

# 具有次奈奎斯取樣寬頻稀疏頻譜感測與適應性跳頻之整合感知無線電平台

黃正光<sup>a</sup>、張孟昕<sup>a</sup>、邱育倫<sup>b</sup>、鄧俊宏<sup>a</sup>、張偉勤<sup>a</sup>

元智大學通訊工程學系<sup>a</sup>

中山科學研究院<sup>b</sup>

**摘要** — 本論文提出一感知無線電(Cognitive Radio, CR) 整合平台, 具備對主要用戶做寬頻頻譜感測並進行動態頻譜接進之兩大能力。首先吾人採用次奈奎斯取樣率的多共集取樣(Muti-coset Sampling)機制, 以設計出能做寬頻感測之高效能稀疏頻譜演算法, 並以電腦模擬驗證其次取樣方式及寬頻稀疏頻譜感測結果; 其次在動態頻譜接進技術方面, 吾人採用一「基於時槽同步之可適性跳頻輪動法則設計」(Slotted Adaptive Frequency Hopping Rolling, SAFHR) 之技術, 並在有主要用戶及多個共存感知網路之靜態/動態干擾狀況下, 測試此 SAFHR 機制對主要用戶及其它感知網路迴避碰撞的能力。最後, 吾人將上述多共集取樣寬頻稀疏頻譜感測技術以及在多網多節點情況下的 SAFHR 技術整合, 並透過一基於儀器與 MATLAB 之軟體無線電(Instruments-in-MATLAB Software Defined Radio, IM-SDR)實驗平台進行實測驗證。

## 一、簡介

在感知無線電(Cognitive Radio, CR)中[1]-[3], 由於次級用戶(Secondary user, SU), 或稱感知用戶(Cognitive User, CU))。為了能靈活地避開對主要網路的干擾, CR 必備之兩大能力為頻譜感測(Spectrum Sensing, SS)及動態頻譜接進(Dynamic Spectrum Access)。本論文將針對寬頻稀疏頻譜感測找出擁有低取樣複雜度及高效能的感知無線電寬頻頻譜感測機制, 多共集取樣(muti-coset sampling), 吾人將先以電腦驗證其頻譜感測正確率。頻譜感測之後根據感測結果採取的可適性跳頻動作, 在多網路以及多節點情況下, 結合可適性跳頻即頻率輪動演算法, 以達到頻譜資源的充分利用。最後再將成果植入一硬體實現平台加以驗證, 此平台為一基於儀器與 Matlab 的可程控軟體無線電 (Instruments-in-Matlab Software Defined Radio, IM-SDR), 其核心為 Matlab 軟體, 並利用 Matlab 程式透過 GPIB/Ethernet/USB/Parallel Port 等介面直接控制各種通訊高階儀器如 Tektronix Arbitrary Waveform Generator 420(I/Q DAC), Agilent ESG D3000A(Waveform Generator), Yokogawa VN6000( IQ Demodulator), Yokogawa DL1740EL (Digital Storage Oscilloscope)等, 實際進行無線電收發機的動作, 如此即可在實驗室中呈現出多種 CR 之 Real-World 應用場景及干擾組合, 以真實地驗證驗證本論文所討論之寬頻稀疏頻譜感測之可行性。

## 二、採用次奈奎斯取樣之寬頻稀疏頻譜感測技術

本章節主要是在探討寬頻頻譜感測的方法[4]-[5], 當環境為寬頻訊號時, 為有效降低接收機的取樣率, 故用文獻中多共集取樣(muti-coset sampling) 的方式對稀疏寬頻信號做次奈奎斯速率的取樣(Sub-Nyquist Sampling)。取樣之後, 再利用壓縮感測(Compressed Sensing)的技術, 找出信號中被使用的頻帶, 並視需要把訊號重建恢復。

此一技術是為一個週期性的非均勻次奈奎斯取樣技術, 用於獲取連續時間上的頻譜稀疏訊號, 我們所傳輸的訊號模型  $x(t)$ , 如圖一, 是為多頻帶的訊號分布模型, 範圍介於  $[-f_{NYQ}/2, f_{NYQ}/2]$ , 而  $f_{NYQ} = 1/T$  是奈奎斯取樣率, 在這個範圍內分布的訊號視為主要使用者訊號 (PU), 其最大頻寬設定為  $B$ 。

Multi-coset sampling (MC)是一個周期性非均勻的次奈奎斯取樣技術, 用於稀疏多頻帶信號。首先, 令奈奎斯週期為  $T = 1/W$ , 找一個適合的正整數  $L$ , 使得 MC samplers  $x(t)$  取樣於  $t_{k,i} = (kL + Ci)T$  for

