

國立交通大學

電信工程研究所

碩士論文

長期演進技術升級版下行鏈路中具毫微微基  
地台之軟頻率複用機制下適應性頻率分配

Adaptive Frequency Allocation of Soft Frequency Reuse (SFR)  
scheme with Femtocells in Downlink LTE-A Networks

研究生：蔡政谷

指導教授：李程輝 教授

中華民國一〇二年八月

長期演進技術升級版下行鏈路中具毫微微基地台之  
軟頻率複用機制下適應性頻率分配


Adaptive Frequency Allocation of Soft Frequency Reuse (SFR)  
scheme with Femtocells in Downlink LTE-A Networks

研究生：蔡政谷

Student : Cheng-ku Tsai

指導教授：李程輝

Advisor : Tsern-Huei Lee

The logo of National Chiao Tung University is a large circular emblem with a gear-like outer border. Inside the circle, there is a stylized representation of a building or structure with the letters 'NCTU' and '1933' integrated into it. The text '國立交通大學' (National Chiao Tung University) is written in Chinese characters across the top of the emblem, and '電信工程研究所' (Institute of Communications Engineering) and '碩士論文' (Master's Thesis) are written in the center.

國立交通大學  
電信工程研究所  
碩士論文

A Thesis

Submitted to Institute of Communications Engineering  
College of Electrical and Computer Engineering  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master  
in

Communications Engineering

August 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一〇二年八月

# 長期演進技術升級版下行鏈路中具毫微微基地台 之軟頻率複用機制下適應性頻率分配

學生：蔡政谷

指導教授：李程輝 博士

國立交通大學電信工程研究所碩士班

## 摘 要

隨著網際網路的普及以及無線通訊技術的進步，各式各樣的使用者裝置大量出現，再加上現代多樣化的行動裝置應用軟體對網路資源的需求越來越吃重，現有的無線網路業者已經無法滿足客戶的需求，異質性網路架構於是被提出。異質性網路，是長程演進技術升級版提出的嶄新架構，能夠有效的填補訊號覆蓋空洞，並增進系統整體的容量，然而，因應新的無線網路傳輸資源規格「正交分頻多工存取技術」，異質性網路必須考慮使用的頻帶重複時各階層基地台的干擾協調，因此各種頻率複用的模型被提出與討論。其中軟頻率複用有著相當好的頻譜使用效率，並且適合異質性網路各階基地台的嵌入，可以說是相當不錯的結合。不過完全按照基礎軟頻率複用的頻率分配，並不符合實際系統中使用裝置的使用變遷趨勢，造成頻寬資源分配的浪費，並且降低系統整體效能的提升。本篇論文所提出的動態頻率分配演算法，有效的改善了原本軟頻率複用的缺點，再更進一步提升了系統整體的吞吐量，並同時保證各階使用者裝置的服務品質及資源分配的公平性。

關鍵字：長程演進技術升級版、異質性網路、毫微微基地台、進階基地台間干擾協調  
頻率複用、動態頻率分配

# **Adaptive Frequency Allocation of Soft Frequency Reuse (SFR) scheme with Femtocells in Downlink LTE-A Networks**

Student: Cheng-ku Tsai

Advisor: Dr. Tsern-huei Lee

Institute of Communications Engineering National Chiao Tung University

## **ABSTRACT**

As wireless communication technologies progress, a huge variety of user equipments (UEs) show up. At the same time, the ever growing number of bandwidth-demanding application makes traffic grow exponentially in wireless networks. In order to meet the rapidly increasing demand of data traffic, LTE-Advanced brought the heterogeneous networks (HetNets) which mixes high and low-power nodes up to improve the system capacity. Because of the characteristic of new OFDM access, enhanced inter-cell interference coordination (e-ICIC) becomes so important that frequency reuse models are taken into account and combined with HetNets. Soft frequency reuse (SFR) stands out from the models to show great spectral efficiency and works smoothly while femtocells are inserted into the system. However, sticking to the fixed frequency allocation of SFR is unrealistic and unfair to some of the UEs. So we propose the brand new adaptive frequency allocation scheme to increase the total system throughput while guaranteeing quality of service and fairness to all UEs in the system.

Keywords: LTE-Advanced, HetNets, femtocell, e-ICIC, frequency reuse,  
adaptive frequency allocation

# 誌 謝

首先我想感謝指導教授 李程輝博士在碩班兩年期間對我的教導。老師教導我的除了專業的知識，更有研究的方法以及做學問應該要有的嚴謹態度，不但讓我養成以多面向去看待及評估一件事情的正確思考方式之外，更是令我學習到了做人處事應有的邏輯和法度。除此之外，在老師帶領之下的實驗室，研究風氣自由且自主，我在這裡也因此能訓練自己擁有良好的自我要求和進度排程，在碩班的求學過程可以說是充實又滿足，相信這一切在我畢業後踏入社會都能使我受益無窮。除此之外還要感謝常常和我們一起參與會議的郭耀文教授和高榮宏教授，除了各種救援之外更提供了許多創新而實用的研究意見，激發了許多靈感種子的萌芽。

再來我要感謝實驗室老大梓洋學長和溫柔的承潔學姊，無論多麼忙碌，都願意暫停手邊的工作為我們解答在他們心目中其實很基礎的問題，或是幫助我們解決許多雞毛蒜皮的小麻煩。此外我要感謝研究夥伴癡漢吳咨翰和林裕捷，我們往往討論研究討論到昏天暗地而樂此不疲，也因此能讓我在顛簸的研究路上順利前行。另外要感謝實驗室其他的同學們：阿肉瑞良、鱷魚鏗標、俊緯哥、小煜、彥良、嘉振、外籍生廷勇、志文、胖子俊彥、勁甫和碩一學弟們，大家一起買飯、一起說笑和分享生活趣事成了生活中快樂的插曲，將是我研究生生涯裡不會忘記的美好回憶。

我還要感謝兩年來一起生活的最佳室友毛蟲楊宗翰和周奕岑，以及遠在家鄉的可愛女友黃珮雯，協助我度過那些情緒的低潮，幫助我生活上各種困難，你們是我心靈上最大的慰藉，讓我能堅持並完成我的研究和學生生涯。

最後要感謝最愛我的爸媽蔡銘峰先生和美麗的張秀惠女士，無論晴雨都不求回報的支持我，並讓我在漫長的求學生涯衣食無虞，你們的教育、鼓勵和愛心讓我能成為一個身體健康、心理健全的人，可以沒有後顧之憂的做我想做的事，走我想走的路。

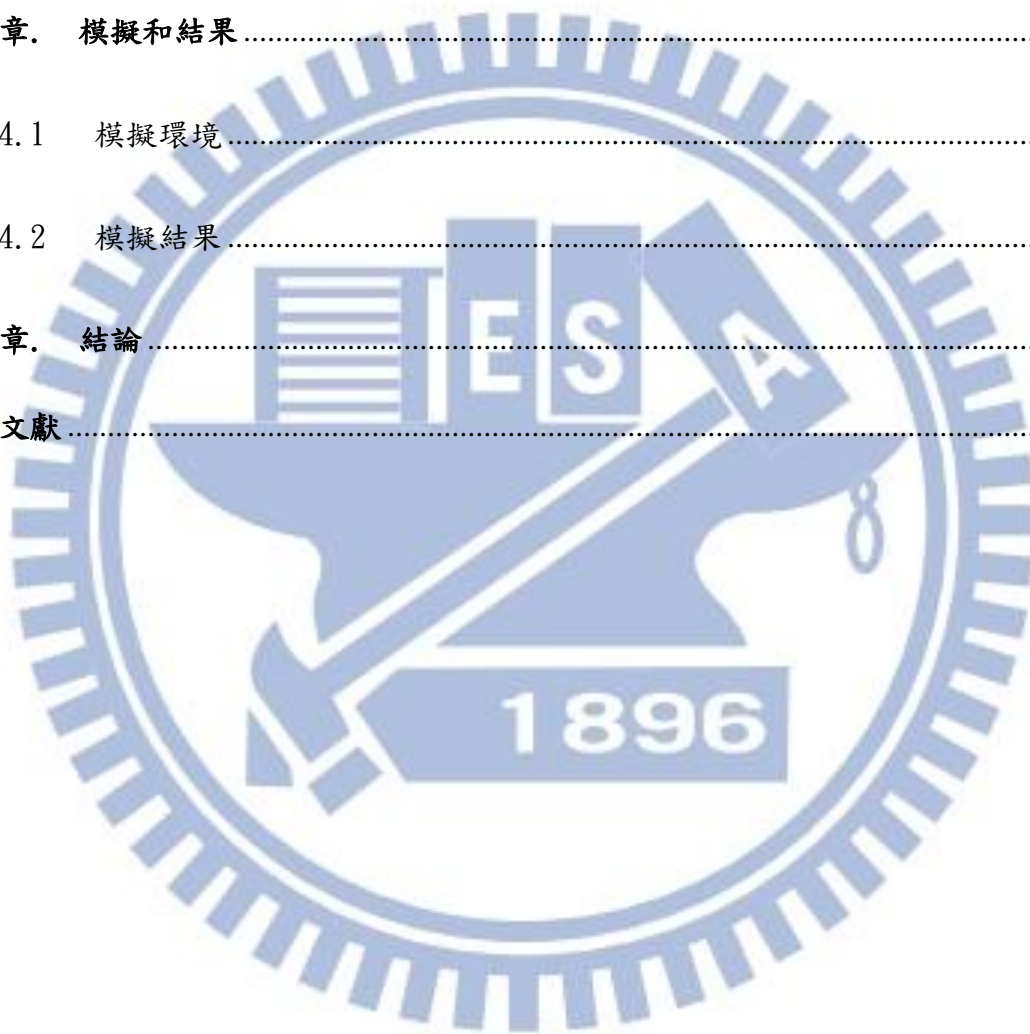
再感謝一次所有幫助過我的人，少了你們任何一個，我都沒辦法順利完成這篇研究，完成我的學業。

2013.08.15

# 目 錄

中文摘要 .....	i
Abstract .....	ii
誌 謝 .....	iii
目 錄 .....	iv
圖 目 錄 .....	vii
表 目 錄 .....	viii
<b>第一章. 簡介 .....</b>	<b>1</b>
1.1 現代行動網路系統沿革 .....	1
1.2 異質性網路 .....	2
1.3 研究動機 .....	5
1.4 相關研究 .....	8
1.5 論文架構 .....	9
<b>第二章. 系統模型 .....</b>	<b>12</b>
2.1 系統環境 .....	12
2.2 毫微微基地台及使用者裝置的佈建和假設 .....	13
2.3 系統效能評估 .....	15
2.4 長程演進技術升級版資源架構 .....	17

<b>第三章. 動態頻寬分配方法和分析</b> .....	18
3.1 問題描述與解決方法 .....	18
3.2 提出的演算法 .....	20
3.3 採用演算法後的干擾分析 .....	26
<b>第四章. 模擬和結果</b> .....	29
4.1 模擬環境 .....	29
4.2 模擬結果 .....	31
<b>第五章. 結論</b> .....	38
<b>參考文獻</b> .....	39



# 圖目錄

圖一	異質性網路中不同層集間基地台的干擾	4
圖二	宏基地台訊號覆蓋幾何示意圖	6
圖三	宏基站頻率複用圖示	6
圖四	加上毫微微基地台的軟頻率複用	8
圖五	其他頻率複用模型	10
圖六	各種頻率複用模型效能比較：Reuse-1 為全頻複用； Reuse-3 為三段頻率複用 SFR 為軟頻率複用；PFR 為分段頻率複用； SFRR 為部分軟頻率複用	11
圖七	系統整體示意圖	12
圖八	資源塊構成圖解	17
圖九	動態頻率分配基本概念	20
圖十	宏基地台使用者轉變為毫微微基地台使用者演算法流程圖	24
圖十一	毫微微基地台使用者轉換為宏基地台使用者演算法流程圖	26
圖十二	採用與未採用演算法之系統吞吐量比較 (300 個使用者裝置，60 個毫微微基地台)	32
圖十三	採用與未採用演算法之系統吞吐量比較 (150 個使用者裝置，60 個毫微微基地台)	33

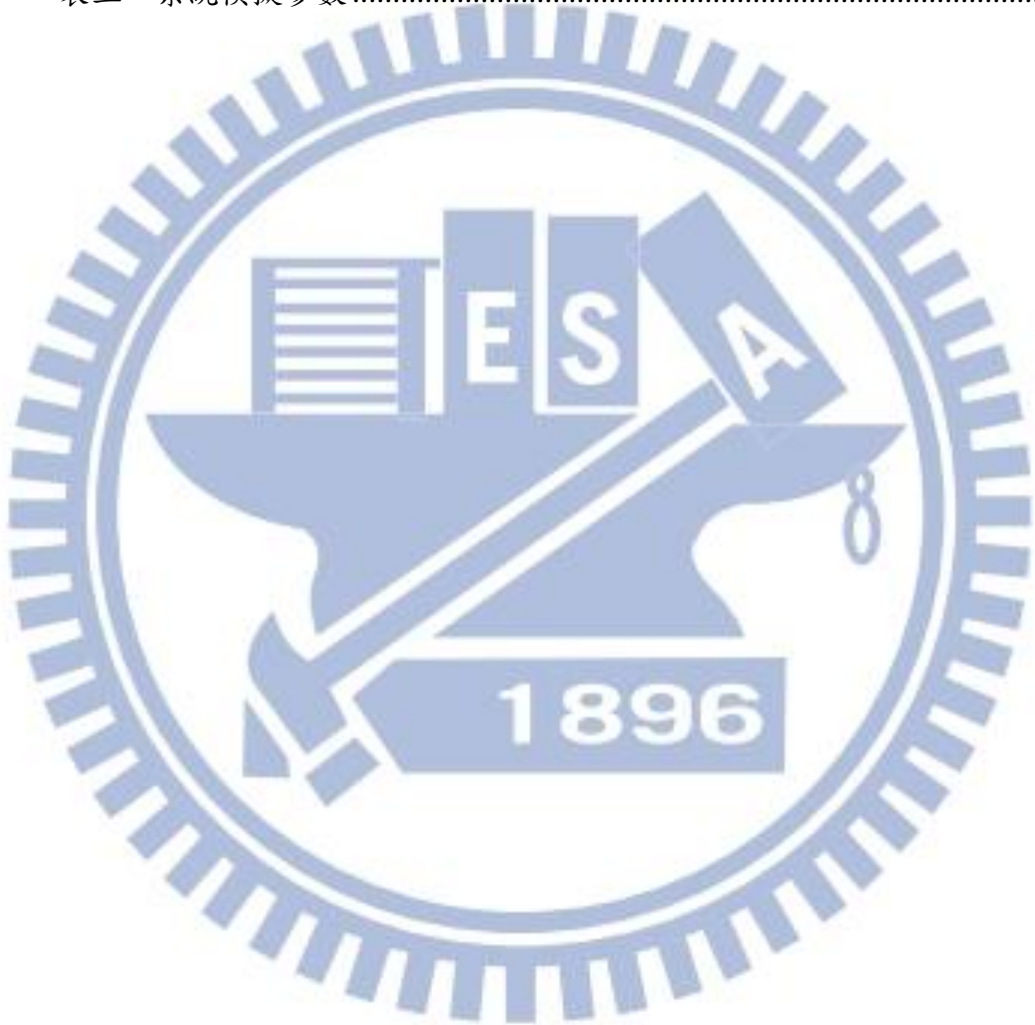


圖十四	採用與未採用演算法之系統吞吐量比較 (450 個使用者裝置, 60 個毫微微基地台)	33
圖十五	採用與未採用演算法之系統吞吐量比較 (300 個使用者裝置, 30 個毫微微基地台)	35
圖十六	採用與未採用演算法之系統吞吐量比較 (300 個使用者裝置, 120 個毫微微基地台)	35
圖十七	外圍宏基地台平均吞吐量 (300 個使用者裝置, 60 個毫微微基地台)	36
圖十八	毫微微基地台平均吞吐量 (300 個使用者裝置, 60 個毫微微基地台)	37



