

國 立 交 通 大 學

電 信 工 程 研 究 所

碩 士 論 文

節能無線數據網路之基地台設計

Cell Design for Energy-Efficient Wireless
Data Networks

研 究 生：田 健 誠

指 導 教 授：王 范 君 教 授

中 華 民 國 一 百 年 十 月

節能無線數據網路之基地台設計

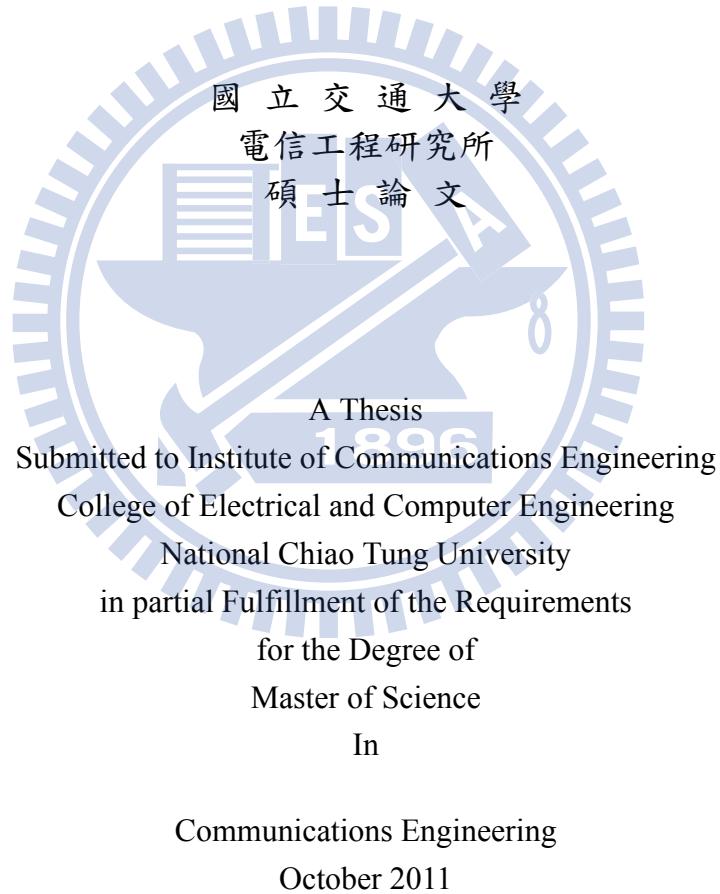
Cell Design for Energy-Efficient Wireless Data Networks

研究 生：田健誠

Student : Chien-Cheng Tien

指 導 教 授：王 范 君

Advisor : Li-Chun Wang



中華民國一百年十月

節能無線數據網路之基地台設計

研究生：田健誠

指導教授：王蒞君教授

國立交通大學
電信工程研究所碩士班

摘要

隨著環境議題的抬頭，以節能省電為導向的設計遂變成一股趨勢。根據研究顯示，資訊及通訊科技產業 (Information and Communication Technology, ICT) 的碳排放占全球總量的 2~4%，且持續增加中。更進一步指出，蜂巢式網路 (Cellular Network) 所消耗之能量佔 ICT 產業的十分之一。因此，許多研究計畫著重在發展具降低能量消耗之技術，即綠色通訊 (Green Communications)。這對許多營運業者除了是一種維持生態永續發展的責任外，也在成本控管上具有經濟效益，是許多廠商投入的方向。

而在蜂巢式網路中，維持基地台運作所消耗的能量更超過整體的 80%。於是，如何在細胞佈建時最佳化基地台的個數、降低能量消耗，是我們想討論的議題。在本篇論文中，我們探討不同的流量負載 (Traffic Load) 下，細胞的涵蓋範圍應如何設計，以提高在頻寬及能量上使用的效率。根據討論的結果，我們可以依不同使用情形，得到最佳的細胞半徑，並發現維持細胞邊界上使用者之服務品質，為決定細胞涵蓋範圍的主要因素。最後，我們也提出一對系統負荷小、低複雜度的節能運作方式，在具節能潛力的時段可減少 75% 的功率使用，進而幫助整體網路節省約 15.6% 的能量消耗。

