

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 頻譜規劃配置與管理基礎研究--子計畫一:頻譜共享機制與 感知型無線網路架構設計之研究(3/3) 研究成果報告(完整版)

計畫類別：整合型  
計畫編號：NSC 99-2219-E-009-001-  
執行期間：99年08月01日至100年07月31日  
執行單位：國立交通大學電信工程學系(所)

計畫主持人：唐震寰  
共同主持人：王蒞君  
計畫參與人員：碩士班研究生-兼任助理人員：陳昌&#21894；  
碩士班研究生-兼任助理人員：林佳迪  
碩士班研究生-兼任助理人員：林詠舜  
碩士班研究生-兼任助理人員：周振孝  
博士班研究生-兼任助理人員：陳耿賢  
博士班研究生-兼任助理人員：蔡昂勳

處理方式：本計畫可公開查詢

中華民國 100 年 10 月 06 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫  成果報告  
 期中進度報告

頻譜共享機制與感知型無線網路架構設計之研究

(Spectrum Sharing and Architecture Design for Cognitive Wireless Network)

計畫類別： 個別型計畫  整合型計畫

計畫編號：NSC 99-2219-E-009-001

執行期間：99 年 8 月 1 日至 100 年 7 月 31 日

計畫主持人：唐震寰教授、王蒞君教授

計畫參與人員：陳耿賢、蔡昂勳

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告  完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、  
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年  二年後可公開查詢

執行單位：國立交通大學電信工程研究所

中 華 民 國 1 0 0 年 0 8 月 3 1 日

# 目 錄

摘 要.....	1
審查意見回覆表.....	2
第一章 計畫簡介.....	4
1.1 簡介.....	4
1.2 總計畫各子計畫之相關性與整合.....	5
1.3 章節介紹.....	6
第二章 頻譜共享的頻譜效率.....	7
2.1 導言— 頻譜共享機制.....	7
2.2 通道模型.....	8
2.3 頻譜共享協定.....	8
2.4 感測問題.....	11
2.5 頻譜使用效率分析.....	13
2.6 漸進的效能.....	15
2.7 效能評估.....	17
2.8 結論.....	22
2.9 參考資料.....	22
第三章 利用多重存取改善頻譜效率.....	24
3.1 簡介— 多重存取.....	24
3.2 系統模型.....	24
3.3 多重存取方案.....	27
3.4 數值模擬.....	30
3.5 結論.....	33
3.6 參考資料.....	35
4.1 簡介— 感知網路的干擾.....	36
4.2 系統模型.....	37
4.3 瞬時干擾分布.....	39
4.4 應用.....	47
4.5 數值結果.....	51
4.6 結論.....	55
4.7 參考資料.....	55
第五章 結論及成果自評.....	60
5.1 結論.....	60
5.2 成果自評.....	60

## 摘要

本計劃於 97 年針對感知無線系統，從頻譜共享的觀點，研究支援感知無線系統網路架構及可用頻段，探討感知無線電的誕生將如何影響未來頻譜的使用和管理，同時簡介四種感知無線網路架構（IEEE 802.22、TACT-MAC、SCC41 與 Overlay/Underlay 架構），並且討論感知無線網路的使用情境，最後研究美國 700MHz 頻譜規劃，探討出一種新的頻譜共享模式，將可以在商業和公共安全的利益之間，造就出一個成功的夥伴關係。

98 年度之研究針對感知無線電網路系統，從頻譜管理及頻譜共享的觀點，去探討感知無線的標準化與相關規範，了解感知無線電過去和現在標準化的相關議題，以及討論標準化未來的發展。我們也研究 AD Hoc 網路之感知無線電頻譜管理機制，提出利用感知無線電與動態頻譜存取技術來加強 Ad hoc 網路的頻譜使用率，進而提升通訊品質和提高系統容量。

本年度則延續前兩年對於感知無線電系統增加頻譜使用率的方案，進行進一步的研究與分析；首先以在多頻段/寬頻系統中，主要用戶與感知無線電的用戶會相互干擾，假設每一個使用者僅知道自己的通道或是透過適當的感測，能得知未被使用頻譜的應用情境下，進行了頻譜效率的分析。從結果中可以得知，感知無線電系統在頻譜共享下，相對於傳統的通訊系統最多有 1.6 倍的頻譜使用效率的增益。除此之外，應用多重存取到異質網路的演算法亦能提升頻譜使用效率。另外，由於現實的環境中存在於一些不確定性和在網路中所造成的干擾，讓感知無線的技術充滿挑戰。因此本年度的計畫亦針對感知網路的干擾進行分析，將在主要網路系統效能上的感知網路干擾量化，這將使得對我們未來設計出符合經濟效率的感知無線網路有很大的幫助，日後也較能成功的佈署感知網路。

本年度的研究主要探討感知無線電技術對於頻譜使用效率的影響，我們透過不同的模型去量化其指標，同時比較這些模型環境下的特性與限制，我們發現感知無線電技術的確可以大幅度地改善頻譜使用效率，而透過這些模型的量化比較，相信能夠提供系統規劃者一個好的頻譜管理機制。

### 三年計畫總結：

本計畫從感知無線電的基礎架構、標準化與相關規範、正交分頻多工存取系統中考慮兩階層干擾之超微細胞分散式通道選取機制、AD Hoc 網路之感知無線電頻譜管理機制、感知無線網路應用於頻譜管理之挑戰，到詳細的感知無線電提升頻譜效率的方案與干擾統計模型分析，對於感知無線電系統頻譜管理技術，在提高頻譜效率方面，提供全方位的研究，相信能做為未來頻譜管理政策的重要參考。

關鍵詞: 感知無線電；頻譜共享；頻譜效率；干擾防範；頻譜切換。

## 審查意見回覆表

計畫審查意見	修正回覆說明
<p>本計畫未來執行重點：整合三個子計畫前兩年之成果，歸納頻譜最佳化所應具備之相關要件，將各個子計畫之心得充分整合，俾使台灣創新無線應用模式與頻率共享技術發展不僅與全球產業接軌，更領先各國成為典範提升民眾福祉。將各個子計畫予以統合，研擬相關配套措施，俾決定最適化之終極目標。</p>	<p>本分項計畫從技術層面切入頻譜規劃配置與管理基礎研究，進行頻譜共享機制與感知型無線網路架構設計之研究，給予頻譜規劃配置與管理技術上最佳化的分析與最適化的考量。本研究計畫從第一年感知無線電的基礎架構，第二年感知無線電應用於頻譜管理面臨之挑戰，到第三年不同環境下搭配不同的感知無線電技術對於頻譜效率的詳細個案分析，有一完整且漸進式的研究。同時第一年亦進行了感知無線網路系統架構與頻譜存取控制協定之研究、了解正交分頻多工存取系統中兩階層干擾之超微細胞分散式通道選取機制，第二年，亦進行了感知無線的標準化與相關規範、AD Hoc 網路之感知無線電頻譜管理機制的研究，第三年亦進行了干擾統計模型的分析研究，從多方面之角度都進行了完整的研究；本研究計畫的成果能夠為台灣的創新通訊模式打下重要的基石並將頻率共享技術推向新的里程碑。</p>
<p>目前本計畫成果經部分計畫成員已開始提供主管機關於相關業務(如第 11 梯次調頻廣播電台執照開放)；建議未來本計畫宜有明確之推廣活動，例如組合式拍賣可行性之探討成果、頻譜共享機制等，可以直接以研討會方式與產業界及主管機關交流推廣。</p>	<p>本計畫每年均有參加全國電信研討會進行發表，同時亦有將成果整理投稿於國際期刊論文。</p>
<p>有關頻譜需求預測模型有很多種，但可歸納為以下三種；①使用 ITU 所推薦的 M2078 方式為最佳，但該方式非常複雜。②ITU 在 IMT2000 時所推薦建議的 M1390 方式與③Spectrum 使用效</p>	<p>目前 M2078 的頻譜效率參數部分是使用 ITU 的標準值，也就是此頻譜需求預測模型為採用傳統通訊系統下所得出的結論。然而用此模型來推估 2015、2020 年的頻譜需求並不夠全面及完</p>

率法較為簡單，但是不夠縝密。如果要使用①種模式，需要向主關機關索取各業者之相關資料。亦請本研究團隊參考交通部「我國中、長期無線電頻譜最佳化之規劃」(2/3)委託研究案。

整。近年來隨著感知無線電技術的發展，可以發現許多增加頻譜效率的方案，若未來通訊系統搭配使用這些方案，頻譜的使用效率便會高於傳統的通訊系統，而這些狀況均未被列入交通部「我國中、長期無線電頻譜最佳化之規劃」的考量中。為此，本計畫從感知無線電的基礎架構、標準化與相關規範、正交分頻多工存取系統中考慮兩階層干擾之超微細胞分散式通道選取機制、AD Hoc 網路之感知無線電頻譜管理機制、感知無線網路應用於頻譜管理之挑戰和實用的感知無線電系統方案，均有詳細的分析以及量化的指標，能做為頻譜需求模型補強的重要參考同時給予未來頻譜管理更先進的選擇。

# 第一章 計畫簡介

## 1.1 簡介

無線電頻譜是一種珍貴的資源，然而，目前各國針對「無線電頻譜」均是採用靜態分配管理，這樣的管理政策面臨到頻譜短缺的問題，於是各國開始重視「無線頻譜的使用狀況」。以美國進行30-3000MHz頻譜使用狀況調查與檢討為例，結果發現「頻譜運用最大問題不是匱乏，而是使用效率過低」，如以美國各地區平均使用率僅5.2%，其中使用率最高紐約地區也僅達13.1%。若再進一步檢討則發現，部分頻帶的使用率過高，部份頻帶卻空閒沒有使用，可知固定分配頻譜的使用效率是極不平均。

因此，動態頻譜存取技術被提出來解決這些頻譜使用效率偏低的問題。動態頻譜存取技術的關鍵就是感知無線電技術，該項技術有能力利用一些取巧的方法去使用執照用戶的無線通道及頻譜。透過異質性網路及動態存取技術，感知無線電網路可以提供較高的頻寬給用戶，而且透過動態及有效率地頻譜管理技術，這個目的就能輕易地達成。然而，感知無線電網路還必須克服可用頻譜的變動性以及滿足不同裝置所要求的服務品質。

本研究在 99 年度時，針對感知無線系統，從頻譜共享的觀點，研究了下列四個議題：

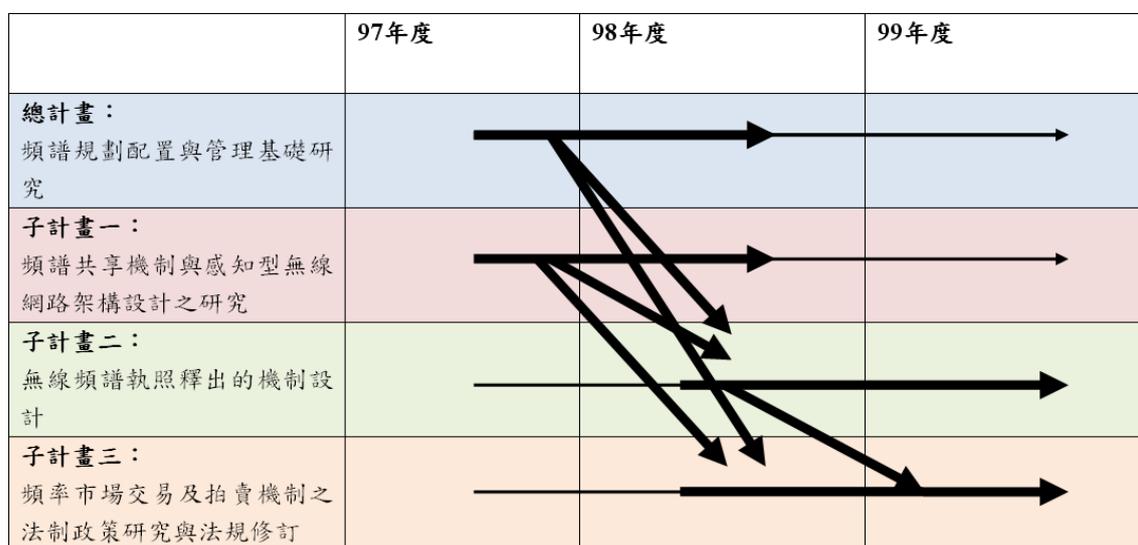
- (1) 感知無線的標準化與相關規範；
- (2) AD Hoc 網路之感知無線電頻譜管理機制；
- (3) 感知無線網路應用於頻譜管理之挑戰。

今年度之研究將延續上一年度之研究，針對感知無線電網路系統，從頻譜管理及頻譜共享之觀點，探討以下三個議題：

- (4) 頻譜共享的頻譜效率；
- (5) 利用多重存取改善頻譜效率；
- (6) 感知網路的干擾。

## 1.2 總計畫各子計畫之相關性與整合

總計畫與各子項計畫間之相關性、預期逐年成果與整合程度以下圖說明之：



- (1) 總計畫以國內外新興通訊技術對頻譜需求現況之分析與資料蒐集為主，以比較法方式進行，詳盡檢視ITU、FCC、OFCOM等國際組織及先進國家之發展現況，與我國已經釋出之頻段進行比較分析，觀察各國頻譜使用及需求之不同所可能造成的問題及產業影響，為支援子計畫二、三之重要基礎研究；
- (2) 子計畫一重點在於支援頻譜共享之感知型網路與感知型無線架構設計，因感知型網路為未來重要之新興技術，可能改變未來頻譜管理及無線通訊產業之商業運作模式，並提供消費者更佳品質之服務，故未來頻譜管理應將頻譜共享機制納入考慮，並將研究成果提供子計畫二、三作為分析之基礎；
- (3) 子計畫二進行基礎機制設計文獻整理、斂核(Nucleolus)拍賣制度設計(J. Rawls' Justice theorem)、及斂核拍賣軟體設計(具誘因匹配的一次性賽局，Java程式開發)等基礎研究工作；
- (4) 子計畫三進行國內外近年頻譜政策與法規之文獻整理，比較分析評估各國模式優缺點和建置最適我國國情之頻譜規劃法規環境雛形。

### 1.3 章節介紹

本計劃第二年之目標在針對感知無線電網路系統，從頻譜管理及頻譜共享之觀點，研究支援感知無線系統網路架構及頻譜使用機制，於第二年的研究成果有三個部份，(1) 頻譜共享的頻譜效率；(2) 利用多重存取改善頻譜效率；(3) 感知網路的干擾，簡介分別如下：

第二章在探討使用感知無線電技術利用未被使用的頻譜增加總系統容量。應用情境設定在多頻段/寬頻系統，而主要用戶與感知無線電的用戶均與不同的接收者進通訊並會受到相互的干擾，同時假設每一個使用者僅知道自己的通道或是透過適當的感測能得知未被使用的頻譜。首先本文量化頻譜共享方案的無線電的頻譜使用效率相對於傳統的無線電的頻譜使用效率的增益，接著推導出本應用情境下感知無線電系統的總頻譜效率，以及最多的成對感知通訊數。

第三章提出一個增加頻譜效率的演算法透過同時存取異質網路，行動基地台可以使用不同的無線存取技術同時存取不同的非干擾網路。這同時存取(例如：無線電存取技術多樣性)行動基地台可以經由最佳化分佈的結果決定他們是否有與多個無線電存取技術連結。為了推導出最佳化的結果，首先使用一個多重存取技術在異質網路中的例子來顯示出多重存取的優勢和在多個無線電存取技術系統中分析多重存取的頻譜效率。透過分析和模擬，顯示出與只選擇一個最好通道品質的網路的垂直切換法(vertical handoff method)比較之下，提出的演算法是有可能達到增加頻譜的功能。

第四章，針對整合一個感知網路的干擾提出一個新的統計模型，解釋感傳程序、次要空間重用協定，以及像 path loss、shadowing、通道衰變這類的環境相關條件。首先，要定義出對於主要使用者的感知網路的干擾，它的特徵函數和累積量。利用截角穩定分布(truncated-stable distributions)定理，來開發針對感知網路干擾問題的統計模型。進一步延伸這個模型，包含功率控制(power control)的效應；並說明如何使用模型，評估整個感知網路系統效能。

最後針對今年的研究成果做個結論及成果自評。

## 第二章 頻譜共享的頻譜效率

本文探討使用感知無線電技術利用未被使用的頻譜增加總系統容量。本文的應用情境設定在多頻段/寬頻系統，而主要用戶與感知無線電的用戶均與不同的接收者進通訊並會受到相互的干擾，同時假設每一個使用者僅知道自己的通道或是透過適當的感測能得知未被使用的頻譜。這些想法的基礎源於頻譜共享的概念。概念相當容易了解；一個感知無線電將會感測系統通道，假如偵測到閒置時，就在此階段進行傳輸。結果如下，雖然感覺很簡單，但是在提出的應用情境下有令人感興趣的特性像是頻譜效率與最多可能的成對感知無線電通訊數。文章同時假定用戶能成功地在可用頻帶上透過自我水填式(selfish water filling)演算法進行傳輸。首先本文量化頻譜共享方案的無線電的頻譜使用效率相對於傳統的無線電的頻譜使用效率的增益，接著推導出本應用情境下感知無線電系統的總頻譜效率，以及最多的成對感知通訊數。

### 2.1 導言— 頻譜共享機制

近期急速成長的個人無線技術導致增加對頻譜資源的需求，為了克服過度擁擠，聯邦通信委員會(FCC)最近提倡佈建無線設備，利用現有資源與主要用戶共存，使其受到最小干擾，大大提升頻譜效率。對頻譜共享目前的做法是分配固定無線系統工作頻段和頻寬，包含發射功率範圍。因此大多數通信系統的設計，利用先進的調變，編碼，多天線和其他技術，在固定頻寬內達到最佳的頻譜效率。另一方面，由於頻譜定位和真實頻譜的使用狀況並不完全一致，若允許更多可彈性使用的頻譜，頻譜短缺情況將可解決。靈活性指的是無線電可找到且適應任何當地可使用的頻譜。新型的無線電能夠在寬的頻段中，穩定的偵測頻譜環境，探查主使用者頻譜的占有性(存在/不存在)以及在不干擾主使用者的情況下使用頻譜。

感知無線電已經被當成將頻譜有效再使用的意思。感知無線電的主要特色是：第二使用者具備探知通訊環境並能配合通訊策略進行個別參數調整以達到最佳化通訊品質及對主使用者干擾最小化。本章主要概念為頻譜共享，頻譜共享第一次在[3]中被提出，它主要表示合併頻譜範圍包含軍用、集群無線電 (trunked radio) 等，並在[4]提出了需要一種全新的方式分配頻譜，頻譜共享的目標是疊加一個新的移動無線電系統提高頻譜效率，而無需改變原本授權系統。另一種日趨流行的技術是分時雙工 (TDD)，同一載體用於兩個鏈接在不同時間傳輸。此類系統的一個性質是，假設在通道不改變過快下，使用相同的頻率，兩個鏈接的通道特性接近相同。目前研究的問題是感知頻譜的實際效能。假設一個非同步的分時雙工 (TDD) 通訊情境，在主使用者和感知無線電的使用者希望與不同的接收者進行通訊時，容易在異質網路(裝置操作在寬頻/多頻的範圍內)受到相互的干

擾。然而，本文強調，在一個子頻段上使用連續水填式只能有一個使用者進行傳輸。特別 OFDM 的無線局域網，如 IEEE802.11a 和 HIPERLAN/2 是適合覆蓋的系統，可頻譜共享，因為在傳輸基礎上他們是非常靈活的頻率管理檢驗感知無線電的總頻譜使用效率，並證明所有感知無線電系統的頻譜效率相對於傳統的通訊系統能夠大幅的提升。文中特別有量化感知無線電與傳統通訊之間的頻譜效率的增益，也就是成對通訊的最大個數雖然感知無線電已經引發業界很大的興趣，但是這項科技中仍有許多基礎理論的問題是無解的。

本章所使用的方法，優點在於簡樸，也就是說有效率的。多少數量的感知用戶允許傳輸和獲得的系統頻譜效率增益是有趣的表現結果。帶來的實際利益頻譜共享技術，這種準確和簡單的系統模型是關鍵。

## 2.2 通道模型

接收端  $R_2$  的基頻離散頻率模型

$$y_R^i = h_l^i \sqrt{P_l^i(h_l^i)} S_l^i + n_l^i \quad \text{for } i=1, \dots, N \text{ and } l=1, \dots, L \quad (1)$$

$h_l^i$  是在子頻帶  $i$  使用者  $l$  的通道衰減過程

$S_l^i$  是在子頻帶  $i$  使用者  $l$  的信號傳遞

$P_l^i$  是在子頻帶  $i$  使用者  $l$  的功率控制(簡化  $P_l^i(h_l^i)$  為  $P_l^i$ )

$n_l^i$  是在第  $i$  個頻帶增加高斯雜訊

假設  $h_l$  在每一個通道衰減長度為常數(相干通訊)，如果衰減緩慢這個假設是合理的，則接收端能夠跟蹤通道變化建立統計模型通道增益  $h_l$  為獨立分布瑞利衰落係數  $L$  和

$$E\{|b_l|^2\} = 1 \text{ for } l = 1, \dots, L$$

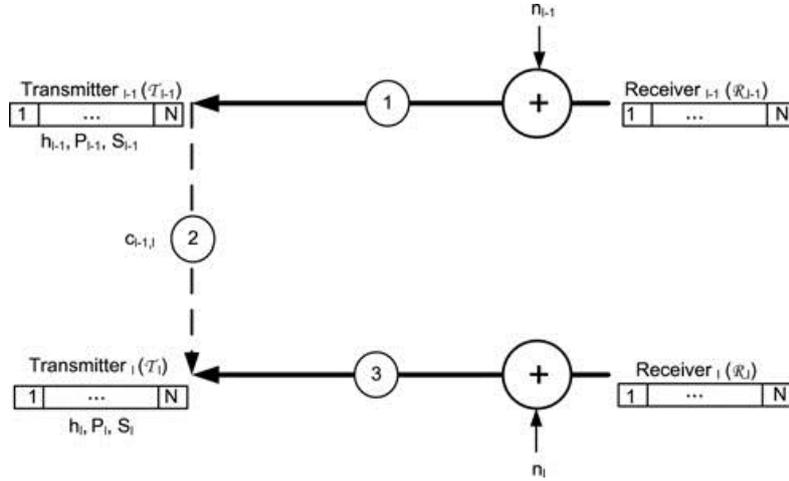
接收端的高斯雜訊為獨立圓對稱且

$$n_l \sim CN(0, N_0) \text{ for } l = 1, \dots, L$$

## 2.3 頻譜共享協定

假設一個非同步的 TDD 通訊情境，在主使用者和感知無線電的使用者與不同的接收者進行通訊時受到相互干擾。擬議的協定很簡單，感知無線電使用者感

測無線環境並調整參數，不論是時間或是頻率。調整訊號在空白頻譜。每一個傳輸者  $T_l$ ,  $l=1, \dots, L$ , 預測接收者的引導序列號  $R_l$ ，用來決定通道增益  $h_l$  (詳見圖 1 中的(1)與(3)之連結)。在 TDD 模式下可以有不同的方式來預測通道。因此，每個使用者  $l$  假設知道自己適當的通道增益  $h_l$  及其他連節的靜態特性。