# 表目錄

表一 異質性網路中成員詳述.....	3
表二 系統頻寬與資源塊個數.....	17
表三 系統模擬參數.....	30



# 第一章.

## 簡介

---

### 1.1 現代行動網路系統沿革

近幾十年來科技發展迅速，除了桌上型硬體設備之外，各類手持的無線網路行動裝置數量成長非常迅速，為了因應人手一台甚至多台行動裝置的網路數據需求量，許多技術在近幾年內被提出、修改和更新。

第三代合作夥伴計劃 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 是一個成立於 1998 年的標準化機構，其目標是製訂和實現全球性的第三代行動電話系統 (3rd Generation, 3G) 規範。第三代合作夥伴計劃在 2008 年公布了所制定的長期演進技術 (Long Term Evolution, LTE)，這個技術便是目前應用於行動裝置及數據卡終端的高速無線通訊的標準之一。長期演進技術的目標是藉助新技術和不同調變方法提升無線網路的數據傳輸能力和速度，希望在 20MHz 頻率下可達下行 100Mbps 及上行 50Mbps 的高速傳輸度，並且保有良好連線品質。而為了系統的普及化，設計上為多重網路存取的系統架構，能兼容第三代合作夥伴計劃舊有系統以及其他各標準體系的通訊系統，因此在眾多第四代行動電話系統 (4th Generation, 4G) 標準中，相當地被看好，成為新一代無線通訊系統主流。儘管在商業宣傳上通常被稱作第四代長期演進技術 (4G LTE)，但其實它只是第三點五代在邁向第四代行動電話系統的過度版本，真正達到第四代標準的是長期演進技術升級版 (Long Term Evolution Advanced, LTE-A)，同樣由第三代合作夥伴計劃在 2011 年 3 月完成，本論文要探討的架構就是在長期演進技術升級版規格之下的系統。

長程演進技術升級版的網路架構主要分為無線部份 (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network, E-UTRAN) 與核心網路部份 (Evolved Packet Core, EPC)，並且在核心網路與使用者裝置 (User Equipment, UE) 之間透過演進型基地台 (Evolved Node

B, eNB)執行所有無線電資源管理(Radio Resource Management, RRM)。無線部份的下行鏈路有別於以往第三代行動電話系統使用的寬頻分碼多工(Wide band Code Division Multiple Access, WCDMA)，是以新技術的正交分頻多工(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)存取技術，將頻譜切割成許多正交窄帶子載波(sub-carrier)，與寬頻分碼多工單一載波所承載單一資料比起來，正交分頻多工更能對抗抵抗通道衰弱能力，因此能夠有更好的傳輸能力。其中資源塊(Resource Block)是正交分頻多工存取技術裡分配給用戶的最小單位，方便時域和頻域兩方面的切割和分配，每個使用者裝置同一時間內至少會佔用一個資源塊。

## 1.2 異質性網路

即便網路傳輸技術不斷革新，但是大量增加的各種使用者裝置和對網路數據需求量日益嚴重的嶄新類型應用程式(applications)，使得無線網路的訊務(traffic)量以指數量級成長。面對如此龐大的需求，長程演進技術升級版提出了許多改進方式來提升整個網路系統的效能，例如載波聚合技術(Carrier Aggregation, CA)允許了不同頻率的載波同時被使用，進而提升終端使用者的可用頻寬；多重輸入多重輸出(Multi-input Multi-output, MIMO)利用多根發射與接收天線提供的空間自由度來提升系統的頻譜效率(spectrum efficiency)；協調式多點傳輸和接收(Coordinated Multipoint Transmission and Reception, CoMP)有效地利用傳輸點間的協調來降低干擾並且降低基地台邊緣處使用者裝置的斷線率。然而以上技術雖然帶來有效的系統效能提升但是仍然容易面臨理論上的限制，並且也無法解決當遇到建築密集的城市區域時，訊號的衰減和地形以及建築形成的訊號覆蓋空洞(coverage holes)造成低訊號對干擾雜訊比(signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)的問題。

為了解決這個問題，長程演進技術升級版提出了名為異質性網路(Heterogeneous Networks, HetNets)的系統。異質性網路的構成包括了原本大訊號傳輸功率的演進型基地台(在異質性網路中又稱作宏基地台(macrocell))和其覆蓋範圍內安插的許多各層

級小訊號傳輸功率基地台，以下會逐一列舉並簡述：

宏基地台 (eNB, 又作 macrocell)：即一般無線網路系統中的演進型基地台，訊號傳輸功率大，覆蓋範圍最廣，負責核心網路與大部分使用者裝置的连接。

遠端無線電站 (remote radio head, RRH)：宏基地台的延伸，唯將其中的天線部分作延伸，拉到需要的地方放置，增加宏基地台的覆蓋範圍，但是資料的排程 (scheduling) 仍是由宏基地台本體進行。遠端無線電站可視為宏基地台的一部分，彼此之間以光纖做連結，它們除了增加傳輸訊號覆蓋範圍，也降低了額外建設宏基地台的系統業者成本。

中繼站 (relay)：中繼站的目的是將收到的無線訊號重建、放大再送出，主要是放置於因地形而造成訊號強烈衰減的地方，如窄巷或隧道內。

微微基地台 (picocell)：是傳輸訊號功率較小的基地台，用以補足訊號覆蓋的空洞。

毫微微基地台 (femtocell)：訊號傳輸功率比微微基地台更小的基地台，同樣用以補足訊號覆蓋的空洞。毫微微基地台與微微基地台的不同在於回程網路 (Backhaul Network) 的介面上，微微基地台以纜線與宏基地台連接，而毫微微基地台的回程網路則是網際網路 (Internet Protocol, IP)，目的是方便安裝，使用者只要有網際網路的连接就可以使用毫微微基地台，因此有助於其普及和更有效率地填補訊號覆蓋的空洞。

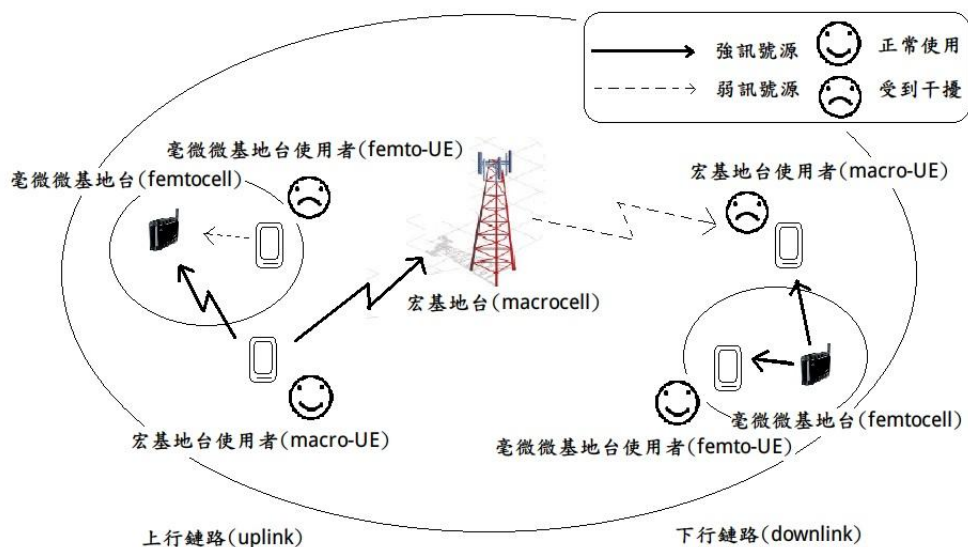
表一 異質性網路中成員詳述

基地台類型	傳輸功率	覆蓋範圍	回程網路
宏基地台(macrocell)	46~49 dBm	幾百公尺到幾公里	S1 介面
遠端無線電站(RRH)	46~49 dBm	幾百公尺到幾公里	光纖
中繼站(relay)	30 dBm	300 公尺	無線網路
微微基地台(picocell)	小於 30 dBm	小於 300 公尺	X2 介面
毫微微基地台(femtocell)	小於 23 dBm	小於 50 公尺	網際網路

異質性網路固然有效地解決了訊號覆蓋空洞處的問題並且大大提升了整體系統效能，但是由於訊號傳輸功率較小的基地台是佈建在宏基地台的訊號覆蓋範圍之內，並且使用與其相同的頻寬，但彼此之間卻沒有經過統一的資料排程（微微基地台以及毫微微基地台並沒有直接連結到宏基地台）因此也衍生出了不同等級的基地台間干擾（intercell-interference, ICI）的問題，以下我們拿宏基地台與毫微微基地台舉例，要說明這些問題，我們必須將連接到宏基地台和毫微微基地台的兩種使用者裝置分別稱為宏基地台使用者(macro user equipment, MUE)和毫微微基地台使用者(femto user equipment, FUE)，下面會就上行鏈路和下行鏈路會產生地干擾狀況做討論：

首先我們討論上行鏈路。宏基地台和毫微微基地台及其使用者會彼此干擾的狀況，往往是發生在宏基地台使用者過度靠近毫微微基地台訊號覆蓋範圍時產生，如圖一左邊毫微微基地台附近，因為宏基地台使用者在上傳資料時必須傳到比較遠的宏基地台，如此強大的訊號傳輸通率將會蓋過以較弱訊號傳輸功率上傳中的毫微微使用者，造成毫微微使用者雖然在自己的服務基地台（serving cell）範圍內，卻無法順利上傳資料。

而在下行鏈路方面，在接近毫微微基地台訊號覆蓋範圍的地方，宏基地台的訊號強度相對的比較弱，此時宏基地台使用者的收訊大受影響，如圖一右邊毫微微基地台的狀況，雖然毫微微基地台照顧到了自己的使用者，卻意外的干擾到附近的宏基地台使用者。



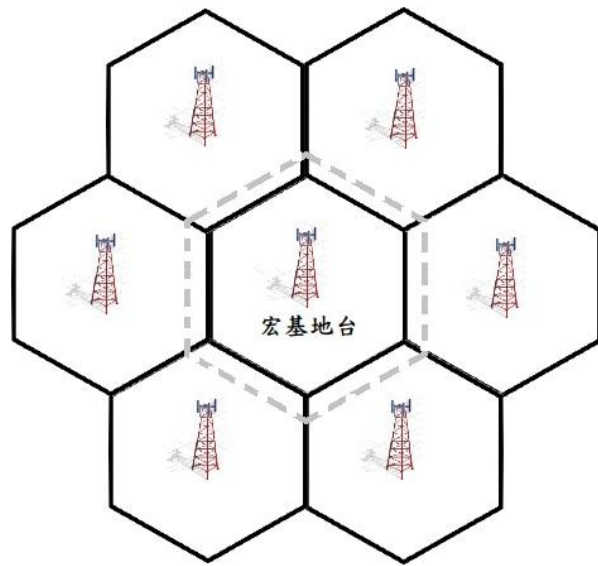
圖一 異質性網路中不同層集間基地台的干擾

要解決這些干擾的問題，除了前面提到的協調式多點傳輸和接收方法之外，主要分為時域和頻域兩方面的進階基地台間干擾協調（Enhanced Intercell-interference Coordination, eICIC）。時域方面有人提出了近乎空白子訊框（Almost Blank Subframe, ABS）的作法，保留某些定的子訊框給毫微微基地台的實體控制通道（Physical Downlink Control Channel, PDCCH）專門使用，以提升解條資訊的下載成功率，但是這個方法首先仍未解決實體下行共享通道（Physical Downlink Shared Channel, PDSCH）的干擾，再來更需要各層級基地台間子訊框完美的同步，大大增加的技術的難度，因此我們轉頭著眼於頻域方面的解決方法，接下來談談異質性網路和頻率複用的結合。

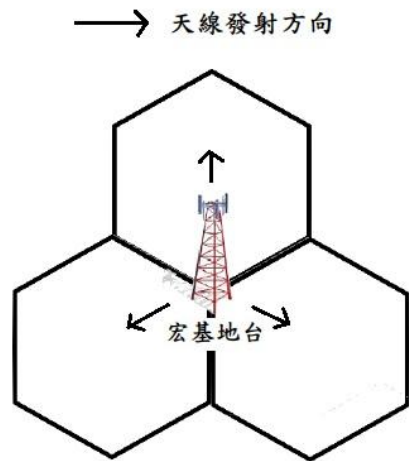
### 1.3 研究動機

早在異質性網路被提出之前，就有人討論如何消弭各宏基地台間的干擾，於是提出了各種頻率複用（frequency reuse）的模型。頻率複用是第三代行動電話系統中蜂巢式網路（cellular network）的基石，由於電磁波在空間中傳遞隨距離的延長而衰減的特性，一個頻率在某個地區使用後，在離此很遠的地區已經衰減了很多，降低到了可接受的程度，於是在足夠遠的距離這個頻率變能夠再被「複用」一次。以往使用寬頻分碼多工時，由於不同基地台使用相同頻帶不會造成干擾，可以做到完全的全頻複用（Universal Frequency Reuse, UFR）；而如今將以正交分頻多工取代寬頻分碼多工，如果照舊使用全頻複用，那麼將產生大量干擾，因此頻率複用的模型議題重新受到重視。

討論頻率複用的模型之前，要先說明長程演進技術升級版提出的宏基地台模型。如圖二之一所示在第三代行動電話系統中，所有的宏基地台打出的訊號覆蓋範圍皆為一個六角形，許許多多的六角形合在一起，形成了整個無線網路的脈絡，因為很像蜂窩所以稱為蜂巢狀網路。而在長程演進技術升級版中，每個宏基地台總共有六支天線，以兩支天線為一組打往三個方向，每個方向為一個六角形，因此每個宏基地台的訊號覆蓋範圍現在是由三個六角形扇面（sector）所構成，如圖二之二所示。

