框的接收時間及剩餘可使用天線數。AAP 訊框記錄 AAP 訊框的傳送時間、CTS 訊框的接收時間及剩餘可使用天線數；ACP 訊框記錄 AAP 訊框的接收時間及剩餘可使用天線數。SU 傳送端估測與 SU 接收端的距離，透過非同步時間距離估測，調整傳輸功率以降低對隱藏節點 PU 的干擾。
- 第二：在 PU 節點傳輸範圍內的 SU 節點對已進行資料傳輸的鄰近 SU 節點，在控制通道傳送一個最高優先權的中斷訊框給鄰近 SU 節點，以消除鄰近 SU 節點對隱藏節點 PU 節點的干擾。
- 第三：在此相位中增加一個通道確認訊框 AAP 以解決暴露節點 PU 問題。

在圖 2 中，顯示本論文於多重輸入多重輸出無線感知隨意網路中所提分散式多重通道媒介存取協定，解決多重通道隱藏節點 PU、SU 與暴露節點 PU、SU 問題的媒介存取協定的控制通道。每個參與無線感知隨意網路的 SUs 均必須依照下列兩個

相位進行通道感測、通道競爭、距離估測及傳輸功率調整、通道取得及通道釋放等幾個步驟。在無線感知隨意網路中的 SU 節點透過非同步時間距離估測法進行 SU 節點間距離估測和競爭控制調整傳輸功率，以避免干擾到 PU 節點的運作。為了更切合實際情況，PU 並不參與整個媒介存取協定的運作，每一個控制訊框將以最大可允許的傳輸功率進行。以下針對控制通道的改良加以說明：

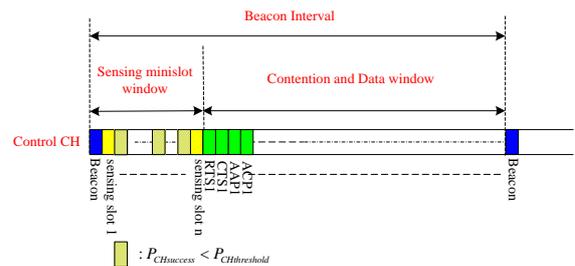


圖 2 多重輸入多重輸出無線感知隨意網路之分散式多重通道媒介存取協定(DMMAC)。

### (一)第一相位之感測時槽視窗(Sensing minislot window)

第一相位之前，使用 IEEE 802.11 之計時同步功能(Timer Synchronization Function, TSF)進行同步，每個節點傳送自己的 Beacon 訊框，此 Beacon 訊框攜帶自己在控制通道的區域時間(Local time)，如果感知無線節點收到比自己還要快的 Beacon 訊框時間，就更新自己的時間，並把自己的 Beacon 訊框丟掉。當 SU 節點所發出 Beacon 訊框發生碰撞時，便進入 Beacon 訊框之倒退機制，在 Beacon 訊框之倒退機制中，將把 Beacon 記錄表中 Beacon 訊框之成功機率列入倒退計時之競爭視窗(Backoff contention window)中。

### (二)第二相位之競爭及資料視窗(Contention and Data window)

此相位有 RTS(Request to send)、CTS(Clear to send)、AAP(Antenna assignment phase)和 ACP(Antenna confirm phase)，及資料(Data)、回覆(ACK)訊框。每個 SU 節點要進行通道取得必須完

成 RTS/CTS/AAP/ACP 訊框交換。因碰撞未能完成競爭通道步驟，必須等到下一個週期，才可進行通道競爭。完成 RTS/CTS/AAP/ACP，並順利取得通道的 SUs 節點，即可進行資料傳輸。接下來將針對各個通道控制訊框進行說明：

