

使用 Microsoft SORA 評估感知無線電下以小波為基礎之去除雜訊演算法效能

朱俊翰*、葉力愷、葉宗鑫、鄭獻勳
國立東華大學電機工程學系

摘要—軟體無線電(Software Defined Radio, SDR)是一種主要由軟體定義作業的無線通訊系統，其中包含以軟體所架構的特定硬體元件。而感知無線電(Cognitive Radio, CR)的技術是建立在軟體無線電的基礎上，被利用來解決低頻譜使用效率的問題。本論文主要使用 Microsoft SORA(Software Radio)這套軟體無線電系統來實驗以小波為基礎之去除雜訊演算法之可適應性能量偵測器的效能，利用兩台筆電與 SORA 系統建構出符合感知無線電原理的實驗環境，並藉由 iperf 來達到傳輸封包與監聽的動作，最後分析此能量偵測器套用實際訊號之效能。

一、 能量偵測器之小波包去除雜訊演算法簡介

在感知無線電系統中，頻譜感測為首要的任務。系統可以在既有的通訊標準中，偵測出授權用戶使用的頻段，且在不干擾授權用戶的正常使用前提下，透過感知無線電的系統傳輸資料，達到有效使用頻譜的目的。因此正確的頻譜感測在感知無線電系統中是最重要的。

能量偵測主要是藉由偵測接收訊號的能量，判定是否有授權用戶的存在。在基於藉由感知用戶觀察訊號的通道中，假設授權用戶和感知用戶之間為可加性高斯白雜訊，頻譜偵測問題可變為下列假設[1][2]:

$$r(t) = \begin{cases} H_1: s(t) + v(t) \\ H_0: v(t) \end{cases} \quad (1)$$

其中 $r(t)$ 是由感知用戶所接收到的訊號， H_1 所代表的是授權用戶正在使用通道， H_0 表示為沒有授權用戶訊號，通道是空閒的。 $s(t)$ 為授權用戶的傳輸訊號， $v(t)$ 表示為可加性白高斯雜訊，假設雜訊是高斯隨機變數又是獨立並且相同地分佈，高斯白色雜訊， $v(t)$ 有平均值為零和變異數為 σ_w^2 ，其中 $\sigma_w^2 = N_0 \cdot (BW)$ ， BW 是經由帶通濾波器後接收訊號的頻寬， N_0 為高斯雜訊單旁帶功率頻譜密度。

通過帶通濾波器後的接收訊號，再經由類比數位轉換器取樣，可改寫為:

$$r(k) = \begin{cases} H_1: s(k) + v(k) \\ H_0: v(k) \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

$r[k]$ 是在第 k 個取樣點的接收訊號， $s[k]$ 是在第 k 個取樣點的授權用戶訊號， $v[k]$ 是在第 k 個取樣點的雜訊訊號。

能量偵測主要是藉由偵測接收訊號的能量來決定是 H_0 或是 H_1 ，接收訊號的觀測時間 T (假設起始時間 $t = 0$)，能量偵測器可用下式表示[3]:

$$V = \frac{2}{N_0} \int_0^T r^2(t) dt \begin{cases} > \lambda & H_1 \\ < \lambda & H_0 \end{cases} \quad (3)$$

λ 是能量偵測器的門檻值(threshold)， N_0 為高斯雜訊單旁帶功率頻譜密度。經由訊號取樣後，可將測試統計 V 改寫為:

$$V = \frac{\sum_{k=1}^N |r[k]|^2}{\sigma_w^2} \begin{cases} > \lambda & H_1 \\ < \lambda & H_0 \end{cases} \quad (4)$$

