

感知無線電—最新技術發展趨勢概論

◎廖建興

1. 前言：

傳統電信網路範疇正從2G/3G而漸擴及4G；而資訊電腦網路正從Wi-Fi漸漸擴及至WiMAX網路，如一言以蔽之，前者正朝向「行動無線寬頻化」發展，而後者正朝向「固定寬頻無線行動化」發展。首先，就技術層面而言，未來4G系統技術必以OFDM正交多工分頻技術為主，可抵抗因多路徑效應所產生之符元間的干擾(ISI)外，對於窄頻的干擾源，也有很好的抑制效果，同時亦可以傳送大量多媒體資料，這是其它系統不容易達到的；而若以技術之應用涵蓋面來看，IEEE電機及電子工程師協會綜合專家學者意見，以含括之區域大小為基準，已訂出了無線通訊標準發展層次示意圖，其中屬於WRAN無線鄉村區域網的IEEE 802.22標準係根基於感知無線電(Cognitive Radio, CR)技術之標準，可感知偵測各其他領域無線電頻譜並進行運用。

感知無線電配置有感知器，其具有觀測和評估無線電頻率環境，以及學習和適應其週遭環境的能力，特別適合用來進行動態頻譜存取及提昇系統的使用率。然而，感知無線電在實際運作上係以被動的感知無線電頻譜的刺激開始而進行感知無線電通訊，因此皆呈現一定程度之模糊不定性及非線性特性。就複雜的非線性系統建模考量而言，其主要可以區分為整域(global)與局部(local)兩種主要策略，此即意涵著發展模糊理論(Fuzzy Theory)之必要性；同時需探究如何有效結合如通

訊信號強度、空間距離位置變化、時間差變化，以及頻譜/帶空間之至少四個維度變化量關係等，建立感知無線電環境分析及通道狀態資訊(CSI)之估測模型，以及與功率控制、頻譜管理及系統性能間之對應或連結關係；並考量如模糊類神經控制等人工智慧演算法，將無線電環境相關品質影響因素進一步納進估測模型演算法中，探討如何減少於通訊頻譜資源共享時，因次要使用者的傳輸(如感知無線電系統)而引起對特定通訊系統之主要使用者(Primary Users, PUs)的干擾，並且保障主要使用者的通訊效能，不會因次要使用者(Secondary Users, SUs)的借用頻帶產生干擾而出現失效機率升高的情形。

因此，本文首先將說明感知無線電之概念與內涵；接著探討感知無線電與目前正積極拓展部署及根基於OFDMA正交分頻多工存取技術之WMAN無線都市區網之WiMAX通訊系統共存關係；再則，探討屬於AI人工智慧技術之適應性類神經模糊推論(Adaptive Neural Fuzzy Inference System, ANFIS)與感知無線電之技術發展依存關係；最後做一總結。

2. 感知無線電概念與內涵

不同的機構和學者從不同的角度給了感知無線電不同的概念和定義，其中比較有代表性的包括最早提出感知無線電概念之Joseph Mitola和著名學者Simon Haykin教授的定義[1-5]。J.Mitola等分別

在1991年與1999年陸續提出軟體無線電 (Software Defined Radio, SDR) 與感知無線電 (Cognitive Radio, CR) 此二基本概念。Mitola 等認為CR可以透過一所謂的無線電訊息表達語言 (Radio Knowledge Representation Language, RKRL) 提高個人通訊服務的靈活運作；並將CR視為是一種結合多種智慧的概念，可解決頻譜資源不足及使用率偏低等問題，此技術概念並獲得廣泛研究與討論[3-7]。根據Mitola概念，CR係建構在SDR基礎上，同時在CR上新增一個新的元素—依靠人工智慧的支援—採用可隨時變化的通訊協定技術，感知其所在環境及所處位置，並在此環境位置上改變其功率、頻率、調變方式及其他相關傳輸參數，以求更高的頻譜使用效率；並期能進一步達到最佳傳輸路徑選擇與最高傳輸品質保證。此些概念已並已因先進的數位訊號處理技術、網路技術、機器學習、計算軟體及硬體的整合發展等而得以逐步實現。簡言之，CR需具備感知能力(Cognitive Capability)及重新配置能力(Re-Configurability)等兩大特色[1-2]：(1)感知能力：使CR能夠從無線環境中感知相關訊息，從而辨識特定時間和空間下之未使用頻譜資源，並選擇最適當的頻譜和傳輸參數，此即所謂之感知週期(Cognitive Cycle) (參考圖1)。