**RTS**：SU 傳送端對 SU 接收端提出資料傳送所需通道的要求，在此訊框當中。SU 傳送端將 RTS 訊框的傳送時間、通道狀態記錄表中最多三個成功機率最佳的通道及 SU 傳送端剩餘可使用天線數送給 SU 接收端。

**CTS**：SU 接收端接收到 SU 傳送端所提供的通道中，從自己的通道狀態記錄表，挑選一個最適合的通道給 SU 傳送端。SU 接收端將 CTS 訊框的傳送時間、RTS 訊框的接收時間及 SU 接收端剩餘可使用天線數放在 CTS 中。

**AAP**：SU 傳送端回傳給 SU 接收端 AAP 訊框的傳送時間、CTS 訊框的接收時間及 SU 傳送端剩餘可使用天線數。

**ACP**：SU 接收端回傳給 SU 傳送端 ACP 訊框的傳送時間、AAP 訊框的接收時間及 SU 接收端剩餘可使用天線數。

**DATA 及 ACK**：每一對 SUs 傳送與接收節點，透過競爭機制成功取得通道，便可進行資料傳輸，SUs 接收節點在完成資料接收後，回傳 ACK 給 SUs 傳送節點。如 SUs 傳送與接收節點要進行更多資料傳送必須回到下一個 Beacon 間隔時間，再次透過兩個相位的通道感測、通道競爭、距離及傳送功率估測、通道取得及通道釋放等步驟。此目的在避免 SUs 佔用 PUs 通道太長時間。

**INT**：當 PU 節點傳輸範圍內的 SU 節點感測到 PU 節點啟動之後，則此 SU 節點將對已經進行資料傳輸的 one-hop 鄰居 SU 節點透過控制通道傳送一個最高優先權的中斷訊框，要求此 SU 節點中斷資料傳輸，以降低鄰近 SU 節點對隱藏節點 PU 節點的干擾。INT 中斷訊框

為所有控制訊框中優先權最高之控制訊框。可在控制通道隨時發出。

### 三、多重輸入多重輸出之分散式多重通道媒介存取協定

為了達成以上目標，本論文將修改 IEEE 802.11 中 RTS/CTS 協定與訊框格式，而節點也必須維護一個通道狀態記錄表、一個 Beacon 記錄表及一個鄰居節點表。在整個多重輸入多重輸出無線感知隨意網路中，透過非同步時間距離估測法來估測 SU 節點間的距離，進而調整 SU 傳送端的傳輸功率以調整傳輸範圍。並利用多對天線 MIMO 的功能，來克服多重輸入多重輸出無線感知隨意網路多重通道隱藏節點及暴露節點問題，當隱藏節點問題能夠解決之後，將能降低節點能量消耗及提升系統輸出量；而克服多重通道暴露節點問題，更能提升系統輸出量。

#### (一) Beacon 記錄表

每一個 SU 節點必須維護一個 Beacon 記錄表，此表記錄 Beacon 成功次數 ( $N_{BEACONsuccess}$ )、失敗次數 ( $N_{BEACONfail}$ ) 及成功機率 ( $P_{BEACONsuccess}$ )。Beacon 記錄表具有以下欄位(圖 3)： $N_{BEACONsuccess}$ ， $N_{BEACONfail}$ ， $P_{BEACONsuccess}$ 。

$N_{BEACONsuccess}$	$N_{BEACONfail}$	$P_{BEACONsuccess}$
---------------------	------------------	---------------------

圖 3 Beacon 記錄表的欄位格式

#### (二) 通道狀態記錄表(Channel Status Recording Table, CSRT)

每一個 SU 節點必須各自維護一個通道狀態記錄表，CSRT 記錄每一個通道取得成功次數 ( $N_{CHsuccess}$ ) 與失敗次數 ( $N_{CHfail}$ )。SU 節點選擇一個通道將依據全部次數中成功次數的機率來決定。 $CH_{id}$  表示通道編號。 $P_{CHsuccess}$  表示通道成功機率。 $P_{thru}$  表示是否要進行下一階段競爭模式之最低臨界機率。通道狀態記錄表具有以下欄位(圖

4):  $CH_{id}$ ,  $N_{CHsuccess}$ ,  $N_{CHfail}$ ,  $P_{CHsuccess}$ ,  $P_{CHthreshold}$ 。