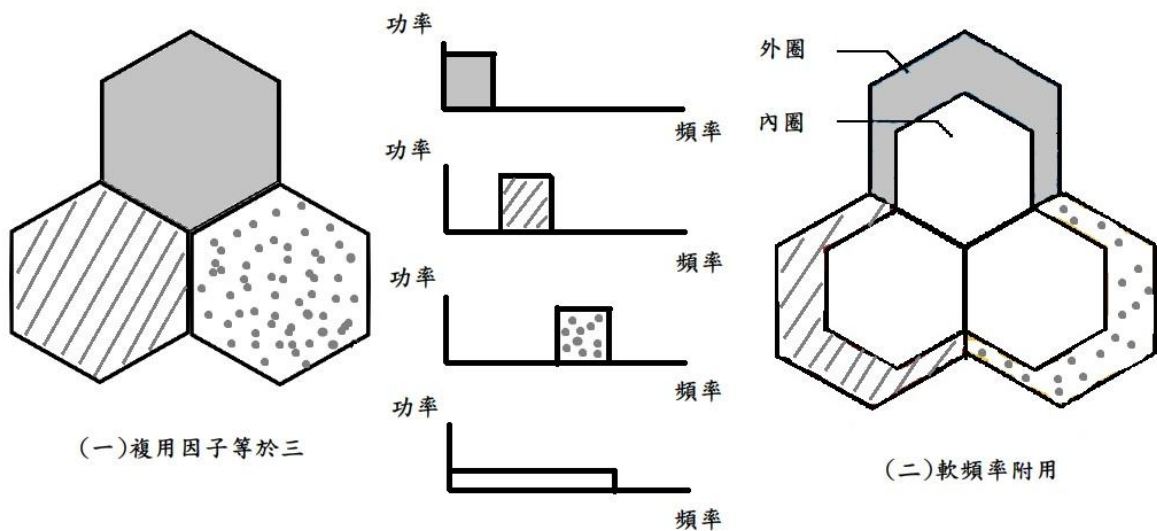


(一)蜂巢式網路



(二)長程演進技術升級版宏基地台訊號覆蓋

圖二 宏基地台訊號覆蓋幾何示意圖



圖三 宏基站頻率複用圖示

一開始使用的頻率複用模型是複用因子(reuse factor)等於三的模型(圖三之一),又稱為三段頻率複用,即宏基地台的每個六角形扇面都使用所有頻寬的 1/3,如此可以錯開所有鄰近宏基地台的頻帶,在沒有干擾的狀況下使用最大頻寬。然而頻寬非常珍貴,根據台灣國家通訊傳播委員會(National Communications Commission, NCC)今年(2013)



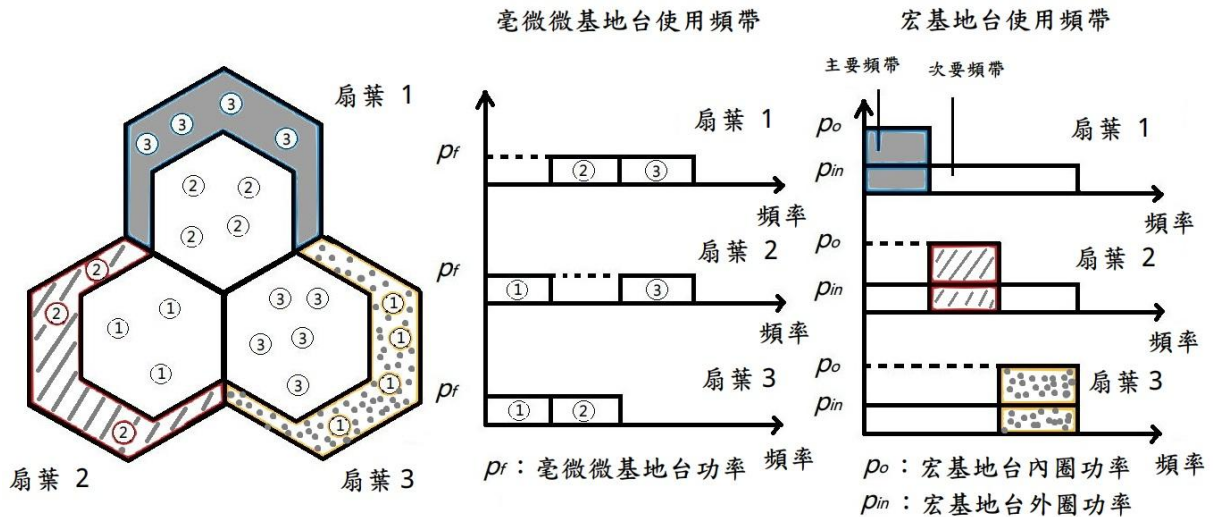
所公布，電信業者每家最低必須購買 15MHz 的頻寬，押金從十億元起跳，如此珍貴的頻寬當然是能用則用。於是華為 (Huawei) 在 2005 年提出的軟頻率複用 (Soft Frequency Reuse, SFR) 被拿出來討論與使用。

軟頻率複用 (圖三之二)，是利用宏基地台每個扇面均有兩支天線的規格，使用兩種不同的訊號傳輸功率、頻帶來達到頻寬使用最大化的目的。軟頻率複用將每個扇面分為內、外圈：

外圈 (outer-cell) 和原本一樣為複用因子等於三，即每個扇面的外圈皆使用全部頻寬的  $1/3$ ，每個扇面外圈的這  $1/3$  頻帶稱為該扇面的主要頻帶 (major band)。外圈的功率強，訊號覆蓋整個扇面半徑。

內圈 (inner-cell) 則使用該扇面外圈用剩的所有頻帶 (佔所有頻帶  $2/3$ )，稱為次要頻帶 (minor band)。內圈傳輸功率較弱，訊號覆蓋範圍小，以避免和鄰近的宏基地台間造成干擾。如果外圈的主要頻帶頻帶沒有用完，在排程時內圈也可以使用外圈剩餘的頻帶，因此稱做「軟」頻率複用。

接下來我們將異質性網路加入到軟頻率複用當中，以軟頻率複用錯開頻帶的特性降低不同層級基地台間的干擾。前面有提到，異質性網路架構中，毫微微基地台是最容易佈建、安裝，並且成本最低的小功率基地台，在自家及辦公室安裝毫微微基地台改善通訊品質也是目前的趨勢，因此以下本篇論文就以討論毫微微基地台為主。如圖四，加入毫微微基地台後，宏基地台的頻率分配 (frequency allocation) 並沒有改變，而毫微微基地台的頻率分配則跟宏基地台一樣有內圈和外圈的區別。為了避開外圈宏基地台的強訊號傳輸功率，並且避免對訊號衰減大的外圈宏基地台使用者造成額外干擾，毫微微基地台一律只能使用次要頻帶 (所有頻帶的  $2/3$ )，又為了盡量降低毫微微基地台彼此間的干擾，外圈和內圈的毫微微基地台又分別使用次要頻帶的  $1/2$  (所有頻帶的  $1/3$ )。如此一來，從頻域面利用頻率複用試圖解決干擾後，毫微微基地台雖然沒有完全避開宏基地台的頻帶，但是在這些存在干擾的頻帶，宏基地台的傳輸功率已經大大降低，尤其外圈的毫微微基地台使用者更是不受干擾。



圖四 加上毫微微基地台的軟頻率複用

雖然異質性網路和軟頻率複用的組合有著不錯的效能表現和系統容量，但是並沒有考慮到實際面上，使用者裝置在同一時間內，並不會既連接到宏基地台又連接到毫微微基地台。也就是說，隨著毫微微基地台流行和普及的趨勢，宏基地台的使用者會慢慢地轉而去使用毫微微基地台，進而產生宏基地台使用者減少而毫微微基地台使用者增加的消長狀況。如果宏基地台使用者不斷的轉變成毫微微基地台使用者，那麼我們應該可以隨著使用者轉變的比率改變頻率的分配來達到更佳의系統吞吐量(system throughput)。因此我們提出，當大比率的宏基地台使用者轉換成毫微微基地台使用者時，在保證並維持外圍宏基地台使用者平均吞吐量的條件下，削減宏基地台的主要頻帶，使毫微微基地台的使用頻帶變大，進而提升整個系統的吞吐量。

## 1.4 相關研究

異質性網路造成的各級基地台間干擾問題，無論是時域或頻域都有改進方法，時域部分主要是利用分時多工 (Time Division Multiple Access, TDMA) 的概念，保留少數子訊框給較弱勢的基地台利用，宏基地台和小傳輸功率基地台間必須交換的資料多，而且要求整個系統完美的同步。

動態頻率分配在異質性網路被提出之前就是熱門的研究，比起時域上做基地台間的協調合作，調整頻率的作法有著不必同步的優點，並且搭配基地台訊息傳輸功率的調整，可以有效控制訊息覆蓋的範圍和對象。在動態調整頻寬上，沒有分內外圈的基地台是統計彼此服務的使用者數量改變整個基地台的頻寬；而在軟頻率複用之後，由於內圈宏基地台可使用外圈用剩的頻帶，頻帶調整的對象變成只有外圈。除了只調整頻寬之外，由於各個宏基地台外圈頻帶錯開，就算增加傳輸功率也沒有額外的干擾，因此可以利用外圈傳輸功率的增加，在頻帶縮小的狀況下仍然維持其吞吐量，如此一來內圈可以用的頻寬更大，進而增加系統整體的吞吐量。

在異質性網路出現後，除了軟頻率複用，還有其他諸如三段頻率複用 (Reuse-3)、分段頻率複用 (Partial Frequency Reuse, PFR) 和部分軟頻率複用 (Soft Fractional Frequency Reuse, SFFR) 等等各階基地台干擾協調架構 (詳見圖五)，但是由於這些架構並沒有完善利用全部頻寬，或是由於分配不良產生了過大的基地台間干擾，因此整體的系統效能 (吞吐量和斷線率) 並不如軟頻率複用良好 (圖六)。值得注意的是，全頻複用雖然一開始表現佳，但是隨著毫微微基的台的增加系統吞吐量也急遽下降；三段頻率複用則過度切割其頻帶，因此最後兩者效能皆輸給軟頻率複用，這也是本篇論文取軟頻率複用做探討的原因。

## 1.5 論文架構

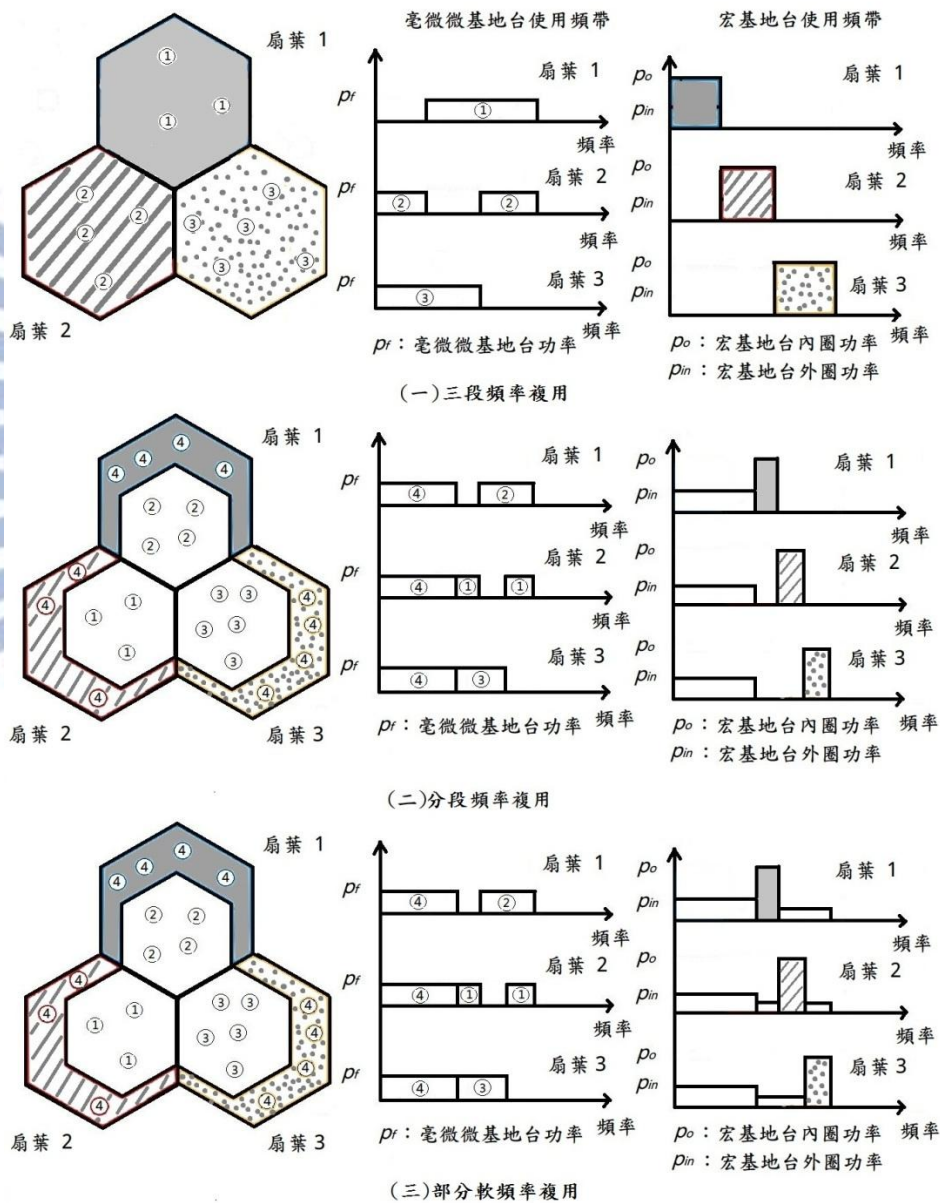
本篇論文探討的是如何根據使用者裝置的轉變，以較公平合理的頻率分配方法，去適應性地動態改變各層級基地台使用的頻寬，並且在基地台間干擾沒有大量增加的情況下，進而達到增進系統吞吐量的方法。針對的目標主要是既有的演進式基地台 (以下稱宏基地台) 和異質性網路架構新加入的毫微微基地台。

接下來的章節中，第二章將會詳述所使用的系統模型，包括方便分析的各项假設和所有會影響系統的參數及其計算公式，以及在長程演進技術升級版給定的規格中對所使用演算法的限制。

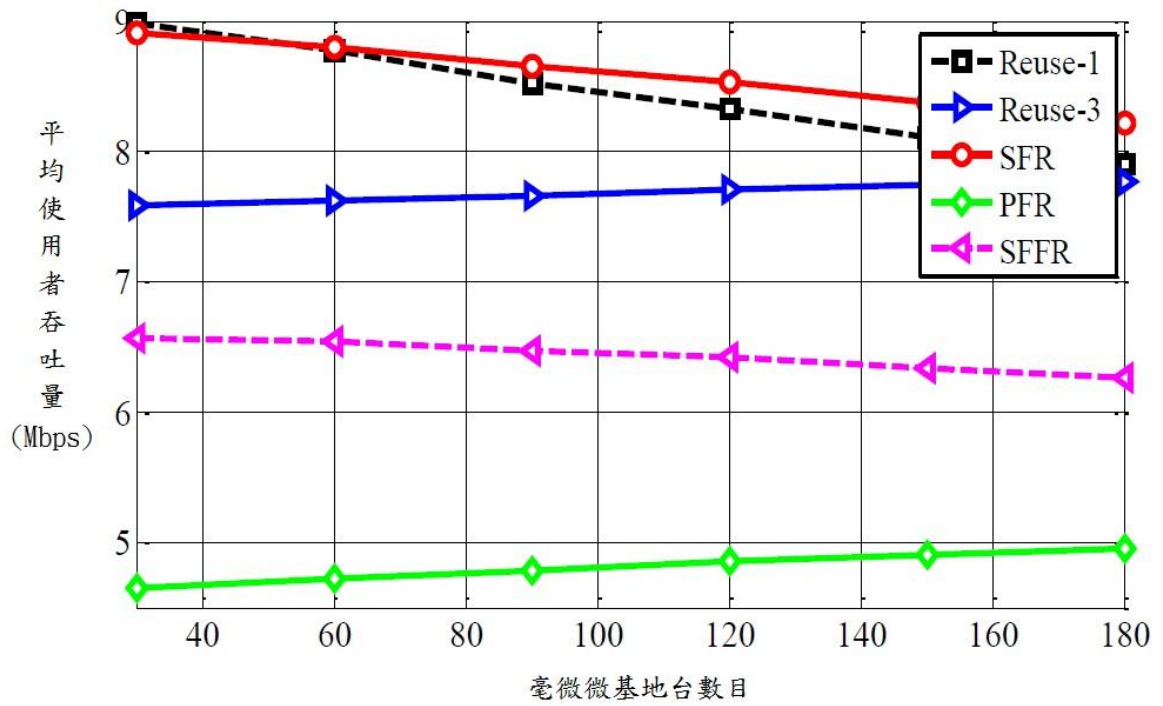
第三章會先詳述演算法的原理，並分析使用演算法後系統的各種影響，然後列出演算法的步驟，用數學運算在確保外圈宏基地台使用者平均吞吐量條件下，保證增加整個系統的吞吐量。