$1 \leq i \leq q, k = 0, 1, 2, \dots, t_{k,i}$  表第  $k$  個週期中之第  $i$  個非均勻取樣點, 時間偏移數  $c_i$  是為小於  $L$  的不同正整

數,  $\{c_i\}_{i=1}^q$  稱為 Multi-coset sampling pattern。系統在

$LT$  時間內收集  $q \leq L$  的取樣點, 使平均取樣率為

$q/LT$  Hz, 週期非均勻的取樣下, 在每個  $L$  分隔

中, 只保留  $q$  個取樣點。圖二為矩陣  $A$  與  $X(f)$  的示意圖,  $S$  為含有非零的值, 可看出稀疏訊號頻譜所在位置。

圖三為模擬的參數設定, 吾人採用多頻帶的訊號模型, 分別產生 QPSK 訊號 ( $f_{c1} = 5$  MHz)、FM 訊號 ( $f_{c2} = 15$  MHz)以及 AM ( $f_{c3} = -10$  MHz)訊號, 各個頻寬皆不可超過次取樣頻率  $f_s$ , 總頻寬為 40MHz。使用 MDL 計算[6]來找出折返點的最小值, 求出共有 3 個 eigenvalues 大於 threshold level, 可得到我們所要感測的 active band 共有 3 個。最後則是重建與頻譜感測的結果, 如圖四為模擬結果, 上方為重建結果, 可看出三種訊號分別重建回原來所在的頻帶上, 下方為頻譜感測的結果,  $L=25$ , 次取樣率為 1.6MHz, 其訊號會被切割成 25 個 band index, 感測出有 3 個 band index 有訊號, AM 在第 7 個、QPSK 在第 16 個而 FM 在第 22 個。

### 三、可適性跳頻演算法則介紹

本章節將探討如何同時避免主要使用者(PU)之靜態頻率干擾(Frequency-Static Interference, FSI)及其它鄰近之感知無線電網路亦共存的情況之動態頻率干擾(Frequency-Dynamic Interference, FDI)之可適性跳頻機制。首先利用平方質數碼(Quadratic Prime Code, QPC)產生所需要之多節點跳頻序列。其次，吾人將利用 Adaptive Frequency Rolling (AFR)方式達到同時避開靜態與動態干擾的需求，接著，將整合前述法則之優點並設計一種為時槽同步可適性跳頻輪動(SAFHR)演算法[7]，此法則除了能夠迴避兩個主要碰撞干擾之外，亦能透過雙層之平方質數碼事先分配節點達到充分利用頻譜、增加頻譜使用效益的功用。

吾人採用並設計一雙層 QPC 跳頻序列與 AFR 結合，並加強其規避 PU 之 FSI 能力，以充分利用頻譜及容納更多之 CR 用戶數目，其名稱為 SAFHR (Slotted Adaptive Frequency Hopping and Rolling)。

首先，設定以下參數：令  $Q(n, l)$  表第  $l$  組跳頻序列的第  $n$  個 QPC 十進位跳頻碼， $p$  為 QPC 之產生質數， $l = ap + b$  代表了選用跳頻序列的指標，其中  $a, b \in \{0, \dots, p-1\}$ ， $(1-a)(1-b) \neq 1$ 。其次，令  $P = p^2 - 1$ ，因此， $Q$  為一個  $PP$  的矩陣， $Q(\cdot, \cdot) \in \{0, \dots, P\} = Z$ 。再令  $R$  為頻率輪動的數目， $\{f_R(m), m=0, \dots, R-1\}$  表  $R$  個可能之輪動頻率，最後，前述之  $P$  參數設為每一次頻率輪動裡的封包數目，亦即每次頻率輪動內之 hopset 頻道數目，故由 QPC 控制選擇後的頻率位移共有  $\{f_Q(m), m=1, \dots, P\}$ ，而所有可用的頻道數目為  $N_f = R \times P$ 。