$CH_{id}$	$N_{CHsuccess}$	$N_{CHfail}$	$P_{CHsuccess}$	$P_{CHthreshold}$
-----------	-----------------	--------------	-----------------	-------------------

圖 4 通道狀態記錄表的欄位格式

### (三)鄰居節點表(Neighbor Node Table, NNT)

每個 SU 節點必須記錄自己傳輸範圍內的 PUs、SUs。此表目的在協助 SU 節點在 MIMO 無線感知隨意網路中克服多重通道隱藏節點 PU、SUs 及暴露節點 PU、SUs 問題時，所必須知道的節點彼此鄰居關係。此表的建立將藉由收到 RTS/CTS/AAP/ACP 等控制訊框來建立，並藉此知道鄰居節點 SUs 與 PUs 節點所使用通道的狀況。鄰居節點表具有以下欄位(圖 5):  $CH_{id}$ ,  $Neighbor_{id}$ ,  $Role$ 。 $CH_{id}$  表示節點 SU 或 PU 所使用通道編號。 $Neighbor_{id}$  表示鄰居節點編號。 $Role$  表示鄰居節點是 SU、PU。

$CH_{id}$	$Neighbor_{id}$	$Role$
-----------	-----------------	--------

圖 5 鄰居節點表的欄位格式

### (四)訊框格式

**Beacon frame:** 時間間隔的同步信號。使用 IEEE 802.11 之計時同步功能進行同步。

**RTS frame:** 除了 IEEE 802.11 欄位，加入以下欄位： $CH_{id1}$ ,  $CH_{id2}$ ,  $CH_{id3}$ ,  $SU_{sender}$ ,  $SU_{receiver}$ ,  $Power_{max}$ ,  $Power_{snd}$ ,  $Time_{RTSsnd}$ ,  $ANT_{residual}$  (圖 6)。 $CH_{id1}$ ,  $CH_{id2}$ ,  $CH_{id3}$  是 SU 傳送端通道狀態記錄表中優先順序較高且成功機率在臨界值以上的最多三個通道，避免 SU 接收端沒有合適的通道可選擇。 $SU_{sender}$  指 SU 傳送端； $SU_{receiver}$  指 SU 接收端。 $Power_{max}$  是系統  $SU_{sender}$  的控制訊框最大傳送功率； $Power_{snd}$  是 SU 傳送端送出 RTS 控制訊框的傳送功率。 $Time_{RTSsnd}$  指 SU 傳送端送出 RTS 控制訊框的時間； $ANT_{residual}$  指 SU 傳送端在 MIMO 系統中送出 RTS 控制訊框之後剩下可使用的天線數。

$CH_{id1}$	$CH_{id2}$	$CH_{id3}$	$SU_{sender}$	$SU_{receiver}$	$Power_{max}$	$Power_{snd}$	$Time_{RTSsnd}$	$ANT_{residual}$
------------	------------	------------	---------------	-----------------	---------------	---------------	-----------------	------------------

圖 6 相對於 IEEE 802.11 RTS 原有欄位之外，

再加入的欄位格式

**CTS frame:** 除了 IEEE 802.11 原有欄位，加入以下欄位： $CH_{id}$ ,  $SU_{sender}$ ,  $SU_{receiver}$ ,  $Power_{max}$ ,  $Power_{rcv}$ ,  $Time_{RTSrcv}$ ,  $Time_{CTSrcv}$ ,  $ANT_{residual}$  (圖 7)。 $CH_{id}$  是 SU 接收端參考 SU 傳送端 RTS 封包，依據自己的通道狀態記錄表所選擇的通道； $SU_{sender}$  指 SU 傳送端； $SU_{receiver}$  指 SU 接收端。 $Power_{max}$  是  $SU_{receiver}$  的控制訊框最大傳送功率； $Power_{rcv}$  是 SU 接收端收到 RTS 控制訊框的接收功率。 $Time_{RTSrcv}$  指 SU 接收端收到 RTS 控制訊框的時間； $Time_{CTSrcv}$  指 SU 接收端送出 CTS 控制訊框的時間； $ANT_{residual}$  指 SU 接收端在 MIMO 系統中收到 RTS 控制訊框之後，送出 CTS 控制訊框之後剩下可使用的天線數。