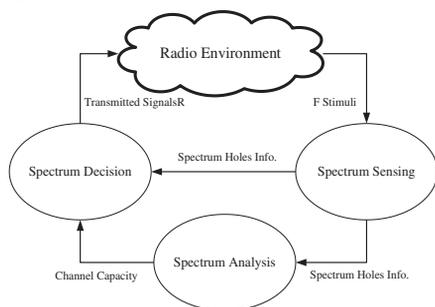


圖1 感知週期(Cognitive Cycle)概念

通常感知能力包括三個主要步驟：頻譜感測(Spectrum Sensing)、頻譜分析(Spectrum Analysis)及頻譜決定(Spectrum Decision)。頻譜感測之主要功能是偵測可用頻譜、檢測頻譜空洞(Spectrum Holes)；頻譜分析估計頻譜感知所獲取的頻譜空洞特徵；頻譜決定根據頻譜空洞的特性和用戶需求選擇合適的頻段來進行通信傳輸。(2)重新配置能力：使CR能夠重新配置參數組態能力，亦即在不改變硬體架構條件下，調整相關傳輸參數，如頻譜、波形、功率、通訊協定及網路參數等。當該可用頻譜已被主要使用者 (Primary User, PU) 使用，感知無線電將切換到其他可用頻譜通信，避免對PU之干擾。

S. Haykin等以數位信號處理觀點認為「感知無線電是一個智慧型通訊系統，它能夠感知外界環境，並使用人工智慧技術從環境中學習，通過即時改變某些操作參數(如傳輸功率、載波頻率和調變技術)，使其內部狀態適應接收到的無線信號的統計性變化，以達到任何時間、任何地點的高可靠通信，從而做到頻譜資源的有效利用」。若要達到「見縫插針、擴展頻譜」，則感知無線電需具備六大能力，即感知(Awareness)、智慧(Intelligence)、適應(Adaptability)、可靠(Reliability)、效率(Efficiency)及學習(Learning) (參考圖2)，每一能力環環相扣，彼此合作來組成「智慧無線通訊系統」[3]。綜上所述，感知無線電能夠感知通訊環境的變化，並據此調整系統傳輸參數，從這個意義可知感知無線電的概念，包含無線電環境分析，通道估計與預測，並將分析預測結果透過軟體無線電平台進行傳輸參數調整；此外感知無線電還包括根據相應的任務、政策、規則和目標進行推理和規劃等高層之功能。

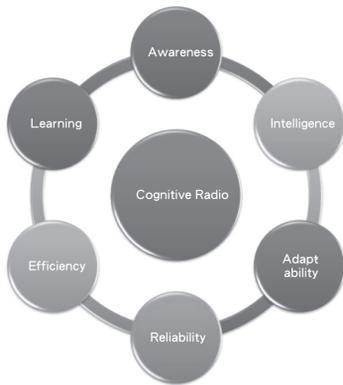


圖2 感知無線電的六大能力示意圖

3. 感知無線電與WiMAX系統

全球微波存取互通運作系統 (Worldwide Interoperability for Microwave Access, WiMAX)，如從應用上而言係如 xDSL 及 Cable Modem 一樣的有線寬頻連線接取技術，只不過 WiMAX 是透過無線傳輸的模式，無需要像現存的一些寬頻環境必須佈置實體線路，所以也就是將這「最後一哩」(Last mile)無線化。而 IEEE 802.16 標準則定義了 WiMAX 作為無線都會網 (Wireless MAN) 的介面規範，為接取問題增加了一個新的解決方案，主要任務是開發工作在 2~66GHz 頻帶的無線接取系統中的實體層 (PHY) 和媒體接取層 (MAC) 的規範；同時還有與空中介面 (Air Interface) 協議相關的一致性測試以及不同無線接入系統之間的共存規範。其與鋪設光纜、DSL、Cable Modem... 等有線接入方式相比，可提高網路部署效率，並節省基礎設施架設成本。