圖一：N 個子段的寬頻/多頻系統的感知無線電通道

進一步假設通道不改變，從即時估計至即時傳輸。在這裡，特別值得注意的一個目標是採用先聽後說的策略，為了與未來用戶傳輸，可靠地偵測出目前在子頻帶使用的用戶。這方面的知識，可從兩個方式。中央集權的模式，擬議一個系統由第三方獲得資訊來安排用戶，或者由額外的信號通道，用於執行碰撞檢測，這樣感知用戶就不會同時傳輸。特別是，當主使用者一出現於系統中預測自己的通道增益時，感知無線電使用者是隨機來到系統中的，舉例，在 Poisson 過程方法估計自己通道連結。這種假設可以進一步證明當使用者數量有限時，兩個使用者同時傳輸的機會是可以忽略的。因此，主使用者並不能察覺到感知無線電的使用者。主使用者和其接收者以 ad-hoc 的方式進行通訊。同時感知無線電的傳輸者能夠在寬頻中穩定的感測頻譜環境，決定是否與其接收者進行通訊，在不影響主使用者的狀況下。在這種投機取巧的方法下，一個子頻帶一次只會有一個裝置在進行傳輸。這種假設是出於當  $R_l$  發送測試序列給  $T_l$ ，並不會干擾  $T_{l-1}$  for  $l = 2, \dots, L$ 。

本文沿用一般研究的框架分析所達成的效果，在這樣的情況下分析頻譜效率的增益也就是成對通訊的最大個數。帶來的實際利益頻譜共享技術，這種準確和簡單的系統模型是關鍵。此外，為了表現這種系統的性能極限，三種能力的量測，可以在文獻中找到，全面檢討這些能力可以在[6]找到。

有關性能指標提出方法是瞬間容量，每個子頻帶多少 bits 每秒每赫茲，也叫做頻譜效率

$$C_l = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2 \left( 1 + \frac{P_l^i |b_l^i|^2}{N_0} \right), l=1, \dots, L \quad (2)$$

這裡總合了每一個使用者固定通道衰減的瞬時分佈。在所有衰減都沒有延遲下，瞬時容量決定了最大的速度。在此工作下每一對使用者的傳輸功率都有分別規定以達成在最大傳輸速率。當通道的資訊可被傳輸者取得，使用者知道本身通道的增益，因此他們會依照他們的知識來調整傳輸的策略。符合最佳化的功率分配是水填(water filling)分配。如下式

$$P_l^i = \left( \frac{1}{r_0} - \frac{N_0}{|h_l^i|^2} \right)^+ \quad (3)$$

$$[(x)^+ = \max(0, x)]$$

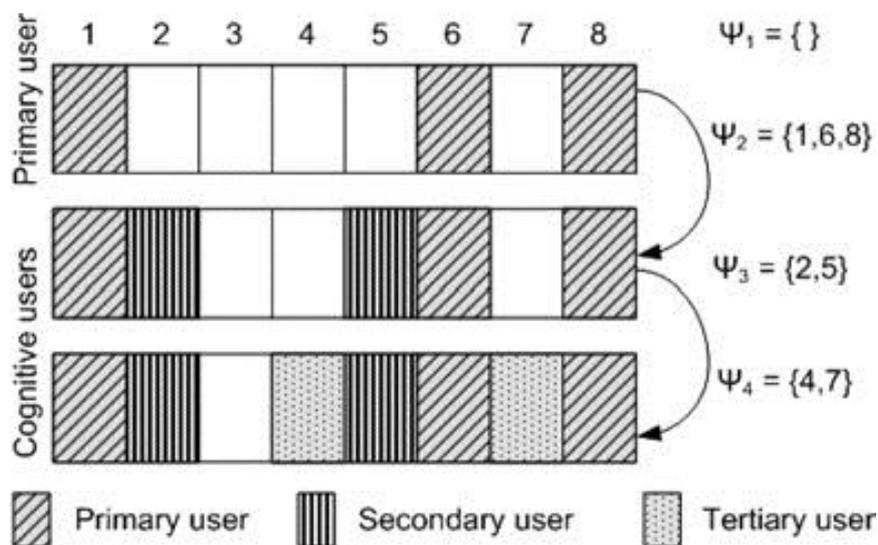
$\gamma_0$  是 Lagrange 的倍數滿足平均功率的限制。

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_l^i = \bar{P};$$

為不失一般性，與大部分的科學期刊論文相同  $\bar{P}=1$ 。注意，雖然水填式(water filling)演算法適用在這分析，但不是這協定的限制。

事實上，如前面提到，實現頻譜共享最重要的工作是授權系統提供一個二進制通道，分配在空間的子頻帶給感知使用者使用。參考圖二。因此不受到水填式(water filling)假設限制，任何二進制的功率控制是有效的。為了簡潔明瞭，用子頻段  $N=8$  來舉例說明。如圖二，主使用者的排序總是高於感知無線電的使用者，主使用者總是可以使用到完整的頻段而感知無線電使用者調整傳輸訊號以填滿空間的頻段。主使用者將先對通道進行處理以使得傳輸為最大效率。如式(I)所示，使用者的通道增益  $h^i$  超過  $\gamma_0 \cdot N_0$  傳輸在子頻段  $i(\psi_2)$ 。第二使用者感測頻譜狀況，並且做出決定只在未被使用的子頻段中做傳輸。當主使用者不再使用頻段時，第二使用者使用互補方式( $\psi_3$ )調整訊號的形式以填滿所多出來的空白頻譜。第三使用者將感測由主使用者與第二使用者使用後剩下的空白頻段進行傳輸

$(\psi_4)$ 。



圖二：一個主使用者及兩個感知無線電使用者在八個子頻段的頻譜共享系統

在早期，感知能力(對使用動態頻率分配、控制功率及其他響應的技術的訊號偵測)已經存在了，只是並未將這項技術訂定標準，但這樣技術已被清楚得看出其希望及潛力的價值，而現在及未來幾乎所有的無線標準都將加入 CR、DSA 和共存技術。整合這些技術的能力也被軍方所注意到。

此外，如果政府部門開放和評估開放新的頻帶明訂其必須使用到 CR 技術時，這些技術也會跟著增加其成熟度。還有許多議題還沒有完全整合併入，如辨識及定義有傷害的干擾，內部的調整、非頻帶間的影響、提供對感知系統的安全性考量及自我和內部系統的共存問題。這些議題都必須在政府當局調整他們政策和規則制定之前簡化。即使如此，現有的標準化工作仍遠遠低於近 10 年前由 Mitola 所推行的原始 CR 概念。現在的感知無線電加入了頻譜狀況的感測、地理環境的感測，資訊型式的通行感測及對流動資料的安全要求等。感知無線電依舊是個熱門的研究領域，更多標準化作業也將被要求整合更多新的發現結果。

## 2.4 感測問題

目前探討的是發射端與接收端兩端之間的通訊(參考圖一的連結一和連結三)，為了分析感測的問題，考慮內部發射端的傳輸(三考圖一連結二)，在這影響下，假設一個一連串的時間週期  $T$  的離散時間基頻模型，每個使用者  $l$  擁有  $N$  個子頻帶， $l=2, \dots, L$ 。

$$y_l^i(k) = c_{l-1,l}^i(k) \sqrt{P_{l-1}^i(h_{l-1}^i)} S_{l-1}^i(k) + n_{l-1}^i(k) \quad (5)$$

$c_{l-1,l}^i(k)$  是時間  $k$  在第  $i$  個子頻帶使用者  $l-1$  傳至使用者的塊狀衰減過程。假設時間夠長，使樣本通道保持不變，並轉至一個新的獨立值， $0 \leq k \ll \beta T$  和  $\beta < 1$  (塊狀衰減模型)。

感知技術取決於所有假設獨特標準的工作裝置，知道其他用戶所使用的導頻序列(pilot sequence)。如上所示，假設頻譜共享的方式只允許一個用戶在子頻帶傳輸。所以接收端使用者  $l$  可表示為(參考圖一連結二)。

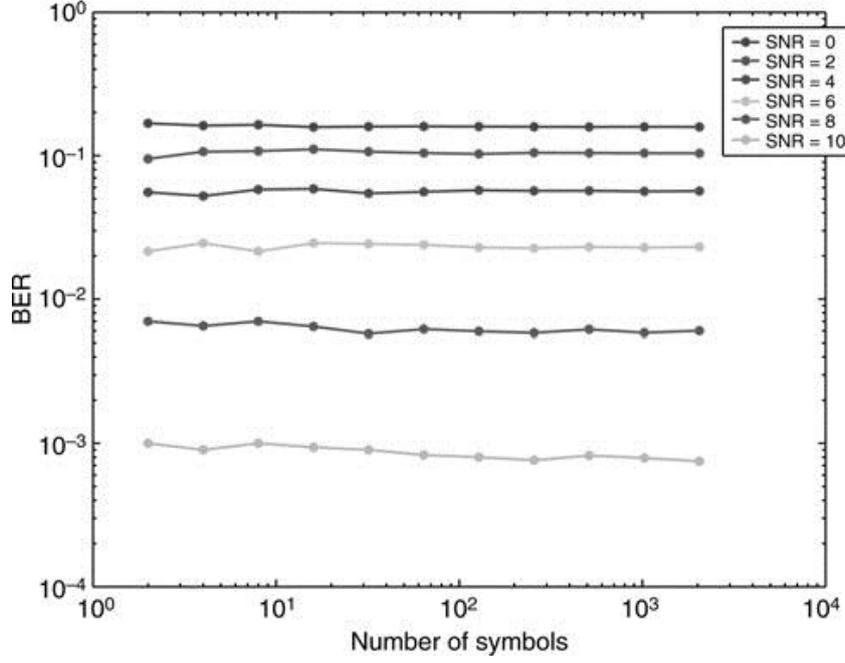
$$y_l^i(k) = \begin{cases} \underbrace{c_{l-1,l}^i(k)\sqrt{P_{l-1}^i}S_{l-1}^i(k)}_{\text{signal}} + \underbrace{n_{l-1}^i(k)}_{\text{noise}}, & \text{if } P_{l-1}^i \neq 0 \\ n_{l-1}^i(k), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

假設  $\beta T$  等於  $M$  且夠大，接收端  $R_l$  感測時間下的平均功率為

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M |y_l^i(k)|^2 = \begin{cases} |c_{l-1,l}^i|^2 P_{l-1}^i + N_0, & \text{if } P_{l-1}^i \neq 0 \\ N_0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

為了得知未被使用的頻譜，感知使用者必須比較接收功率和雜訊功率  $N_0$ 。

如果假設  $M \rightarrow \infty$ ，在低信噪比下，這個方法變得沒有效率(圖三)。



圖三：BER 對信號 M 的關係圖 (分貝)

這種技術的品質將因為雜訊判斷不夠精準而衰退。在這種檢測的主要困難是在頻譜共享的機制下取得良好的雜訊估計，需要一個感測通道方法，不斷地感測。因此，進行檢測通道需具有非常高的正確檢測率。(保證非常低的機率與主系統的干擾)[11]文中描述頻譜共享協定，所有感知用戶在感知通道執行感測。在[12]已經推導了在特定的協方差矩陣主系統 (arbitrary primary system's covariance matrix)，一般情況下，感測與錯誤機率的數學公式。

## 2.5 頻譜使用效率分析

感測到由使用者 1 所在使用的子頻段

$$\Psi_l = \{i \in [1, \dots, N]; P_{l-1}^i \neq 0\} \quad (8)$$

$\Psi_l$  有下列特性:

$$\begin{cases} \Psi_l = \emptyset, \\ \bigcup_{l=1}^{L+1} \Psi_l \subseteq [1, N], \\ \bigcap_{l=1}^{L+1} \Psi_l = \emptyset \end{cases} \quad (9)$$

使用者 1 使用 N 個子頻段中每一子頻段的頻譜效率為

$$C_{l,N} = \frac{1}{\text{card}(\Omega_l)} \sum_{i \in \Omega_l} \log_2 \left( 1 + \frac{P_l^i |h_l^i|^2}{N_0} \right) \quad (10)$$

其中  $\Omega_l$  表示為使用者 l 感測到空間的頻段

$$\Omega_l = \left\{ i \in [1, N] \cap \overline{\bigcup_{k=1 \dots l} \Psi_k} \right\} \quad (11)$$

N 個子頻段中使用者 l 在最佳傳輸速率下所進行的功率分配是用來解決最佳化問題的解答:

$$\max_{P_l^1, \dots, P_l^{\text{card}(\Omega_l)}} C_{l,N}, \quad \text{for } l=1, \dots, L$$

取決於每個子頻帶功率的限制

$$\begin{cases} \frac{1}{\text{card}(\Omega_l)} \sum_{i \in \Omega_l} P_l^i = 1, \\ P_l^i \geq 0, \end{cases} \quad (12)$$

I 為最佳化功率分配的結果。系統所允許的最多使用者數 L 必須滿足  $\text{card}(\Omega_l) \neq 0$  的條件。

$$\Phi_{l,N} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i \in \Omega_l} \log_2 \left( 1 + \frac{P_l^i |h_l^i|^2}{N_0} \right) \quad (13)$$

乘上(13)除上  $\text{card}(\Omega_l)$  可得

$$\Phi_{l,N} = \frac{\text{card}(\Omega_l)}{N} \cdot C_{l,N} \quad \text{for } l=1, \dots, L \quad (14)$$

(請注意, 因為主要用戶中享有的全部頻寬, 所以  $\text{card}(\Omega_l) = N$ ) 當  $l=1$  時為例外,

主使用者的通道容量不需經過認知。 $\Delta_{l,N}$  為使用者 l 對於 N 個子頻段的頻段增益因子, 亦即:

$$\Delta_{l,N} \equiv \frac{\text{card}(\Omega_l)}{N} \quad \text{for } l=1, \dots, L \quad (15)$$

頻段增益因子代表使用者 l 所佔據的一小部分。使用者 l 的每一段頻譜效率可以表示成:

$$\Phi_{l,N} = \Delta_{l,N} \cdot C_{l,N} \quad \text{for } l=1, \dots, L \quad (16)$$

N 個的子頻段系統對於每一個使用者的頻譜效率為:

$$\Phi_{\text{sum},N} = \sum_{l=1}^L \Phi_{l,N} \quad (17)$$

## 2.6 漸進的效能

以下為寬頻的效能研究( $N \rightarrow \infty$ )。在有限的子頻段下使用者 1 的通道容量為

$$C_{l,\infty} = \int_0^\infty \log_2 \left( 1 + \frac{P_l(t) \cdot t}{N_0} \right) \cdot f(t) dt, \\ \text{for } l = 1, \dots, L \quad (18)$$

$P_l$  受到平均的限制

$$\int_0^\infty P_l(t) \cdot f(t) dt = 1 \quad (19)$$

本篇的研究沒有限定，所以從現在起，假設通道的增益是獨立的瑞利分佈。本文採用的方法得到的結果適用任何不同機率分布函數的通道模型，因此  $f(t)$  可被適當的機率分數函數代替。在獨立的瑞利分佈影響，使用者 1 的頻譜效率為

$$C_{l,\infty} = \int_0^\infty \log_2 \left( 1 + \frac{P_l(t) \cdot t}{N_0} \right) \cdot e^{-t} dt, \quad \text{for } l = 1, \dots, L \quad (20)$$

$P_l$  受到平均的限制

$$\int_0^\infty P_l(t) \cdot e^{-t} dt = 1 \quad (21)$$

$\gamma_0$  是 Lagrange 的倍數滿足下式：

$$\frac{1}{r_0} \int_{r_0 \cdot N_0}^{+\infty} e^{-t} dt - N_0 \cdot E_i(r_0 \cdot N_0) = 1 \quad (22)$$

( $Ei(x)$  是指數積分函數，定義為

$$Ei(x) = \int_x^{+\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt$$

給定  $\gamma_0$  才能解得根，數值結果在第七節， $\gamma_0$  落在區間  $[0, 1]$  當  $\gamma_0$  增加則  $N_0$  減少。

另一方面當  $\gamma_0 \rightarrow 1$  由(22)可得到很好的信噪比(SNR)。此外，使用者 1 的頻譜效率可用下式計算：

$$\begin{aligned}
C_{l,\infty} &= \int_0^{\infty} \log_2 \left( 1 + \frac{P_l(t) \cdot t}{N_0} \right) \cdot e^{-t} dt \\
&= \int_{\gamma_0 N_0}^{\infty} \log_2 \left( 1 + \frac{\left( \frac{1}{\gamma_0} - \frac{N_0}{t} \right) \cdot t}{N_0} \right) \cdot e^{-t} dt \\
&= \int_{\gamma_0 N_0}^{\infty} \log_2 \left( \frac{t}{\gamma_0 \cdot N_0} \right) \cdot e^{-t} dt \\
&= \frac{1}{\ln(2)} \cdot E_i(\gamma_0 \cdot N_0) \quad (23)
\end{aligned}$$

為了要用頻譜效率來區分系統的效能，頻寬  $W$  為通道容量的其中變數：

$$\begin{aligned}
C_{l,\infty}(W) &= \frac{1}{W} \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \log_2 \left( 1 + \frac{P_l(f) \cdot |H_l(f)|^2}{N_0} \right) df \\
&(24)
\end{aligned}$$

由 20 與 24 式可以得出頻率變化  $f$  與通道增益  $t$  的特性，即：

$$f = -W \cdot e^{-t} + \frac{W}{2}, \quad (25)$$

和之前定義相似，定義通道增益因子  $\Delta_{\infty}$  為使用者  $l$  與  $l+1$  在有限子頻段中總頻寬為  $W$  感測到空白頻譜之間的比值：

$$\Delta_{\infty} \equiv \frac{\Delta f}{W} \quad (26)$$

$\Delta f$  表示為衰弱增益(25)低於臨界值  $\gamma_0 N_0$  的頻率區間。

$$\Delta_{\infty} = 1 - \exp(-\gamma_0 \cdot N_0) \quad (27)$$

推導適當的空白頻段，當式(18)中  $t \in [0, \gamma_0 N_0]$  時可得：

$$\Phi_{l,\infty} = \Delta_{\infty} \cdot C_{l,\infty} \text{ for } l = 1, \dots, L \quad (28)$$

與子頻段個數為固定時的狀況相似。 $l=1$  即主使用者，頻譜使用效率不需經過認知，其通道容量為  $C_{1,\infty}$ 。量化頻譜使用效率增益能夠看出感知無線電相較於傳統無線電之間的價值。依著下面的步驟可以得出每個使用者的頻譜使用效率，並以  $C_{1,\infty}$  作為變數基礎：

$$\Phi_{l,\infty} = \Delta_{\infty} \cdot C_{1,\infty} \text{ for } l=1,\dots,L \quad (29)$$

L 個使用者所有漸進式的頻譜使用效率為

$$\begin{aligned} \Phi_{sum,\infty} &= \sum_{l=1}^L \Phi_{l,\infty} \\ &= \sum_{k=0}^{L-1} \Delta_{\infty}^k C_{1,\infty} \\ &= \underbrace{\frac{1-\Delta_{\infty}^L}{1-\Delta_{\infty}}}_{\geq 1} \cdot C_{1,\infty} \quad (30) \end{aligned}$$

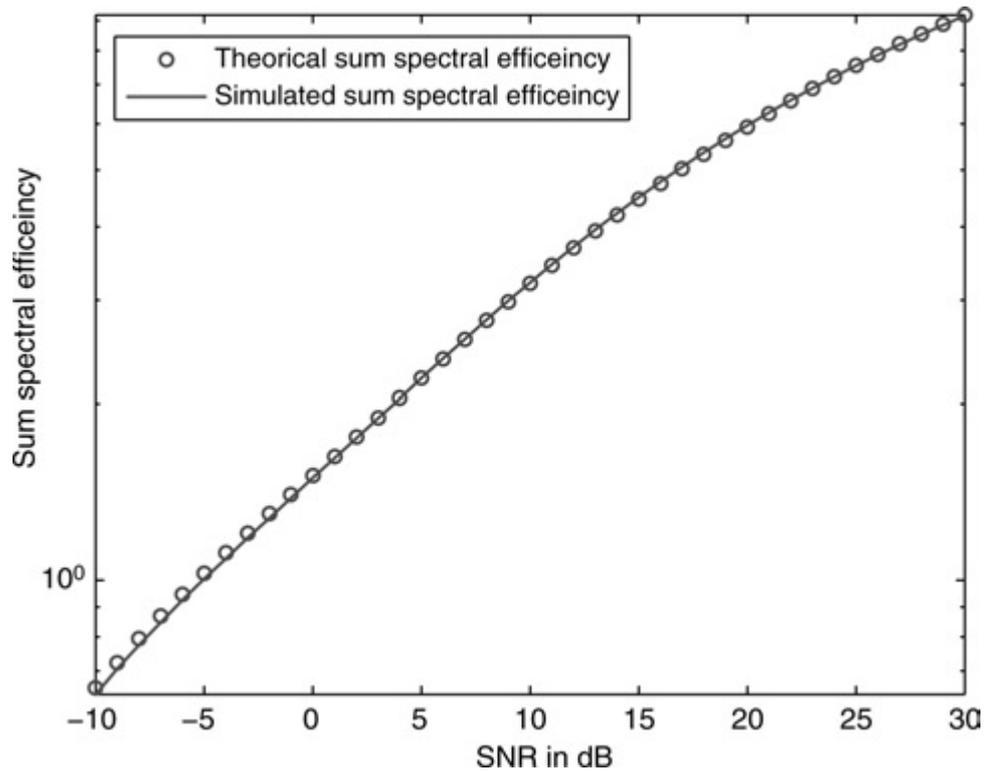
因此感知無線電系統的總頻譜使用效率是遠遠的大於沒感知的  $C_{1,\infty}$ 。感知無線電系統的總頻譜效率總是比傳統沒有感知能力的通訊系統好，此結果再次強化了未來對於感知無線電的興趣。將  $C_{1,\infty}$  帶入 (16) 式，可以得到總頻譜使用效率如下：

$$\Phi_{sum,\infty} = \frac{1}{\ln(2)} \cdot \frac{1-\Delta_{\infty}^L}{1-\Delta_{\infty}} \cdot E_i(r_0 \cdot N_0) \quad (24)$$