Cell Design for Energy-Efficient Wireless Data Networks

Student: Chien-Cheng Tien

Advisor: Dr. Li-Chun Wang

Institute of Communications Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

With the rise in environmental issues, energy saving-oriented design becomes a trend. According to the current study, 2~4% of worldwide carbon emissions are caused by ICT (Information and Communication Technology) industry and is constantly increasing. It further pointed out that the energy consumption of cellular networks is one-tenth of the amount of ICT infrastructures. Therefore, many projects focus on developing new techniques that reducing energy consumption, that is, green communications. In addition to a responsibility for preserving the environment, it is also with economic benefits in cost control and thus dedicated by many service providers and manufactures.

In the cellular network, over 80% energy consumption is used to maintain the operation of base stations. Hence, that is what we want to discuss in cell design for optimizing the number of base stations and reducing the energy consumption. In this thesis, we discuss how to choose the cell radius under different traffic profile in order to enhance the efficiency in the use of bandwidth and energy. According to the results, we can decide the optimal cell radius base on different situations. Moreover, we find that to determine the cell coverage, the QoS requirement of cell-edge users is the main factor. In the end, we propose a less-overhead and low-complexity operation mode to reduce the power consumption for 75% during time period with power-saving potentiality and save for up to 15.6% of daily energy consumption.

誌謝

這篇論文的完成，要感謝我的指導老師，王蒞君教授。謝謝老師兩年多來在學業上的悉心指導，教導我如何在面對問題與瓶頸時，有正確的觀念及態度解決困難。更感謝老師除了在課業上的春風化雨，生活上的關心也不曾缺少，很多方面都能感受到老師的用心與照顧。也由衷感激老師對於我的不足能不厭其煩、孜孜教誨；更別提有時候懶散怠惰，老師也能包涵並轉而分享自己的求學經驗與人生哲學，勉勵我們向上，師恩的浩瀚，永銘於心。

也要感謝實驗室的好夥伴，兩年多來的並肩向前，讓我生活充滿歡樂。謝謝俾榮學長、昂勳學長、李橋學長、偉齊學長的照顧與幫忙，使我能快速適應實驗室的生活，也懷念學長們帶我們這群小蘿蔔頭到處吃喝玩耍的日子。謝謝宗廷、祐榕、凱評、婧萍這群一同奮戰的朋友，即便我常是被欺負的那個。也謝謝美麗的助理芷齡與可愛的學弟們文彬、宗展、耕含、振孝、彥名，讓實驗室充滿歡笑。謝謝你們在研究與生活上的陪伴與鼓勵，讓這兩年多的日子永恆難忘。有機會，我們一定要再聚一聚！

最後，我要感謝我的家人，雖然求學路上跌跌撞撞，但你們無盡的支持與溫暖關懷，是我最大的精神支柱，讓我心無旁騖、無憂無慮地完成學業。也感謝一路上關心我的好友們，煩悶的時候謝謝你們的傾聽。

謝謝曾經幫助我、陪伴我走過這一段時光的人。我想，需要感謝的人太多了，不如就感謝老天吧！

誌於 風城交大

一百年十月

目 錄

中文摘要	.....	i
英文摘要	.....	ii
誌謝	.....	iii
目錄	.....	iv
表目錄	.....	vi
圖目錄	.....	vii
1 簡介	.....	1
1.1 動機	.....	1
1.2 問題與解決方法	.....	2
1.3 論文綱要	.....	2
2 背景介紹	.....	3
2.1 綠色通訊 (Green Communications)	.....	3
2.1.1 朝向以能源有效利用為導向的設計	.....	4
2.2 細胞設計之目標	.....	5
2.3 細胞大小在細胞佈建規劃 (Cell Planning) 中之討論	.....	6
2.3.1 高頻寬需求與小細胞的設計	.....	6
2.3.2 細胞分割 (Cell Splitting) 的概念	.....	7
2.3.3 服務流量與涵蓋範圍的分析	.....	8
2.4 文獻探討	.....	9
3 系統模型	.....	11
3.1 系統架構	.....	11
3.2 無線傳播環境	.....	13
3.3 性能衡量指標	.....	15
4 問題規劃與擬定	.....	17
4.1 簡單假設下的觀察	.....	17
4.1.1 最大值的最小細胞容量	.....	19
4.2 問題的擬定	.....	22
5 性能表現分析	.....	23