$CH_{id}$	$SU_{sender}$	$SU_{receiver}$	$Power_{max}$	$Power_{rcv}$	$Time_{RTSrcv}$	$Time_{CTSrcv}$	$ANT_{residual}$
-----------	---------------	-----------------	---------------	---------------	-----------------	-----------------	------------------

圖 7 相對於 IEEE 802.11 CTS 原有欄位之外，再加

入的欄位格式

**AAP frame:** 有以下欄位： $CH_{id}$ ,  $SU_{sender}$ ,  $SU_{receiver}$ ,  $Time_{CTSrcv}$ ,  $Time_{AAPsnd}$ ,  $ANT_{residual}$  (圖 8)。 $CH_{id}$  是 SU 傳送端收到 SU 接收端 CTS 封包之後所選擇的通道； $SU_{sender}$  指 SU 傳送端； $SU_{receiver}$  是指 SU 接收端； $Time_{CTSrcv}$  指 SU 接收端收到 CTS 控制訊框的時間； $Time_{AAPsnd}$  指 SU 接收端送出 AAP 控制訊框的時間； $ANT_{residual}$  指 SU 接收端在 MIMO 系統中收到 CTS 控制訊框之後，送出 AAP 控制訊框之後剩下可使用的天線數。

$CH_{id}$	$SU_{sender}$	$SU_{receiver}$	$Time_{CTSrcv}$	$Time_{AAPsnd}$	$ANT_{residual}$
-----------	---------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------

圖 8 AAP 的欄位格式

**ACP frame:** 有以下欄位： $CH_{id}$ ,  $SU_{sender}$ ,  $SU_{receiver}$ ,  $Time_{AAPrcv}$ ,  $Time_{ACPsnd}$ ,  $ANT_{residual}$  (圖 9)。 $CH_{id}$  是 SU 傳送端收到 SU 接收端 CTS 封包之

後所選擇的通道； $SU_{sender}$ 是指 SU 傳送端； $SU_{receiver}$ 是指 SU 接收端。 $Time_{AAPrcv}$ 指 SU 接收端收到 AAP 控制訊框的時間； $Time_{ACPsnd}$ 指 SU 接收端送出 ACP 控制訊框的時間； $ANT_{residual}$ 指 SU 接收端在 MIMO 系統中收到 AAP 控制訊框之後，送出 ACP 控制訊框之後剩下可使用的天線數。

$CH_{id}$	$SU_{sender}$	$SU_{receiver}$	$Time_{AAPrcv}$	$Time_{ACPsnd}$	$ANT_{residual}$
-----------	---------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------

圖 9 ACP 的欄位格式

ACK frame: 有以下欄位： $CH_{id}$ ， $SU_{sender}$ ， $SU_{receiver}$  (圖 10)。 $SU_{sender}$ 是指 SU 傳送端； $SU_{receiver}$ 是指 SU 接收端； $CH_{id}$ 是 SU 接收端收到 SU 傳送端的 Data 封包之後，所發出通道釋出確認訊框。

$CH_{id}$	$SU_{sender}$	$SU_{receiver}$
-----------	---------------	-----------------

圖 10 ACK 的欄位格式

INT frame: 有以下欄位： $CH_{id}$ ， $SU_{sender}$ ， $PU_{sender}$  (圖 11)。 $CH_{id}$ 是指被干擾通道， $SU_{sender}$ 是指送出  $INT_{CH}$  中斷訊框之 SU 傳送端； $PU_{sender}$ 是指被干擾範圍內之 PU 傳送端。

$CH_{id}$	$SU_{sender}$	$PU_{sender}$
-----------	---------------	---------------

圖 11 INT 的欄位格式

### (五)傳輸功率估測的 MAC 協定設計

#### 1.非同步時間距離估測

在[25]中，作者提出一個在無線網路中的非同步時間(Asynchronous Clocks)距離估測(Distance Estimation)。在本論文中將透過 RTS/CTS/AAP/ACP 控制訊框的交換，紀錄控制訊框的傳送與接收時間來估算 SU 傳送端與 SU 接收端間的距離。