研究結果令人高興，只要知道通道增益和 SNR 就可以推導出使用感知無線電後提升的頻譜效率。

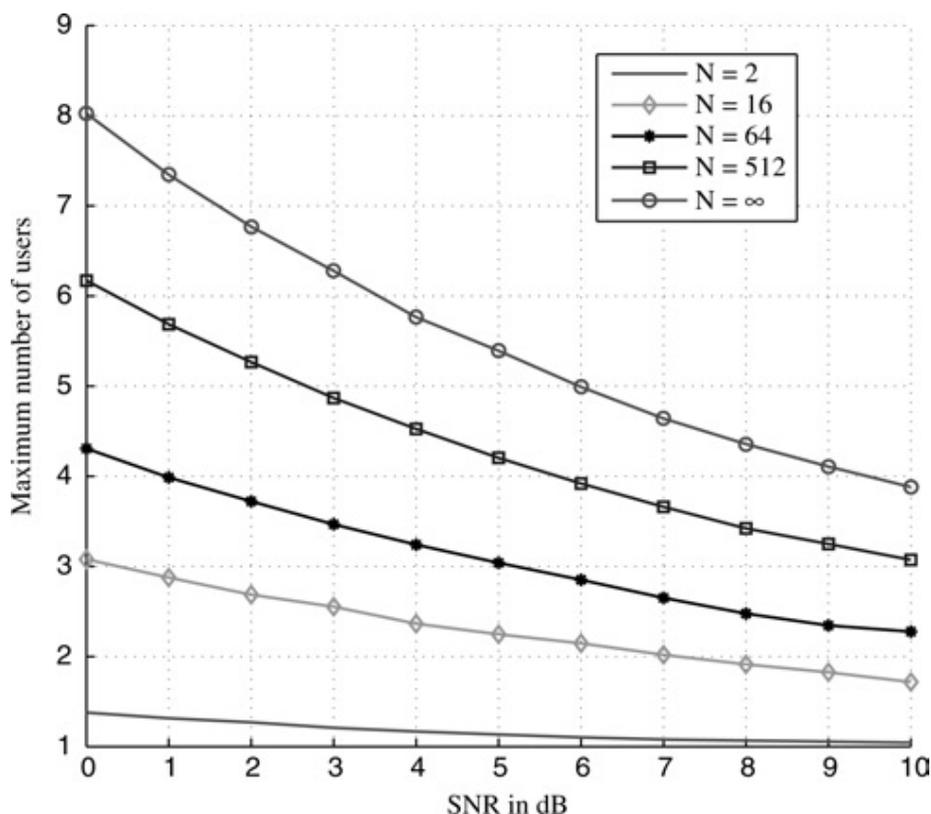
## 2.7 效能評估

將總頻譜使用效率的理論值(24)與模擬值(12)進行比較以驗證每一節方法的正確性。模擬 L 每位使用者均處於相同且獨立分佈 Rayleigh 的通道並且能夠完全的感測到空白的子頻帶。圖四證明了漸近分析，即時適當的 N 個子頻帶 (N=16)，很明顯的總和頻譜效率(17)與(31)相符。此外，理論上的使用者最大個數並沒有限制，只是 L 必須滿足  $\text{card}(\Omega_l) \neq 0$  的條件，否則第 L 使用者通道效率將被忽略。



圖四：比較總頻譜效率的理論值及模擬值當  $L=5$  及  $N=16$

圖五為在不同子頻帶數  $N$  下最大使用者數  $L$  與接收到的每個資訊片段  $E_b / N_0$  的訊號能量關係圖。從中可以發現，當允許的使用者越多時，需要的子頻帶也越多，這樣的情形在  $E_b / N_0$  低時非常明顯。舉例，在執照頻譜的傳輸訊號能量為 8dB，有 2048 個子頻段時，最多可允許 4 位感知無線電使用者共同。在[15]，分析五個使用者在不同的總和頻譜效率下的信噪比函數。在低信噪比情況，頻譜效率相較於傳統沒有感知系統明顯提高，在高信噪比情況，最大的總和頻譜效率達到  $C_{1,\infty}$ 。



圖五：在不同子頻段個數  $N$  下的最大使用者個數

本文注重在總和頻譜效率增益  $E_b/N_0$ 。 $E_b/N_0$  和頻譜效率不同的特點在於限制的頻寬下所需要的能量。這樣做是為了找到最佳的每個訊息傳輸能量和頻譜效率。每個資訊接收的能量，能更有效比較不同配置的基本限制結果，而不是 SNR。將(23)，代入  $E_b/N_0$ ，主要用戶的頻譜效率為

$$C_{1,\infty} = \frac{1}{\ln(2)} \cdot E_i \left( \frac{\gamma_0}{E_b / N_0 \cdot C_{1,\infty}} \right) \quad (32)$$

在這情況，頻譜效率的明確結果是不可靠的。藉由(32)在圖六畫出總和頻譜增益函數。這裡的目標是量化一對一的共享頻譜效率增益。圖六由二分法演算法獲得模擬結果。配置有一個主要用戶和四個感知用戶，最大的頻譜效率增益不能超過

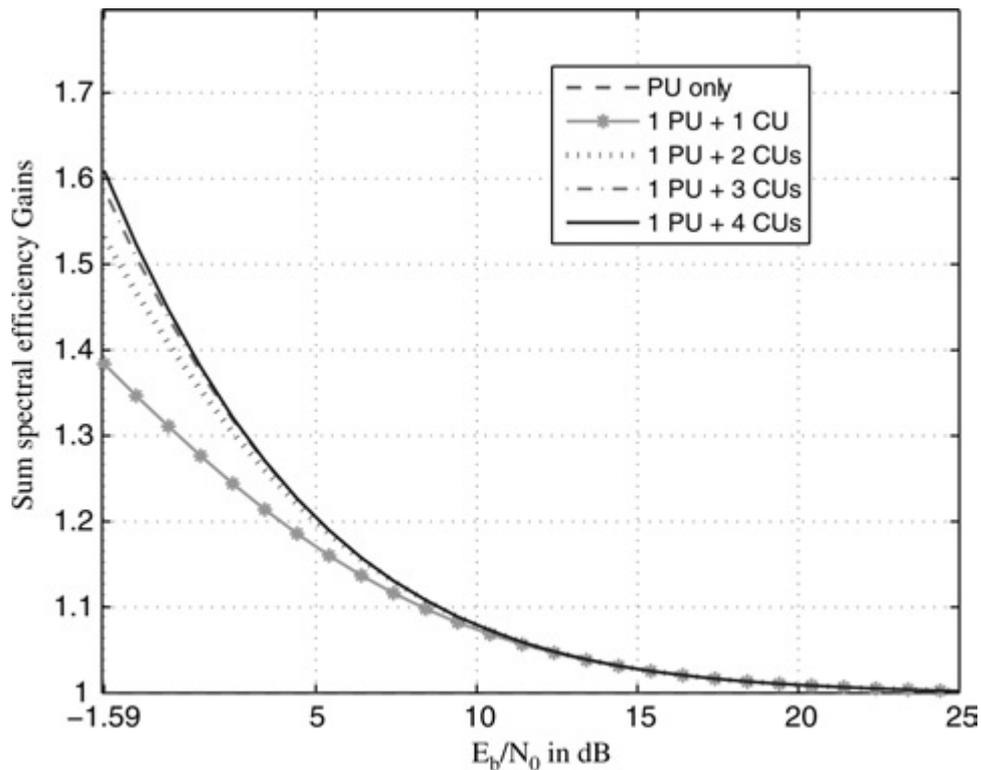
60%。如果主要用戶享用全部頻帶， $E_b/N_0$  就增加。在高  $E_b/N_0$  的情況， $\frac{1}{\gamma_0}$  大

於  $\frac{N_0}{|h|^2}$ ，每個子頻帶得到更多的能量。為了繼續進行進一步的分析，與沒有感知用戶的傳統系統做比較。總和頻譜效率比較而言，考慮進行以下兩個情況：

• 沒有感知無線電情況(NCR)：主要用戶享有全部頻寬，每子頻帶的平均功率限制為

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i^i = L \cdot P \quad (33)$$

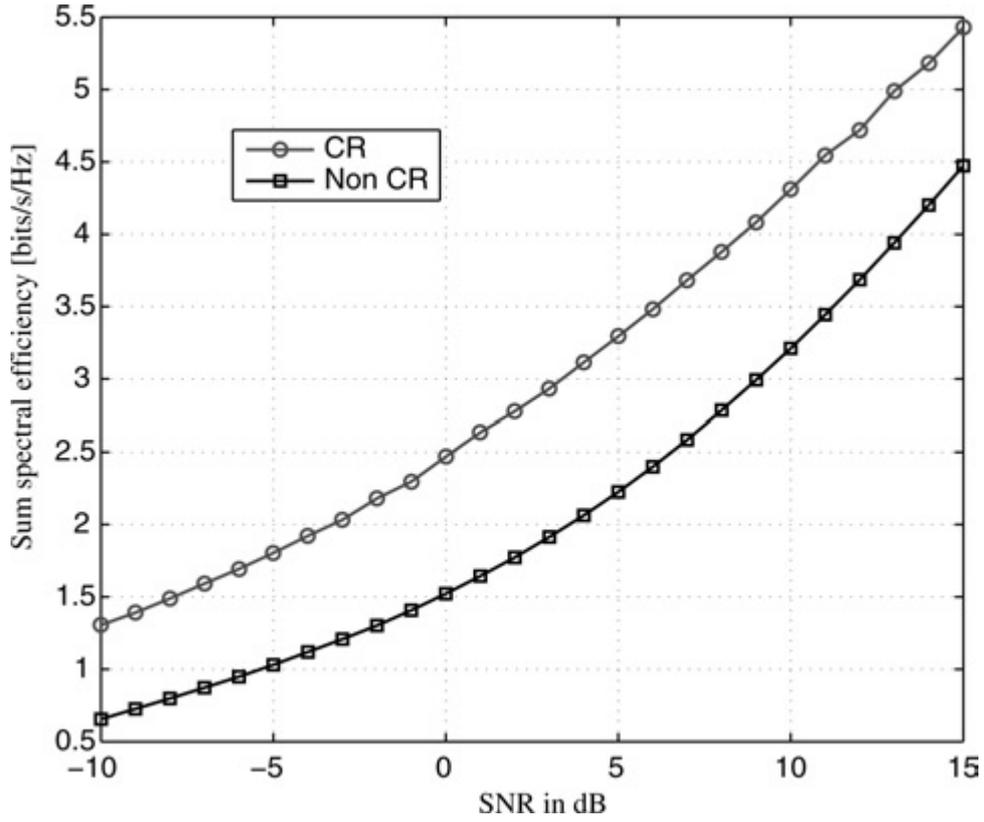
L 為在 SNR 最大數量的使用者。



圖六：一個主使用者與不同個數的感知無線電使用者的總頻譜效率增益

主要用戶可以根據 N 子頻帶，以增加乘載量大小。

• 感知無線電情況：L-1 個感知用戶與主要用戶共同使用 N 個子頻帶。靠每個子頻帶的限制能量來增加每位使用者的乘載量。圖七驗證預期，由(30)分析。因為多樣的增益，所以頻譜共享的結果總是比傳統要來的好，特別是頻譜共享系統實現 1 bit/秒/赫茲，勝於 NCR 系統。



圖七：N=512 時，有感知無線電技術與無使用感知無線電技術的總頻譜效率

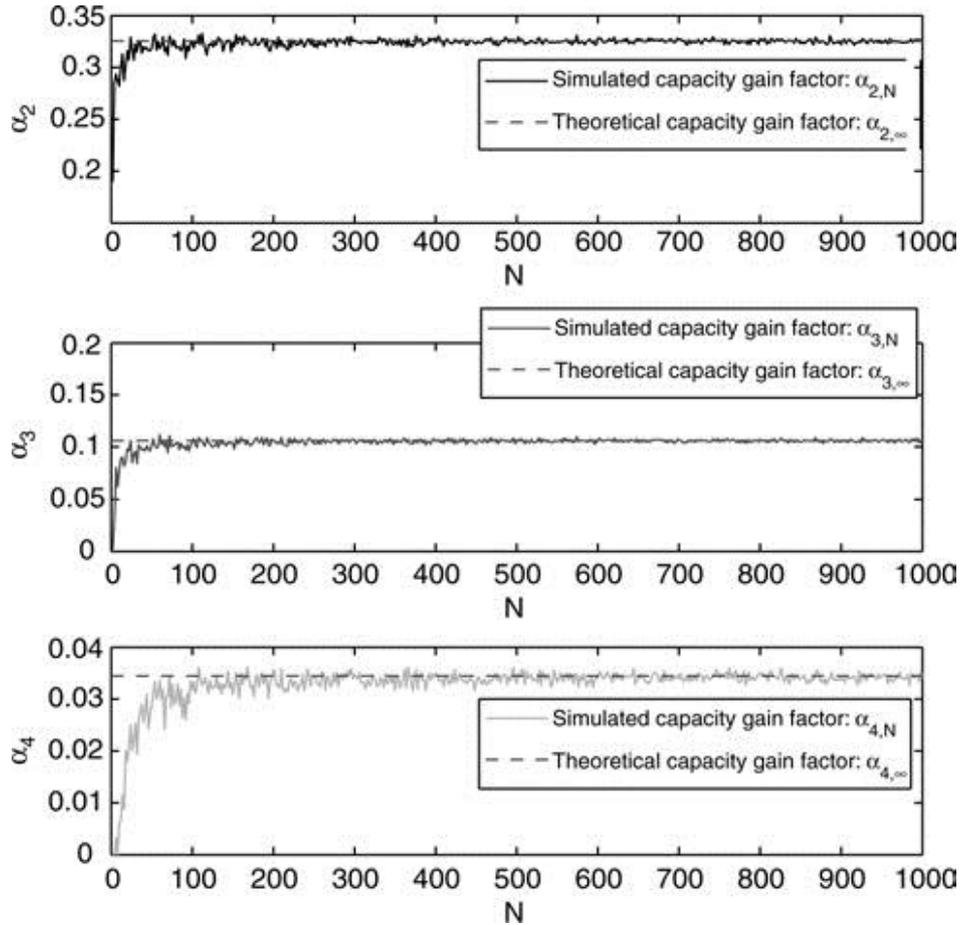
現在開始考慮頻帶因素的增益情況，量化五個使用者不同配置的頻譜效率增益，研究如何讓頻譜效率增益收斂至理論值一。先寫下每個使用者  $l$  的頻譜效率

$$\Phi_{l,\infty} = \alpha_{l,\infty} C_{1,\infty}, \text{ for } l=1, \dots, L \quad (34)$$

且

$$\alpha_{l,\infty} = \Delta_{\infty}^{l-1}, \text{ for } l=1, \dots, L \quad (35)$$

$\alpha_{l,\infty}$  為主要用戶對使用者  $l$  的頻帶因素的增益。圖八是一個系統有四個感知用戶的數值模擬結果。當 SNR=10dB，比較每位使用者  $l$ ，利用(14)得到  $\alpha_{l,N}$  的模擬值和(35)的理論值，得知當  $N$  增加，頻帶因數的增益趨近  $\alpha_{l,\infty}$ ， $\alpha_{2,N}$  接近理論值當使用者是三或四個。



圖八：當 SNR=0dB 時，頻段因子增益的收斂值

## 2.8 結論

頻譜共享這種新的方法能夠在沒有犧牲已憑證註冊的頻譜使用者的傳輸品質情況下，讓更多使用者獲得空間的頻譜使用。文章中有量化使用感知無線電對於傳統無線電裝置頻譜效率的增益。可以發現雖然頻譜共享的概念相當簡單，但頻譜共享的頻譜使用效率比起傳統的頻譜使用效率高出許多。模擬結果證實頻譜共享方案能提升頻譜效率的理論並同時得出頻譜共享方案在頻譜效率上比起傳統的頻譜使用效率可以得到多少增益。

## 2.9 參考資料

- [1] Federal Communications Commission: "Cognitive Radio Technologies Proceeding ( CRTP)," available at: <http://www.fcc.gov/oet/cognitiveradio/>
- [2] MITOLA J. : "Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio." Doctor of Technology, Royal Inst. Technol. (KTH), Stockho

Im, Sweden, 2000

- [3] MITOLA J. : “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications”. Mobile Multimedia Communications (MoMUC 1999), New York, November, 1999
- [4] WEISS T., JONDRAL F. : “ Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency,” IEEE Commun. Mag. , 2004, 42 , (3)
- [5] HADDAD M. , DEBBAH M. , HAYAR A.M. : “Distributed power allocation for cognitive radio”. Proc. IEEE ISS PA, Sharjah , United Arab Emirates, February 2007
- [6] BIGLIERI E. , PROAKIS J. , SHAMAI S. : “Fading channels: information-theoretic and communication's aspects”, IEEE Trans. Inf. Theory, 1998, 44 , (6), pp. 2619 – 2692
- [7] TSE D. , VISWANATH H.P. : “ Fundamentals of wireless communication” (Cambridge University Press, 2005)
- [8] COVER T.M., THOMAS J.A. : “Elements of information theory “ (Wiley, 1991)
- [9] CAI K.V. , PHAN V. , O’CONNOR R.J. : “ Energy detector performance in a noise fluctuating channel”. IEEE Military Communications Conf., October 1989 , vol. 1, pp. 85 – 89
- [10] VAN TREES H.L. : “ Detection, estimation , and modulation theory: radar-sonar signal processing and Gaussian signals in noise-part III” (Wiley, 2001, 2nd edn.)
- [11] WEISS T. , HILLENBRAND J. , KROHN A. , JONDRAL F. :”Efficient signaling of spectral resources in spectrum pooling systems”. Proc. SCVT, Eindhoven, Netherlands , 2003
- [12] HILLENBRAND J. , WEISS T. , JONDRAL F. :”Calculation of detection and false alarm probabilities in spectrum pooling systems”, IEEE Electron. Lett. , 2005, 9 ,(4), pp. 349 – 351
- [13] GRADSHTEYN I. , RYZHIK I. : “ Tables of integrals, series, and products” (Academic, New York, 1980)
- [14] VERDU S. : “Spectral efficiency in the wideband regime “, IEEE Trans. Inf. Theory, Special Issue on Shannon Theory: Perspective, Trends and Applications , 2002, 48 , pp. 1319 – 1343
- [15] HADDAD M. , DEBBAH M. , HAYAR A.M. : “Spectral efficiency for cognitive radio systems”. Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. ( GLOBECOM 2007), Washington, DC, USA, 2007

### 第三章 利用多重存取改善頻譜效率

本文提出一個增加頻譜效率的演算法透過同時存取的異質網路，行動基地台可以使用不同的無線存取技術同時存取不同的非干擾網路。這同時存取(例如：無線電存取技術多樣性)行動基地台可以經由最佳化分佈的結果決定他們是否有與多個無線電存取技術連結。為了推導出最佳化的結果，首先本文使用一個多重存取技術在異質網路中的例子來顯示出多重存取的優勢和在多個無線電存取技術系統中分析多重存取的頻譜效率。透過分析和模擬，顯示出與只選擇一個最好通道品質的網路的垂直切換法(vertical handoff method)比較之下，提出的演算法是有可能達到增加頻譜的功能。因此，提出的多重存取演算法可以視為一個在異質環境裡得到更多頻譜效率的可行結果。

#### 3.1 簡介— 多重存取

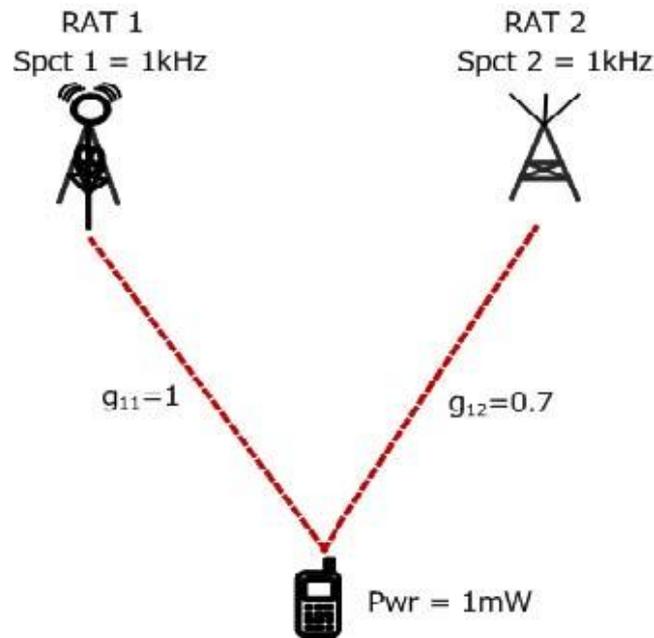
下一代的無線通訊系統在異質網路裡需要提供多種普遍存在的服務。在混雜的環境裡，頻譜管理技術在移動使用者與使用者之間對於可用的稀有無線電資源(例如：頻譜和能量)的有效共享是一個關鍵的問題。有很多的研究是為了增加頻譜的效率，例如：多重存取方案和資源管理。[5]推導在頻譜共享系統裡的頻譜效率[6]中，最近的研究顯示：動態系統和技術，對於頻譜分配及管理、資源配置和適性網路提供一個新的範例。在異質性的無線網路裡，一個完整的結構是有可能改善頻譜效率。

基本上，[7]介紹 802.11 無線區域網路和 UMTS 的整合的概念，同時推薦使用經由無線區域網路和平行 UMTS 語言連結的行動基地台去維持資料服務整合架構。另一種方法是結合無線區域網路和通用分組無線業務的整合模型和交互工作機制。而且[8]呈現出一些交互工作機制和信號流程並且在大範圍面積提供低速的資料以及在小範圍面積提供高速的資料。另一種 ad-hoc 網路及蜂窩系統的整合模型和系統架構在[9]被評估。特別是，[4]為處理在一個整合性無線電網路之下的無線電資源管理策略和評估在基於價格的有效運行使用下之動態通道分配的經濟效益。這些研究已經展示一些異質無線系統整合模型和互通工作的架構，因此本文將重心放在能增加系統容量的多重存取傳輸。這節文章分析在異質網路中，行動基地台允許存取不同的無線電存取技術頻段到多重存取方案的頻譜效率。