5.1	考慮實際情況下系統環境的假設	23
5.1.1	將扇區 (Sectors) 分割成不同地帶 (Zones)	23
5.1.2	扇區間分不同頻段使用與否	24
5.2	使用者平均可得容量與平均細胞容量	25
5.3	涵蓋範圍與容量大小之限制條件的驗證	30
5.4	不同流量負載下決定最佳細胞大小之程序	31
6	結果與討論	33
6.1	中流量負載的使用情形下決定最佳細胞半徑	39
6.2	具節能效果的運作模式	43
7	結論與未來研究方向之建議	45
	參考文獻	46

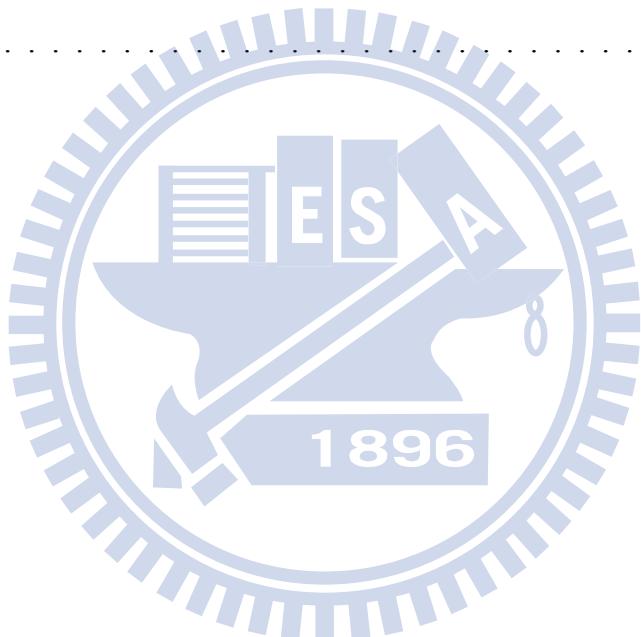


表 目 錄

3.1 不同時刻之 P_A 值	13
3.2 尖峰時刻不同地區之細胞流量負載 (單位: Mbps/km ²)	16
6.1 主要的模擬參數	33
6.2 尖峰時刻不同流量負載之條件限制值 (以 $D=4000$ 人/km ² 為例)	34
6.3 不同流量負載下最大可允許之細胞涵蓋範圍	42