當授權用戶未使用通道時，測試統計呈現為中央型卡方分佈(central chi-square distribution)，取樣點數 N 和自由度(freedom of degrees)相同，可用符號 χ_N^2 表示，當通道正被授權用戶使用時，測試統計呈現為非中央型(non-central chi-square distribution)，有著相同的自由度數目 N ，和非中央型參數 γ ，用符號 $\chi_N^2(\gamma)$ 表示。測試統計可描述為[4]:

$$V \sim \begin{cases} \chi_N^2, & H_0 \\ \chi_N^2(\gamma), & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中 γ 可表示為:

$$\gamma = \frac{\sum_{k=1}^N |s[k]|^2}{\sigma_w^2} \quad (6)$$

V 的機率密度函數(probability density function, PDF)可以寫為:

$$f_V(y) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^N 2^{N/2} \Gamma(N/2)} y^{(N/2)-1} e^{-\frac{y}{2\sigma^2}}, & H_0 \\ \frac{1}{2\sigma^2} \left(\frac{y}{\gamma}\right)^{\frac{N-2}{4}} e^{-\frac{y+\gamma}{2}} I_{(N/2)-1}\left(\frac{\sqrt{y\gamma}}{\sigma^2}\right), & H_1 \end{cases} \quad (7)$$

其中 I_ν 是第 ν 階修正型貝塞爾函數 (Bessel function)， $\Gamma(\cdot)$ 是伽瑪函數(gamma function)， σ^2 為雜訊功率。

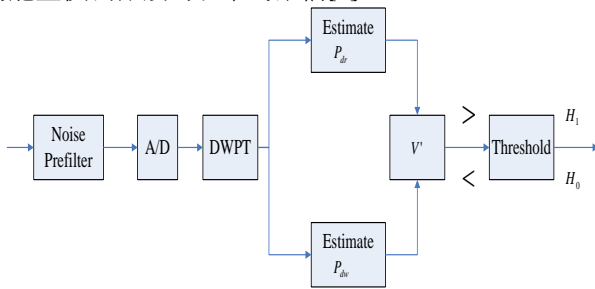
頻譜偵測的偵測器效能有兩個重要的量測：偵測機率 (probability of detection, P_D) 定義為當授權用戶正在使用該頻段時，感知用戶判斷授權用戶訊號的存在。誤報機率 (probability of false alarm, P_{FA}) 定義為當授權用戶實際上未使用該頻段，但感知用戶宣告授權用戶訊號的存在。 P_D 與 P_{FA} 可以表示如下列式子：

$$P_D = \text{Prob}(V > \lambda | H_1) = Q_{N/2}(\sqrt{\frac{\gamma}{\sigma^2}}, \sqrt{\frac{\lambda}{\sigma^2}}) \quad (8)$$

$$P_{FA} = \text{Prob}(V > \lambda | H_0) = \frac{\Gamma(\frac{N}{2}, \frac{\lambda}{2\sigma^2})}{\Gamma(\frac{N}{2})} \quad (9)$$

其中 N 為取樣點數， γ 為訊雜比， $Q_c(a,b)$ 為廣義的馬庫姆 Q 函數 (generalized Marcum Q -function)， $\Gamma(\cdot)$ 與 $\Gamma(\cdot, \cdot)$ 為完整和非完整伽瑪函數 (complete and incomplete gamma functions)。

在相同頻寬中，將雜訊降低，可以改善偵測效能，換而言之，對於接收訊號的雜訊功率，只將有包含著授權訊號和雜訊訊號部分的子頻帶雜訊功率求出。因此將傳統的能量偵測器改為以下的結構[5]：



圖一：小波包去除雜訊演算法之能量偵測器模型

先輸入帶通濾波器選擇中心頻率 f_c 和頻寬 BW ，移除接收訊號外的頻帶，接著經由類比數位轉換器被量化的接收訊號，可寫成數位接收訊號 $r[k]$ ，在小波包去除雜訊演算法中，分析去除雜訊後的接收功率 P_{dr} 和去除雜訊後的雜訊功率 P_{dw} ，會得到新的測試統計 V' ，可表示為下式：

$$V' = N \frac{P_{dr}}{P_{dw}} \begin{matrix} H_1 & > \\ & \lambda \\ H_2 & < \end{matrix} \quad (10)$$