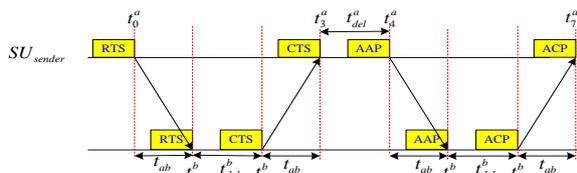


圖 12 無線感知隨意網路中非同步時間距離估測法估測 SU 節點間的距離。

由圖 12 得到：

$$4t_{ab} + t_{del}^a + 2t_{del}^b = t_7^a - t_0^a$$

$$t_{ab} = \frac{t_7^a - t_0^a - t_{del}^a - 2t_{del}^b}{4}$$

$$t_{del}^a = t_4^a - t_3^a$$

$$t_{del}^b = t_2^b - t_1^b = t_6^b - t_5^b$$

$$d_{ab} = ct_{ab}$$

其中

$t_0^a$ ：SU 傳送端送出 RTS 控制訊框的時間，此值將記錄在 RTS 控制訊框中；

$t_3^a$ ：SU 傳送端收到 CTS 控制訊框的時間，此值將記錄在 AAP 控制訊框中回傳給 SU 接收端；

$t_4^a$ ：SU 傳送端送出 AAP 控制訊框的時間，此值將記錄在 AAP 控制訊框中回傳給 SU 接收端；

$t_7^a$ ：SU 傳送端收到 ACP 控制訊框的時間；

$t_1^b$ ：SU 接收端收到 RTS 控制訊框的時間，此值將記錄在 CTS 控制訊框中回傳給 SU 傳送端；

$t_2^b$ ：SU 接收端送出 CTS 控制訊框的時間，此值將記錄在 CTS 控制訊框中回傳給 SU 傳送端；

$t_5^b$ ：SU 接收端收到 AAP 控制訊框的時間，此值將記錄在 ACP 控制訊框中回傳給 SU 傳送端；

$t_6^b$ ：SU 接收端送出 ACP 控制訊框的時間，此值將記錄在 ACP 控制訊框中回傳給 SU 傳送端；

$t_{de}^a$ ：表示 SU 傳送端的延遲時間；

$t_{de}^b$ ：表示 SU 接收端的延遲時間；

$t_{ab}$ ：表示 SU 傳送端送出控制訊框(RTS/AAP)到 SU 接收端的時間，或表示 SU 接收端送出控制訊框(CTS/ACP)到 SU 傳送端的時間；

$c$ ：表示 SU 傳送端與 SU 接收端訊號傳遞速度；

$d_{ab}$ ：表示依據非同步時間的距離估測法估測 SU 傳送端與 SU 接收端的距離。

#### 2.確定性傳遞模式

在[26]中，作者提出一個在無線網路中的確定性傳遞模式(deterministic propagation model)：

$$P_{im} = \frac{k \cdot P_i}{d_{im}^\alpha}$$

其中

$P_i$  : 表示節點  $i$  的未知傳輸功率;

$P_{im}$  : 表示節點  $m$  收到節點  $i$  所傳送訊號的接收功率;

$d_{im}$  : 表示節點  $i$  與節點  $m$  的距離;

$k$  和  $\alpha$  (*path-loss exponent*) 是已知常數。

### 3.SU 傳送端傳輸功率估測

經由 A-1 得到 SU 傳送端與 SU 接收端間的估測距離; 再經由 A-2 的確定性傳遞模式, 可以得到 SU 傳送端傳輸功率估測。

$$P_{SU_{snd}} = \frac{P_{SU_{rcv}} d_{SU}^\alpha}{k}$$

其中

$P_{SU_{snd}}$  : 表示 SU 傳送端的估測傳輸功率;

$P_{SU_{rcv}}$  : 表示 SU 接收端收到 SU 傳送端所傳送訊號的接收功率;

$d_{SU}$  : 表示 SU 傳送端與 SU 接收端的距離;