第四章列出模擬的參數和結果，顯示吞吐量的確提升，也可以看到各級基地台的吞吐量照預期般修正。

整篇論文的總結則歸納在第五章裡。



圖五 其他頻率複用模型



圖六 各種頻率複用模型效能比較：Reuse-1 為全頻複用；Reuse-3 為三段頻率複用  
SFR 為軟頻率複用；PFR 為分段頻率複用；SFFR 為部分軟頻率複用

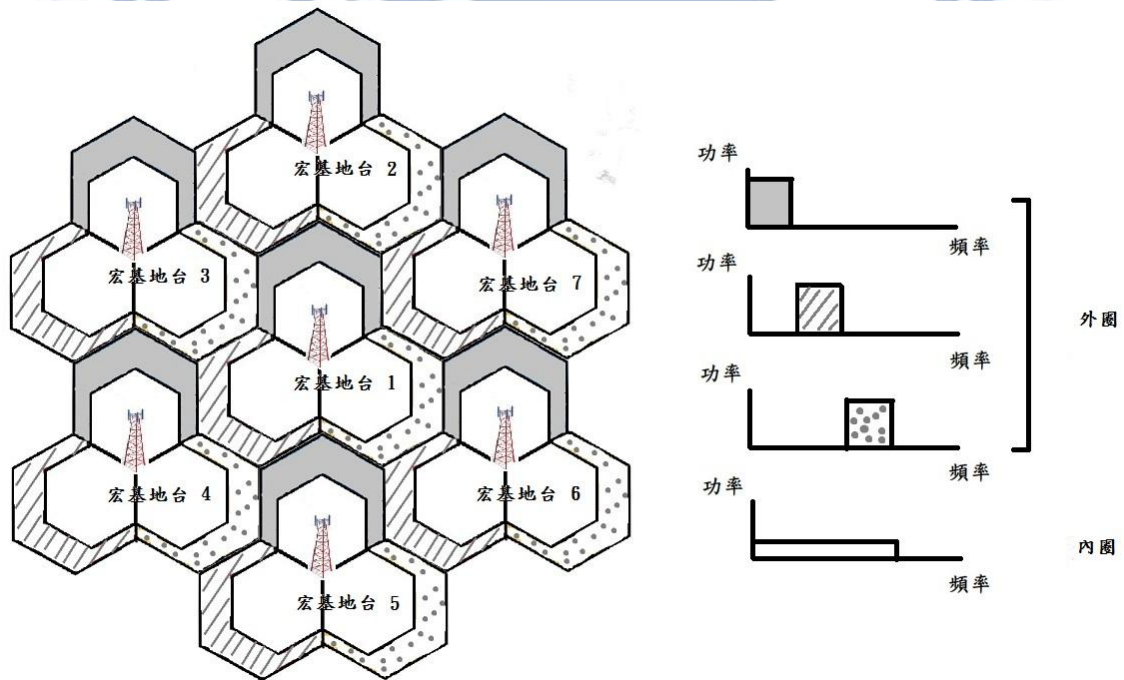


## 第二章.

# 系統模型

### 2.1 系統環境

本論文的系統是討論長程演進技術升級版的下行鏈路，整個系統由七個宏基地台所構成，每個宏基地台有三個六角形扇面（如圖七），並且在使用提出的演算法前，初始皆採用軟頻率複用的頻率分配（如圖三之二）。所有宏基地台的外圈將會互相緊鄰甚至重疊，但是所有鄰近的外圈頻率不相重疊，因此所有宏基地台的外圈並不彼此干擾；而造成干擾的部分包括宏基地台內圈（使用所有頻寬）對同基地台內不同扇面內圈的使用者或是不同基地台的外圈使用者所傳輸到的信號，抑或是宏基地台外圈對其他基地台內圈使用者所傳輸到的信號。在加入毫微微基的台之後又會再有額外的干擾，前面一章 1.2 已經討論說明過，在此不再贅述。



圖七 系統整體示意圖

## 2.2 毫微微基地台及使用者裝置的佈建和假設

接下來將在建立完成的宏基地台內佈建毫微微基地台。我們將毫微微基地台在中央的宏基地台 1 訊號覆蓋範圍內採均勻分布的方式佈建，無論內外圈。因為使用者的訊號對干擾雜訊比在計算時，頂多只考慮到相鄰的基地台干擾，再更遠的基地台訊號已經相對地微弱，我們可以將之忽略，因此一個四面八方皆受到包圍的宏基地台（即宏基地台 1）基本上可以代表任意基地台的狀況，這也是系統採用總數七個宏基地台的原因。

毫微微基地台的使用頻率也是分為內外圈，詳情可以參考上一章圖四，毫微微基地台除了自己的使用者之外，會對所有其他正在使用相同頻帶的使用者造成干擾：內圈的毫微微基地台會對在其訊號覆蓋範圍之內，所有宏基地台使用者或是其他鄰近的內圈毫微微基地台使用者造成干擾；外圈的毫微微基地台，則由於使用的頻帶與外圈的宏基地台使用者錯開，因而只會對其他鄰近的外圈毫微微基地台使用者造成干擾。

關於宏基地台內外圈的正六邊形直徑比在這裡必須要先著墨說明。由於本篇論文討論的，是在毫微微基地台使用者數量大於宏基地台使用者時，擬將宏基地台外圈的使用頻帶削減，並分配給宏基地台內圈使用者和無法使用上述頻寬而為數大量的毫微微基地台使用者，又毫微微基地台內外圈地使用頻帶是錯開的，為求公平起見，必須按照內外圈毫微微基地台的數量，按照比例分配頻寬。因為毫微微基地台在整個宏基地台訊號覆蓋範圍內是用均勻分布的方式佈建，我們合理假設內圈與外圈毫微微基地台的數量比，即為宏基地台的內圈與外圈面積比。根據正六角形面積公式：

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} \times l^2 \quad (1)$$

（其中  $A$  為面積， $l$  為邊長）面積比即為邊長平方比，又正六角形的邊長即其兩相對頂點（即直徑）的一半，因此我們取內外圈直徑比 0.7:1，使得面積比為 0.49:0.51，約莫是 1:1。如此一來往後在演算法中，每當削減了宏基地台外圈頻帶，便將其對半分別分給內圈與外圈的毫微微基地台使用者。

最後要在系統裡加入連接到兩種基地台的使用者裝置。宏基地台的使用者裝置同樣以均勻分布撒在整個宏基地台訊息覆蓋範圍之內，根據其所在位置（對應扇面的內圈或外圈），利用相對應可以使用的頻帶；而毫微微基地台的使用者裝置則有些許的不同，只會以均勻分布撒在服務它的毫微微基地台的訊息覆蓋範圍之內，使用頻寬則是對應此毫微微基地台的所在位置而定（圖四）。因此毫微微基地台使用者並不會離開其服務範圍，但是宏基地台服務的使用者裝置是有可能出現在任何地方的，包括在毫微微基地台的覆蓋範圍之內。因為毫微微基地台通常是公司或家用裝置，通常採用封閉性用戶組的訪問控制（Closed Subscribers Group Access, CSG），意即使用者必須具有密碼或其它使用者權限才能連接，因此不具權限的宏基地台使用者進入卻不能連接到毫微微基地台，也是相當合乎實際情形的假設。

由於要考慮到使用者裝置在連接到宏基地台與毫微微基地台之間的轉變，因此我們假設在一個宏基地台內，其使用者裝置並沒有斷線的狀態，如果一個使用者裝置沒有連接到任何一個毫微微基地台，那麼他一定是連接到當地宏基地台。除此之外所有毫微微基地台必須統計其服務的使用者裝置數量和平均吞吐量並上傳至網際網路並能從網際網路接收宏基地台配給或收回額外頻帶的資訊，如此一來宏基地台便可以透過網際網路精確掌控其訊息覆蓋範圍之內所有使用者裝置數量與其吞吐量資訊，並能夠順利指揮範圍內毫微微基地台伸縮其使用頻帶。

最後為了方便分析和演算法的簡化，我們假設所有使用者裝置可以使用的頻寬沒有上限，連接到某一基地台下的所有使用者裝置將可以平均分享其可使用的所有頻寬。這個假設將造成宏基地台外圈的頻寬不會因為其使用者數量變少就有剩下的狀況，也就是說宏基地台內圈並沒有外圈使用剩餘的頻寬可以使用，與有設定使用者應用頻寬上限的軟頻率複用有些許不同。但是本論文考慮的是整體的系統吞吐量，因此在宏基地台總使用者佔所有使用者比例不變的情況下，內外圈分開計算的吞吐量或許不是很精確，但相加起來的宏基地台總使用者吞吐量整體來講是正確的，因此在不影響總體分析的狀況下我們套用此簡化假設。



## 2.3 系統效能評估

為了要呈現系統的表現，我們使用吞吐量來表示使用者裝置受到的服務績效，本篇論文會統計的吞吐量包括系統吞吐量、宏基地台外圍使用者總吞吐量和毫微微基地台使用者總吞吐量。在只考慮頻率分配的情況下，我們使用薛能通道容量理論（Shannon Capacity Theorem）的公式來做為計算吞吐量的標準：

$$R \text{ (bps)} = W \log_2(1 + SINR) \quad (2)$$

$R$  即為所要計算的吞吐量，單位如公式內標示為每秒傳送位元數 (bits per second, bps)； $W$  為所使用的頻寬，單位是赫茲 (Hz)，頻率部分在下一小節會再更詳細的說明；最後  $SINR$  是訊號對干擾雜訊比，它是功率大小的比值，沒有單位。

而訊號對雜訊干擾比則首先我們看宏基地台的使用者裝置，計算方式顧名思義是以所要收到的訊號功率去除以干擾和白高斯雜訊的功率和，所有處於同頻帶而非想要接收的訊號功率通通都是干擾：

$$SINR_{MUE} = \frac{P^{S,B}}{\sum_{b=1}^7 \sum_{s=1}^3 P^{s,b} - P^{S,B} + \sum_{f=1}^{N_f} P^f + \sigma^2} \quad (3)$$

$P$  皆代表使用者裝置所接收到的訊息功率：分子的  $P^{S,B}$  為處在  $B$  宏基地台的第  $S$  個扇面中的使用者裝置所欲接收到的訊息功率；分母的  $P^{s,b}$  則為使用者裝置從第  $b$  個宏基地台中的第  $s$  個扇面所接收到的干擾功率，但是自己的扇面不算干擾，因此可以看到加上了  $s \neq S$  的條件； $P^f$  是從第  $f$  個毫微微基地台傳來的干擾功率，注意以上功率都是指傳到使用者裝置端時所接收到的功率大小，即傳輸時功率乘以通道增益 (channel gain) 的結果。最後  $\sigma^2$  為可加性高斯白雜訊的功率。

接著要計算毫微微基地台使用者裝置的訊號對雜訊干擾比，基本上運算方法和宏基地台的使用者差不多，只是干擾源不太一樣，一些變數也要修正：

$$SINR_{FUE} = \frac{P^F}{\sum_{b=1}^7 \sum_{s=1}^3 P^{s,b} + \sum_{f=1, f \neq F}^{N_f} P^f + \sigma^2} \quad (4)$$

其中分子改為  $P^f$  代表連機到  $F$  毫微微基地台的使用者裝置所欲接收到的訊息功率；分母  $P^{s,b}$  大體上相同，唯現在所有宏基地台的所有扇面皆造成干擾； $P^f$  部分要多扣掉毫微微基地台自身功率，加上  $f \neq F$  的條件； $\sigma^2$  一樣為可加性高斯白雜訊的功率。

下一個要介紹的是頻道造成的衰減（channel attenuation），本論文採用在自由空間底下造成的頻道衰減，衰減的來源有天線場型（antenna pattern）和路徑損失（Path Loss，PL）。自由空間路徑損失模型（Free Space Path Loss，FSPL）的公式如下：

$$FSPL \text{ (dB)} = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f_c) - 147.55 \quad (5)$$

其中的  $d$  是服務的基地台到使用者裝置之間的距離，單位為公尺（m）； $f_c$  為基地台所使用的載波頻率，單位為赫茲（Hz）；最後一項為自由空間模型的路徑損失常數。

因為宏基地台的天線大多是有向性天線，因此除了發射功率之外，發射方向與收訊角度也和接收到的功率大有關係：

$$\text{Antenna Pattern (dB)} = -\min\left[12 \left(\frac{\theta}{65^\circ}\right)^2, 20\right] \quad (6)$$

其中  $\theta$  是使用者裝置所在位置與宏基地台天線發射中心線的夾角，單位為度（°），而無論夾了多少角度，最小的衰減皆為 20dB。毫微微基地台的方面因為通常採用全向式（omnidirectional）天線，所以不管使用者裝置在哪裡，都不會因角度而衰減，亦即當遇到計算毫微微基地台的信號或干擾功率時，我們一律只計算路徑損失而沒有天線場型這個條目。

雜訊部分皆採用可加性高斯白雜訊（Additive White Gaussian Noise，AWGN）。

最後本論文討論的是平面（2D）的自由空間場域模型，無論是傳輸端與接收端之間的高低差，或者是因各種建築物壁障和地形產生的穿透損失（Penetration Loss）或是遮蔽衰弱（Shadow Fading），我們皆不考慮。