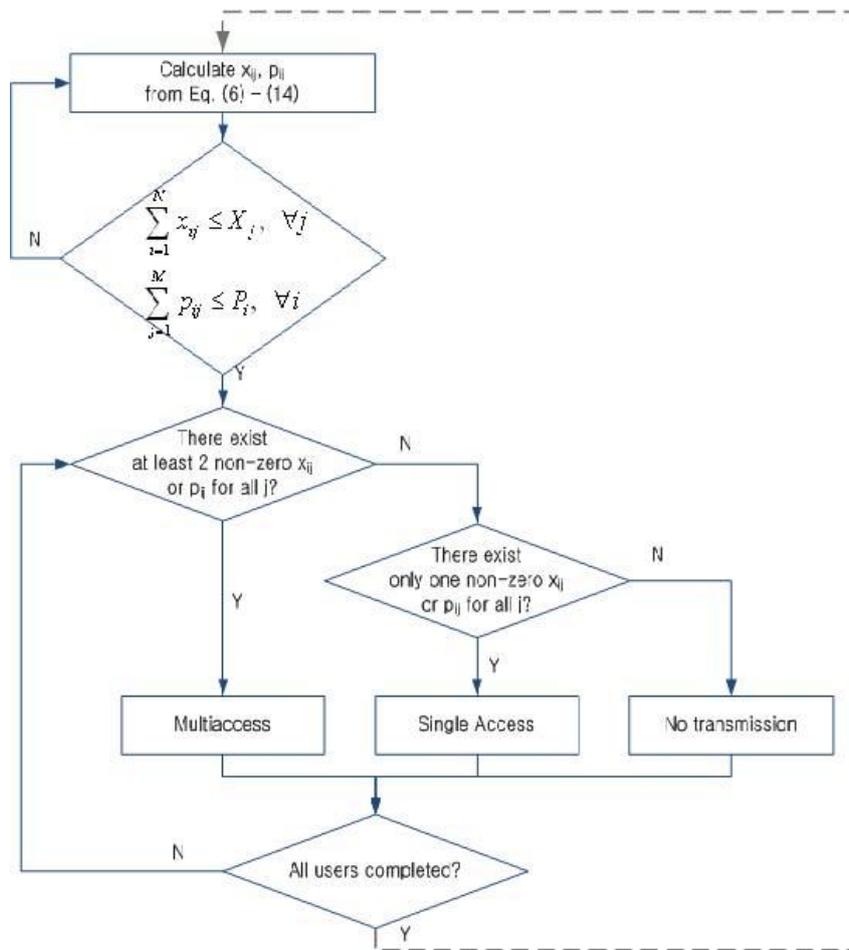
#### 3.2 系統模型

用於多路徑存取能力的系統模型如圖一和三所示，在此考慮一個常見的有重疊區域之多路徑網路和著重於在較小的無線存取技術區域裡，行動基地台盡可能存取較多無線存取技術。行動用戶被假設建立在一個可重置的 SDR 和所有主要用

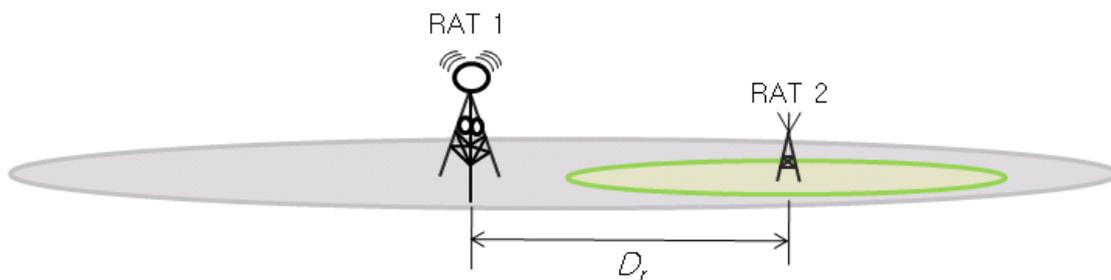
用戶對於多路徑存取到不同的無線電存取技術有適當的執照。因此，行動用戶與用戶之間沒有重大的干擾，而且用戶們可以利用現有的無線電資源，例如：頻譜，來動態及自主地調整用戶自己的無線電操作參數。換句話說，即使行動用戶同意不同的無線電存取技術或網路操作員，如果用戶們的裝置與一些無線存取技術可以透過空中連結介面保持連結，則可以使用不同的無線電存取技術。這樣同時使用是由多模終端具有存取不同網路的能力來達成。在這系統下，行動基地台可以使用多種無線電存取技術同時地傳送他們的數據或在更好的通道條件下選擇一種無線電存取技術。在多路徑存取中，假設每個存取都可以傳送獨立的訊息。



圖一：多重存取的範例



圖二：提出的多重存取演算法



圖三：模擬的環境

### 動機

為了證實多路徑存取的優勢，在圖一中考慮一個多路徑存取的例子。在這張圖中，有兩個單位為頻譜帶寬的無線電存取技術和有一個單位化總功率的行動使用者。在行動基地台與無線電存取技術 1, 2 的通道雜訊增益比分別是  $g_{11}$ ,  $g_{12}$ 。

在這例子當中，讀者可以考慮兩個傳輸情況。一個是行動使用者只選擇一個無線電存取技術時，有一個最好的通道條件；換句話說，就是垂直切換法。另一個是行動使用者同時連接 2 個無線電存取技術，而對 2 個存取而言，為總功率除以一 半(即 0.5mW)，這就是多路徑存取法。就理論上的觀點來看多路徑傳輸的訊息，假設傳送的消息是獨立的，所以兩個獨立訊息的資訊內容可以是個別資訊的總和。基於 Shannon 容量公式，可以計算出每個傳輸方案的上鏈資料速率如下所述：

$$\gamma_{VHO} = x \log_2 \left( 1 + \frac{gP}{x} \right)$$

$$= \log_2(1+1) = 1$$

$$\gamma_{MA} = \log_2(1+0.5) + \log_2(1+0.7 \times 0.5)$$

$$= \log_2(1.5) + \log_2(1.35)$$

$$= 0.583 + 0.433$$

$$= 1.018$$

其中， $x$  為頻譜帶寬、 $g$  為通道雜訊增益比以及  $p$  為傳輸功率。當  $g12$  值為 0.7 時，可以得到結果，但可以達成更多的容量增加或  $g12$  有更高的值時，則頻譜效率會增加。如這計算結果顯示，可以使用同時存取多路徑的能力來提高多路徑網路的頻譜效率，若使用一個適當考慮通道條件的多路徑存取方案。

### 3.3 多重存取方案

#### A. 多重存取的資源分配

如圖一所示，在異質網路中上行的多重存取可以用如下所述之公式表示生產量最大化的問題

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \log \left( 1 + \frac{g_{ij} P_{ij}}{x_{ij}} \right) \quad (1)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^N x_{ij} \leq X_j, \forall j \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^M P_{ij} \leq P_i, \forall i \quad (3)$$

$$x_{ij}, p_{ij} \geq 0 \quad (4)$$

$X_{ij}$  是使用者從無線電存取技術  $j$  到  $i$  的頻譜帶寬， $g_{ij}$  是在無線電存取技術  $i$  和  $j$  之間的通道雜訊比增益之比率， $p_{ij}$  是使用者從無線電存取技術  $i$  到  $j$  的傳輸功率量。在限制條件下， $X_j$  是每個無線電存取技術  $j$  的總頻譜帶寬和  $P_i$  是使用者  $i$  的最大功率限制。在這種最大化的問題，注意到此變數  $\{x, p\}$  的目標函數呈凹面狀拋物線，所以可推導出最佳值和被視為易處理的數值。因此，這可以說明在問題中，一個區域的最大值也是全域的最大值。在頻譜和功率的分配之中，為了得到最佳的上行資源，應該考慮目標函數的 Lagrangian 和按照各自的  $\lambda_j$  和  $\mu_i$  來區分 KKT 條件。

$$L(x_{ij}, p_{ij}, \lambda_j, \mu_i) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M x_{ij} \log \left( 1 + \frac{g_{ij} p_{ij}}{x_{ij}} \right) + \sum_{j=1}^M \lambda_j \left( X_j - \sum_{i=1}^N x_{ij} \right) + \sum_{i=1}^N \mu_i \left( P_i - \sum_{j=1}^M p_{ij} \right)$$

(5)

$$\frac{\partial L}{\partial x_{ij}} = \log \left( 1 + \frac{g_{ij} p_{ij}}{x_{ij}} \right) - \frac{g_{ij} p_{ij}}{x_{ij} + g_{ij} p_{ij}} - \lambda_j \leq 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial p_{ij}} = \frac{g_{ij} x_{ij}}{x_{ij} + g_{ij} p_{ij}} - \mu_i \leq 0 \quad (7)$$

$$x_{ij} \left( \log \left( 1 + \frac{g_{ij} p_{ij}}{x_{ij}} \right) - \frac{g_{ij} p_{ij}}{x_{ij} + g_{ij} p_{ij}} - \lambda_j \right) = 0 \quad (8)$$

$$p_{ij} \left( \frac{g_{ij} x_{ij}}{x_{ij} + g_{ij} p_{ij}} - \mu_i \right) = 0 \quad (9)$$

$$\lambda_j \left( X_j - \sum_{i=1}^N x_{ij} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\mu_i \left( P_i - \sum_{j=1}^M p_{ij} \right) = 0 \quad (11)$$

其中， $\lambda_j$  和  $\mu_i$  是正的 Lagrangian 乘法器。

從上面的方程式，可以使用知名的牛頓法來計算出最佳的  $X_{ij}$  值和得到在頻譜和功率分配之間的關係。

$$p_{ij} = x_{ij} \left( \frac{1}{\mu_i} - \frac{1}{g_{ij}} \right) \quad (12)$$

為了得到 shadow price，考慮對偶函數為：

$$D(\lambda, \mu) = \max_{x, p} L(x_{ij}, p_{ij}, \lambda_j, \mu_i)$$

然後對於 shadow price 調整規則，有另一個方程式：

$$\lambda_j^{(n+1)} = \left[ \lambda_j^{(n)} + \delta \left( \sum_{i=1}^N x_{ij}^{(n)} - X_j \right) \right]^+ \quad (13)$$

其中， $\delta > 0$  是另一個常數步階大小， $[z]^+ = \max\{z, 0\}$ ， $n$  是第  $n$  同樣地，在功率配置上也可以決定  $\mu_i$  的值。

$$\mu_i^{(n+1)} = \left[ \mu_i^{(n)} + \zeta \left( \sum_{j=1}^M p_{ij}^{(n)} - P_i \right) \right]^+ \quad (14)$$

其中， $\zeta > 0$  是另一個常數步階大小。

使用牛頓法和第 12~14 個方程式作迭代計算之後，為了最大化系統容量，可以得到最佳的頻譜以及功率配置之值。

## B. 多重存取演算法

異質網路是基於上述之分析與推理，提出一個多重存取演算法，如圖二所示。在這流程圖中，上半部份表示為牛頓法的應用和在頻譜和功率間的關係之推導。透過這個流程，一個頻譜的最佳解和功率配置可透過在無線存取技術和行動使用者之間交換全球資訊。尤其， $x_{ij}$  和  $p_{ij}$  是由每個行動使用者計算出來，而不是由無線電存取技術計算。根據流程圖，從上部分可得到結果，而下半部份(例如：每個行動使用者)決定是否同時存取相同的無線電存取技術。如果無線電存取技術至少存在兩個非零功率或頻譜配置之值，則行動使用者將選擇多重存取到相同的無線電存取技術。並且，如果只存在一個非零的功率或頻譜配置之值，則行動使用者將只有在一個無線電存取技術之下維持單一存取。在這個機制中，如果功率或頻譜配置之值全都為零，那麼任何的無線電存取技術都是沒被選擇且沒資料傳輸。提出的演算法具有利用多重存取的技術將頻譜效率提升的特性，當無線電通道條件在多

個無線存取系統與行動使用者之間仍能保持良好時。

### 3.4 數值模擬

#### A. 模擬配置

在上行的正交分頻多工存取之中考慮兩個簡單的無線電存取技術模型。假設對應的單元如圖三所示，並且，模擬參數顯示在表一中用於確定數值結果。通道在無線電存取技術和行動基地台之間的增益雜訊比可表示為路徑損耗值和包含熱雜訊之遮蔽值相乘的結果。依照路徑損耗模型，使用修正化 Hata 都會區的傳播模型

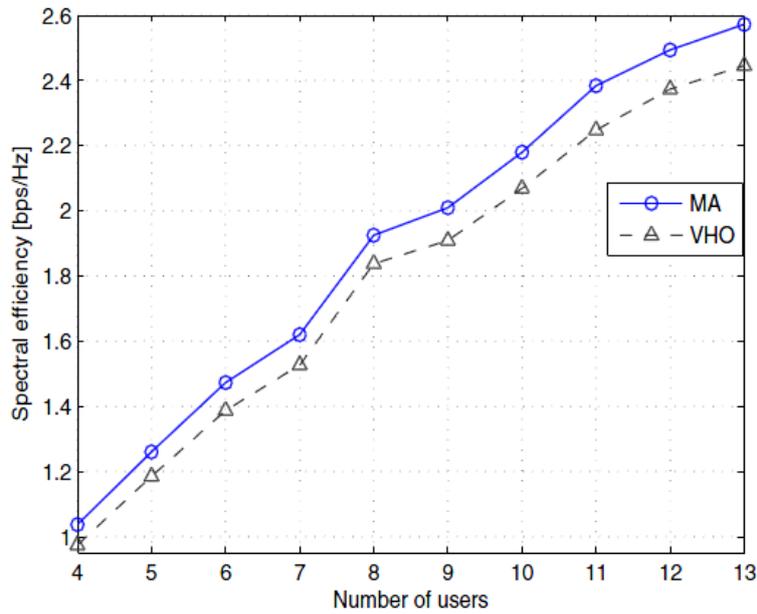
$$\begin{cases} 122 + 38\log(d), & \text{if } d \geq 0.05\text{km} \\ 122 + 38\log(0.05), & \text{if } d < 0.05\text{km} \end{cases} \quad (15)$$

其中， $d$  表示在無線電存取技術和行動基地台之間的距離且單位為公里，和每一個使用者在 50 公尺內假設會經歷到相同的路徑損耗之值。遮蔽元件遵循數學上平均值為 0dB 和標準差為 8dB 的正規化分佈模型。

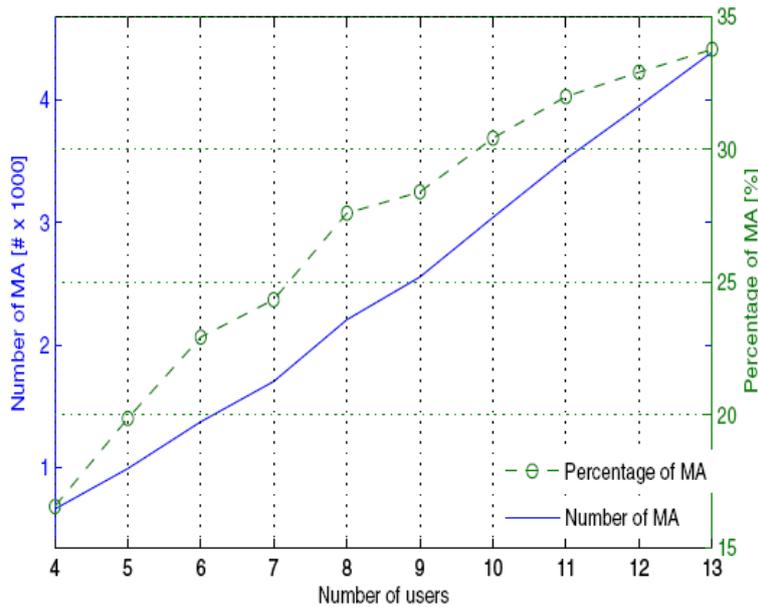
假設行動使用者在（例如：無線電存取技術 2）一個以每小時四公里的時速轉動方向並在每個模擬區間會與前一個移動方向相關的小型單元內隨機分佈。

#### B. 模擬結果

圖四顯示出在多路徑存取和垂直交換之間頻譜效率的差異。這張圖顯示出：在頻譜效率方面，提出的多重存取演算法優於垂直交換。這理由是提出的多重存取演算法對於資料傳輸通過維持一些無線電存取技術的多個連結而有傳輸優勢。這是指同時使用無線電存取技術能夠使頻譜效率增加。並且，這張圖顯示出目標多路徑存取計畫達成大約 0.08 到 0.16(bps/Hz)或在現有的垂直交換法上升 7%。根據使用者的數量，圖五顯示出多路徑存取數量的變化。



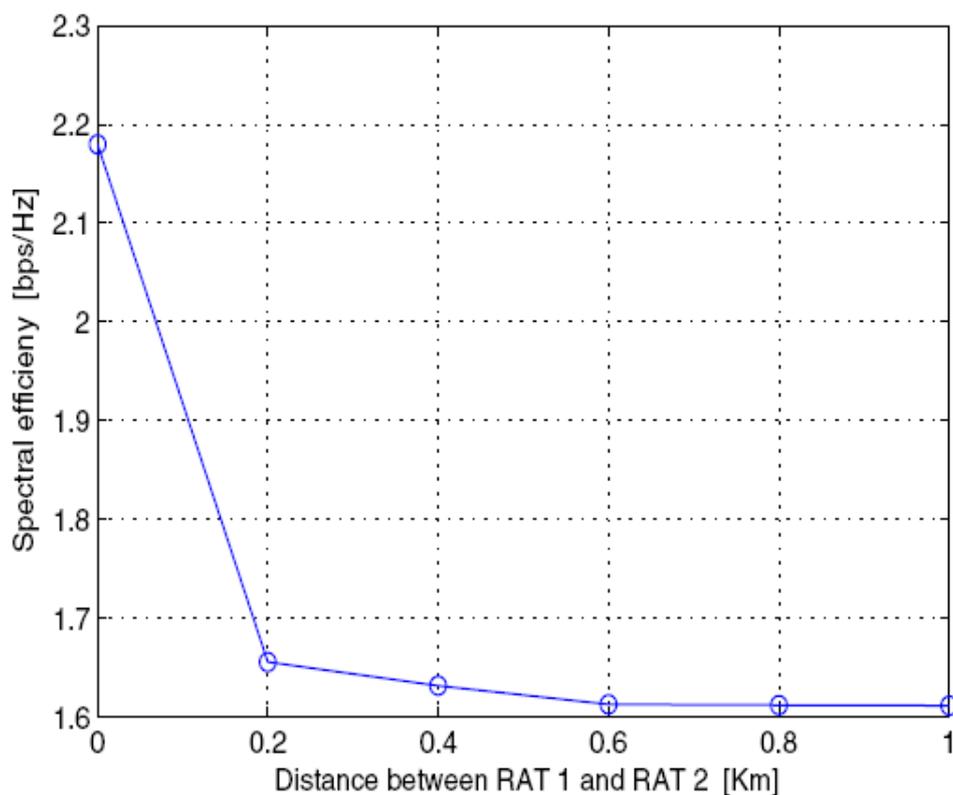
圖四：多重存取與垂直換手系統的頻譜效率比較



圖五：多路徑存取的數量

雖然這個變化幾乎是線性地增加，多重存取的比例以對數成長和收斂到大約 35% 點左右。這是指即使使用者數目增加，多重存取的發生比率是收斂的。頻譜效率在距離(Dr)上的影響如圖六所示。可以看到當距離 Dr 增加，則頻譜效率降低，特別在 0 到 0.2 公里之間。從這張圖我們可以得到一個事實：當不同的無線電存取技術是彼此相鄰(大約距離 0.2 公里內)，則目標多路徑存取演算法有更多的好處。

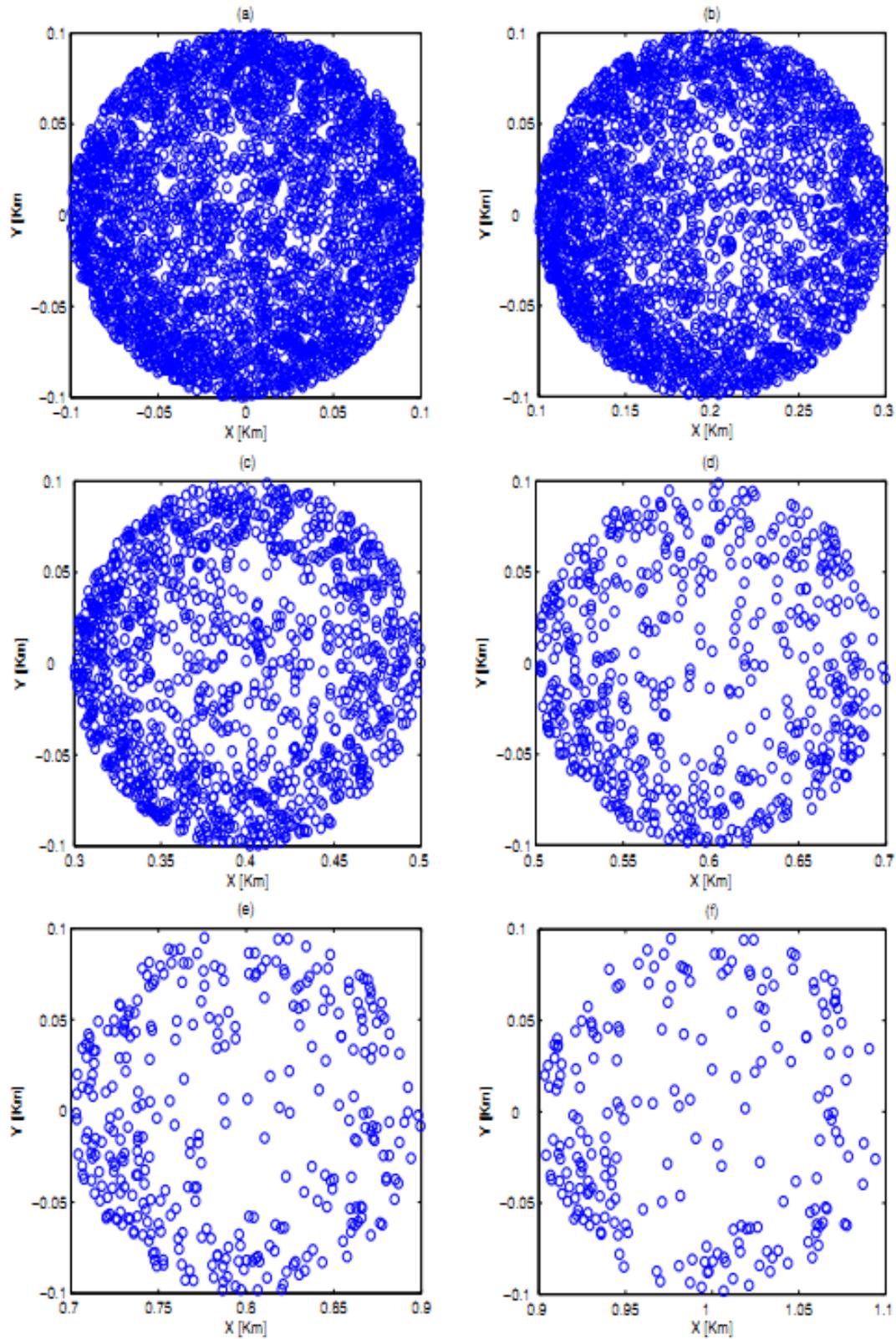
同樣地，當多路徑存取發生時，圖七(a)-(f)顯示出當距離從 0 到 1 公里變化和使用者為 10 位時使用者的分佈。這些圖是指擁有良好的通道條件的行動基地台當一些無線電存取技術在不同的無線電存取技術互相接近之下，會有更多機會達到多路徑存取，並且，這結果顯示行動使用者可以利用同時調整無線電存取技術來改善頻譜效率。此外，從中可以看到在無線存取技術之間距離越長，則多路徑存取的發生會越少。此外，當距離  $D_r$  增加，因為多路徑存取在中心區域發生次數少(如：垂直切換發生)；所以，中心地區 cell 的多路徑存取出現密度比其他圓形地區出現較低。因為在行動基地台和無線電存取技術之間，其中一個主要的通道條件比其他通道條件更好。換句話說，行動使用者在 cell 的中心區域以單一存取較佳。此外，分佈在左邊的區域較右邊的區域深，因為左邊區域比無線電存取技術 1 的基地台較近且通道條件比右邊區域較好。因此，左邊區域有更多的多路徑存取分佈。這結果顯示出可以使用提出的多重存取演算法來達成增加頻譜效率。並且，不論多重存取是否在無線電存取技術之間的距離是長或短，則提出的多重存取方案都有頻譜優勢。