如前所述，我們可以將小波包去除雜訊演算法的偵測總結如下：

Step1：設定分解階層 j ，計算接收訊號 $r[k]$ 的離散小波包轉換，會得到 2^j 個小波包，它裡面有小波包係數的集合為 $\{S_{j,k}^{2n}, S_{j,k}^{2n+1}\}$ 。

Step2：求出第 j 層中每一個小波包的功率。

Step3：用 $\begin{cases} \tilde{P}_{wn} & , \tilde{P}_j < \lambda_d \\ \tilde{P}_{ws} & , \tilde{P}_j > \lambda_d \end{cases}$ 分出“訊號”和“雜訊”功

率，如果 \tilde{P}_{wn} 為空集合則回到 Step1，並且把原分解階層 j 加 1。 j 加 1 的動作是因為當設定分解層數少時，有時會發生找不到雜訊功率之情況，因此需要對接收訊號做更高層的分解。

Step4：求出去除雜訊後之接收訊號功率 P_{dr} 和去除雜訊後之雜訊功率 P_{dw} 。

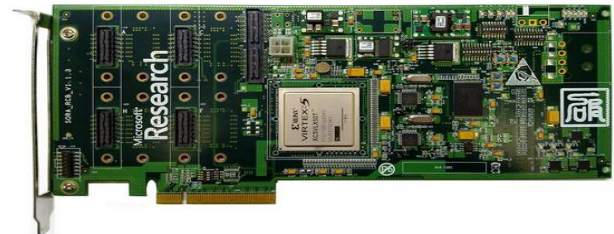
Step5：把 P_{dr} 和 P_{dw} 做比較，得到測試統計 V' 。

Step6： V' 在與門檻值做比較，判定有無訊號。

二、 MICROSOFT SORA 系統簡介

傳統的無線通訊系統中，關鍵的底層操作，例如媒體存取層控制 (MAC) 和實體層 (PHY) 的訊號處理，基本上都是使用專用的硬體晶片來實現。但是一旦專用的硬體晶片設計生產後，就無法修改。這大大地限制了無線技術的發展，使得無線技術的升級需要更久的時間。而軟體無線電則是透過通用的計算平台 (例如 CPU)，利用軟體程式來完成大部分的無線底層功能，也由於是透過軟體實現，因此可以很方便的修改和升級，而且通用處理器的發展速度遠遠超過專用的硬體與處理器。

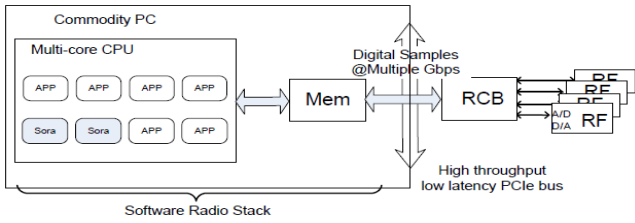
SORA 系統同時採用硬體和軟體技術來達到高速的無線訊號處理。SORA 開發的無線控制板採用最新的 PCIe (PCI Express) 標準，可實現 10 Gbps 以上的傳輸速率，可以滿足大部分無線技術的傳輸需求，如圖二所示。