此 AFR 系統可供多個 CR 微網(Piconet)來使用，在此用  $g$  表微網編號， $g \in \{0, 1, \dots, R-1\}$ ，而每個微網內至多可供  $P$  個使用者使用，針對第  $g$  個微網中的第  $s$  個使用者， $s \in \{1, 2, \dots, P\}$ ， $m, n$  為與  $k$  之關係為  $k = mP + n$ ，其第  $k$  個傳送的封包所使用的頻率  $f_{s,g}(k)$  表示式如下：

$$f_{s,g}(k) = f_R((m+g) \bmod R) + f_Q(Q(n, Q(m \bmod (P+1), s))) \quad (3)$$

以下，吾人舉一例進行電腦模擬：令  $R=5, p=3, P=8$ ，故  $Q$  為一  $8 \times 8$  的矩陣  $Q \in \{0, \dots, P\} = Z$  每個輪動剛好可以將  $p=3$  之 QPC 的 8 組互相正交的跳頻序列用完，而且有 8 種組合，因此，至少每 8 個輪動都會有不同的 QPC 跳頻序列排列組合。

圖五為模擬兩個網路分別有四個使用者在傳輸的情況，由於 PU 相對於 SU 較固定且長時間傳輸，因此只需要透過 CR 頻譜感知技術及可達到迴避，如圖六。

### 四、基於 IM-SDR 實現平台之寬頻頻譜感測與適應性跳頻系統驗證與架設

本章節透過儀器架設之 IM-SDR 平台，測試 Multi-coset 奈奎斯特取樣率寬頻頻譜感測技術與可適性跳頻技術。硬體實現平台整體的模擬網路大環境示意圖如圖七，主要是在寬頻的環境下分為主要使用者(Primary User, 簡稱 PU)，和次要使用者，透過這樣的網路環境架構設計，利用寬頻頻譜感測技術，來求出 PU 之頻譜佔

用情況，並在網路內傳輸做跳頻的動作，看看是否能如期運作並且迴避對主要使用者的碰撞。主要流程大致上可先粗略地分為三個步驟：首先，將欲傳輸的主要使用者訊號經過電腦程式 Matlab TX 處理之後傳送至任意波形產生器(AWG 420)傳送[8]。其二，將資料經過 RF TX 升頻後送出，由 RF RX 降頻並接收。而取樣方式則是將取樣脈波訊號經由另一台電腦程式傳送至任意波形產生器(AWG 520)傳送至示波器接收外部取樣訊號。第三，等傳送資料在示波器經由外部取樣脈波取樣之後，將資料透過電腦程式 Matlab RX 接收回來並做頻譜感測。

針對外部取樣接收訊號，吾人設計了一組取樣訊號上有各個 delay 的取樣脈波訊號，使主要使用者訊號可以去接收外部給的取樣訊號去做取樣，而 Yokogawa DL1740EL 示波器[9]可以做到這一點，如圖八。吾人要將輸入訊號設定為所要做頻譜感測的 PU 訊號。感測到的 4 個 active band 跟原始的輸入訊號比較，可看出位置皆相同，故所感測到的 PU 位置是正確的。

有感測 PU 訊號得結果後，便要根據此頻譜感測結果採取跳頻的動作，在此先把總寬頻 4M 分為 10 個跳頻集合，而所使用的頻段分布是從 2.398GHz 到 2.402GHz，中央頻率為 2.4GHz，故每個集合的頻寬為 0.4M，而每個 Hopset 分別有 8 個通道，Hopset#1 是 2.3980GHz - 2.3983GHz，Hopset#2 是 2.3984GHz - 2.3987GHz...以此類推，跳頻狀況如圖九。而疑似多網情況下模擬傳輸頻段表如下，總共有 Ney#1-Net#7，如圖十。圖十一則為頻譜分析儀上所觀察到的頻譜分布圖，可看到 3 個 PU 訊號所在位置為集合的 3、7、9，也可觀察到其他疑似多網中跳頻的狀況。

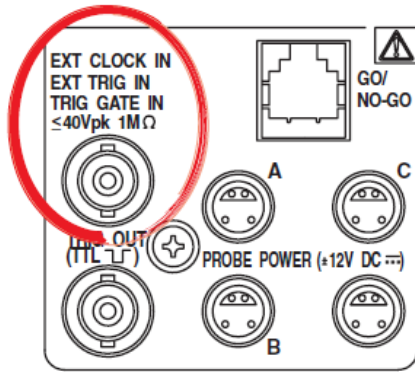
### 五、結論

為了有效地解決頻譜資源匱乏與頻譜使用率之問題，我們探討了寬頻頻譜感測之文獻及可有效實現在硬體平台上之方法 MC Sampling。透過先前寬頻頻譜感測之後，接著是介紹一個適用於多網多節點網路環境下的「基於時槽同步之可適性跳頻及頻率輪動並結合平方質數碼」的演算法則設計，針對兩種在單網多節點下以及多網傳輸下常見之靜態與動態頻率干擾碰撞。結合以上寬頻的頻譜感測技術以及吾人設計的可適性跳頻法則，將可達到迴避靜態、動態頻率干擾以及分配節點使用通道，提升頻譜使用效率之功用。將 Multi-coset Sub-Nyquist Sampling 寬頻頻譜感測方法，做實際的儀器傳輸感測驗證，再根據感測結果完成 SAFHR 跳頻迴避之動作。可證實本論文所探討之技術可針對寬頻作頻譜感測，有效提升頻譜效能，並針對感測到之主要使用者存在時迴避碰撞，準確地完成感測主要使用者與迴避碰撞之運作。