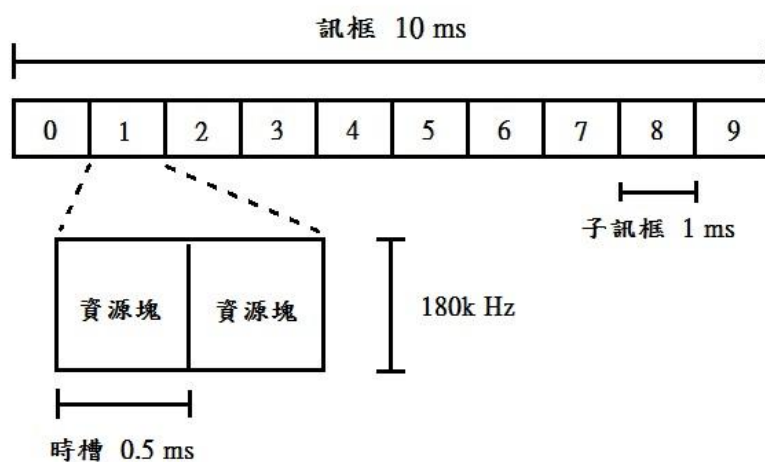
## 2.4 長程演進技術升級版資源架構

本篇論文討論的是頻率分配，因此要先探討一下規格所訂定的資源架構，才能根據規定來使用。長程演進技術升級版所使用的正交分頻多工存取技術，為第一層(Layer 1)，亦即實體層 (Physical Layer, PHY) 在無線通道上傳送資料的基礎。正交分頻多工存取的無線電資源，是由時域和頻域建構而成的二維空間所定義，而這無線電資源的最小單位稱作資源塊 (Resource Block, RB)，每個使用者裝置一次使用的最小資源必須大於等於一個資源塊。

在時域上，一個訊框 (frame) 的長度為十毫秒，裡面包含了十個長度為一毫秒的子訊框 (sub-frame)，子訊框的長度即為一個傳送時間的間格，而子訊框內又分為兩個 0.5 毫秒的時槽 (time slot)，一個時槽即為一個資源塊的時域長度；在頻域上，一個子載波的頻寬為 15k 赫茲，12 個子載波總共 180 k 赫茲則為一個資源塊頻域上的頻寬。因此一個資源塊由 0.5 毫秒與 180 k 赫茲構成 (圖八)，而我們在分配頻寬時便以一次最少 180 k 為單位。資源塊在不同系統頻寬裡的個數則如表二所示。

表二 系統頻寬與資源塊個數

系統全部頻寬 (Hz)	5M	10M	20M
$N_{RB}$ (資源塊個數)	25	50	100



圖八 資源塊構成圖解

## 第三章.

# 動態頻寬分配方法和分析

---

### 3.1 問題描述與解決方法

如同前面所提到的，雖然基於頻寬珍貴、不該隨意浪費的概念，一般都會盡可能的使用全部的頻寬，但是如何在彼此緊鄰的基地台間做好降低干擾的工作仍是不可或缺的考量，這主要是為了保護基地台邊緣容易受到干擾的使用者裝置，尤其在加入異質性網路之後，宏基地台內多了許多的干擾源，更適合使用頻帶切割的方式。這是因為在宏基地台切割了頻帶後，雖然降低了自身的吞吐量，但是卻降低了對毫微微基地台的干擾，使毫微微基地台有更好的發揮。而提出毫微微基地台等小傳輸功率基地台的初衷，本來就是要補足宏基地台訊號覆蓋不足，因此就整個系統來說更有效率的補足了吞吐量，彼此之間可以說是相輔相成。

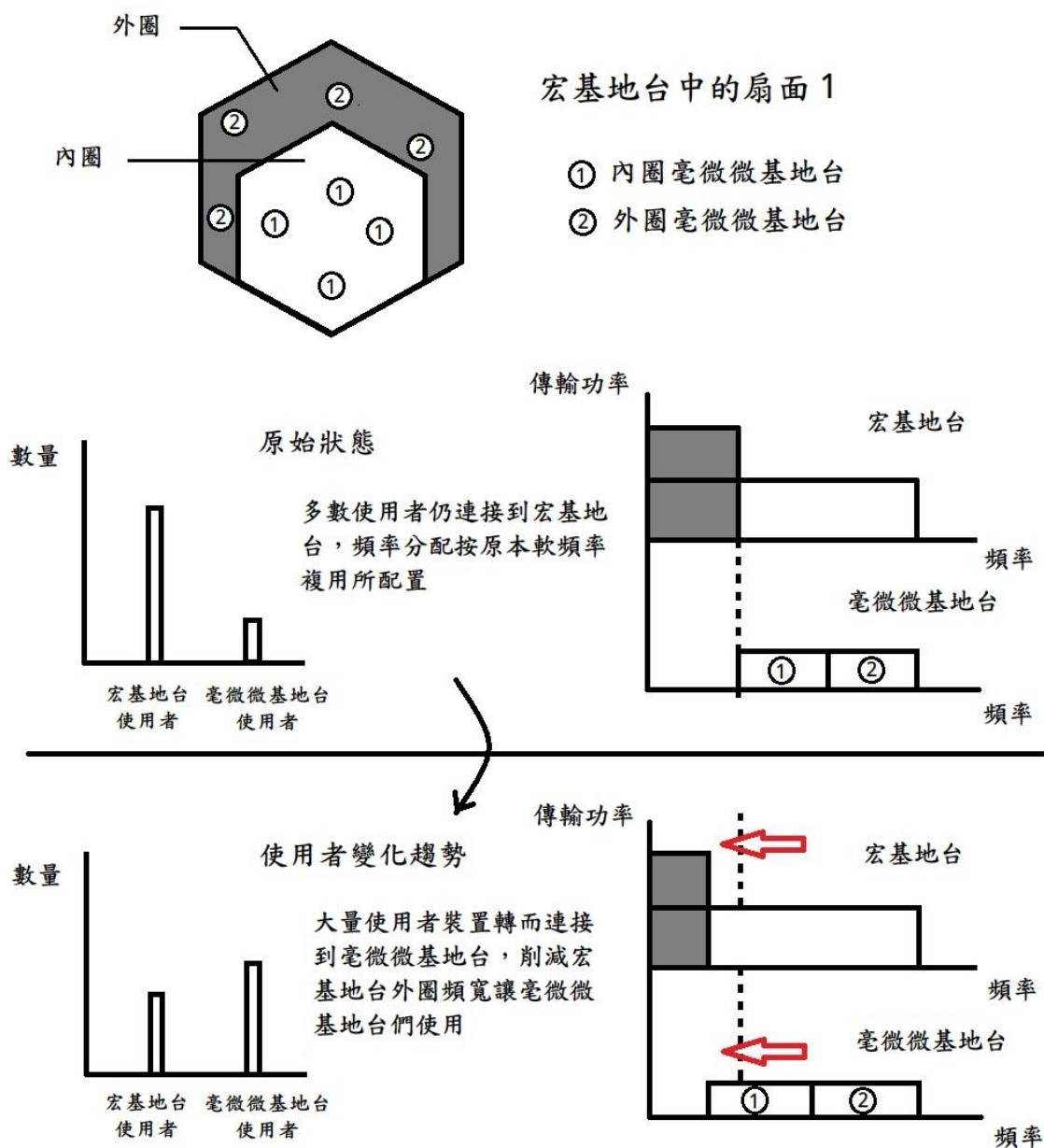
而在眾多的基地台間分頻干擾協調模型中，軟頻率複用可以說是一個相當優秀的系統，既有效的錯開了相互干擾的頻帶，又最大化了頻寬的使用，並且剛好讓小功率基地台有了發揮的空間（見第一章圖四），詳細原因說明如下：宏基地台的兩根天線把信號覆蓋分成了內外兩圈，其中外圈為了錯開所有相鄰的宏基地台外圈頻帶而只用三分之一的系統頻寬，雖然這大大降低了外圈的訊務容量，但是權衡了它使用大功率傳輸和降低干擾的好處，是可以接受的。也因為以如此大功率傳輸的頻帶剩下了三分之一，其餘三分之二的系統頻寬將以遠遠低於原來覆蓋整個宏基地台範圍的傳輸功率來服務內圈的宏基地台使用者，我們同時也將這三分之二的頻帶分成兩半，分別給內圈和外圈毫微微基地台使用。如此分配的理由有三：一是毫微微基地台功率極小，如前述的最好與宏基地台外圈使用大功率傳輸的頻帶分開以免受到大的干擾；二是宏基地台外圈雖然用大功率傳輸，但是因為能量逸散十分嚴重，若毫微微基地台使用相同頻帶，則靠近的外圈

宏基地台使用者受到的影響將比內圈可觀許多。由此我們可以也發現，若毫微微基地台在頻帶使用上避開了其扇面中使用的主要頻帶，不但帶給自己好的抗干擾效果，同時也是保護宏基地台外圈的使用者。第三為了進一步做內外圈毫微微基地台之間的干擾協調，內圈和外圈的毫微微基地台分別平分剩下的頻寬（即系統頻寬的  $1/3$ ）。

如果宏基地台與毫微微基地台的使用者裝置的使用人數是相等且固定的，那麼一般軟頻率複用的分配方式就已經很恰當了，然而真實情況並非如此：實際上使用者數量並不是憑空增加的，並且這些使用者裝置也不會同時既連接到宏基地台又連接到毫微微基地台，而是當宏基地台使用者感覺到需要加強連線效能或是只是因為方便而申裝毫微微基地台時，由原本的宏基地台使用者「轉換」成為毫微微基地台使用者。有鑒於毫微微基地台的便利性，我們認為這種轉換的趨勢會越來越顯著。如此此消彼長的情況之下，一旦毫微微基地台使用者遠超過宏基地台使用者時，原來的頻率分配便不再那麼的合適，因為此時宏基地台外圈極少量的使用者卻佔用了整個系統  $1/3$  的頻寬，多數的使用者裝置（此指毫微微基地台使用者）卻也同樣只使用  $1/3$  的頻寬相當的不合理，所以應當削減宏基地台外圈的頻寬，轉而讓有多數使用者的毫微微基地台們使用（圖九），以增進系統整體的吞吐量。而基於公平原則，我們也不能過度削減宏基地台外圈的頻寬，宏基地台同時也必須保持自己的使用者有一定的使用容量，因此我們提出：

**每當有超過 2% 的宏基地台使用者轉換成為毫微微基地台使用者時，在保證宏基地台外圈使用者的平均吞吐量不小於毫微微基地台使用者的平均吞吐量之條件下，削減宏基地台外圈的部分頻寬，進而讓毫微微基地台有更大的頻帶可以使用，以提升系統整體的吞吐量。**

以上是概念上的敘述，由下一小節開始將會以數學的方式，計算並給定動態頻寬分配的詳細演算法，眾多符號（notation）可以參照目錄部分的符號表。



圖九 動態頻率分配基本概念

### 3.2 提出的演算法

我們要求的系統假設一如第二章裡提到的，毫微微基地台會回報使用者的資訊，回報的資訊共有兩項：連接的使用者裝置數量和使用者的有效吞吐量。而回傳的資訊經宏基地台統整之後，由各宏基地台決定是否開始演算法的進行，詳細情形將由下段開始介紹。而由於宏基地台與毫微微基地台的資訊交換是透過網際網路的有線傳輸，並且交換

的資訊內容只有三項：毫微微基地台回報使用者裝置數量、毫微微基地台回報使用者裝置總吞吐量和宏基地台指示毫微微基地台可用的頻帶。因此不但傳輸的額外通信費用（overhead）極小，傳輸管道均是有線傳輸，加上演算法只有在宏基地台本身有較複雜的運算，而並不會另外佔用無線通訊的資源。

系統中宏基地台會持續監控毫微微基地台回報的資訊，計算連接到宏基地台與連接到毫微微基地台的人數比率是否有改變，一旦有超過百分之二的人數變遷，宏基地台便開始啟動一連串的運算，如果這變遷是宏基地台使用者減少而毫微微基地台使用者增加，首先宏基地台會要求毫微微基地台再次回報連接的使用者裝置數以及其吞吐量，以決定是否要開始調整頻寬的動作。決定的條件為宏基地台外圈的使用者裝置平均吞吐量不得小於毫微微基地台使用者裝置的平均吞吐量。計算如下：

$$\overline{R_{M_o}} = \frac{R_{M_o}}{n_{M_o}} \quad (7)$$

$$\overline{R_F} = \frac{R_F}{n_F} \quad (8)$$

其中  $\overline{R_{M_o}}$  以及  $\overline{R_F}$  分別為外圈宏基地台使用者與毫微微基地台使用者當前的平均吞吐量； $R_{M_o}$  與  $R_F$  則是當前兩種基地台整體的吞吐量； $n_{M_o}$  與  $n_F$  想當然爾是兩種基地台使用者當前的數量。由以上兩式我們可以得到，決定要開始給予頻寬的第一個條件判斷式為：

$$\overline{R_{M_o}} \geq \overline{R_F} \implies \frac{R_{M_o}}{n_{M_o}} \geq \frac{R_F}{n_F} \quad (9)$$

如果外圈宏基地台使用者的平均吞吐量小於毫微微基地台使用者平均吞吐量，當然就代表大多數人還是使用宏基地台，並且毫微微基地台的頻寬並不需要增加，就可以結束我們的演算法，等到系統又偵測到超過百分之二的使用者轉變時再重新啟動；而如果(9)式成立，亦及宏基地台外圈使用者平均吞吐量大於等於毫微微基地台使用者平均吞吐量的條件滿足，就代表宏基地台使用者人數可能已經相對過少，卻享有過大的使用頻寬，

就可以開始研擬改變頻寬分配的動作，進入演算法的下一步。

前一章的系統模型提到，因為長程演進技術升級版的資源架構限制，我們每次能分配的最小頻寬單位為一個資源塊，所以接下來要削減宏基地台外圍頻帶的時候，採取每次削減兩個資源塊，分別由內圈和外圈的毫微微基地台各取得一個資源塊的分配方法（詳細比例原則請回頭參考第 13 頁說明）。我們必須確定在改變頻率分配後，宏基地台外圍使用者（頻寬便小的使用者們）所減少的總吞吐量，比內圈宏基地台使用者及毫微微基地台使用者（頻寬變大的使用者們）所增加的總吞吐量小，才真正去改變資源塊的分配，如此系統總吞吐量才能得到提升，改變頻率分配也才有意義。

由公式（2）、（3）可以得知，影響系統吞吐量的主要變因是頻寬，對數項內的干擾影響較小，並且在下一小節內將論證演算法產生的額外干擾並不影響訊號對干擾雜訊比的表現，因此我們接著便由頻率分配的改變來計算吞吐量的消長。由於吞吐量與頻寬成正比，我們可以由資源塊的數量變化比例來計算頻寬的變化量，於是乎在削減兩個資源塊後，由外圍宏基地台使用者減少的吞吐量為：

$$R_{M_o} - R'_{M_o} = R_{M_o} \times \frac{2}{n_{R_{M_o}}} \quad (10)$$

其中  $R'_{M_o}$  為削減掉兩個資源塊後外圍宏基地台使用者剩餘的總吞吐量；而  $n_{R_{M_o}}$  則為當前外圍宏基地台所能使用的資源塊數目。同理，我們計算內圈宏基地台使用者以及毫微微基地台使用者在得到資源塊後所增加的吞吐量分別為：

$$R'_{M_i} - R_{M_i} = R_{M_i} \times \frac{2}{n_{R_{M_i}}} \quad (11)$$

$$R'_F - R_F = R_F \times \frac{1}{n_{R_F}} \quad (12)$$

其中  $R'_{M_i}$  和  $R'_F$  為內圈宏基地台和所有毫微微基地台在得到資源塊後的吞吐量； $R_{M_i}$  為內圈宏基地台當前的總吞吐量； $n_{R_{M_i}}$  和  $n_{R_F}$  則分別為內圈宏基地台和毫微微基地台當前所使用的資源塊數目。