$k$  和  $\alpha$  (*path-loss exponent*) 是已知常數。

## 四、模擬與討論

本系統由 4 個 PU 節點及 400 個 SU 節點所組成, 分布在 1200 x 1200 平方公尺範圍內。假設所有 SU 節點電源都維持在開的狀態, 在沒有開始調整傳輸範圍之前, 控制訊框的傳輸範圍固定在 250 公尺, 系統模擬時間為 20,000 秒, 4 個 PU 位置固定在 (300, 300), (900, 300), (300, 900), (900, 900), 即總共有 4 個資料通道。另外系統還有一個獨立的控制通道。每個 PU 啟動傳輸資料間隔平均值分別為 10, 20, 30, 40, 60, 120, 180, 240 和 300 秒。

每一筆資料都經個 10 次模擬結果取平均值, 為了避免因路徑問題, 整個網路拓樸圖共均分為 100 個區塊, 所有 400 個 SU 節點平均分布在 100

個區塊內。假設系統資料流量為均勻分佈 (Uniformly distributed), 平均每一秒資料離開比率為 0.05, 平均每一秒資料到達比率為 8。在 MIMO 的系統中, 每一個 SU 節點均具有兩組天線, 可同時進行 2 對 2 的 MIMO 資料傳輸。在 SISO 的系統中, 每一個 SU 節點只具有一組天線, 只能進行類似 IEEE 820.11 的資料傳輸。在 PU 啟動中, 假設啟動機率採取指數分佈 (Exponential Distributed), 本論文探討 PU 隨機啟動 2 個及隨機啟動 4 個。

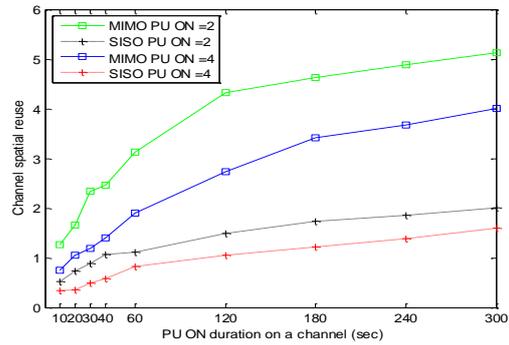


圖 13 無線感知隨意網路中 MIMO 與 SISO 相對於 PU 開啟間隔時間的通道重複使用率比較。

在圖 13 中當 PU 啟動的間隔時間變長時, 表示 SU 更有機會使用到 PU 空間的通道來進行資料傳輸, 因此隨著 PU 啟動的間隔時間變長時, SISO 和 MIMO 的通道重複使用率也會變大。再者因 MIMO 有兩對可同時進行資料傳輸的天線, 而 SISO 只有一對可進行資料傳輸的天線, 因此圖中可以看出 MIMO 的通道重複利用率必定會大於 SISO 的通道重複利用率, 且大概是 2 倍多。

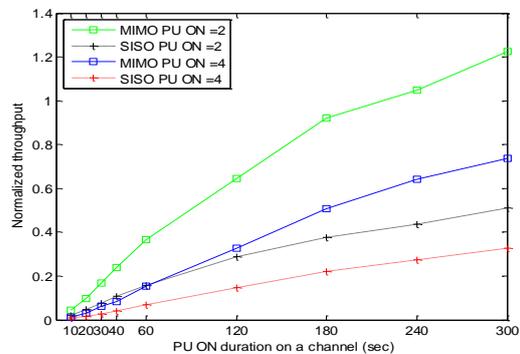


圖 14 無線感知隨意網路中 MIMO 與 SISO 相對於 PU 開啟間隔時間的正規化系統輸出量比較。

在圖 14 中當 PU 啟動的間隔時間變長時，隨著 PU 啟動的間隔時間變長時，SISO 和 MIMO 的正規化系統輸出量也會變大。由圖中可以看出 MIMO 的正規化系統輸出量大概是 2 倍多於 SISO。由於本系統考慮通道的重複使用因此正規化系統輸出量有可能會大於 1。