WiMAX 實體層的傳輸接取技術係採取正交分頻多工存取 (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) 技術。OFDM 技術可配

合不同的多重存取方式，如 OFDM/FDMA、OFDM/TDMA、以及 OFDM/CDMA，不僅多載波可以有效提昇資料傳輸率，加上結合多重存取技術，可以讓多個裝置與其通信，此即為一般所稱之 OFDMA 通道存取方式。OFDM 基本技術構想早於二十世紀中就有人提出，亦可視為多載波調變技術 (Multi-Carrier Modulation) 的一種，但一直到 FFT (快速傅利葉轉換) 的發明及配合，方使得原本不易實現的傅利葉轉換簡化造就其實用性而快速興起，不但 xDSL、WLAN、DVB、DAB 及 WiMAX 等技術皆以 OFDM 為主要的無線通訊技術。藉由將原本單一通道切割成若干的子通道，將高速的資料信號轉換成並行的低速的子資料流程，並於子通道上傳輸，可以將更多資料載到子頻道上，有效提昇頻譜利用率 (Spectrum Efficiency)，增加系統的資料傳輸量。OFDM 技術優點很多，除了可以抵抗因多路徑效應所產生之符元間的干擾 (ISI) 外，對於窄頻的干擾源，也有很好的抑制效果；同時亦可以傳送大量多媒體資料，這是其它系統不容易達到的。OFDMA 除了在多載波上傳輸，面對不同使用者，甚至可以在不同的子載波上選用特定或動態的子載波數做為傳輸，因此對於通道條件差的載波可以盡量避免使用。透過如此有效的選擇，OFDMA 亦成為行動式 WiMAX (Mobile WiMAX, 802.16e) 技術之不二選項。OFDMA 的訊框結構可以利用時間和頻率兩種維度來表示；頻寬可以細分成多個子通道來使用，而不同的時間可以分配給不同的使用者使用。因此 OFDMA 的訊框在時間和頻率兩個維度中被多工使用，增加了系統無線資源的利用率。而 OFDMA 的子載波可進一步組成子通道，而數個子通道又可以組成資訊叢集來分配

給一個以上的用戶使用；每個資訊叢集可改變其訊框及調變等級，允許基地台動態調整頻寬以符合目前用戶端的系統需求。

感知無線電WiMAX (Cognitive WiMAX) 系統，依感知器裝置的對象不同而有不同的研究方向，S. Haykin等將此分法定義為漸進式的和創新式的感知無線網路系統 (Cognitive Radio Network System, CRNS)。所謂的漸漸式CRNS是利用現有的通訊基礎建設將感知系統建置在基地台上，在這樣的架構下，基地台或頻譜代理人(Spectrum Broker)負責對感知無線電系統進行通道配置；而所謂創新式CRNS則不需要任何的基地台和通訊基礎建設，而將結合通道配置和功率控制的感知系統建置在行動端上，以快速又有效率的獲知頻譜空洞並分配給需要的感知使用者[6-7]。A. E. Leu等，提出感知無線電與WiMAX系統共存時之系統設計框架架構(Framework)，其所謂之感知頻譜分配 (Cognitive Channel Assignment, CCA)，包含了頻率敏捷感知無線電(Frequency-Agile Cognitive Radio)、功率控制器(Power Controller)，以及聽後講(Listen-Before-Talk)之頻譜接取(Spectrum Access)運作方式。感知頻譜存取是配置於BS基地台上，由BS來主導感知通道分配機制進行使用者配置，因此當BS在感知到某一頻譜可用時(Available)，便可動態的分配給需要使用的使用者，而功率控制器與頻譜感知合作以增加系統的頻譜再用率(Frequency Reuse)。此一配置的好處是可以增加頻譜重複使用率、增加系統的容量和簡化網路操作，而相對於傳統的WiMAX系統的使用者則不需經過改良即可適用於本此一感知WiMAX系統，提昇了系統的相容性。也證明CCA確實可以獲得比傳統的動態頻譜存取更佳的性能。然該文對聽後講(Listen-Before-Talk)之頻譜