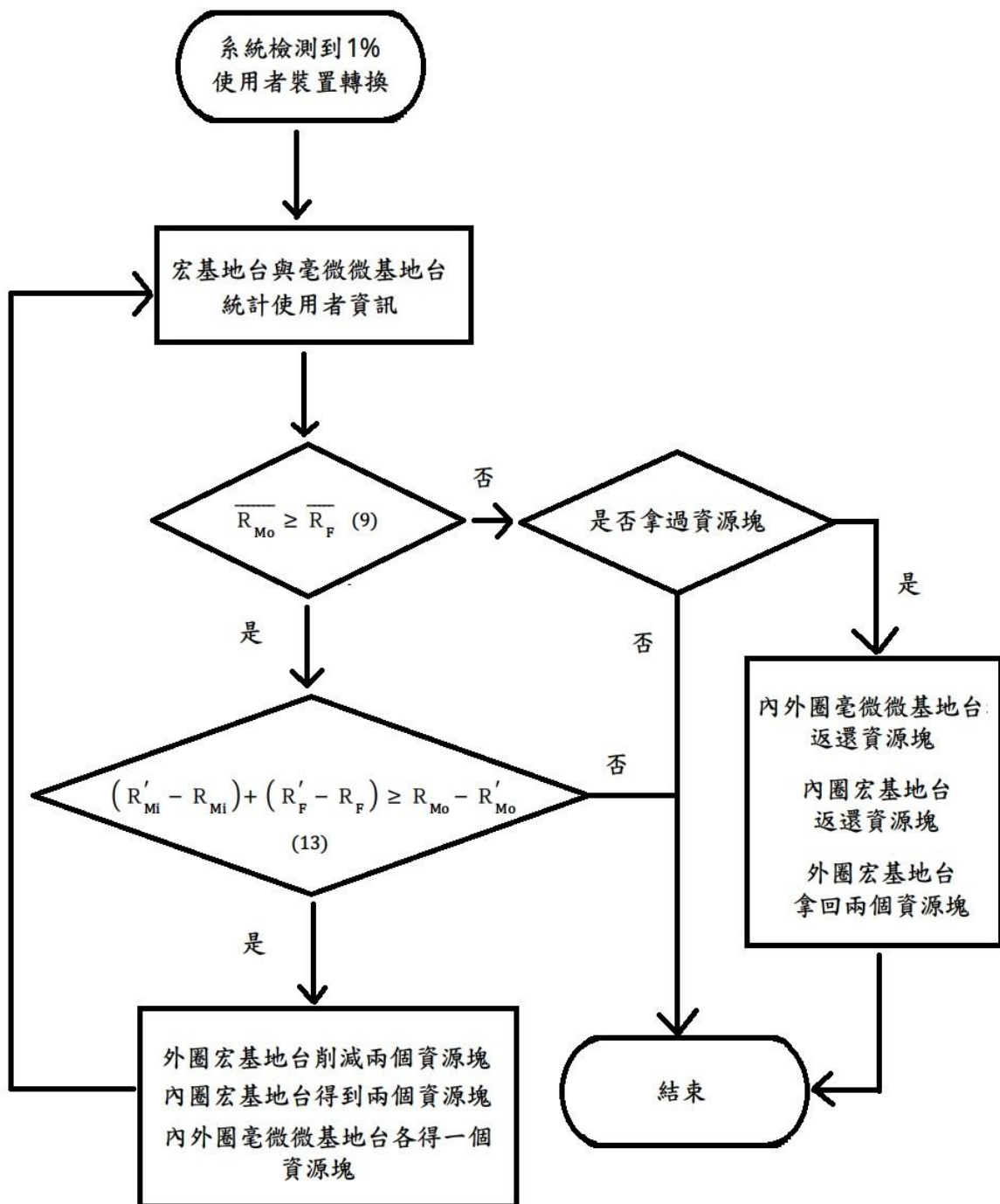
由以上兩式我們可以求得，若改變資源塊分配後，系統整體的吞吐量要得到提升，則繼第一個條件式 (9) 之後，下面的第二個條件式必須成立：

$$\begin{aligned} & \left( R'_{Mi} - R_{Mi} \right) + \left( R'_F - R_F \right) \geq R_{Mo} - R'_{Mo} \\ \Rightarrow & R_{Mi} \times \frac{2}{\eta_{R_{Mi}}} + R_F \times \frac{1}{\eta_{R_F}} \geq R_{Mo} \times \frac{2}{\eta_{R_{Mo}}} \end{aligned} \quad (13)$$

若 (13) 無法滿足則不應當改變資源塊目前的分配，並且結束演算法，直到系統又偵測到超過百分之二的使用者轉變時再重新啟動；而若滿足 (13) 之後我們確定如此重新分配資源塊後系統總吞吐量將會獲得提昇，宏基地台將通知各毫微微基地台並按照新的資源塊分配去給定頻寬。

但是在重新分配資源之後，我們要再次確定外圍宏基地台使用者平均吞吐量是否仍大於等於毫微微基地台使用者平均吞吐量，因此宏基地台將再次統計各毫微微基地台回傳的資訊，並且回到條件一的 (9) 去做確認，若無法滿足，代表系統目前雖然整體的吞吐量得到提升，但是宏基地台並沒有保護到自身外圍的使用者，違反公平原則，外圍宏基地台應當收回削減的資源塊，而內圍宏基地台和所有的毫微微基地台也該返還所有的資源塊並且結束演算法，直到系統又偵測到超過百分之二的使用者轉變時再重新啟動；若 (9) 再次滿足，則代表系統整體的吞吐量不但得到提升，並且所有的使用者按公平原則，更加平均的得到系統的資源，演算法優化了整體系統。

整個演算法的發動是建立在超過 1% 的使用者由連接宏基地台轉換去連接到毫微微基地台開始，經過兩層條件的把關確定既保護了使用者權益又提升了整體系統效能之後，完成演算法並等待下次使用者大量轉換再次觸發演算法；若無法滿足條件，則提結束演算法並一樣等待使用者的大量轉換。整個演算法的流程圖將如下頁 (圖十) 所示，其中條件將不再贅述，而直接以關鍵算式表示，可以與本節前面敘述互相參照。



圖十 宏基地台使用者轉變為毫微微基地台使用者演算法流程圖

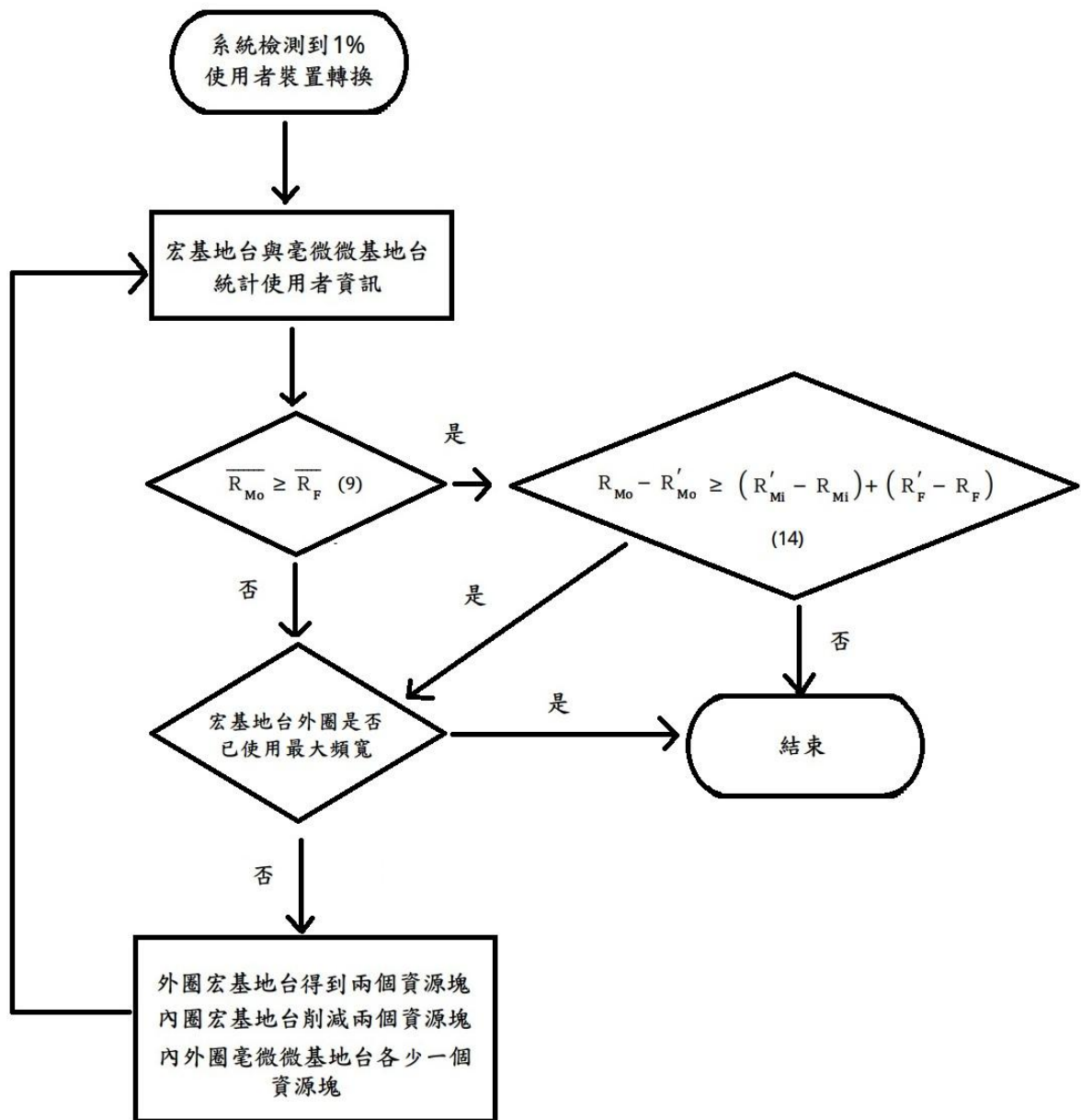
除此之外，為了演算法的完整性，我們也必須考慮到如果毫微微基地台使用者轉變為宏基地台使用者的狀況。一旦毫微微基地台使用者轉換成為宏基地台使用者，我們首先一樣必須考慮外圍宏基地台使用者平均吞吐量此時是否大於等於毫微微基地台使用者平均吞吐量，即條件一的 (9) 式。如果不滿足，而宏基地台外圍的使用頻寬又未達到原來的上限，就必須轉而削減毫微微基地台的使用頻寬，將資源返還給外圍宏基地台。若外圍宏基地台的使用頻寬已達上限，那麼雖然無法滿足 (9) 式，但是為了不讓宏基地台外圍的使用頻帶超過三分之一，干擾到其他宏基地台的外圍使用者，也不應該再給外圍宏基地台頻寬，亦即系統資源分配回到最原始的軟頻率分配，然後結束演算法。

即便滿足了 (9)，由於毫微微基地台使用者減少，我們若繼續削減毫微微基地台的資源，並返還給宏基地台外圍使用者（在外圍宏基地台使用頻帶未達原本系統上限的情況下），仍有可能系統的總吞吐量增加，即是以外圍宏基地台使用者增加的吞吐量去減掉內圍使用者和毫微微基地台使用者所減少的吞吐量，最後成為剛好與 (13) 方向相反的不等式：

$$R_{Mo} \times \frac{2}{n_{R_{Mo}}} \geq R_{Mi} \times \frac{2}{n_{R_{Mi}}} + R_F \times \frac{1}{n_{R_F}} \quad (14)$$

若 (14) 式無法滿足那我們在保護到外圍宏基地台使用者，並且系統吞吐量也最大化的情況之下，結束演算法。若繼續由毫微微基地台將資源返還外圍宏基地台能夠增加系統吞吐量，即 (14) 是被滿足了，我們也要再次確認外圍宏基地台的資源是否已達到上限，若達到上限則一樣不能改變資源分配，未達上限，則將資源由毫微微基地台削減而給予外圍宏基地台，以增加系統總吞吐量。

人數由毫微微基地台反轉換為宏基地台使用者的狀況與原來假設的相反，但是在宏基地台外圍使用者仍然必須保護，以及其資源有規格上限制的情況下，步驟與使用者由連接宏基地台轉換為連接毫微微基地台有些許不同，流程圖則如圖十一所示。



圖十一 毫微微基地台使用者轉換為宏基地台使用者演算法流程圖

### 3.3 採用演算法後的干擾分析

介紹完演算法之後，我們想要分析演算法讓各層基地台的使用頻帶改變之後，對所有的使用者造成什麼不同的影響，因此將論證系統的額外缺點，和需要以模擬實證的項目。我們將討論的目標分為宏基地台內、外圈使用者，以及內、外圈的毫微微基地台使

用者四項。由公式 (2)、(3) 我們可以得知，影響使用者裝置吞吐量的變因主要有：所能夠使用的頻寬、服務中基地台的訊息傳輸功率、造成干擾的訊息功率總合以及雜訊。在演算法中我們已經討論和適當分配完使用頻寬的部分，各層基地台傳輸功率亦不改變，再加上雜訊維持相同的狀況下，我們只須要考慮新的頻率分配所造成的干擾改變，以下將一一討論。

首先讓我們來看看內圈毫微微基地台的使用者。它們最大的干擾源即是宏基地台內圈的傳輸訊號，但是這個干擾的頻帶在演算法前後都是完全與毫微微基地台重疊，在兩者傳輸功率不改變的情況下，使用頻帶一起增加，由公式 (2) 可以發現干擾增加是在對數涵式當中，必須連帶頻寬一起增加的接收訊息功率一起看，也就是說必須觀察它的訊號對干擾雜訊比，可以看到雖然雜訊增加但是要接收的訊號使用頻帶亦然，總體訊號對干擾雜訊比並不改變；次要干擾則是其它的內圈毫微微基地台，狀況與主要干擾相同，並且干擾源的信號傳輸功率更小，不須額外討論。

再來看外圈的毫微微基地台使用者。外圈毫微微基地台的使用者也有可能被宏基地台內圈穿透出來的訊號干擾，另外也受到其它外圈毫微微基地台的干擾，但是狀況一如內圈的毫微微基地台，造成的負面影響其實不影響訊號對干擾雜訊比，我們不需要去擔心。比較不一樣的是鄰近宏基地台的外圈傳輸功率，是有可能額外增加的干擾，雖然不會干擾到外圈宏基地台使用者，但是和外圈毫微微基地台使用者卻是使用相同的頻帶，所幸本演算法考慮的是縮減宏基地台外圈頻帶，因此無論如何皆不會有額外的干擾，相反的干擾只會越來越小。

第三我們看內圈的宏基地台使用者。內圈宏基地台使用者主要的干擾源是自己宏基地台其他扇面的傳輸訊號、內圈的毫微微基地台傳輸訊號以及其它鄰近宏基地台的外圈訊號。其他扇面的訊號原本就與自身扇面一樣使用所有頻帶，沒有額外干擾；內圈毫微微基地台本來就使用相同頻寬，因此一如毫微微基地台內圈使用者的狀況，一樣不造成影響；而其它宏基地台外圈的頻帶，則與外圈毫微微基地台相同，在演算法的重新分配後只會更小，更不需要考慮。