圖六：在無線通訊技術一與二之間距離變化量對頻譜效率的影響

### 3.5 結論

本文提出能改善頻譜效率透過多重存取到異質網路的演算法。由數值分析和模擬的結果，可以看出多重存取演算法對於頻譜效率提升的效果，而頻譜效率是頻譜管理的重要因素。多重存取的演算法可視為一個在異質網路系統中實用並能提升頻譜效率的的解決方案。



圖七：多重存取發生於無線存取技術 2 的使用者分布圖，當無線存取技術 1 與 2 的距離( $Dr$ )為(a)  $Dr = 0\text{Km}$ , (b)  $Dr = 0.2\text{Km}$ , (c)  $Dr = 0.4\text{Km}$ , (d)  $Dr = 0.6\text{Km}$ , (e)  $Dr = 0.8\text{Km}$ , (f)  $Dr = 1\text{ Km}$

### 3.6 參考資料

- [1] R. Berezdivin, R. Breinig, and R. Topp, "Next-Generation Wireless Communications Concepts and Technologies," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, pp. 108-116, Mar. 2002.
- [2] G. Wu, M. Mizuno, and P. J. M. Havinga, "MIRAI Architecture for Heterogeneous Network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, pp. 126-134, Feb. 2002.
- [3] J. Sari, F. Vanhaverbeke, and M. Moeneclaey, "Extending the Capacity of Multiple Access Channels," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 38, pp. 74-82, Jan. 2000.
- [4] L. Badia, C. Taddia, G. Mazzini, and M. Zorzi, "Multi-radio Resource Allocation Strategies for Heterogeneous Wireless Networks," in *Proc. of WPMC '05*, Aalborg, Denmark, September 2005.
- [5] M. Haddad, A. Hayar, and M. Debbah, "Spectral Efficiency of Spectrum Pooling Systems," *IET Commun.*, vol. 2, No. 6, pp. 733-741, July 2008.
- [6] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, pp. 40-48, Apr. 2008.
- [7] M. Jaseemuddin, "An Architecture for Integrating UMTS and 802.11 WLAN Networks," in *Proc. of 8th IEEE ISCC*, 2003.
- [8] A. Salkintziz, C. Fors, and R. Pazhyannur, "WLAN-GPRS Integration for Next Generation Mobile Data Networks," *IEEE Wireless Communications*, pp. 112-124, October 2002.
- [9] G. Cristache, K. David, H. Hildebrand, J. Diaz, and R. Sigle, "Aspect for the Integration of ad hoc and Cellular Networks," in *Proc. of Third Scandinavian Workshop on Wireless Ad-hoc networks*, 2003.
- [10] T. M. Cover, and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, A John Wiley & Sons Inc. publication, 2006.
- [11] S. Boyd, and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*, Cambridge University Press, 2004.
- [12] T. K. Sarkar, Z. Ji, K. Kim, A. Medouri, and M. Salazar-Palma, "A Survey of Various Propagation Models for Mobile Communication," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, Vol. 45, pp. 51-82, Jun. 2003.

## 第四章 感知網路的干擾

在次要使用者的無線電傳輸不會干擾主要使用者的前提下，機會主義的頻譜存取(Opportunistic spectrum access)讓已授權頻譜中使用率不足的部分開放，讓它可以再利用。這樣的一個系統，必須精確的偵測以及快速的反應出不同頻譜的使用情況，所以他需要感知次要的使用者。因此，定義這些因為次要頻譜重新利用而造成的感知網路干擾，是非常重要的。在本節文章中，針對整合一個感知網路的干擾提出一個新的統計模型，解釋感傳程序、次要空間重用協定，以及像 path loss、shadowing、通道衰變這類的環境相關條件。首先，要定義出對於主要使用者的感知網路的干擾，它的特徵函數和累積量。利用截角穩定分布(truncated-stable distributions)定理，來開發針對感知網路干擾問題的統計模型。進一步延伸這個模型，包含功率控制(power control)的效應；並說明如何使用模型，評估整個感知網路系統效能。數值結果顯示出，模型在擷取感知網路干擾的統計行為上是有效的。這個結果讓對於干擾有更重大的了解，日後也較能成功的佈署感知網路。

### 4.1 簡介— 感知網路的干擾

隨著新的無線應用與裝置的出現，射頻頻譜的需求有著大幅度的增加。由於射頻頻譜的不足，以及被分配到的頻譜未能充分的使用，相關政府管理機構，如 FCC，已經開始重新評估他們的頻譜分配政策。由於頻寬的要求隨著時間和空間的維度有所不同，傳統制式的頻譜分配方式使頻譜無法有彈性的被使用，嚴重的阻礙已經很珍貴的頻譜，去做有效的利用。因此，機會主義的頻譜存取 (opportunistic spectrum access) 加上感知無線電的技術，已經是解決這個問題的一個比較有希望的方法。

在次要的無線電傳輸不會干擾主要使用者的前提下，機會主義的頻譜存取開放了授權頻譜未能充分利用的部分讓它可以重複使用。CR 被提出來針對次要使用者，去精確的偵測與選擇沒有被使用的頻譜。舉例來說，如果一個通訊通道在主要和次要的網路之間是主動的，忙碌的通道評估可以根據一個共享在主要和次要網路之間的電訊(preamble)的偵測，或是在主要網路射頻訊號的能量感測。此外，感知無線網路可以執行一個兼具偵測和避免偵測的協定(detect-and-avoid protocol)，而其中的感知裝置的傳輸功率等級是基於被感知到的主要網路功率。

然而，由於一些不確定性和在網路中的干擾總和的關連，讓頻譜分享一直是個充滿挑戰性的問題。會有這樣的不確定性是因為不知道干擾源的數量，也不知道干擾源的位置，以及通道衰減、shadowing 和其他不確定的環境相關條件。因此，為了將在主要網路系統效能上的感知網路干擾量化，去合併這樣的不確定性是非常重要的。所以提出一個針對定義網路干擾的統一架構，來研究各種問題，包含在一個會受通道衰減、shadowing、以及多重路徑衰減影響的無線環境中，

不同步產生的整體干擾[13][14]。最原始的動機是為了將隨機定位的 UWB 無線電通訊的網路總使用量[15]-[17]，在空間密度方面量化[18]-[20]。這個架構同時也被用來研究異質無線網路的共存問題[21]-[25]。這些研究共同的主題，則是 The Poisson point process[26]在發射節點位置上的使用。The Poisson point process 已經在各種不同的領域中被廣泛的使用；像是天文學[27][28]、質子發射斷層掃描[29]、細胞生物學[30]、光子通訊[31]-[34]，以及無線通訊[28][35]-[40]。近年來，Poisson model 已經被應用在各種不同的無線網路的空間結點分布問題，像是隨機程序、ad hoc、relay、感知無線電，或是 femtocell 網路。

為了解決由次要感知網路所引起的共存問題，以多個在網路中的次要使用者產生的整體干擾，來建立準確的模型，是非常重要的。在[48]提到，對於 Poisson Nodes 在任意區域產生干擾總和的 moment expression，可以藉由假設一個典型 unbound 的通道衰減模型去得到。然而，unbound 的通道衰減模型會和實際結果有很大的偏差[49]。在感知無線電網路中，lognormal 的分布被提出來建立所有干擾源功率總和的模型[45]。這樣的 lognormal 估計也被用在因為 fading 所造成的主要使用者干擾總和，在不考慮其他通道的不確定性[46]。[47]根據主要網路的 Poisson model，定義了針對次級使用者的最佳功率控制方案。

在本節中，探討一個新的統計模型，針對每一個維度(實數或虛數部分)感知網路的干擾總和，可以解釋感傳程序、次級空間重用協議、次級使用者的空間密度，以及像路徑衰退、shadowing、通道衰變這類的環境相關條件。此外，此架構，可以為在有限或無限空間的次級使用者產生的感知網路干擾建立模型，同時考慮到該區域的形狀以及主要使用者的位置。舉例來說，考慮兩種型態的次級空間重用協定；也就是 single-threshold 與 multiple-threshold 協定。每個協定都先表示出它們感知網路干擾的特徵函數(CF)，再藉此得出他們的累積量。用這些累積量可以為感知網路干擾建立截角穩定(truncated-stable)的隨機變數模型。更進一步的去延伸這個模型，我們讓它具有功率控制的效應，並評估展示模型在一個系統效能上的使用，如在感知網路干擾上出現的 BEP(bit error probability)。數據結果證實，模型在各種不同的情境條件下，對於感知網路干擾統計行為的擷取是有效的。

## 4.2 系統模型

在感知網路，為了不要干擾主要網路，次級使用者在傳輸以前要先感測通道。在本節中，考慮主要網路在 frequency division duplex 模式。因此，為了偵測主動主要使用者的存在，次級使用者會感測主要使用者的上行通道。同時，考慮次級網路是一個簡單的 ad-hoc 網路，次級使用者可以加入或離開這個網路，並可以直接感測或是取得這個通道的授權而不用和其他的次級使用者作協調

[53]-[55]。這樣，次級使用者可能可以同時傳輸而不需要考慮彼此之間的距離。

#### A. 感知無線電的行為模型(Cognitive Network Activity Model)

每個次級使用者的動作，必須依賴主要使用者接收到的上行訊號傳輸強度來決定。以下考慮兩種次級空間重用協定的形式；也就是 threshold 與 multiple-threshold 協定。

##### 1) Single-Threshold Protocol:

滿足下面條件，第  $i$  個次級使用者是主動的，

$$\frac{KP_p Y_i}{R_i^{2b}} \leq \beta_i \quad (1)$$

同樣地，

$$R_i^{-2b} Y_i \leq \zeta \quad (2)$$

$\beta$  是 activating threshold； $\zeta \triangleq \frac{\beta}{KP_p}$  是正規化的 threshold； $P_p$  是主要使用者的傳輸功率； $Y_i$  是從主要使用者到第  $i$  個次級使用者通道的 squared fading path gain； $K$  是說明近場損耗的增益； $R_i$  是主要使用者和第  $i$  個次要使用者間的距離； $b$  是 amplitude pass-loss exponent。在此先假設  $Y_i$ 's 是 common cumulative distribution function(CDF)的 independent and identically 分布 (IID)， $F_Y(\cdot)$ 。因此，次級網戶使用者的動作可以用 Bernoulli 隨機變數取代：

$$1_{[0, \zeta]}(R_i^{-2b} Y_i) \sim \text{Bern}(F_{Y_i}(R_i^{-2b} \zeta)), \quad (3)$$

以及指標函數，定義為

$$1_{[p, q]}(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } p \leq x \leq q, \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

Bernoulli variable 等於一的時候表示次級使用者是主動的。

##### 2) Multiple-Threshold Protocol:

在這裡，根據偵測到的主要網路上行訊號功率水平，去設定次級網路使用者的傳輸功率[56]。考慮  $N-1$  個遞增的正規化 threshold values  $\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_{N-1}$  來指出  $N$  個不一樣的主動次級使用者類別，以  $A_k$  表示， $k = 1, 2, \dots, N$ 。令  $\zeta_0=0$ 、 $\zeta_N=0$ ，則第  $k$  個主動類別  $A_k$  會依循下面的 activation rule：

$$1_{[\zeta_{k-1}, \zeta_k]}(R_i^{-2b} Y_i) \sim \text{Bern}(\mu_{Y_i}^{(pt)}(0, R_i^{2b} \zeta_{k-1}, R_i^{2b} \zeta_k)). \quad (5)$$

要注意在類別  $A_k$  的主動次要使用者端，所收到的主要客戶訊號功率，在  $KP_p \zeta_{k-1}$  與  $KP_p \zeta_k$  之間。

## B. Interference Model

在主要接收端，由第  $i$  個感知干擾源產生的干擾訊號，可以表示為

$$l_i = \sqrt{P_i} R_i^{-b} X_i \quad (6)$$

其中， $P_i$  是在遠近地區邊界的干擾訊號功率； $R_i$  是第  $i$  個感知干擾源和主要接收者之間的距離； $X_i$  是從第  $i$  個感知干擾源到主要接收者之間的通道，在每個維度的 fading 通道路徑增益。下面假設  $X_i$ 's 是有一般 PDF 性質的 IID， $f_X(\cdot)$ ，與  $Y_i$ 's 互相獨立。

假想次級使用者是根據 homogeneous Poisson point process 在二維平面  $\mathbb{R}^2$  空間中散佈的，同時被影響的主要使用者假設是在整個區域的中心。令  $S \subset Z$  在區域  $R \subset \mathbb{R}^2$  是次級使用者的一個索引集合。而  $k$  個次級使用者位於  $R$  的機率只和整個  $A_R$  區域面積有關，可以寫成[26]

$$P\{|S|=k\} = \frac{(\lambda A_R)^k}{k!} e^{-\lambda A_R}, \quad k=0,1,2,\dots \quad (7)$$

$\lambda$  為空間密度(以每單位面積中的節點計算)。此外，我們假設區域  $R$  是被限制在已經給定的兩個半徑  $d_{\min}$ 、 $d_{\max}$  圍成的環形區域中，這兩個半徑是從離主要接收者最近以及最遠的距離。這讓我們去考慮一個將次級使用者被定位在一個既定的區域裡的方案。

## 4.3 瞬時干擾分布

為了定義感知網路的干擾，接下來先推出 full network activity 時(所有的次級使用者都在使用中)以及 regulated activity(每個次級使用者都在空間重用協定的規定下)情況下的累積量。上面兩種情況分別寫在下面 Section III-A 和 III-B。使用這種累積量的表示方式，在此也針對感知網路干擾，發展出對稱的截角穩定模型 (truncated-stable model)，寫在下面 Section III-C。

### A. Full Activity

由所有出現在區域  $R$  的次級使用者產生的感知網路干擾，可以寫成

$$l_{fa} = \sqrt{P_I} \underbrace{\sum_{i \in S} R_i^{-b} X_i}_{Z_{fa}(R)} \quad (8)$$

用[14, theorem 3.1]， $Z_{fa}(R)$  的 CF 可以表示成

$$\psi_{Z_{fa}(R)}(j\omega) = \exp\left(-2\pi\lambda \int_X \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \left[1 - \exp(j\omega x r^{-b})\right] \times f_X(x) r dr dx\right) \quad (9)$$

$j = \sqrt{-1}$ 。用(9)式，可以計算出干擾量  $Z_{fa}(R)$  的第  $n$  個累積量：

$$\begin{aligned}
\kappa_{Z_{fa}(\mathcal{R})}(n) &= \frac{1}{j^n} \frac{d^n \ln \psi_{Z_{fa}(\mathcal{R})}(j\omega)}{d\omega^n} \Big|_{\omega=0} \\
&= 2\pi\lambda \int_X \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} x^n r^{1-nb} f_x(x) dr dx \\
&= \frac{2\pi\lambda}{nb-2} (d_{\min}^{2-nb} - d_{\max}^{2-nb}) \mu_X(n)
\end{aligned} \tag{10}$$

利用  $Z_{fa}(\mathcal{R})$  的累積量，可以得到在 full activity 的情況，感知網路干擾  $I_{fa}$  的第  $n$  個累積量：

$$\kappa_{I_{fa}}(n) = P_I^{n/2} \kappa_{Z_{fa}(\mathcal{R})}(n) \tag{11}$$

## B. Regulated Activity

### 1) Single-Threshold Protocol:

根據(3)，在空間重用協定中，次級使用者在區域  $R$  的動作，會在 single normalized threshold  $\zeta$  的規範之下。因此，針對 single-threshold 協定，感知網路感擾可以寫成

$$I_{st} = \sqrt{P_I} \underbrace{\sum_{i \in A_{st}} R_i^{-b} X_i}_{Z_{st}(\zeta; \mathcal{R})} \tag{12}$$

$A_{st}$  定義為動作中的次級使用者在區域  $R$  的索引集合：

$$A_{st} = \left\{ i \in S : \mathbb{1}_{[0, \zeta]}(R_i^{-2b} Y_i) = 1 \right\} \tag{13}$$

和(9)式相似， $Z_{st}(\zeta; \mathcal{R})$  的 CF 可以表示成

$$\psi_{Z_{st}(\zeta; \mathcal{R})}(j\omega) = \exp\left(-2\pi\lambda \int_X \int_Y \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} [1 - \exp(j\omega x r^{-b})] \times \mathbb{1}_{[0, \zeta]}(r^{-2b} y) f_X(x) f_Y(y) r dr dy dx\right) \tag{14}$$

累積量  $\kappa_{Z_{st}(\zeta; \mathcal{R})}(n)$  可以由 Appendix B-A 推導出。利用  $Z_{st}(\zeta; \mathcal{R})$  的累積量，可以得到針對 single-threshold 協定感知網路干擾  $I_{st}$  的第  $n$  個累積量

$$\kappa_{I_{st}}(n) = P_I^{n/2} \kappa_{Z_{st}(\zeta; \mathcal{R})}(n) \tag{15}$$

*Remark 1:* 當  $\zeta \rightarrow \infty$ ，第二第三項可以銷掉，

$$\lim_{\zeta \rightarrow \infty} \kappa_{I_{st}}(n) = \kappa_{I_{fa}}(n) \tag{16}$$

如同預期。因此，full activity 可以視為 single-threshold 空間重用使  $\zeta \rightarrow \infty$  的一個極端情況。

### 2) Multiple-Threshold Protocol:

利用(5)式，在  $A_k$  的次級使用者產生每個類別的感知干擾，可以寫成

$$I_{mt,k} = \sqrt{P_{l,k}} \underbrace{\sum_{i \in A_k} R_i^{-b} X_i}_{Z_k(\mathfrak{R})} \quad (17)$$

$P_{l,k}$  為次級使用者在第  $k$  個主動類別  $A_k$  的傳輸功率

$$A_k = \left\{ i \in S : 1_{[\zeta_{k-1}, \zeta_k]}(R_i^{-2b} Y_i) = 1 \right\} \quad (18)$$

$N$  個功率等級  $P_{l,1}, P_{l,2}, \dots, P_{l,N}$  為一個遞減的組合，以至於在類別裡動作中的使用者，會被較高的主要訊號低功率傳輸的偵測功率等級所定義。與(14)式相似， $Z_k(R)$  的 CF 可以表示為

$$\psi_{Z_{st}(\zeta_{\beta_i}, \mathfrak{R}_i)}(j\omega) = \exp\left(-\theta_i \lambda \int_X \int_Y \int_{a_i}^{b_i} [1 - \exp(j\omega x r^{-b})] \times 1_{[0, \zeta_{\beta_i}]}(r^{-2b} y) f_X(x) f_Y(y) r dr dy dx\right) \quad (19)$$

在所有  $N$  個類別裡，由次級使用者產生的感知網路干擾可以定義為

$$I_{mt} = \sum_{k=1}^N \sqrt{P_{l,k}} Z_k(\mathfrak{R}) \quad (20)$$

因為所有的  $Z_k(R)$ 's 在統計上是獨立的，在此可以針對 multiple-threshold 協定，得到第  $n$  個感知網路干擾  $I_{mt}$  的累積量

$$\kappa_{I_{mt}}(n) = \sum_{k=1}^N P_{l,k}^{n/2} \kappa_{Z_k(\mathfrak{R})}(n) \quad (21)$$

$\kappa_{Z_k(\mathfrak{R})}(n)$  由(40), (44), (46)得出，在 Appendix B-B for  $k = 1, k = 2, 3, \dots, N - 1, k = N$ 。

*Remark 2:* 利用 cumulant expressions (10)(15)(21)，針對每個次級空間重用協定，可以定義一些感知網路干擾的統計特性(像平均、變異數，以及其他高階統計特性)。舉例來說，二階的累積量 (cumulant) 可以被用來測量感知網路干擾的功率。

### C. 截角穩定分布模型 (Truncated-Stable Distribution Model)

截角穩定分佈依循穩定分佈類別，是一個相對較新的分布類別[57]。因為以下特性，所以可以用穩定分佈(stable distributions)去建立在無線網路中干擾的模型：1)擷取干擾節點空間分布的能力；2)可以適應 heavy tail behavior；他對於在靠近主要使用者的一些干擾源有主要貢獻[58]。然而，就像[14]所說，在干擾源散播在整個平面的時候，整體干擾才會收斂在一個穩定分布的情況下。因為在  $r = 0$  有 singularity，所以穩定分佈有 unbounded (infinite)

second-order moment；因此在使用這個模型的時候也要注意這點。截角穩定 (truncated-stable) 分佈有著 smoothed tails 以及 finite moments，可以提供一個替代的統計工具來建立整體干擾的模型，更能貼近實際情況，也不用考慮 singularity 的問題。

對稱截角穩定 (truncated-stable) 隨機變數  $T \sim S_t(\gamma', \alpha, g)$  的 CF，可以從[59]得到

$$\psi_T(j\omega) = \exp\left(\gamma' \Gamma(-\alpha) \left[ \frac{(g-j\omega)^\alpha}{2} + \frac{(g+j\omega)^\alpha}{2} - g^\alpha \right]\right) \quad (22)$$

$\Gamma(\cdot)$  為 Euler's gamma function； $\gamma'$ 、 $\alpha$ 、 $g$  為與截角穩定分佈相關的參數； $\gamma'$  和  $\alpha$  彼此有類似的分散性與穩定分佈的 characteristic exponent。 $g$  是讓穩定分佈的 tail 較為平滑的指數函數。截角穩定分佈的第  $n$  個 cumulant 可以用(22)式得到

$$\kappa_T(n) = \begin{cases} \gamma' \Gamma(-\alpha) g^{\alpha-n} \prod_{i=0}^{n-1} (\alpha-i), & \text{for even } n \\ 0, & \text{for odd } n \end{cases} \quad (23)$$

利用(23)式，代入  $\alpha$ ，前兩項非零的 cumulants，即第二第四階的 cumulants，可以用  $\gamma'$  和  $\alpha$  表示。