圖二：SORA 基於 PCIe 的無線介面控制板

2.1 硬體架構

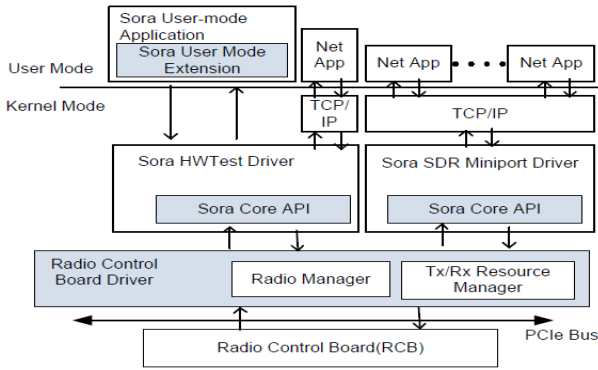
Microsoft SORA 系統主要由四部分所組成，分別為電腦、RCB (radio control board) 板、介面轉換板、射頻子板 (RF front-end) 與天線 [6]。如圖三所示，其中 RCB 板是 SORA 系統中硬體的核模組，它包含了高效能的現場可程式化閘陣列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 晶片、PCIe-x8 的介面以及 256 MB 的第二代雙倍資料率同步動態隨機存取記憶體 (Double-Data-Rate Two Synchronous Dynamic Random Access Memory, DDR2 SDRAM)，因此它擁有高吞吐量與低延遲的特點，並且能夠在射頻子板和電腦的記憶體之間傳輸高保真度的數位訊號。SORA 系統運用電腦的 CPU 來完成所有的訊號處理，所以為了提高執行效率，需要至少 4 核心且時脈在 2.66GHz 以上的電腦，SORA 利用 4 核心 CPU 的多工特性，例如單指令多資料流程 (Single Instruction Multiple Data, SIMD) 與快取記憶體，來提高訊號處理演算法在 CPU 的執行速度，進而滿足即時通訊的要求。



圖三：SORA 系統架構[6]

2.2 軟體架構

RCB 驅動式不僅管理 RCB 板和射頻子板的硬體資源，並且提供 SDR 微小型通訊埠(miniport)驅動程式的傳輸數位波形應用程式介面(Application Programming Interface, API)，如圖四所示：



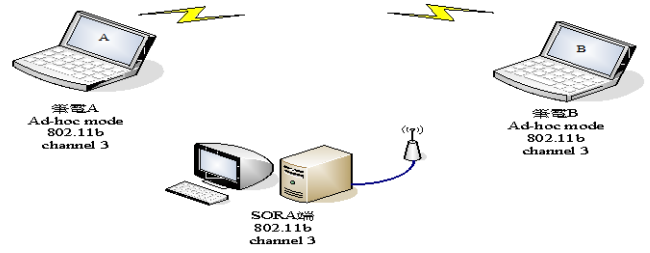
圖四：SORA 軟體架構[6]

在 SORA 軟體開發套件(Software Development Kit, SDK)中，提供了一個名稱為“SoftWifi”的 SDR 微小型通訊埠(Miniport)驅動程式，它可以實現 802.11a/b/g 的通訊協定和實現較低的三層(例:鏈結層(link layer)、媒體存取控制(Media Access Control, MAC)層、實體(physical)層)。在 SoftWifi 中，鏈結層傳輸時會將乙太網路(Ethernet)訊框轉換成 802.11 的訊框，媒體存取控制層在基礎上為有限狀態機(Finite State Machine, FSM)負責處理媒體存取的技術，實體層的部分則包含了所有基頻訊號處理的實現，像是調變、解調、通道監測。

因此 SORA 系統可以被虛擬成無線網卡來做實際的應用，並且通訊協定都已包含在 SORA 系統的驅動程式中。SORA 系統中的驅動程式符合網路驅動程式介面規格(Network Driver Interface Specification, NDIS)，NDIS 主要功能是制定出標準的應用程式介面 (Application Programming Interface, API)來管理網路介面卡(Network Interface Card, NIC)，並且擔任更高層級驅動程式的介面，例如中繼驅動程式與傳輸通訊協定驅動程式。