最後要看外圈的宏基地台使用者。外圈宏基地台使用者的干擾方面，因為軟頻率複用本身就有保護，其實幾乎沒有什麼額外的干擾，但是為了保守起見我們額外來考慮鄰近宏基地台內圈的訊號可能穿透出來而造成干擾。而由於鄰近宏基地台內圈頻帶本來就與自身宏基地台外圈完全重疊，其傳輸功率也不改變，因此採用演算法也不會多出任何額外的干擾，不需要再探究。

在下一章裡我們會確認確保外圈毫微微基地台平均吞吐量的步驟是否有效，最後當然會演示採用演算法後系統整體吞吐量增加的結果。



## 第四章.

# 模擬和結果

---

### 4.1 模擬環境

系統的模擬使用與實驗室同仁討論開發的模擬器，模擬器的核心為七個宏基地台的位置座標，我們在訂定宏基地台的座標之後，分別給定其訊號發射分布，接著再加入毫微微基地台，根據這些毫微微基地台與宏宏基地台的相對位置決定其隸屬的宏基地台。在各階基地台佈置完成後開始加入使用者裝置，分布與假設在系統模型已經詳細介紹過，我們利用這些使用者裝置的位置座標來計算與宏基地台和毫微微基地台的相對位置，如此方可以套入系統模型中（整個系統的座標皆採二元平面座標），天線發射功率逸散、路徑衰減以及所有重複頻帶的使用者受到的干擾，進而可以計算所有使用者裝置的訊號對雜訊干擾比和吞吐量。

模擬的執行我們先使用原本的軟頻率複用分配，固定所有參數，惟使用者裝置連接的基地台比率不斷改變：使用者裝置一開始全部都連接到宏基地台，在模擬開始後，每次以百分之二的數量轉換宏基地台使用者為毫微微基地台使用者，以至最後所有使用者皆轉換為毫微微基地台使用者。在每個使用者裝置轉換百分比步階，我們皆分類去計算隸屬於各階基地台的使用者裝置之訊號對干擾雜訊比及其吞吐量，每個百分比的模擬結果都是上百次相同機率分布之後平均的數值。

接著我們將演算法代入模擬器中使用，模擬一樣紀錄出使用者裝置各轉換百分比的資訊，同樣也是上百次機率分布之後平均的數值。最後將演算法所得到的數值與原始軟頻率分用相比較，確實證明了論證的正確以及演算法的確可以提升系統總吞吐量。

表三為模擬使用的參數，參數的使用皆是參考相關研究裡各篇論文使用的參數，一些未定義清楚，抑或是因規格不同而無法套用的參數，則是綜合比較第三代合作夥伴計劃提出的各篇規格與參數建議來設置，各模擬參數如下：

表三 系統模擬參數

參數名稱	參數數值	
	宏基地台	毫微微基地台
基地台數量	7 (每個宏基地台具三個扇面)	30 ~ 120
訊號覆蓋範圍	長程演進技術升級版六角形扇面，宏基地台間距 500 公尺	半徑 20 公尺的圓
天線場型	$-\min\left[12\left(\frac{\theta}{65^\circ}\right)^2, 20\right]$	全向式天線
初始的資源塊分配個數	內圈初始使用 66 個資源塊 外圈則使用 34 個資源塊	內圈與外圈初始皆使用 33 個資源塊
系統總頻寬	20 MHz，規格訂定頻域向同時有 100 個資源塊供分配	
使用者裝置數量	150 ~ 450，使用者裝置連接的基地台會以 1% 的步階轉換	
可加性高斯白雜訊功率密度	-174 dBm / Hz	

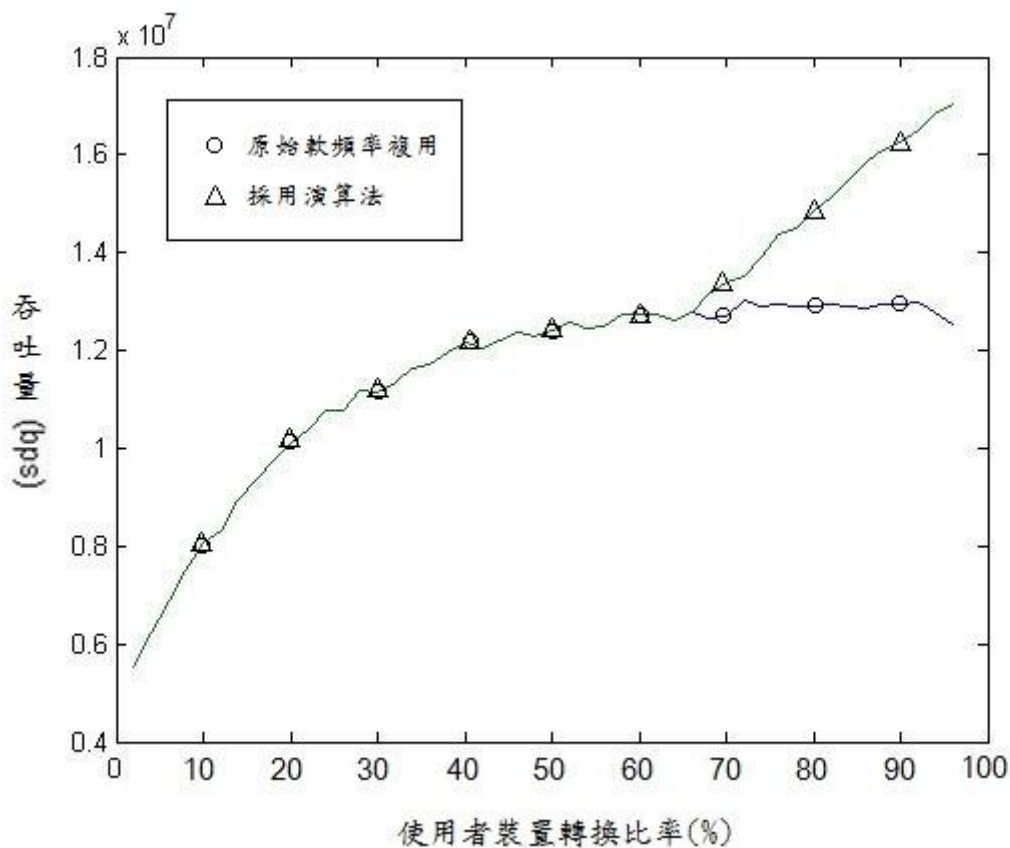


## 4.2 模擬結果

從圖十二開始是整個系統以及各級基地台服務之下的使用者裝置吞吐量，由這些吞吐量可以說明演算法對系統的提升，以及公平性的保證。圖十一是系統整體的吞吐量，可以看到若是頻率分配照原本的軟頻率複用而不改變，系統吞吐量會在毫微微基地台可使用的頻寬到達飽和時不再上升；若採用演算法，可以看到大概從使用者轉換率到達 65 % 時開始，系統效能開始得到提升。轉折點便是外圈宏基地台使用者平均吞吐量開始超越毫微微基地台使用者吞吐量的地方，如此的轉折可以證明演算法中條件一的 (9) 式起了作用，為外圈宏基地台使用者的服務做到了把關。

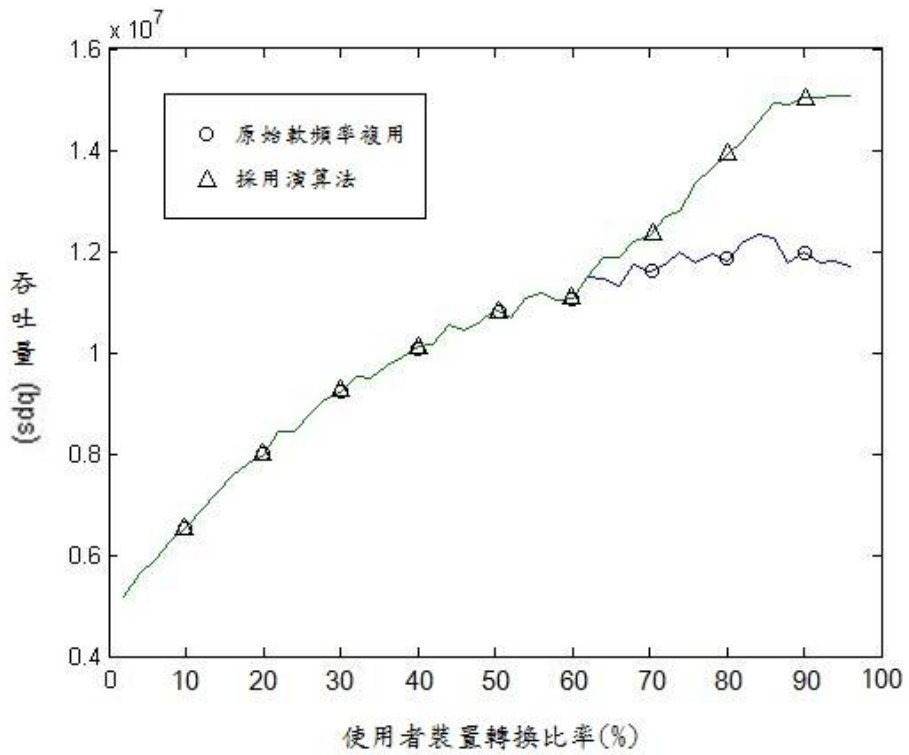
吞吐量之所以會直線上升，是因為每次雖然做相同的頻率分配改變（外圈宏基地台削減兩個資源塊；內圈與外圈毫微微基地台各得一個資源塊），但受益的使用者裝飾越來越多，而被削減頻寬的使用者越來越少。而吞吐量的增加曲線之所以會不平滑，在使用者轉換率上升時仍維持相同吞吐量而未能提升，可能是因為當下雖然削減與給予頻寬雖然保證了系統吞吐量的提升，但是過度快速地做頻寬的轉移導致了外圈宏基地台使用者的平均吞吐量不再高於毫微微基地台使用者，因此系統收回給予的頻寬，再度驗證(9) 式發揮了功效。

由於模擬採用薛能通道容量理論來做為吞吐量的評估公式，只考慮了頻率和功率的影響，並沒有在時間軸上實際分配資料傳輸，因此未採用演算法的毫微微基地台在服務許多使用者的擁擠狀況下才能持平其吞吐量，若是實際在時間軸給予資料做計算，肯定會因為擁擠而產生使用者裝置的競爭 (contention)，導致系統吞吐量下降，在一次必須最少使用一個資源塊的規格下將更加明顯，此時演算法提供的動態頻率分配將更顯著的提升系統的吞吐量。

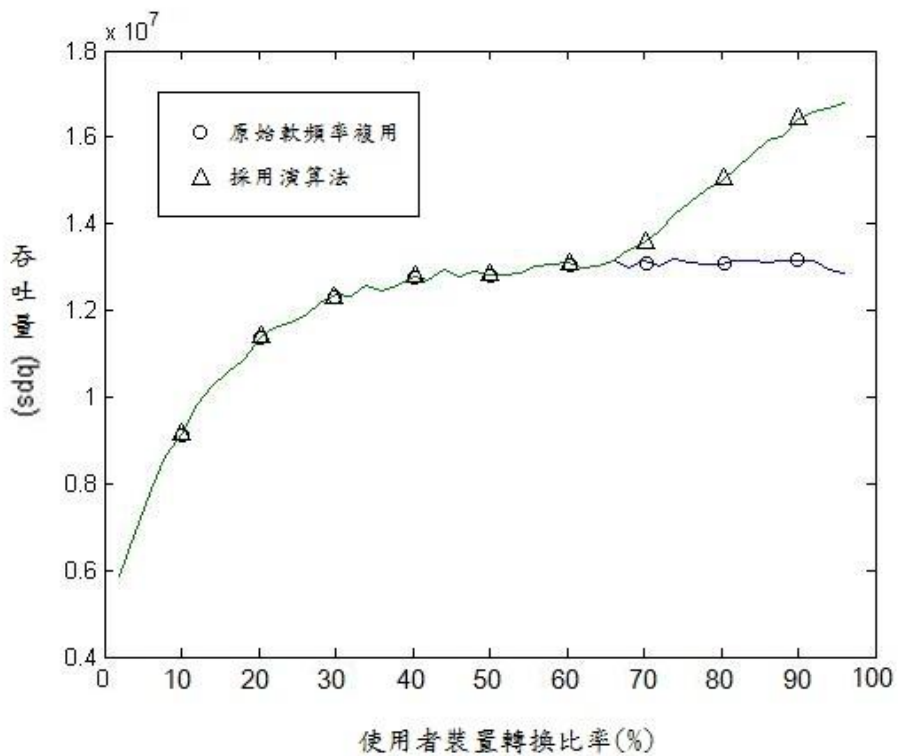


圖十二 採用與未採用演算法之系統吞吐量比較  
(300 個使用者裝置，60 個毫微微基地台)

接著我們維持毫微微基地台的數量，只改變使用者裝置的數量，以 150 個使用者裝置為步階來模擬分別看 150 個和 450 個使用者裝置採用演算法的結果。由圖十三和圖十四可以發現整體趨勢並無不同，系統吞吐量提升的比率差不多，並且一樣是在使用者轉換率達 65% 時演算法開始發生作用。這代表使用者數量對演算法提供的系統效能提升並沒有影響，因為即使系統內使用者人數變化，系統內各階基地台可以提供的容量仍然相同。注意到使用者裝置只有 150 時，未採用演算法之系統吞吐量未趨平緩，顯示系統仍未達飽和，即便如此，演算法仍然能提供系統的提升。至於使用者裝置越多曲線越平滑則是因為參與計算的樣本數大，平均之後不容易出現暴衝的數值。



圖十三 採用與未採用演算法之系統吞吐量比較  
(150 個使用者裝置，60 個毫微微基地台)

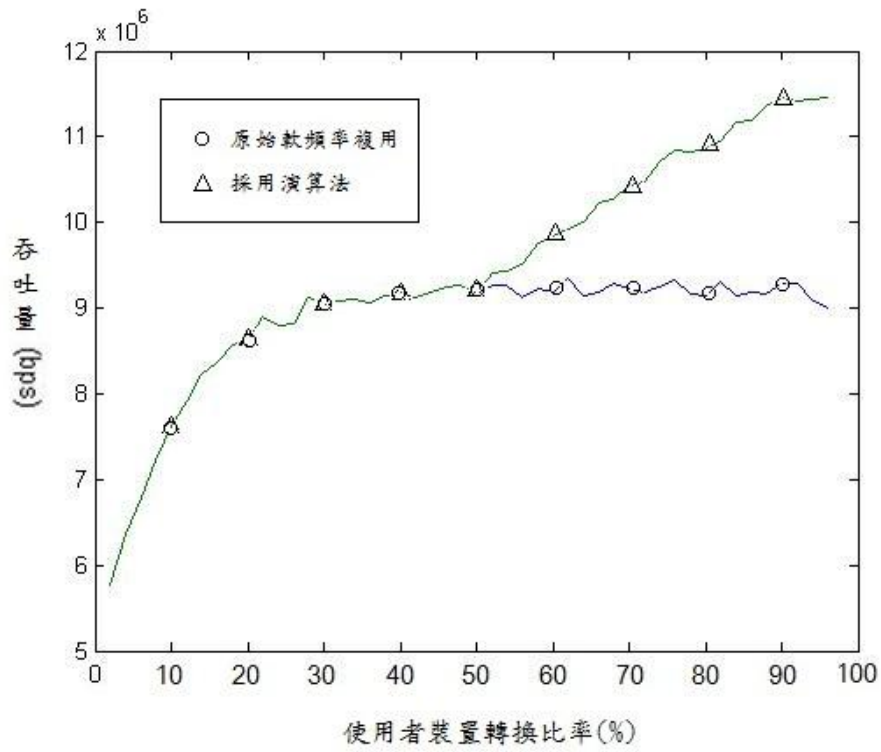


圖十四 採用與未採用演算法之系統吞吐量比較  
(450 個使用者裝置，60 個毫微微基地台)