為了使用截角穩定分布建立感知網路干擾的模型，我們先固定 characteristic exponent 為  $\alpha = 2/b$ 。這樣做是因為當  $d_{\min} \rightarrow 0$ ， $d_{\max} \rightarrow \infty$ ，感知網路干擾會依 characteristic exponent  $\alpha = 2/b$  的穩定分布走。令  $I_A$  為對應 activity model  $A \in \{\text{fa}, \text{st}, \text{mt}\}$  (依循 single-threshold 或 multiple-threshold 協定的 full activity, regulated activity) 的感知網路干擾。接著我們可以以對稱的截角穩定隨機變數建立感知網路干擾  $I_A$ ，

$$I_A \sim S_t(\gamma'_A, \alpha = 2/b, g_A) \quad (24)$$

$\gamma'_A$  和  $g_A$  分別為 dispersion 與 smoothing 參數，若以  $I_A$  的第二第四累積量來表示

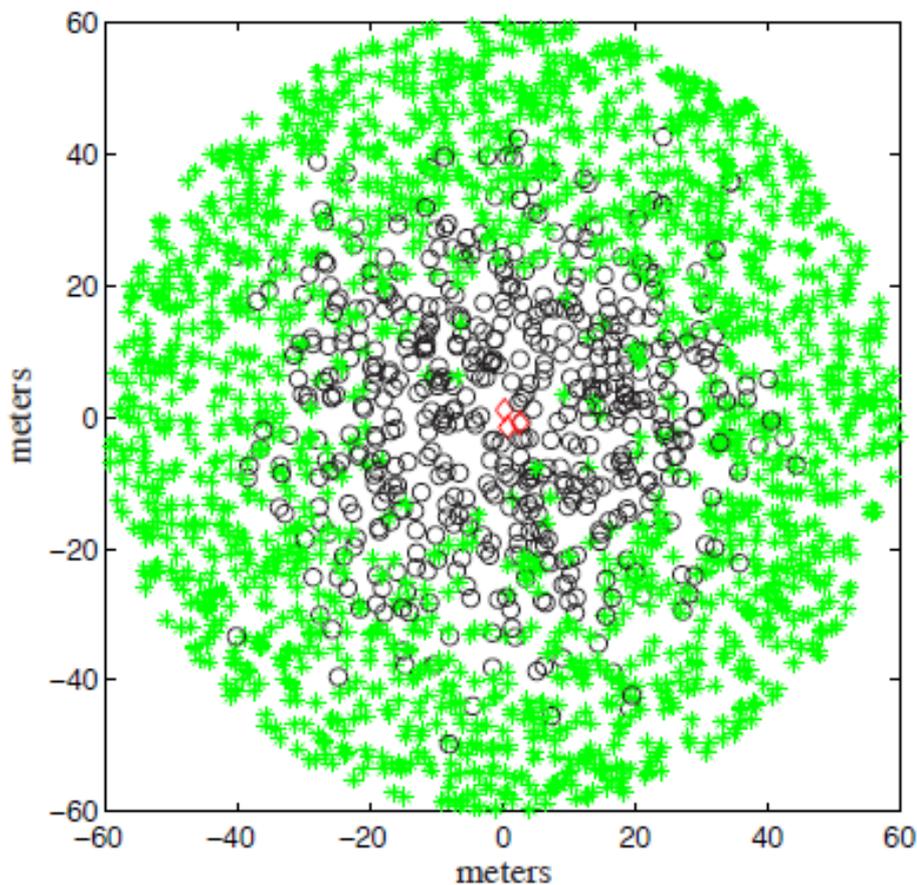
$$\gamma'_A = \frac{\kappa_{I_A}(2)}{\Gamma(-\alpha) \alpha (\alpha-1) \left[ \frac{\kappa_{I_A}(2)(\alpha-2)(\alpha-3)}{\kappa_{I_A}(4)} \right]} \quad (25)$$

$$g_A = \sqrt{\frac{\kappa_{I_A}(2)(\alpha-2)(\alpha-3)}{\kappa_{I_A}(4)}} \quad (26)$$

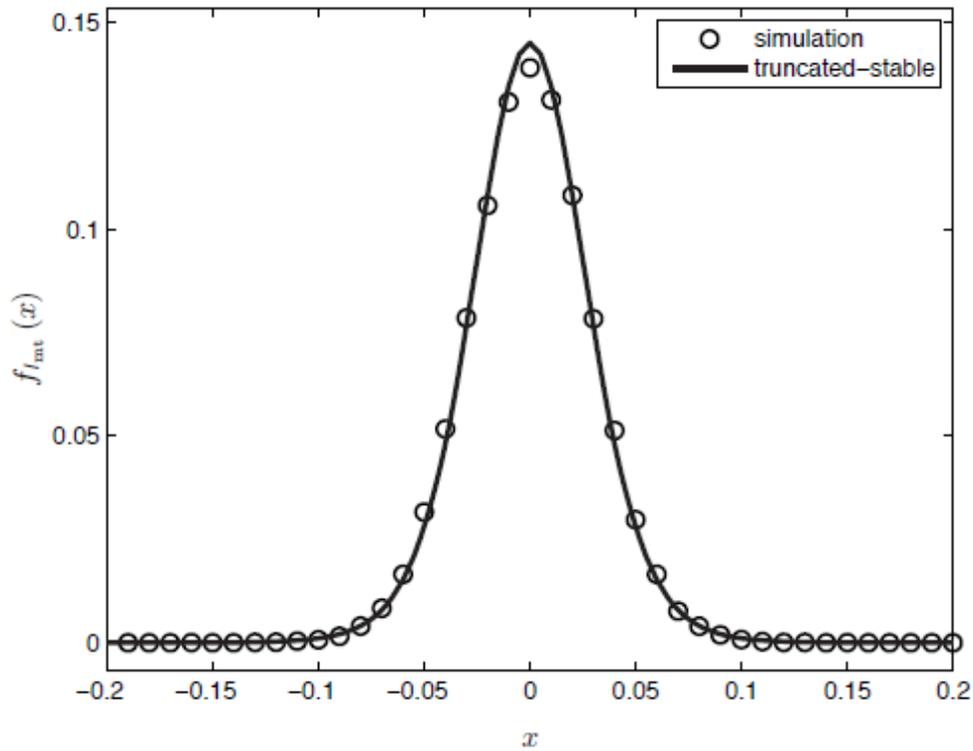
為了驗證統計模型，我們可以考慮一個  $d_{\min} = 1 \text{ m}$ ， $d_{\max} = 60 \text{ m}$ ， $\lambda = 0.1$

個使用者/ $m^2$ 的環形區域。主要訊號以及次級訊號都在 Rayleigh fading 的環境下，即 $\sqrt{Y_i} \sim \text{Rayleigh}(1/2)$ 、 $|H_i| \sim \text{Rayleigh}(1/2)$ 。利用兩個 thresholds( $N=3$ )，以下列參數來考慮 multiple-threshold 協定：如果從主要使用者傳出的訊號功率  $\zeta_1$  小於  $-42\text{dBm}$ ，次級網路使用者就傳輸功率  $P_{I,1} = 0\text{dBm}$ ；主要使用者傳出的功率在  $\zeta_1$  與  $\zeta_2 = -20\text{dBm}$  之間，次級使用者就傳輸  $P_{I,2} = -23.7\text{dBm}$ ；主要使用者傳出的功率在比  $\zeta_2$  大，次級使用者就傳輸  $P_{I,3} = -38.7\text{dBm}$ 。圖一為在 multiple-threshold 協定規範下的 active 的次級使用者實際情形；圖二圖三顯示感知網路干擾  $I_{mt}$  的 PDF 與 complementary CDF (CCDF)。在此可以從圖二圖三看出模擬結果與截角穩定(truncated-stable)統計模型相當吻合。

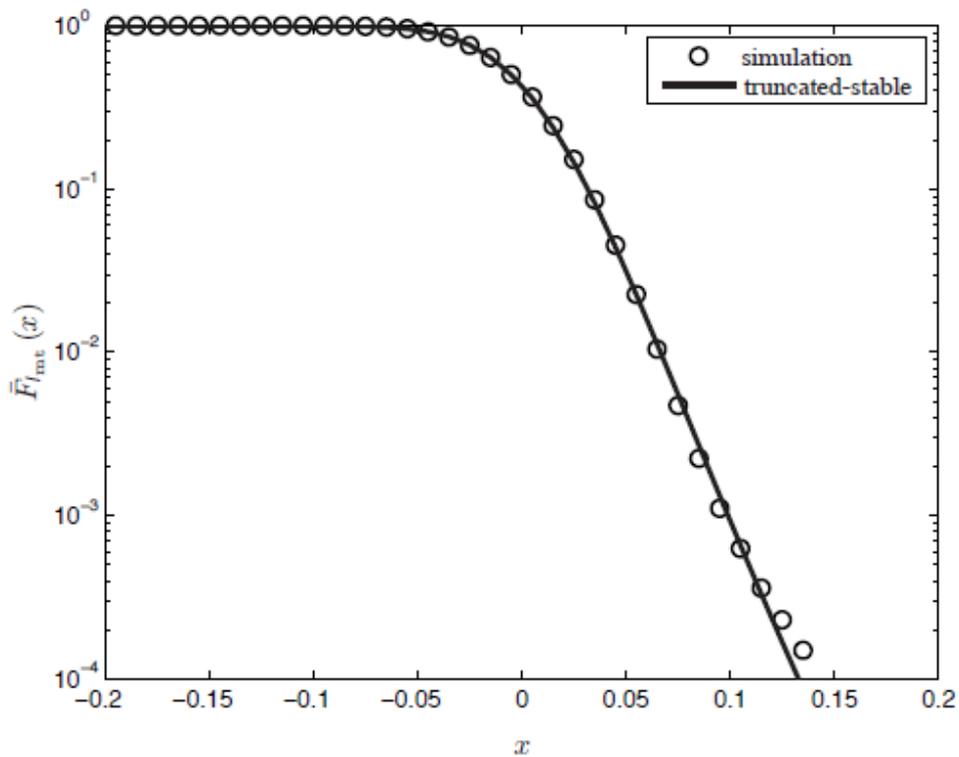
利用對稱截角穩定(truncated-stable)模型，可以去解釋感知網路干擾中的 shadowing 效應。舉例來說，以 single-threshold 協定，在 shadowing 環



圖一：多限制協定和 CR 網路的節點位移

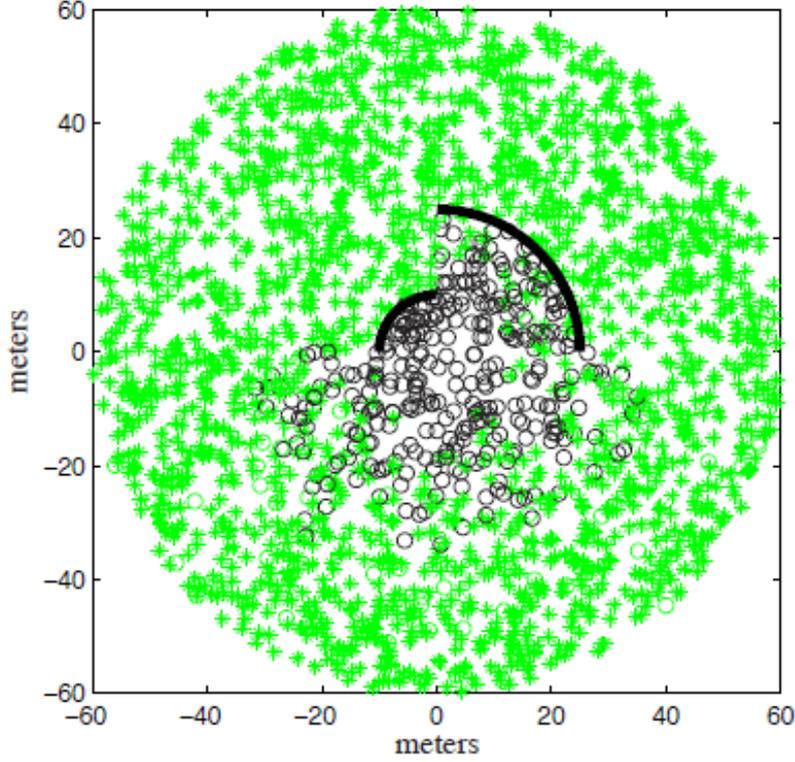


圖二：感知網路干擾的 PDF



圖三：感知網路干擾的 CCDF(多限制協定和圖 1 相同參數)

境下，會有一些障礙物；此研究可以將整個區域  $R$  分割成不同的小區域  $R_0, R_1, R_2, \dots, R_L$  去對應每個障礙物的位置。因為 shadowing 的關係，對應



圖四：在存在的陰影下的單限制協定和 CR 網路的節點位移

障礙物後方的小區域再多出額外的衰減項。所以感知網路干擾可以寫成

$$I_{st} = \sum_{\ell=0}^L \sqrt{P_{I,\ell}} \underbrace{\sum_{i \in A_{st,\ell}} R_i^{-b} X_i}_{Z_{st}(\zeta\tilde{\beta}_\ell; \mathfrak{R}_\ell)} \quad (27)$$

where

$$A_{st,\ell} = \left\{ i \in S \cap \mathfrak{R}_\ell : 1_{[0, \zeta\tilde{\beta}_\ell]}(R_i^{-2b} Y_i) = 1 \right\} \quad (28)$$

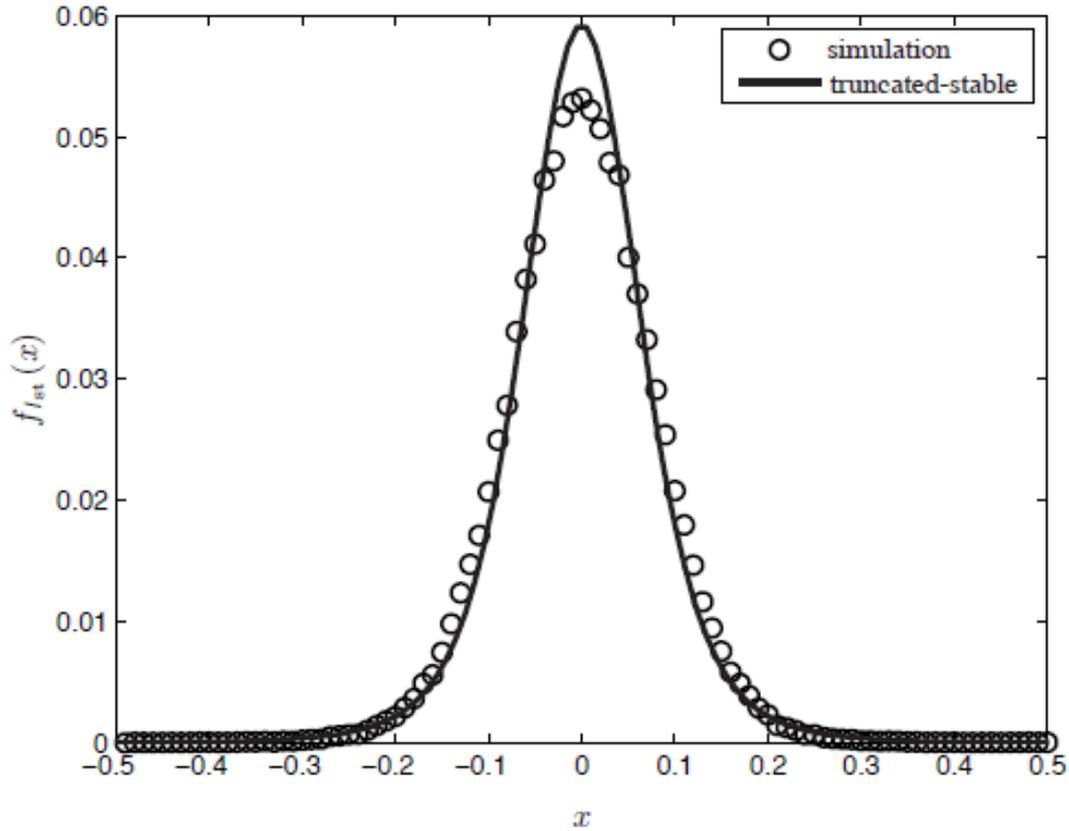
$P_{I,1}$ 、 $\tilde{\beta}_\ell$  代表小區域  $R_1$  額外的衰減項， $l=1, 2, \dots, L$ ； $P_{I,0} = P_I$ 、 $\tilde{\beta}_0 = 1$ 。  $Z_{st}(\zeta\tilde{\beta}_\ell; \mathfrak{R}_\ell)$  的 CF 可以表示成

$$\psi_{Z_{st}(\zeta\tilde{\beta}_\ell; \mathfrak{R}_\ell)}(j\omega) = \exp\left(-\theta_\ell \lambda \int_X \int_Y \int_{a_\ell}^{b_\ell} [1 - \exp(j\omega x r^{-b})] \times 1_{[0, \zeta\tilde{\beta}_\ell]}(r^{-2b} y) f_X(x) f_Y(y) r dr dy dx\right) \quad (29)$$

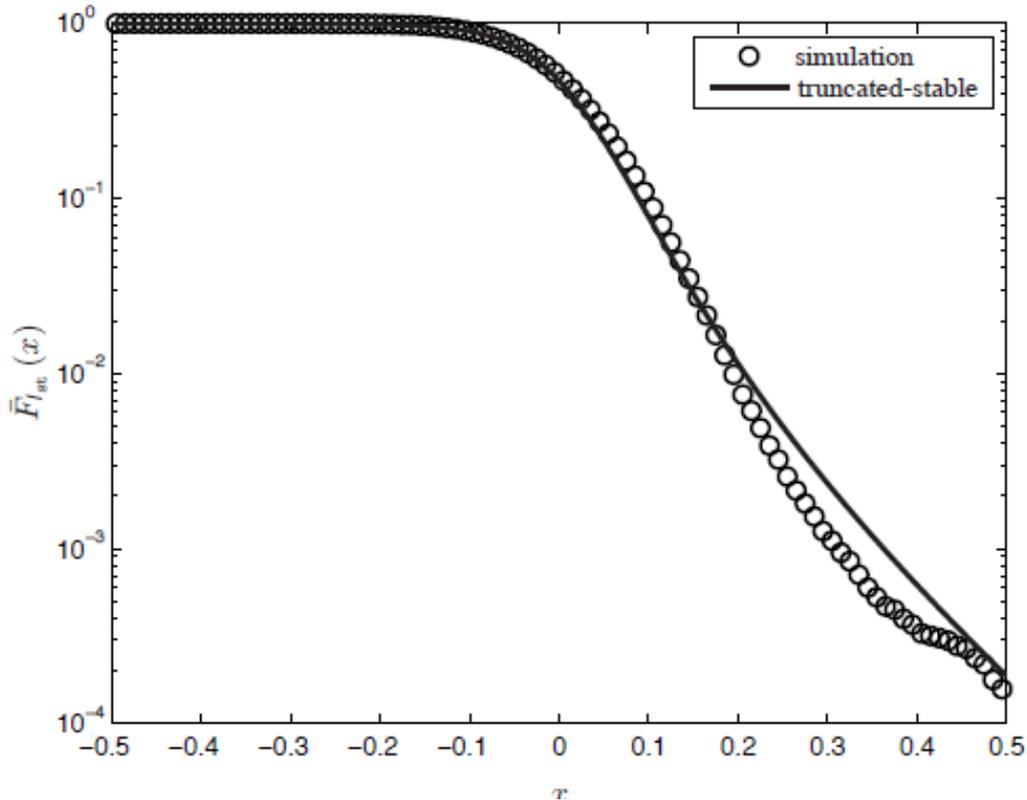
$a_1$ 、 $b_1$  為小區域  $R_1$  的邊界； $\theta_1$  為被  $R_1$  覆蓋的角度。若有障礙物存在， $\theta_1$  就可以對應被障礙物覆蓋的角度。就單一個在距離原點  $d$  的障礙物來說，本研究會在障礙物的前後各放置兩個小區域： $(a_1, b_1) = (d_{\min}, d)$  and  $(a_2, b_2) = (d, d_{\max})$ 。所以 single-threshold 協定下，考慮 shadowing 的效應，感知網路干擾的第  $n$  個 cumulant 可以寫為

$$\kappa_{l_{st}}(n) = \sum_{\ell=0}^L P_{I,\ell}^{n/2} \kappa_{Z_{st}}(\zeta_{\tilde{\beta}_\ell}; \mathfrak{R}_\ell)(n) \quad (30)$$

累積量  $\kappa_{Z_{st}}(\zeta_{\tilde{\beta}_\ell}; \mathfrak{R}_\ell)^{(n)}$  可以將(38)式  $\kappa_{Z_{st}}(\zeta; \mathfrak{R})^{(n)}$  的  $\zeta_{\tilde{\beta}_\ell}$ 、 $\theta_1$ 、 $a_1$ 、 $b_1$  分別代入  $\zeta$ 、 $2\pi$ 、 $d_{\min}$  就可以得到。圖四顯示在 single-threshold 協定下的 active 次級使用者 ( $\zeta = -40$  dBm 在區域  $d_{\min} = 1\text{m}$ 、 $d_{\max} = 60\text{m}$ ， $\lambda = 0.01$  users/m<sup>2</sup>)。我們在距離主要接收端 10 公尺以及 25 公尺放置兩個障礙物，



圖五：感知網路干擾的 PDF(單限制協定和圖 4 有相同的參數)



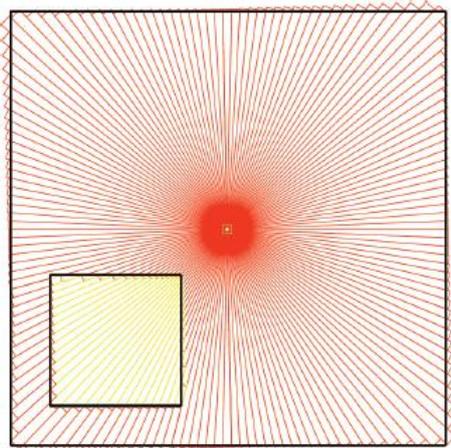
圖六：感知網路干擾的 CCDF(單限制協定和圖 4 有相同的參數)

覆蓋角為  $\pi/2$ ，並有 20dB 的額外衰減，可以用來表示 shadowing 的效應。因此，設  $\check{\beta} = \check{\beta}_2 = 20\text{dB}$ 、 $\theta_1 = \theta_2 = \pi/2$ 。圖五圖六顯示在這個情況下，感知網路干擾  $I_{st}$  的 PDF 以及 CCDF。由這些圖片可以再次觀察到截角穩定( truncated-stable ) 模型可以用來準確的擷取感知網路干擾的統計行為。