三、 實驗環境建立

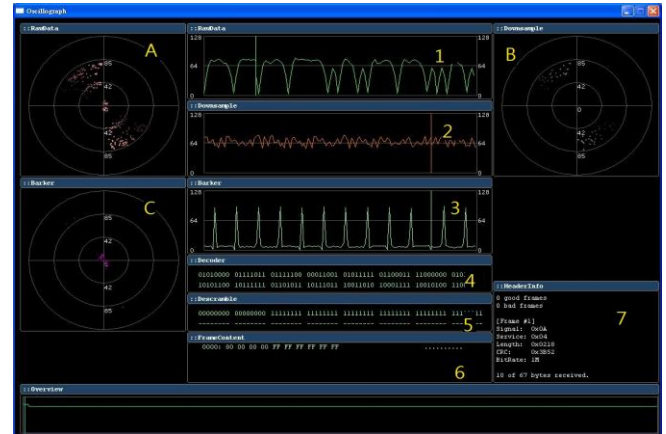
本論文中的實驗主要是利用兩台筆電和 SORA 來呈現感知無線電之動作。實驗環境如圖五所示，將兩台筆電皆設定在無線 ad-hoc 模式 802.11b 的通訊協定下，筆電 A 為伺服器端，筆電 B 為客戶端，兩者進行傳輸封包的動作，而 SORA 端在實驗中被定義為感測用戶，動作為監聽傳輸的封包，並將所擷取的訊號進一步結合演算法來測試效能。



圖五：實驗環境示意圖

四、 實驗結果與分析

在實驗中，我們可以藉由 SORA 內附的 Oscilloscope 來觀測所收到之資料訊號，如圖六所示，可以從中觀測時間內的訊號，像是 1 與 A 為原始資料之振幅與星座圖、2 與 B 為縮小取樣後的振幅與星座圖、3 與 C 為經由 barker despreading 後的振幅與星座圖、4.解映射 (Demapping)與 5.解擾(descramble)後的結果、6.訊框內容和 7.訊框表頭的資訊。



圖六：Oscilloscope 介面圖

在實驗中，我們可以藉由調整筆電網卡不同的傳輸功率，獲得不同的 SNR，如下表I所示：

表 I 調整網卡傳輸功率與 SNR 之關係

網卡傳輸功率	平均 SNR(dB)
高	2.2023
中高	-2.0516
中	-7.5141
中低	-14.2123

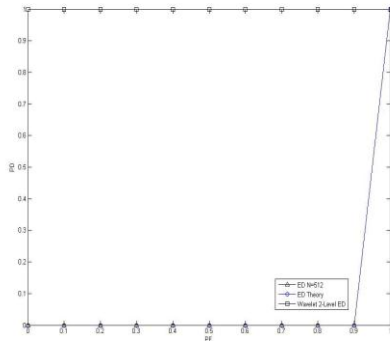
本篇論文模擬部份主要是對偵測器的效能，提供模擬結果和分析，採用接收操作特性(receiver operating characteristic, ROC)曲線，以探討對於不同門檻值在偵測機率和誤報機率之間的關係，來判別偵測器的效能，這代表在頻譜中沒有訊號傳輸的情況下，而頻譜偵測器誤判此頻譜有訊號的機率，和對於有訊號傳輸下，頻譜偵測器偵測到訊號的機率比值。

本論文中定義之理論值為將所有取樣訊號做平均功率運算後的結果，實際值則是將訊號隨機取樣 N 個取樣點後所得的結果，所描繪之曲線分別為套用實際值所跑的

能量偵測器特性操控曲線、套用理論值所跑的能量偵測器特性操控曲線、套用實際值所跑的小波特性操控曲線。圖七為套用其中一個實際訊號的平均訊號雜訊比，取樣點數 N 為 512。離散小波包轉換使用的是 haar 為母小波函數，使用分解階層 j 為 2 階，訊號長度(Signal length)為 10000。模擬參數如表II所示，模擬結果如下：

表II
模擬參數I

Signal length	N	Wavelet Mother	j	$\bar{\gamma}$ Average SNR(dB)
10000	512	haar	1、2	2.2023