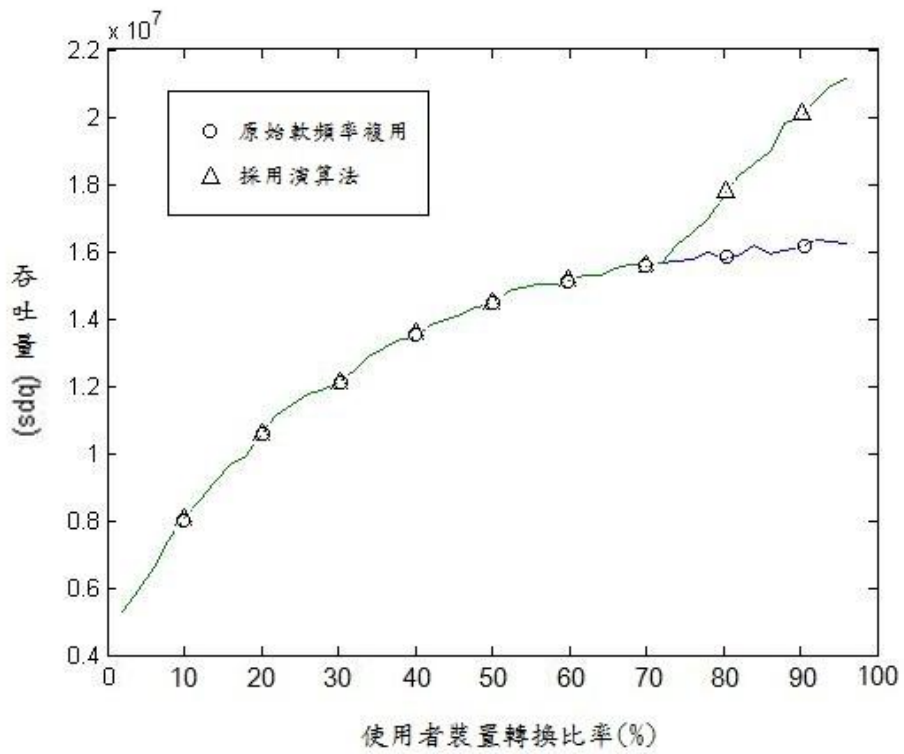
由前面的模擬結果中，我們可以看出使用者數量與演算法的效能提升毫無關係，接下來我們討論毫微微基地台數量對系統以及演算法的影響。圖十五與圖十六同樣是系統總吞吐量的比較，其使用者裝置數量回到 300 個，這次我們改變毫微微基地台的數量：圖十五有 30 個毫微微基地台而圖十六則有 120 個毫微微基地台。首先我們可以看到圖十五中系統總吞吐量的增加很快地便趨緩，這是因為毫微微基地台數目少，可以增加的系統容量也不多，因此系統很快達到飽和；圖十六中，由於大量的毫微微基地台增加的系統容量多上許多，系統就比較慢達到飽和。比較圖十一、十四與十五，可以發現毫微微基地台增加並不會使系統容量線性成長，因為大量的毫微微基地台也會對彼此造成干擾，尤其數量一多起來，平均距離變近，干擾將會以倍數提升，結果將會降低提升的系統容量。

圖十五與十五第二個差別則在於演算法啟動的時機不同，毫微微基地台少的系統，在毫微微使用者變多的時候，能提供的容量小，因此會比較早需要外圍宏基地台的頻寬支援，可以看到大約在 50% 左右演算法便會開始啟動，並且對系統的提升非常的多，說明演算法最適合在毫微微基地台不普及，而使用者紛紛想轉型的過渡時期使用；圖十六中演算法直到 68% 才啟動，這是因為毫微微基地台們可以提供的容量變大，毫微微基地台使用者們變得相對不依賴外圍宏基地台給予的頻寬，此時若滿足條件一就盲目地給予頻寬，反而可能導致系統總吞吐量下降，演算法中第二個條件式 (13) 便是在此時發揮到它的功用。我們還可以發現，即使在毫微微基地台倍增的情況下，演算法也只有延遲了 3% 才啟動，證明演算法在毫微微基地台開始大量增加的狀況仍然能扮演優化系統的角色。

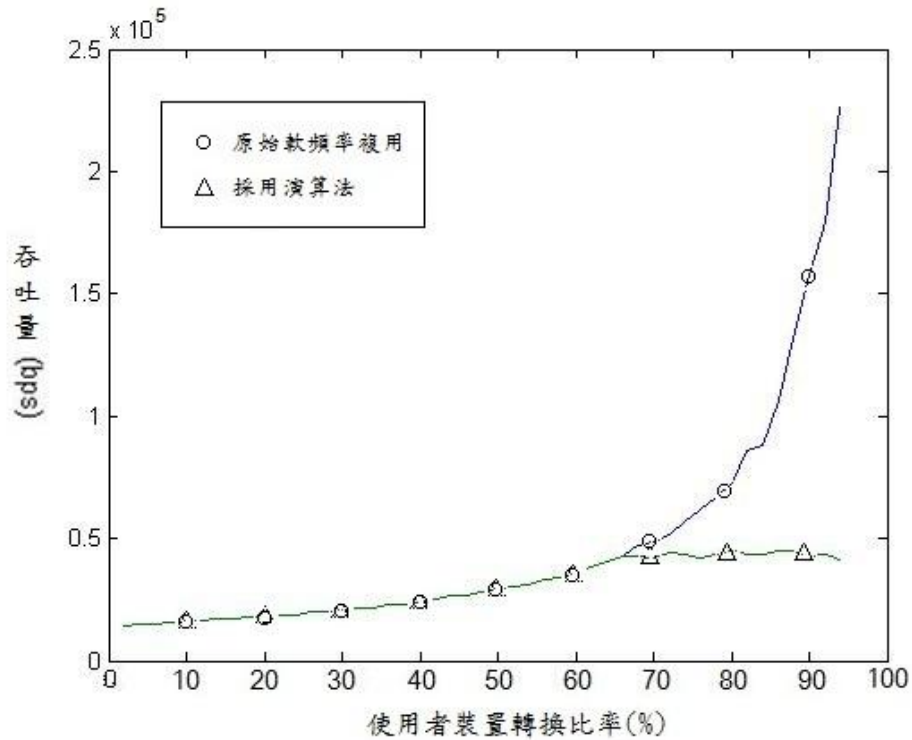
另外可以注意到，系統的飽和與否，與啟動演算法沒有直接的關聯，這是因為演算法受到兩個條件式的限制，若是一味追求系統總吞吐量，那只要在人數增加時把資源全部給毫微微基地台就行了，但是這樣的分配並不合理，並需給予限制。圖十七我們可以看到系統在偵測到外圍宏基地台有過大的頻寬之後，便會削減其資源，使得外圍宏基地台使用者的平均吞吐量維持在一定的值。



圖十五 採用與未採用演算法之系統吞吐量比較  
(300 個使用者裝置，30 個毫微微基地台)



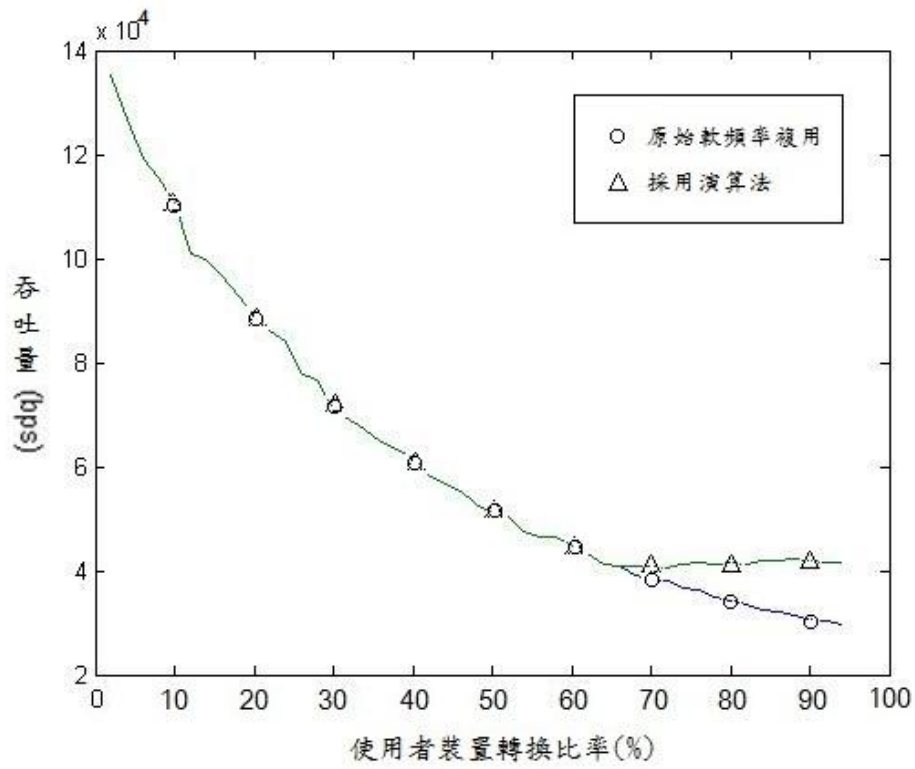
圖十六 採用與未採用演算法之系統吞吐量比較  
(300 個使用者裝置，120 個毫微微基地台)



圖十七 外圍宏基地台平均吞吐量  
(300 個使用者裝置, 60 個毫微微基地台)

圖十七是第一個條件 (9) 衍生的結果，可以看到系統一旦偵測到外圍宏基地台吞吐量開始急遽增長，便能及時購發動，將資源更公平、有效率的分配，若演算法沒有啟動，則外圍宏基地台使用者平均吞吐量將急遽暴增，這就是本篇論文一開始動機裡面發現的現象。啟動演算法之後，外圍宏基地台的平均吞吐量只要維持受到保證的吞吐量即可，毫微微基地台使用者的平均吞吐量將可以得到提升（如圖十八所示）。圖十七顯示了演算法成功穩固外圍宏基地台的平均吞吐量，既控制也保護宏基地台本身的使用者。

圖十七則可以看到演算法有效的幫助毫微微基地台提升系統整體的吞吐量，在給予了資源之後，毫微微基地台使用者的平均吞吐量將不再下降。圖十一到十五顯示了演算法的確可以提升系統整體的吞吐量，並且提供了系統變化後演算法的不同功效；圖十七和十八則證明了演算法的兩個條件公式確實有效，除了整體系統優化之外，在內部各階基地台隸屬的使用者裝置也都照計畫般被分配到合理且有效率的系統資源。



圖十八 毫微微基地台平均吞吐量  
(300 個使用者裝置，60 個毫微微基地台)



## 第五章.

### 結論

---

本論文的核心宗旨在於新型網路架構異質性網路與頻率複用的結合，開始的目的是為了降低系統內各級基地台之間的干擾。而在探究合理分配的過程中我們發現了軟頻率複用是個適合的頻率分配，可以最大化頻寬的使用效益，並且可以提供新型毫微微基地台嵌入系統的空間。然而硬性的頻率分配並沒有考慮到實際上使用者變化的趨勢，而造成頻寬資源浪費在少數使用者裝置，系統效能提升停滯的狀況。

我們提出的演算法經過理論論證以及模擬實證之後，確定可以在系統中使用者裝置大量由宏基地台轉而去連接毫微微基地台時，無論在何種情況下，皆有效的提升系統整體的吞吐量，並且隨著轉換的人數越多，提升的比例越加明顯。而在系統得到提升的同時，經由演算法的雙重條件控制，可以確保宏基地台照顧到自己的外圍使用者，即本篇論文的演算法不但優化了系統，也兼顧了系統內各級使用者裝置的被服務品質與系統資源分配的公平性。



## 參考文獻

---

- [1] 郭昱賢、林盈達, “LTE 架構、協定與效能”, 國立交通大學資訊工程系, 2011.9.30
- [2] Klaus Ingemann Pedersen, Troels Emil Kolding, Frank Frederiksen, István Zsolt Kovács, Daniela Laselva and Preben Elgaard Mogensen, “An Overview of Downlink Radio Resource Management for UTRAN Long-Term Evolution”, Nokia Siemens Networks, IEEE Communications Magazine, July 2009
- [3] David lo ´Pez-pérez, King’s College London, I-smail Güvenç, Docomo communications laboratories USA, inc., Guillaume De la Roche, University of Bedfordshire Marios Kountouris, Supelec, Tony q. s. Quek, institute for infocomm research, Jie Zhang, University of Sheffield, “Enhanced Intercell Interference Coordination Challenges in Heterogeneous Networks”, IEEE Wireless Communications, June 2011
- [4] Shaoyi Xu, Jing Han , Tao Chen, “Enhanced Inter-cell Interference Coordination in Heterogeneous Networks for LTE-Advanced”, School of Electronics and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, China, State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Renesas Mobile R&D, IEEE, 2012
- [5] R1-050507, “Soft Frequency Reuse Scheme for UTRAN LTE”, Huawei, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #41, 9 – 13 May, 2005
- [6] Manli Qian, Wibowo Hardjawana, Yonghui Li, Branka Vucetic, Jinglin Shi, Xuezhi Yang, School of Electrical and Information Engineering, The University of Sydney, NSW, Australia, Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Key Laboratory of Mobile Computing and Pervasive Device, Wireless Research Dept, Huawei Tech. Co., Beijing, China, “Inter-cell Interference Coordination Through Adaptive Soft Frequency Reuse in LTE Networks”, IEEE, 2012

- [7] Xuehong Mao, Amine Maaref, Koon Hoo Teo, “Adaptive Soft Frequency Reuse for Inter-Cell Interference Coordination in SC-FDMA Based 3GPP LTE Uplinks”, Mitsubishi electric research laboratories, December 2008
- [8] Jianguo Liu, Dongyao Wang, Jiyong Pang, Jun Wang and Gang Shen, “Inter-Cell Interference Coordination based on Soft Frequency Reuse for Relay Enhanced Cellular Network”, Research & Innovation Center, Alcatel-Lucent Shanghai Bell, IEEE, 2010
- [9] Mazin Al-Shalash, Farid Khafizov, Zhijun Chao, “Interference Constrained Soft Frequency Reuse for Uplink ICIC in LTE Networks”, Huawei Technologies, IEEE, 2010
- [10] Mahmoud M. Selim, Mostafa El-Khamy, Mohamed El-Sharkawy, “Enhanced Frequency Reuse Schemes for Interference Management in LTE Femtocell Networks”, Egypt-Japan University of Science and Technology (E-JUST), IEEE, 2012
- [11] “Developing Integrating High Performance HET-NET”, 4G Americas, October 2012
- [12] TR 25.814, “Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access”, 3GPP, 2006.9
- [13] TR 36.814, “Further advancements for E-UTRA physical layer aspects” 3GPP, 2010.3