## 4.4 應用

### A. Effect of the Primary Network Power Control

大部分研究一般用蜂巢系統來克服功率控制的 near-far problem。倘若主要網路使用了功率控制，主要網路使用者的傳輸功率，會因為基地台與主要接收端之間的距離  $R_b$  以及通道增益  $H_b$  而有所不同。因此，傳輸功率  $P_p$  多半是隨機的，而了解感知網路干擾功率控制的效應也相當重要。假設在功率可以完美控制的情況下， $P_p | H_b|^2 / (R_b^{2\beta}) \geq P^*$ ， $P^*$  為最小功率需求。針對離散功率控制，可能的功率組合是有限的。假設有  $L$  種可能的功率  $P_1, P_2, \dots, P_L$ ，我們用 probability mass function (PMF)：



圖七：非圓區域的環形部分近似

$$\mathbf{P}\{P_p = P_\ell\} = \begin{cases} \mathbf{P}\left\{\frac{P^* R_p^{2b}}{|H_p|^2} \leq P_1\right\}, & \text{for } \ell = 1 \\ \mathbf{P}\left\{P_{\ell-1} < \frac{P^* R_p^{2b}}{|H_p|^2} \leq P_\ell\right\}, & \text{for } \ell = 2, 3, \dots, L-1 \\ \mathbf{P}\left\{\frac{P^* R_p^{2b}}{|H_p|^2} > P_L\right\}, & \text{for } \ell = L \end{cases} \quad (31)$$

這是以經驗法則求得。而在這個情況，single-threshold 協定下，感知網路干擾的第  $n$  個 cumulant 可以寫為

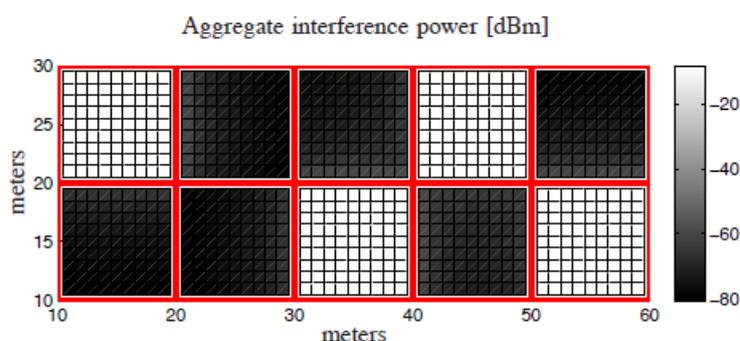
$$\kappa_{I_{st}}(n) = E\left\{P_I^{n/2} \kappa_{Z_{st}\left(\frac{\beta}{\kappa P_p}; \mathbb{R}\right)}(n)\right\} = P_I^{n/2} \sum_{\ell=1}^L \mathbf{P}\{P_p = P_\ell\} \kappa_{Z_{st}\left(\frac{\beta}{\kappa P_\ell}; \mathbb{R}\right)}(n) \quad (32)$$

### B. Effect of Secondary Interference Avoidance

除了讓所有的 active 次級使用者都在同一個類別裡傳輸相同的功率，也可以使用次級功率控制，在降低干擾和改善功率效率上都有很好的成果 [60][61]。此外，如果可以知道次級使用者的位置，就可以設計一個功率效率較好的次級網路。舉例來說，如果在預期的接收端接收到的平均訊雜比很小，就不需要每個次級使用者在傳輸時都使用開關功率控制。因此，在可以知道位置的情況下，可以規定出每個次級使用者，只在預期接收端在最大距離  $R^*$  以內的範圍下才作傳輸。超過這個最大距離的傳輸都是不可靠的。令  $P_s$ 、 $R_s$  兩個變數分別為次級傳輸功率以及和預期接收端的距離。而在考慮功率控制的 single-threshold 空間重用的協定下，第  $n$  個感知網路干擾的 cumulant 為

$$\kappa_{I_{st}}(n) = \mu_{\sqrt{P_s}}(n) \kappa_{Z_{st}(\zeta; \mathbb{R})}(n) \quad (33)$$

如果預期的接收端很近，根據 Poisson point processes 定理， $R_s$  可以趨近於 Rayleigh ( $1/(2\pi\lambda r)$ )， $\lambda_r$  為次級接收端的密度。

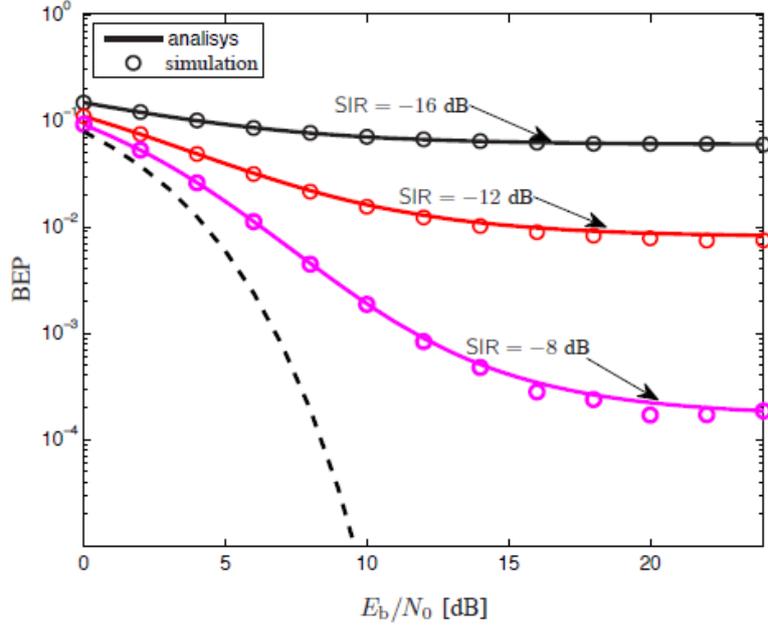


圖八：由 FBS 產生的集合干擾功率(dBm)

### C. Non-circular Regions

當主要與次級使用者在一個有限的區域內，主要使用者的位置以及區域的形狀會影響主要次要使用者間的距離分布，也因此造成了整體干擾。在 Sections II 和 III 提出的架構中，考慮到用極座標系統以及將主要使用者放置在區域的中心。極座標便於分析散佈在圓切面的干擾源。但為了將整個架構延伸到非圓型區域的問題，本研究把整個區域分個成極小的圓形(圖七)，然後以(30)式去估計感知網路干擾的第  $n$  個累積量(cumulant)。用這個方法，任何位置的主要使用者、多個障礙物的 shadowing、不同密度的區域都可以考慮到。

*Remark 3 (Femtocells):*依照上述處理非圓形區域的方法，將在 macrocell 網路下，femtocell base stations (FBSs)產生的整的干擾建立模型[62]。因為 FBSs 為隨機配置，macrocell 網路下沒有座標依據，他們自然會對 macrocell 使用者造成干擾。舉例來說，用(30)式以全網路活動(full network activity)累積量(10)代替  $\kappa Z_{st}(\zeta\tilde{\beta}_\ell; \mathcal{R}_\ell)^{(n)}$ ，在此可以定義在環境中由 FBSs 產生的整體干擾的統計特性。在圖八中使用在 femtocells standardization process 中的其中一個參考環境，來計算整體干擾。每個方塊代表一個(10 × 10)公尺的區塊；裡面的每個小格代表已量測過整體干擾功率的位置，對應每個被干擾影響的 macrocell 使用者。



圖九：在知網路干擾的存在下  $E_b/N$  對 BPSK 的 BEP

#### D. BEP Analysis

在區域 R 中，節點的傳輸動作在(3)的規範下，並存在感知網路產生的干擾，在此考慮一個 binary phase-shift keying(BPSK)窄頻系統。在相關接收者後，主要接收訊號的決策變數可以寫成

$$V = GU\sqrt{E_b} + I_{st} + W \quad (34)$$

$G$  為影響訊號的通道衰變因子； $U \in \{1, -1\}$  為訊息資料數據； $E_b$  為每位元的能量； $I_{st}$  為感知網路干擾； $W$  為 zero-mean additive white Gaussian noise，變異數為  $N_0/2$ 。用  $G$ 、 $I_{st}$ 、 $U = +1$  的條件，決策變數  $V$  的 CF 為

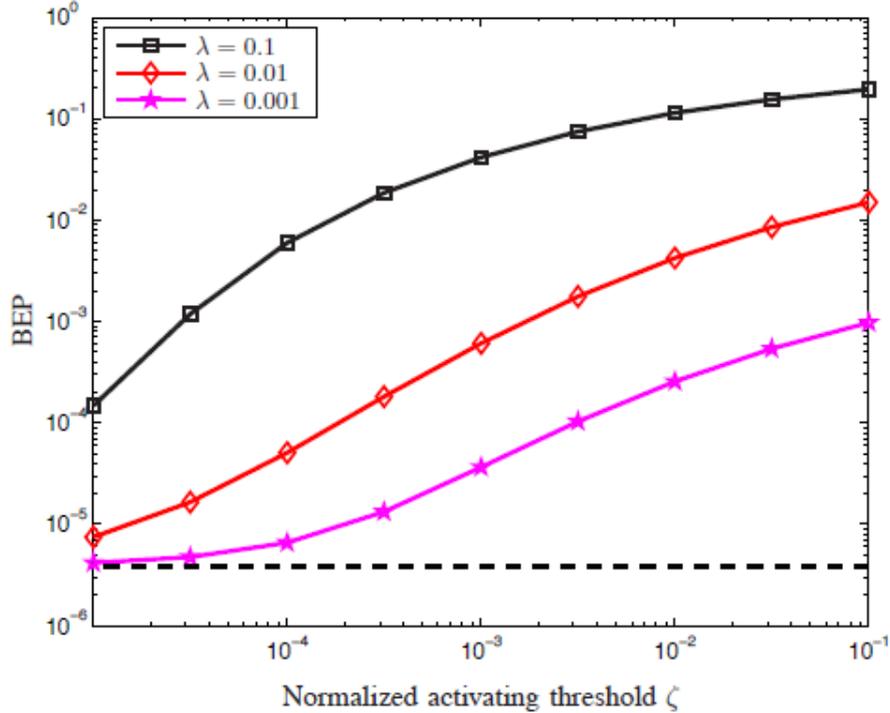
$$\psi_V(j\omega|G, I_{st}, U = +1) = \exp\left\{j\omega\left(G\sqrt{E_b} + I_{st}\right) - \frac{N_0\omega^2}{4}\right\} \quad (35)$$

假設  $G$  和  $I_{st}$  為統計獨立， $U = +1$  決策變數的 CF 為

$$\psi_V(j\omega|U = +1) = \psi_G(j\omega\sqrt{E_b})\psi_{I_{st}}(j\omega)\exp\left(-\frac{N_0\omega^2}{4}\right) \quad (36)$$

感知網路干擾  $I_{st}$ ，我們用對稱截角穩定 (truncated-stable) 模型， $I_{st} \sim S_t$  ( $\gamma'_{st}$ ,  $\alpha = 2/b$ ,  $g_{st}$ )  $\gamma'_{st}$ 、 $g_{st}$  由(25)(26)決定。因為  $I_{st}$  被估計成一個對稱隨機變數，平均的 BEP 會等於  $U = +1$  時的 BEP，用 inversion theorem 可以表示為

$$P_e = P\{V < 0 | U = +1\} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty \frac{\psi_v(-j\omega | U = +1) - \psi_v(+j\omega | U = +1)}{j\omega} d\omega \quad (37)$$



圖十：BER 的 BPSK

#### 4.5 數值結果

這個章節要說明用感知網路干擾模型去觀察主要次級網路之間的共存。舉個數值的例子。假設沒有其他指定的值，主要和次級訊號都在  $d_{\min} = 1$  m、 $d_{\max} = 60$  m、 $b = 1.5$ ，有 Rayleigh fading 的條件下。本研究先觀察在主要使用者的 BER 下，感知網路干擾的效應。圖九為 BPSK 的 BER 對  $E_b/N_0$ ，分別在訊雜比  $SIR = E_b/P_I = -16$ ,  $-12$ , and  $-8$  dB 作圖，次級網路密度為  $\lambda = 0.1$  users/m<sup>2</sup>，並在 single-threshold 協定下， $\zeta = -40$  dBm。由圖九觀察得知，模擬與分析結果是相符合的，這樣一來就確立了在 Section IV-D 的 BER 分析，也再次確認 truncated-stable 的干擾模型是有效的。

為了確立次級使用者的空間密度效應，與主要 BER 下的 activating threshold，圖十以在 single-threshold 協定下，正規化的 activity threshold  $\zeta$  的函數表示 BPSK 的 BER； $E_b/N_0 = 10$  dB、 $SIR = -10$  dB、 $\lambda = 0.1, 0.01$ , and  $0.001$  users/m<sup>2</sup>。如同我們預期，可以觀察到當節點密度  $\lambda$  或是 threshold  $\zeta$  增加的時候，主要 BER 會有很嚴重的衰減。只要給定次級密度，此分析架構就可

以設計出一個 activity threshold，並確保目標 BEP 在主要使用者端。

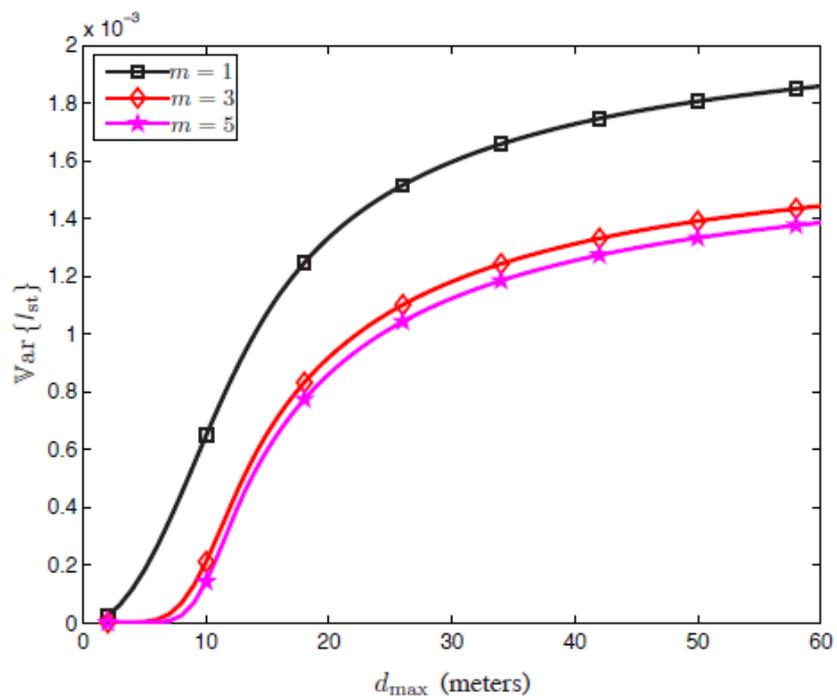
為證明在感知網路干擾的 fading 效應，接下來考慮主要與次級信號的 Nakagami-m fading，即  $\sqrt{Y_i} \sim \text{Nakagami}(m, 1)$ 、 $|H_i| \sim \text{Nakagami}(m, 1)$ 。圖十一顯示，當 Nakagami fading 參數  $m=1, 3, 5$ ，離主要使用者最大距離  $d_{\max}$  的函數表示感知網路干擾  $I_{st}$  的變異數(平均功率)。次級網路的使用者密度  $\lambda = 0.01 \text{ users/m}^2$ ，並根據 single-threshold 協定， $\zeta = -30 \text{ dBm}$ ，每個使用者傳輸功率  $P_i = 0 \text{ dBm}$ 。這個例子可以看出，threshold  $\zeta$  固定，fading 參數  $m$  增加(fading 較不顯著)，因為次級的 activity 較少，在主要使用者的感知網路干擾會抵消。可以看出如果 fading 較不顯著(較大的  $m$  值)，在任何  $d_{\max}$  值下，感知網路干擾的功率值會降低。這是因為較不顯著的 fading 會讓與主要使用者距離較接近的次級使用者 activity 減少，最後造成較低的感知網路干擾功率。此外，當  $d_{\max}$  增加，我們可以觀察到感知網路干擾會趨近飽和；這是因為次級使用者距離主要使用者太遠，整體干擾影響有限。

圖十二為在感知網路干擾的功率控制效應；以在主要功率控制下 activating threshold  $\beta$  的函數，在 single-threshold 協定，表示感知網路干擾  $I_{st}$  的變異數。在這個例子， $K=0 \text{ dBm}$ 、密度  $\lambda = 0.1 \text{ users/m}^2$ 、次級使用者傳輸功率為  $P_i = 0 \text{ dBm}$ 。主要使用者散佈在距離基地台  $d_{\min p} = 1 \text{ m}$  到  $d_{\max p} = 1000 \text{ m}$  的環形區域間；同時，通訊連結在 Rayleigh fading 的影響下，即  $|H_p| \sim \text{Rayleigh}(1/2)$ 。根據 primary power control policy，設定四個功率值  $-5, -15, -25, -35 \text{ dBm}$ ，最小所需功率為  $P^* = -95 \text{ dBm}$ 。由圖片可以看出，若主要網路做了功率控制，感知網路干擾的變異數也會增加，不論  $\beta$  是多少。這是因為當主要使用者離基地台越近，他的傳輸功率會減少。結果，次級使用者的 activity 增加，active 次級使用者的數量會很大。

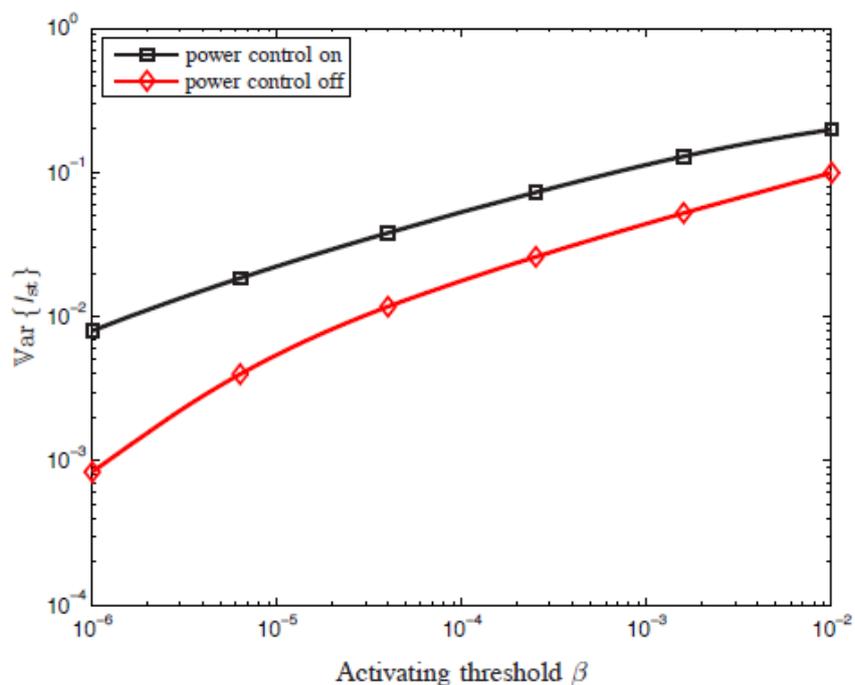
圖十三，不同的  $\lambda$  值，在次級開關功率控制下，以次級使用者在 full activity(即  $\zeta \rightarrow \infty$ )的情況下，最大傳輸距離  $R^*$  的函數，來表示感知網路干擾  $I_{fa}$  的變異數。在這個例子裡， $\sqrt{Y_i} \sim \text{Nakagami}(2, 1)$ 、 $|H_i| \sim \text{Nakagami}(2, 1)$ ，根據 secondary power control policy，定  $P_i = 0 \text{ dBm}$ 、 $P_s \sim \text{Bern}(F_{R_s}(R^*))$ 、 $R_s \sim \text{Rayleigh}(1/(2\pi\lambda r))$ 、 $\lambda_r = \lambda$ ，因此， $\mu_{\sqrt{P_s}}(n)$  在(33)式為  $1 - e^{-\pi\lambda r R^{*2}}$ ；在此可以看出，當  $R^*$  增加，干擾功率增加且指數趨近於一(即  $P_i = 0 \text{ dBm}$ ，沒有功率控制)。可以由圖十三看出，當  $R^*$  增加，感知網路干擾減少了，特別是  $\lambda$  小的時候。

圖十四顯示，主要使用者在  $(200 \times 200)$  公尺平方(見圖七)、full activity ( $\zeta \rightarrow \infty$ )的情況下、 $P_i = 0 \text{ dBm}$ ，感知網路干擾的 PDFs。主要與次級的連結具有 Nakagami-m fading(即  $\sqrt{Y} \sim \text{Nakagami}(2, 1)$ 、 $|H_i| \sim \text{Nakagami}(2, 1)$ )；方塊中的區域有兩個不同的次級空間密度：在紅色區塊， $\lambda = 0.01$ 、黃色區塊， $\lambda = 0$ (即沒有次級使用者)。PDFs  $f_{I_{fa}}(x)$  根據三個主要使用者位置的情況作圖：i) 在大的方塊中間，ii) 在低密度(零密度)區域的中心，iii) 在大型方塊的右上角。又可以由圖十四觀察得知，當主要使用者移動到角落的時候，感知網路干擾會比較不

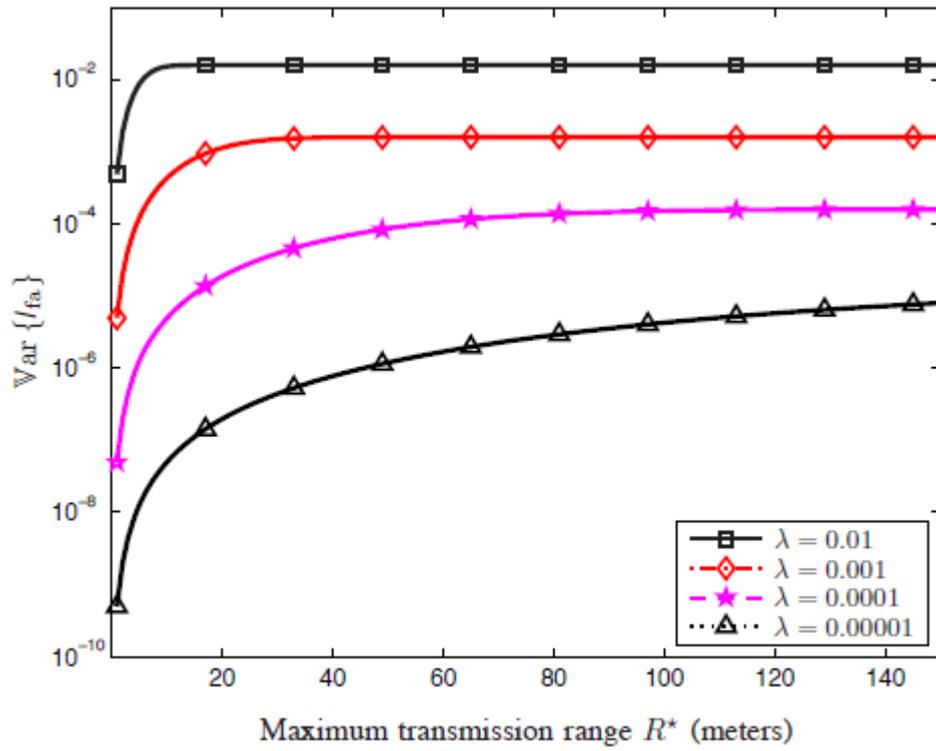
嚴重。這是因為當主要使用者在角落的時候，主要與次級使用者間的距離增加。此外，這個架構也可以用來討論，指定區域中，次級使用者的不均勻空間分布問題。因此，由統計干擾模型，可以找出主要使用者容易受到感知網路影響的位置。