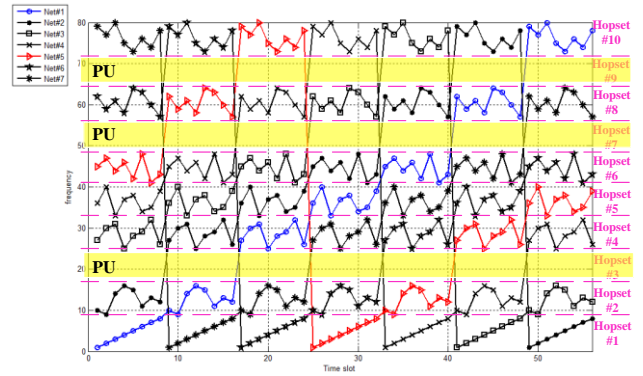
### 六、致謝

本研究承蒙國科會經費補助(編號：NSC-102-2218-E-155-001)，得以順利完成，特此致謝。

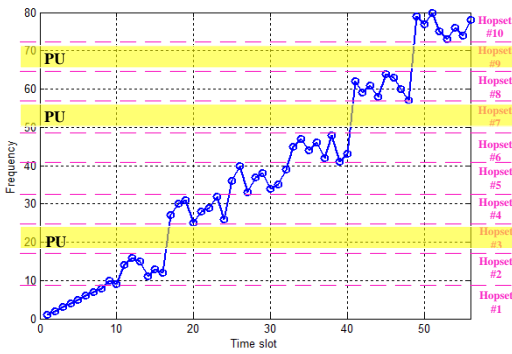




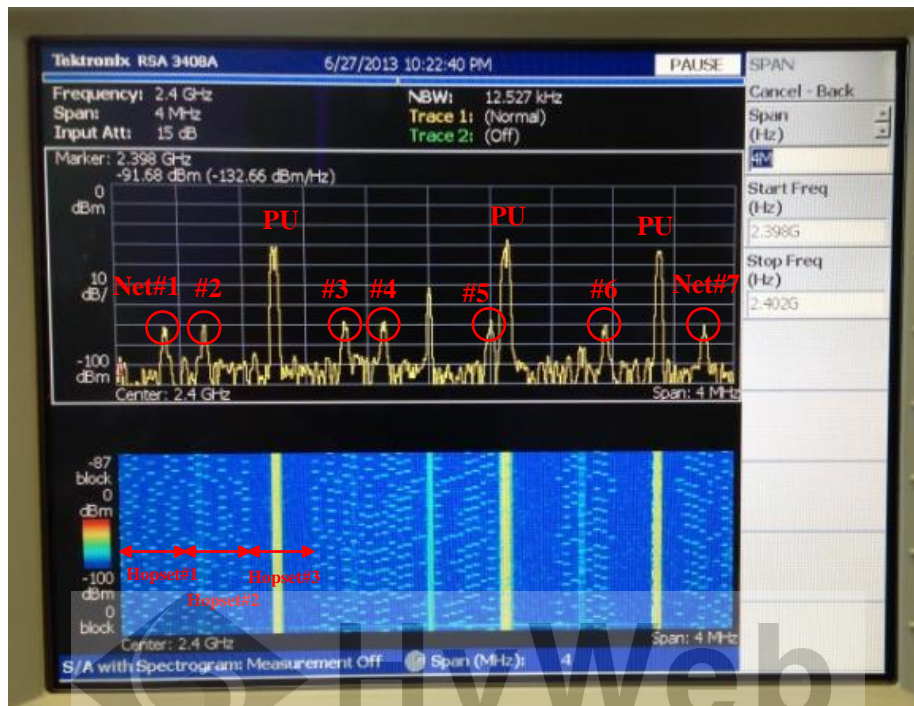
圖八：示波器接收外部取樣設定圖



圖十：擬似多網單節點跳頻傳輸圖



圖九：單網單節點跳頻傳輸圖



圖十一：頻譜分析儀中擬似多網跳頻狀況圖