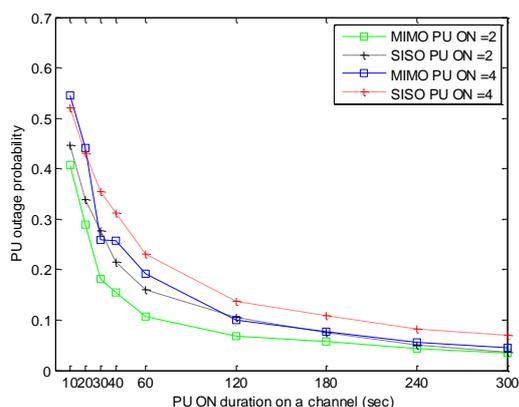


圖 15 無線感知隨意網路中 MIMO 與 SISO 相對於 PU 開啟間隔時間的 PU 被干擾機率比較。

在圖 15 中當 PU 啟動的間隔時間變長時，表示 SU 更有機會使用到 PU 空間的通道來進行資料傳輸，因此隨著 PU 啟動的間隔時間變長時，SISO 和 MIMO 的 PU 被干擾機率也會變多。由此圖中可以看出 MIMO 的 PU 被干擾機率因有比較多的資料傳輸機會，因此相對於 SISO 而言，對 PU 干擾的機率也會比較低。

## 五、結 論

本論文研究多重輸入多重輸出感知無線網路無線傳輸所產生的干擾問題，並提升無線網路通道重複使用率、系統輸出量及降低 PU 被干擾的機率。由於 MIMO 系統為多重輸入多重輸出的系統設計，因此可同時建立多個傳輸連結，也因此有比較多的資料傳輸機會，所以在提升系統效能會有顯著的幫助。而 SISO 系統因為同一時間只能有一組連線成功，因此在通道重複使用率及正規化系統輸出量，隨著 PU 啟動的間隔時間變長時，MIMO 系統

會比 SISO 有更好的系統效能，本論文其比值大約是 2 倍多。由於 MIMO 系統有比較多的資料傳輸機會，因此在通道重複使用率及正規化系統輸出量，隨著 PU 啟動的間隔時間變長時，MIMO 系統會比 SISO 有更好的系統效能，其比值大約是 2 倍多。在 PU 被干擾機率的模擬結果中也發現 MIMO 的 PU 被干擾機率也會比 SISO 降低許多。

## 誌 謝

感謝審稿委員的辛苦，讓本篇論文能更加完善。也感謝南華大學校內專題計畫的支持，計畫編號為 Y103000955，使本論文得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

- [1] F. Akyildiz, W.Y. Lee, M.C. Vuran and S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Computer Networks*, Vol. 50, pp. 2127–2159, 2006.
- [2] J. Xiang, Y. Zhang and T. Skeie, "Medium access control protocols in cognitive radio networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, Volume 10, Issue 1, pp. 31-49, January 2010.
- [3] C. Cormio and K.R. Chowdhury, "A survey on MAC protocols for cognitive radio networks," *Ad Hoc Networks*, Volume 7, Issue 7, pp. 1315-1329, September 2009.
- [4] C. Cordeiro, K. Challapali, D. Birru and S. Shanka, "IEEE 802.22: The first world-wide wireless standard based on cognitive radios," *Proceedings of IEEE DySPAN*, pp. 328–337, November 2005.
- [5] J. Jia, Q. Zhang, X. Shen, "HC-MAC: a hardware-constrained cognitive MAC for efficient spectrum management," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Volume