接取運作方式係假定BS基地台之感知靈敏度(Sensitivity)係理想超低敏感值，同時對因幾何關係及接收信號時間差等對頻譜感應及接取之影響則並未說明[8]。

4. 感知無線電與適應性類神經模糊推論人工智慧

模糊理論(Fuzzy Theory)起源於1965年，由美國加利福尼亞大學柏克萊分校的Zadeh L.A.教授在「Information and Control」期刊上首度發表了模糊集合論(Fuzzy Sets)，為模糊理論之開端。當時是為求將人類主觀性的思考或判斷的不正確性作量化處理，來表達某些無法明確定義的模糊性概念，並在發表中指出在現實世界中大部分的人、事、物是無法以明確的二分邏輯法判斷的，例如：高與低、大與小、冷與熱等，都存在著邊界不明的模糊概念，所以Zadeh L.A.教授認為在實用上應該要將傳統明確集合(Crisp Set)中「絕對屬於」的概念擴展至「相對屬於」的概念，換言之，領域中的元素在某種程度上是屬於該集合的，但同時也可以視為某種程度上不屬於該集合的，故模糊集合有別於明確集合中的非「0」即「1」的關係。模糊理論將人類思考或語言的不確定性量化，且以數值表達人類的主觀感覺，其實就是要使數學回過頭來擷取人腦識別和判決的模糊特點，使部分自然語言能夠轉換成計算機之程式，而使人類能以簡單的程式語言來完成複雜設備儀器的控制。

人類的大腦大約由 10^{11} 個神經細胞(Nerve Cells)組成，而每個神經細胞又有 10^4 個突觸(Synapses)與其他細胞互相連結成一個非常複雜的神經網路。當人類的感官受到外界刺激經由神經細胞傳遞訊號到大腦，大腦便會下達命令傳遞至相關的



受動器(Effector)做出反應，此種過程往往需要經由反覆訓練，才能做出適當的判斷，並且記憶於腦細胞中。依此，所謂類神經網路(Neural Network)理論約起源於1950年代，當時科學家仿造人類大腦的組織及運作方式，開始提出稱之為「感知機」(Perceptron)的神經元模型，具有感知及學習之特性，這是最簡單也是最早的類神經模型，感知機通常被拿來做分類器(Classifier)使用。直至今日，類神經網路仍有新架構及理論不斷被提出，並配合電腦運算速度倍數增長，使類神經網路功能愈形強大，而運用層面亦更為廣泛。

如進一步將模糊理論與類神經理論架構結合，其優點簡言之即是其每一模糊法則是活的，並可隨時經由學習而調整。例如，每一個歸屬之高斯函數(Gaussian Function)是可以藉由調整其期望值、變異數變動的；而各權重值(Weighting)亦是可經過學習而調整的。其中有關「學習」的理論基礎，就是套用「類神經網路」的理論基礎。ANFIS適應性類神經模糊推論系統(Adaptive Neural Fuzzy Inference System)係適應性地整合類神經(Neural)及模糊推論系統(FIS)為一體，其具有易實作及學習能力佳等優點，可用於最佳化適應性網路架構之FIS參數。

近年來關於人工智慧(Artificial Intelligence)於感知無線電的相關文獻資料中，亦已有許多先進陸續貢獻其研究結果[9-13]。A. He等有鑑於許多之CR研究學者嘗試於以相關人工智慧之技術以應用於感知無線電領域當中，以了解其不同之應用領域及感知能力，因此乃綜整如人工類神經網路(Artificial Neural Network, ANN)、隱藏式馬可夫模型(Hidden Markov Models, HMM)、規則植基系統(Rule-Based System, RBSs)、本體植基系統(Ontology-Based System, OBSs)，以及