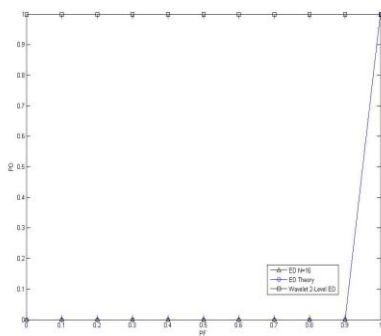


圖七：在 $\bar{\gamma} = 2.2023\text{dB}$, $N = 512$ 之接收操作特性曲線

由上圖七可看出以小波為基礎之去除雜訊演算法擁有良好的偵測效能，但操作特性曲線在 4 個不同的 SNR 值皆相同，因此在只降低取樣點數 N 為 16，如表III所示，其餘模擬參數皆相同的前提下，重新跑模擬，驗證是否程式有出錯，如圖八所示：

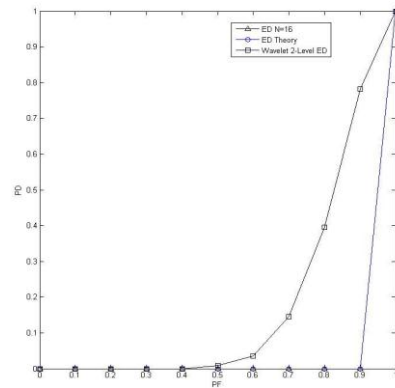
表III
模擬參數II

Signal length	N	Wavelet Mother	j	$\bar{\gamma}$ Average SNR(dB)
10000	16	haar	1、2	2.2023

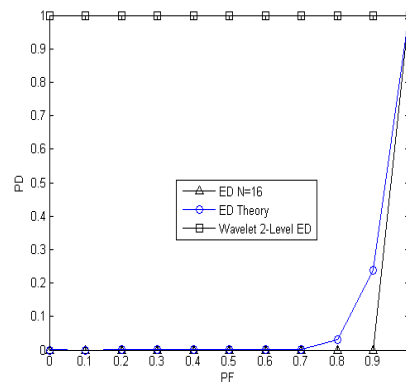


圖八：在 $\bar{\gamma} = 2.2023\text{dB}$, $N = 16$ 之接收操作特性曲線

由圖八發現雖然降低取樣點數，但操作特性曲線仍然不變，考慮到有可能是實際情況的 σ^2 太小，所以直接調整模擬中的 σ^2 參數來驗證程式是否正確。如下圖九和圖十所示，可以發現經由調大 σ^2 的值，理論值與套用實際訊號值之操作特性曲線顯示出來的結果非常接近。



圖九：在 σ^2 為 5, $N = 16$ 之接收操作特性曲線



圖十：在 σ^2 為 0.5, $N = 16$ 之接收操作特性曲線

結論

在模擬結果中，可以看出運用所定義之實際值與理論值操作特性曲線有著些微誤差，但已可看出和理論值比較的結果相當接近，且以小波為基礎之去除雜訊演算法之可適應性能量偵測器，在 σ^2 較大的情況下仍擁有良好的偵測效能。我們可以發現在實際的狀況中，若是 σ^2 較小，則改變取樣點數對於操作特性曲線的影響，會變得不是那麼重大。換而言之，若是在 σ^2 較小的情況，可以不必使用較大的取樣點數，藉此提升系統效率。

參考文獻

- [1] F. F. Digham; M.-S. Alouini, and M. K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2007.
- [2] A. Pandharipande and J.P. Linnartz, "Performance analysis of primary user detection in a multiple antenna cognitive radio," *in Proc. IEEE ICC*, pp. 6482-6486, 2007.
- [3] D. Cabric ; A. Tkachenko and W. Brodersen , "Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection", *in Proc. MILCOM*, pp.1-7, Oct. 2006.
- [4] V. Kostylev, "Energy detection of a signal with random amplitude," *in Proc. IEEE ICC*, vol. 3, pp. 1606-1610, 2002.
- [5] 林鴻宗, "感知無線電下以小波為基礎之去除雜訊演算法之可適應性能量偵測器", 國立東華大學電機工程學系碩士論文, 民國 100 年七月
- [6] "The SORA manual" in <http://research.microsoft.com/apps/pubs>, July 2011.