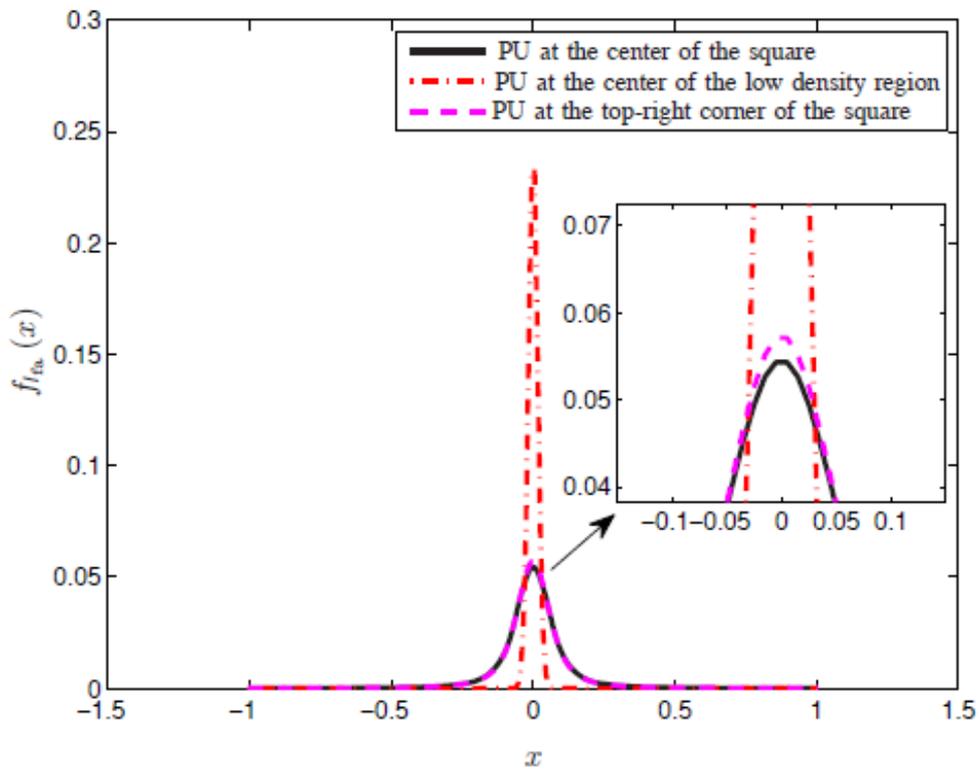
圖十一：感知網路干擾的改變



圖十二：感知網路干擾的變化



圖十三：感知網路干擾的變化



圖十四：感知網路干擾的 PDF

## 4.6 結論

在本章中，針對感知網路干擾的整合提出一個新的統計模型；它可以解釋感傳程序、空間分布結點、次要空間重用協定，以及像 path loss、shadowing、通道衰變這類的環境相關條件。此研究考慮次要空間重用協定的兩種型式，也就是 single-threshold 與 multiple-threshold 協定；針對各個協定都要定義出對於主要使用者的感知網路的干擾，它的特徵函數和累積量。利用截角穩定分布 (truncated-stable distributions)，可以得到感知網路感擾的統計模型。更進一步的去延伸這個模型，使其具有功率控制和 shadowing 的效應，並在感知網路干擾存在的條件下定義出 BEP。數據結果指出，此研究的模型在各種不同的情境條件下，對於感知網路干擾統計行為的擷取是有效的。本章發展出的架構，讓讀者可以定義感知網路干擾，在未來可以成功的佈署感知網路。此外，這個架構也可以被應用在 macrocell users 在多層網路的隨機分布封閉路徑 femtocell，所造成的跨層干擾效應研究上。

## 4.7 參考資料

- [1] FCC, “Policy task force report (et docket-135),” 2002.
- [2] M. A. McHenry, “NSF Spectrum Occupancy Measurements Project Summary,” Shared Spectrum Company, 2005.
- [3] FCC, “Notice of proposed rule making, in the matter of facilitating opportunities for flexible, efficient and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies (et docket no. 03-108) and authorization and use of software defined radios (et docket no. 00-47), FCC 03-322,” Dec. 2003.
- [4] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [5] I. F. Akyildiz, W. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, “Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey,” *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127–2159, Sep. 2006.
- [6] Q. Zhao and B. M. Sadler, “A survey of dynamic spectrum access,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 79–89, May 2007.
- [7] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, “Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective,” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894–914, May 2009.
- [8] A. Ghasemi, , and E. S. Sousa, “Spectrum sensing in cognitive radio networks:

- Requirements, challenges and design trade-offs,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 32–39, Apr. 2008.
- [9] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, “Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios,” in *Proc. IEEE Asilomar Conf. on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, CA, Nov. 2004, pp.772–776.
- [10] A. Sonnenschein and P. M. Fishman, “Radiometric detection of spread- spectrum signals in noise,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 28,no. 3, pp. 654–660, Jul. 1992.
- [11] R. Tandra and A. Sahai, “SNR walls for signal detection,” *IEEE J. Sel Topics Signal Process.*, vol. 2, no. 1, pp. 4–17, Feb. 2008.
- [12] R. Tandra, S. M. Mishra, and A. Sahai, “What is a spectrum hole and what does it take to recognize one: Extended version,” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 824–848, May 2009.
- [13] M. Z. Win, “A mathematical model for network interference,” *IEEE Commun. Theory Workshop*, Sedona, AZ, May 2007.
- [14] M. Z. Win, P. C. Pinto, and L. A. Shepp, “A mathematical theory of network interference and its applications,” *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 205–230, Feb. 2009.
- [15] M. Z. Win and R. A. Scholtz, “Impulse radio: How it works,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, no. 2, pp. 36–38, Feb. 1998.
- [16] —, “Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 4, pp. 679–691, Apr. 2000.
- [17] M. Z. Win, “A unified spectral analysis of generalized time-hopping spread-spectrum signals in the presence of timing jitter,” *IEEE J. Sel.Areas Commun.*, vol. 20, no. 9, pp. 1664–1676, Dec. 2002.
- [18] R. A. Scholtz, “Private conversation,” University of Southern California, Sep. 1997, Los Angeles, CA.
- [19] J. H. Winters, “Private conversation,” AT&T Labs-Research, Mar. 2001, Middletown, NJ.
- [20] L. A. Shepp, “Private conversation,” AT&T Labs-Research, Mar. 2001, Middletown, NJ.
- [21] P. C. Pinto and M. Z. Win, “Communication in a Poisson field of interferers – Part I: Interference distribution and error probability,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 7, pp. 2176–2186, Jul. 2010.
- [22] —, “Communication in a Poisson field of interferers – Part II: Channel capacity and interference spectrum,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*,vol. 9, no. 7, pp. 2187–2195, Jul. 2010.

- [23] A. Rabbachin, T. Q. S. Quek, P. C. Pinto, I. Oppermann, and M. Z. Win, "Non-coherent UWB communication in the presence of multiple narrowband interferers," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 11, pp. 3365-3379, Nov. 2010.
- [24] P. C. Pinto, A. Giorgetti, M. Z. Win, and M. Chiani, "A stochastic geometry approach to coexistence in heterogeneous wireless networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 7, pp. 1268-1282, Sep. 2009.
- [25] P. C. Pinto and M. Z. Win, "Spectral characterization of wireless networks," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, vol. 14, no. 6, pp. 27-31, Dec. 2007.
- [26] J. F. Kingman, *Poisson Processes*. Oxford University Press, 1993.
- [27] S. Chandrasekhar, "Stochastic problems in physics and astronomy," *Rev. Modern Phys.*, vol. 15, no. 1, pp. 1-89, Jan. 1943.
- [28] S. E. Heath, "Applications of the Poisson Model to Wireless Telephony and to Cosmology," Ph.D. dissertation, Department of Statistics, Rutgers University, Piscataway, NJ, Mar. 2004, thesis advisor: Professor Lawrence A. Shepp.
- [29] M. Y. Vardi, L. Shepp, and L. Kaufman, "A statistical model for positron emission tomography," *Journal of the American Statistical Association*, vol. 80, no. 389, pp. 8-20, Mar. 1985.
- [30] M. Beil, F. Fleischer, S. Paschke, and V. Schmidt, "Statistical analysis of 3D centromeric heterochromatin structure in interphase nuclei," *Journal of Microscopy*, vol. 217, pp. 60-68, 2005.
- [31] D. L. Snyder, "Filtering and detection for doubly stochastic Poisson processes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 91-102, Jan. 1972.
- [32] J. R. Pierce, "Optical channels: practical limits with photon-counting," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 26, no. 12, pp. 1819-1821, Dec. 1978.
- [33] J. R. Pierce, E. C. Posner, and E. R. Rodemich, "The capacity of the photon counting channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 27, no. 1, pp. 61-77, Jan. 1981.
- [34] J. L. Massey, "Capacity cutoff rate, and coding for direct detection optical channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 29, no. 11, pp. 1615-1621, Nov. 1981.
- [35] E. S. Sousa, "Performance of a spread spectrum packet radio network link in a Poisson field of interferers," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 38, no. 6, pp. 1743-1754, Dec. 1992.
- [36] J. Ilow, D. Hatzinakos, and A. N. Venetsanopoulos, "Performance of FH SS radio networks with interference modeled as a mixture of Gaussian and alpha-stable noise," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 4, pp. 509-520, Apr. 1998.
- [37] C. C. Chan and S. V. Hanly, "Calculating the outage probability in a CDMA network with spatial Poisson traffic," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 1, pp. 183-204, Jan. 2001.

- [38] F. Baccelli, B. Błaszczyszyn, and F. Tournois, “Spatial averages of coverage characteristics in large CDMA networks,” *Wireless Networks*, vol. 8, no. 6, pp. 569–586, Nov. 2002.
- [39] X. Yang and A. P. Petropulu, “Co-channel interference modeling and analysis in a Poisson field of interferers in wireless communications,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 51, no. 1, pp. 64–76, 2003.
- [40] J. Orriss and S. K. Barton, “Probability distributions for the number of radio transceivers which can communicate with one another,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 4, pp. 676–681, Apr. 2003.
- [41] S. P. Weber, X. Yang, J. G. Andrews, and G. de Veciana, “Transmission capacity of wireless ad hoc networks with outage constraints,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 12, pp. 4091–4102, Dec. 2005.
- [42] O. Dousse, F. Baccelli, and P. Thiran, “Impact of interferences on connectivity in ad hoc networks,” *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 13, no. 2, pp. 425–436, Apr. 2005.
- [43] O. Dousse, M. Franceschetti, and P. Thiran, “On the throughput scaling of wireless relay networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2756–2761, Jun. 2006.
- [44] L. Song and D. Hatzinakos, “Cooperative transmission in Poisson distributed wireless sensor networks: Protocol and outage probability,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 10, pp. 2834–2843, Oct. 2006.
- [45] A. Ghasemi and E. S. Sousa, “Interference aggregation in spectrum- sensing cognitive wireless networks,” *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 2, no. 1, pp. 41–56, Feb. 2008.
- [46] R. Menon, R. M. Buehrer, and J. H. Reed, “On the impact of dynamic spectrum sharing techniques on legacy radio systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, pp. 4198–4207, Nov. 2008.
- [47] W. Ren, Q. Zhao, and A. Swami, “Power control in spectrum overlay networks: How to cross a multi-lane highway,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 7, pp. 1283–1296, Sep. 2009.
- [48] E. Salbaroli and A. Zanella, “Interference analysis in a Poisson field of nodes of finite area,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 4, pp. 1776–1783, May 2009.
- [49] H. Inaltekin, M. Chiang, H. V. Poor, and S. B. Wicker, “The behavior of unbounded path-loss models and the effect of singularity on computed network characteristics,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 7, pp. 1078–1092, Sep. 2009.
- [50] R. K. Ganti and M. Haenggi, “Interference and outage in clustered wireless ad hoc networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 4067–4086, Sep.

2009.

- [51] F. Baccelli, B. Błaszczyszyn, and P. Muhlethaler, “Stochastic analysis of spatial and opportunistic Aloha,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 7, pp. 1105–1119, Sep. 2009.
- [52] V. Chandrasekhar and J. G. Andrews, “Uplink capacity and interference avoidance for two-tier femtocell networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 7, pp. 3498–3509, Jul. 2009.
- [53] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen, “Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 589–600, Apr. 2007.
- [54] O. Simeone, I. Stanojev, S. Savazzi, Y. Bar-Ness, U. Spagnolini, and R. Pickholtz, “Spectrum leasing to cooperating secondary ad hoc networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 1, pp. 203–213, Jan. 2008.
- [55] L. C. Wang and A. Chen, “Effects of location awareness on concurrent transmissions for cognitive ad hoc networks overlaying infrastructure-based systems,” *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 8, no. 5, pp. 577–589, May 2009.
- [56] ECC, “Technical requirements for UWBDAA (detect and avoid) devices to ensure the protection of radiolocation services in the bands 3.1 - 3.4 GHz and 8.5 - 9 GHz and BWA terminals in the band 3.4 - 4.2 GHz,” 2008.
- [57] G. Samoradnitsky and M. Taqqu, *Stable Non-Gaussian Random Processes*. Chapman and Hall, 1994.
- [58] R. K. Ganti and M. Haenggi, “Interference in ad hoc networks with general motion-invariant node distributions,” in *Proc. IEEE Int. Symp. on Inf. Theory*, Toronto, CANADA, Jul. 2008, pp. 1–5.
- [59] P. Carr, H. Geman, D. B. Madan, and M. Yor, “The fine structure of asset returns: An empirical investigation,” *The Journal of Business*, vol. 75, no. 2, pp. 305–332, Apr. 2002.
- [60] N. Bambos and S. Kandukuri, “Power controlled multiple access (PCMA) schemes for next-generation wireless packet networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 3, pp. 58–64, Mar. 2002.
- [61] G. J. Foschini and Z. Miljanic, “A simple distributed autonomous power control algorithm and its convergence,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, no. 4, pp. 641–646, Nov. 1993.
- [62] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews, and A. Gatherer, “Femtocell networks: A survey,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 9, pp. 59–67, Sep. 2008.
- [63] J. Gil-Pelaez, “Note on the inversion theorem,” *Biometrika*, vol. 38, no. 3/4, pp. 481–482, Dec. 1951.

## 第五章 結論及成果自評

### 5.1 結論

第二章在多頻段/寬頻系統中，主要用戶與感知無線電的用戶均與不同的接收者進通訊並會受到相互的干擾，同時假設每一個使用者僅知道自己的通道或是透過適當的感測能得知未被使用的頻譜的應用情境下進行了頻譜效率的分析。在文中透過模擬得出量化的頻譜共享頻譜效率與傳統無線電裝置的頻譜效率增益值以及最多的成對感知通訊數。頻譜共享這種新的方法能夠在沒有犧牲已憑證註冊的頻譜使用者的傳輸品質情況下，讓更多使用者獲得空閒的頻譜使用。

第三章提出能透過多重存取到異質網路的改善頻譜效率演算法。首先呈現出一個多重存取的簡單例子來證實頻譜效率的優勢，然後再提出一個同時多重存取的演算法。提出的多重存取演算法在頻譜效率方面經由模組化和分析，顯示出提出的演算法與只選擇一個最佳通道品質的垂直交換法比較之下，提出的演算法能提升頻譜效率。

第四章針對感知網路干擾的整合提出一個新的統計模型；它可以解釋感傳程序、空間分布結點、次要空間重用協定，以及像 path loss、shadowing、通道衰變這類的環境相關條件。因此一開始先定義多重存取的系統模型定義。再推導最佳化的解決方案。數值的分析證明所提出的干擾模型是有效的，並可以同時了解干擾特性的細節。

### 5.2 成果自評

前兩年之研究主要從頻譜管理及頻譜共享之觀點去探討感知無線的標準化與相關規範，了解感知無線電過去和現在標準化的相關議題，以及討論標準化未來的發展。我們也研究 AD Hoc 網路之感知無線電頻譜管理機制，提出利用感知無線電與動態頻譜存取技術來加強 Ad hoc 網路的頻譜使用率進而提升通訊品質和提高系統容量。

今年度之研究延續上一年度，針對感知無線電網路系統進行更進一步的研究，從挑選實際應用中可行的方案，進行頻譜效率的量化分析與模型建立，像是在多頻段/寬頻系統中，主要用戶與感知無線電的用戶均與不同的接收者進通訊並會受到相互的干擾，同時假設每一個使用者僅知道自己的通道或是透過適當

的感測能得知未被使用的頻譜的應用情境下進行了頻譜效率的分析，或是改善頻譜效率透過多重存取到異質網路的演算法。接著又考慮到實際實行面上必定會遇到的干擾問題，感知網路干擾的整合提出一個統計模型以預期及解釋感傳程序、空間分布結點、次要空間重用協定，以及像 path loss、shadowing、通道衰變這類的環境相關條件所造成的干擾。

今年度的研究結果，使我們更加了解感知無線電網路如何應用在現行的網路上，也對頻譜共享機制中種種不同應用環境及規劃方式對於頻譜效率的提升有更確切及深入的了解，而感知網路的干擾模型對我們未來設計出符合經濟效率感知無線網路有很大的幫助，日後也較能成功的佈署感知網路。

本計畫已發表之相關論文如下：

1. Ang-Hsun Tsai, Li-Chun Wang, Jane-Hwa Huang, and Ruey-Bing Hwang, "Capacity comparison for CSG and OSG OFDMA femtocells," in *Proc. IEEE GLOBECOM Workshops (GC'10 Workshops)*, pp.653-658, Dec. 2010.
2. Ang-Hsun Tsai, Li-Chun Wang, Jane-Hwa Huang, and Ruey-Bing Hwang, "Stable subchannel allocation for OFDMA femtocells with switched multi-beam directional antennas," in *Proc. IEEE GLOBECOM 2011 - Wireless Communications Symposium (GC'11 - WC)*, Dec. 2011.

# 國科會補助計畫衍生研發成果推廣資料表

日期:2011/10/04

國科會補助計畫	計畫名稱: 子計畫一: 頻譜共享機制與感知型無線網路架構設計之研究(3/3)
	計畫主持人: 唐震寰
	計畫編號: 99-2219-E-009-001- 學門領域: 無線通訊(國家型)
無研發成果推廣資料	

99 年度專題研究計畫研究成果彙整表

計畫主持人：唐震寰		計畫編號：99-2219-E-009-001-					
計畫名稱：頻譜規劃配置與管理基礎研究--子計畫一：頻譜共享機制與感知型無線網路架構設計之研究(3/3)							
成果項目			量化			單位	備註（質化說明：如數個計畫共同成果、成果列為該期刊之封面故事...等）
			實際已達成數（被接受或已發表）	預期總達成數(含實際已達成數)	本計畫實際貢獻百分比		
國內	論文著作	期刊論文	1	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	1	0	100%		
		專書	0	0	100%		
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（本國籍）	碩士生	4	0	100%	人次	
		博士生	2	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		
國外	論文著作	期刊論文	0	0	100%	篇	
		研究報告/技術報告	0	0	100%		
		研討會論文	0	0	100%		
		專書	0	0	100%		章/本
	專利	申請中件數	0	0	100%	件	
		已獲得件數	0	0	100%		
	技術移轉	件數	0	0	100%	件	
		權利金	0	0	100%	千元	
	參與計畫人力（外國籍）	碩士生	0	0	100%	人次	
		博士生	0	0	100%		
		博士後研究員	0	0	100%		
		專任助理	0	0	100%		

<p>其他成果 (無法以量化表達之成果如辦理學術活動、獲得獎項、重要國際合作、研究成果國際影響力及其他協助產業技術發展之具體效益事項等，請以文字敘述填列。)</p>	<p>無</p>
--	----------

	成果項目	量化	名稱或內容性質簡述
科 教 處 計 畫 加 填 項 目	測驗工具(含質性與量性)	0	
	課程/模組	0	
	電腦及網路系統或工具	0	
	教材	0	
	舉辦之活動/競賽	0	
	研討會/工作坊	0	
	電子報、網站	0	
	計畫成果推廣之參與(閱聽)人數	0	

# 國科會補助專題研究計畫成果報告自評表

請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況、研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）、是否適合在學術期刊發表或申請專利、主要發現或其他有關價值等，作一綜合評估。

1. 請就研究內容與原計畫相符程度、達成預期目標情況作一綜合評估

達成目標

未達成目標（請說明，以 100 字為限）

實驗失敗

因故實驗中斷

其他原因

說明：

2. 研究成果在學術期刊發表或申請專利等情形：

論文： 已發表  未發表之文稿  撰寫中  無

專利： 已獲得  申請中  無

技轉： 已技轉  洽談中  無

其他：（以 100 字為限）

Ang-Hsun Tsai, Li-Chun Wang, Jane-Hwa Huang, and Ruey-Bing Hwang, 'Capacity comparison for CSG and OSG OFDMA femtocells,' in Proc. IEEE GLOBECOM Workshops (GC'10 Workshops), pp.653-658, Dec. 2010.

3. 請依學術成就、技術創新、社會影響等方面，評估研究成果之學術或應用價值（簡要敘述成果所代表之意義、價值、影響或進一步發展之可能性）（以 500 字為限）

今年度之研究延續上一年度，針對感知無線電網路系統進行更進一步的研究，從挑選實際應用中可行的方案，進行頻譜效率的量化分析與模型建立，像是在多頻段/寬頻系統中，主要用戶與感知無線電的用戶均與不同的接收者進通訊並會受到相互的干擾，同時假設每一個使用者僅知道自己的通道或是透過適當的感測能得知未被使用的頻譜的應用情境下進行了頻譜效率的分析，或是改善頻譜效率透過多重存取到異質網路的演算法。接著又考慮到實際實行面上必定會遇到的干擾問題，感知網路干擾的整合提出一個統計模型以預期及解釋感傳程序、空間分布結點、次要空間重用協定，以及像 path loss、shadowing、通道衰變這類的環境相關條件所造成的干擾。

今年度的研究結果，使我們更加了解感知無線電網路如何應用在現行的網路上，也對頻譜共享機制中種種不同應用環境及規劃方式對於頻譜效率的提升有更確切及深入的了解，而感知網路的干擾模型對我們未來設計出符合經濟效率感知無線網路有很大的幫助，日後也較能成功的佈署感知網路。