案例植基系統(Case-Based System, CBSs)等，並以反應性、複雜度、安全性、強鍵性，及穩定度等影響因素進行討論，以提供讀者更清楚了解[9]。一嶄新之神經模糊信號分類(Neuro-Fuzzy Signal Classifier, NFSC)可運用於寬頻帶及窄頻帶之感測平台[10]。基於合作式頻譜感應之效益及改進次要使用者(Secondary Users, SUs)之不確定問題影響，一基於模糊整合(Fuzzy Integral)理論之合作式頻譜感應技巧已被提出，其亦將當地頻譜之可靠度納入最終之模糊決定，模擬證明此方法之效率[11]。一基於裝置量測之即時通訊性能特徵化之多層次前饋神經網路亦已被提出，其可顯現出一些有趣之感知學習能力[12]。有關適應性類神經模糊網路系統之整體介紹如[13]；而一基於神經網路之頻譜預估技巧，無需先前訊息可降低頻譜感應之負擔及較快蒐尋到頻譜空洞[13]。

5. 結論

感知無線電技術係利用高效率及高彈性之無線電特性，在確保不對其它無線通訊系統造成干擾前提下，找尋閒置頻段及合適之可用通道，以提高頻譜使用效率及增加無線寬頻系統的傳輸能力。並可於重疊覆蓋的多種無線電異質通信網路環境間進行選擇，以實現包括終端、網路及業務在內之重配置能力，提高整體網路性能，滿足新世代行動寬頻系統需求，及達致無所不在之無線寬頻傳輸環境。因此，感知無線電未來技術需求，一般尚期望其能被賦予更強大之人工智慧處理能力，以更有效提升對無線環境之認知及調適能力。基於感知無線電技術已被認定為新世代無線通信技術發展的重點項目之一，各國均已進行投入各項關鍵技術開發，我國產官學



研單位亦當積極投入，以進行此感知無線電未來相關新技術之整合及開發規劃，以掌握此新世代無線通信契機。

6. 參考文獻：

- [1] J. Mitola III and G. Q. Maguire Jr., "Cognitive radio: Making software radios more personal", IEEE Personal Communications, vol. 6, pp. 13-18, 1999.
- [2] J. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio", Ph. D. diss., Royal Institute of Technology, Sweden, 8 May 2000.
- [3] S. Haykin, "Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications", IEEE Journal on Selected Areas in Comm., vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [4] P. Setoodeh and S. Haykin, "Robust Transmit Power Control for Cognitive Radio", Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 915-939, May 2009.
- [5] S. Haykin, David J. Thomson and Jeffrey H. Reed, "Spectrum Sensing for Cognitive Radio", Proceedings of the IEEE, vol. 97, no. 5, pp. 849-877, May 2009.
- [6] F. K. Jondral, "From Maxwell's Equations to Cognitive Radio", 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008, CrownCom 2008, pp. 1-5, 15-17 May 2008.
- [7] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey", Computer Network, www.elsevier.com/locate/comnet, 2006.
- [8] A. He et. al., "A Survey of Artificial Intelligence for Cognitive Radios", IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 59, no. 4, pp.1578-1592, May 2010.
- [9] K. Ahmad et. al., "Neuro-Fuzzy Signal Classifier (NFSC) for standard wireless technologies", International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), pp. 616-620, 2010.
- [10] L. Weidong et. al., "A Novel Cooperative Spectrum Sensing Scheme Based on Fuzzy Integral Theory in Cognitive Radio Networks", Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCom '09, pp. 1-4, 2009.
- [11] N. Baldo and M. Zorzi, "Learning and Adaptation in Cognitive Radios Using Neural Networks", Consumer Communications and Networking Conference, pp. 998-1003, 2008.
- [12] V. K. Tumuluru, W. Ping and D. Niyato, "A Neural Network Based Spectrum Prediction Scheme for Cognitive Radio", IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1-5, 2010.
- [13] J.-S. R. Jang, "ANFIS: Adaptive-Networked-based Fuzzy Inference Systems", IEEE Trans. Syst. Man Cybern, vol. 23, no. 3, pp. 665-685, 1993.