- 7, Issue 1, pp. 106-117, 2008.
- [6] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami and Y. Chen, "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Volume 25, Issue 3, pp. 589-600, 2007.
- [7] B. Hamdaoui B and K. Shin, "OS-MAC: an efficient MAC protocol for spectrum-agile wireless networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Volume 7, Issue 8, pp. 915-930, 2008.
- [8] C. Cordeiro and K. Challapali, "C-MAC: a cognitive MAC protocol for multi-channel wireless networks," *The 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks 2007 (DySPAN 2007)*, pp. 147-157, April 2007.
- [9] Y. Kondareddy and P. Agrawal, "Synchronized MAC protocol for multi-hop cognitive radio networks," *IEEE International Conference on Communications 2008 (ICC '08)*, pp. 3198-3202, May 2008.
- [10] H. Su and X. Zhang, "Cross-layer based opportunistic MAC protocols for QoS provisionings over cognitive radio wireless networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Volume 26, Issue 1, pp. 118-129, May 2008.
- [11] H. Su and X. Zhang, "CREAM-MAC: an efficient cognitive radio enabled multi-channel MAC protocol for wireless networks," *2008 International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM 2008)*, pp. 1-8, June 2008.
- [12] L. Le, and E. Hossain, "OSA-MAC: a MAC protocol for opportunistic spectrum access in cognitive radio networks," *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC IEEE*, pp. 1426-1430, April 2008.
- [13] T.K. Lou, H.L. Chao and T.J. Tsai, "On synchronized channel sensing and accessing for cognitive radio users in IEEE 802.11 wireless networks," *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC IEEE*, pp. 757-761, September 2009.
- [14] S.Y. Wang, Y.M. Huang, L.C. Lau and C.C. Lin, "Enhanced MAC protocol for cognitive radios over IEEE 802.11 networks," *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC IEEE*, pp. 37-42, March 2011.
- [15] W.S. Jeon, J.A. Han and D.G. Jeong, "A novel MAC scheme for multichannel cognitive radio ad hoc networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Volume 11, No. 6, pp. 922-934, June 2012.
- [16] M. Timmers, S. Pollin, A. Dejonghe, L.V. Perre, and F. Cattoor, "A distributed multichannel MAC protocol for multihop cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume 59, No. 1, pp. 446-459, January 2010.
- [17] Z. Chen, C.X. Wang, X. Hong, J.S. Thompson, S.A. Vorobyov, X. Ge, H. Xiao, and F. Zhao, "Aggregate interference modeling in cognitive radio networks with power and contention control," *IEEE Transactions on Communications*, Volume 60, No. 2, pp. 456-468, February 2012.
- [18] D. Gong, M. Zhao, and Y. Yang, "A multi-channel cooperative MIMO MAC protocol for wireless sensor networks," *Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS), 2010 IEEE 7th International Conference*, pp. 11-20, Nov. 2010.
- [19] M. Park, S.H. Choi, and S.M. Nettles, "Cross-layer MAC design for wireless networks using MIMO," in *Proc of IEEE GlobeCom*, Volume 2, St. Louis, MO, pp. 2870-2874, Nov. 2005.

- [20] J. Mirkovic, G. Orfanos, H.J. Reumerman, and D. Denteneer, "A MAC protocol for MIMO based IEEE 802.11 wireless local area networks," *Wireless Communications and Networking Conference, WCNC IEEE*, pp. 2131-2136, Mar. 2007.
- [21] Ashtaiwi, H.S. Hassanein, "MIMO-Based collision avoidance in IEEE 802.11e networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume 59, No. 3, pp. 1076-1086, Mar. 2010.
- [22] K.G.M. Thilina, E. Hossain, D.I. Kim, "DCCC-MAC: A Dynamic Common Control Channel-Based MAC Protocol for Cellular Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, No. 5, May 2016, pp. 3597–3613.
- [23] C. Gao, Y. Shi, Y. Thomas Hou, and S. Kompella, "On the throughput of MIMO-empowered multihop cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Volume 10, No. 11, pp. 1505-1519, Nov. 2011.
- [24] C. Gao, S. Chu, and X. Wang, "Distributed scheduling in MIMO empowered cognitive radio ad hoc networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*. IEEE computer Society Digital Library, 22 Aug. 2013.
- [25] C.Y. Wen, R.D. Morris, and W.A. Sethares, "Distance estimation using bidirectional communications without synchronous clocking," *IEEE Transactions on Signal Processing*, Volume 55, Issue 5, pp. 1927-1939, May 2007.
- [26] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1996.