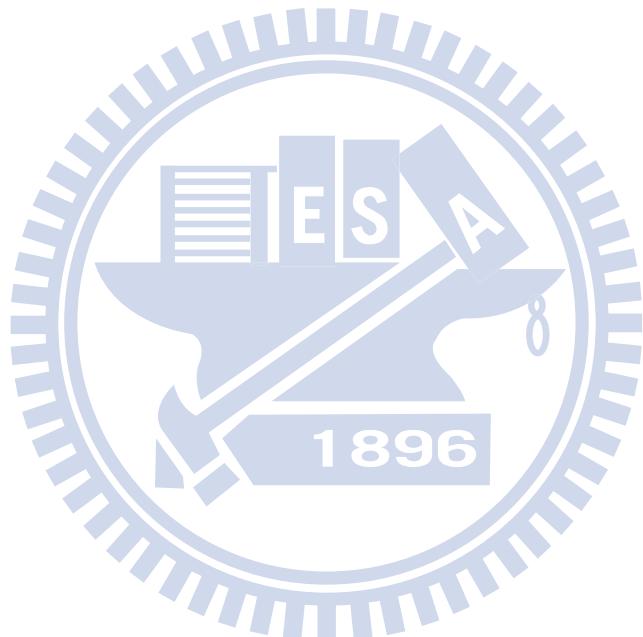


圖 目 錄

2.1 尖峰時刻與離峰時刻的使用效率比較	4
2.2 細胞分割的例子	7
2.3 細胞分割之概念可減少 $3/4$ 的功率消耗	8
3.1 系統架構圖	11
3.2 以每日流量負載圖估計不同時刻之 P_A 值	12
3.3 不同方位之天線增益圖	14
4.1 細胞邊界上使用者可得容量之總和	19
4.2 細胞容量 (假設單一細胞且無窮多根天線)	21
5.1 120 度方向性天線將細胞分為三個區域 (Sectors)	23
5.2 k (此例 $k = 2$) 根天線將一區域分為 $K = 3k$ 個地帶 (Zones)	24
5.3 使用者與天線間的夾角	26
5.4 扇區間使用相同的頻段下使用者所受之干擾 (此例 $k = 2$)	27
5.5 扇區間使用不同的頻段下使用者所受之干擾 (此例 $k = 2$)	27
5.6 使用者與相鄰細胞基地台之距離及天線間的夾角	28
5.7 決定最佳細胞半徑大小的流程示意圖	32
6.1 不同人口密度下使用者平均可得之容量比較	35
6.2 不同存取機率下使用者平均可得之容量比較	36
6.3 扇區間不同頻段使用方式下使用者平均可得容量之比較	37
6.4 扇區間不同頻段使用方式下平均細胞容量之比較	38
6.5 不同的頻段使用方式在滿足容量大小條件下最大可允許之細胞半徑	39

6.6 滿足涵蓋範圍條件下不同頻段使用方式最大可允許的細胞半徑	40
6.7 不同頻段使用方式下滿足限制條件中最大可允許之細胞半徑	41
6.8 不同人口密度下最大可允許的細胞半徑 ($P_A = 0.146$)	41
6.9 不同流量負載下最大可允許之細胞半徑	42
6.10 不同時刻之最佳細胞半徑以及具有節能潛力之時段	44



第 1 章 簡介

隨著環境議題的抬頭，減少能源消耗之訴求逐漸受到大家重視。除了能降低溫室氣體的排放 (如： CO_2 等)，減緩生態破壞；同時，對於成本的控管，更能提高經濟效益，增加獲利。雖然現今行動無線電網路 (Mobile Radio Networks) 所產生的溫室氣體，相較於其他產業相對為低，但隨著使用行動通訊的人口數持續增加，傳輸資料量大幅成長，能量消耗勢必會逐年上升。因此，在設計未來行動通訊系統，要求能量使用上具有高效率 (Energy Efficient)，有漸趨重要的趨勢 [1]。

而在行動通訊中，無線電存取網路 (Radio Access Network) 所消耗的功率，超過整體的 80%，更精確的說，即基地台 (Base Station) 所消耗的能量 [2]。舉例來說，在蜂巢式網路 (Cellular Network) 系統下，每一基地台會耗費高達 2700 瓦特 (Watt) 的電力，若考量大區域網路，則每年會消耗好幾十個百萬瓦特 [1]。然而，改進的方式主要可以由兩個方向來達成：第一，使用更具效率且可針對不同負載量作動態調整的硬體元件和軟體模組；以及第二，改善佈建基地台的規劃，在滿足系統的效能表現下，有效地降低同時運作的基地台數，達到能量消耗的減少 [3]。

1.1 動機

新的第四代 (4G) 行動通訊系統，為了滿足更大的資料傳輸容量，小的細胞結構 (Small Cell) 為一般所採取的策略。然而，小細胞結構意味著基地台佈置密度的增加，若我們不考慮使用者的使用情形，很有可能我們在一區域緊密佈置基地台，但實際上使用者卻不需如此大量的容量，而造成資源及成本的浪費。舉例來說：考慮使用者的使用習慣，若以空間上及時間上兩個維度來探討，白天人們出門工作，住宅區的使用者數目較少，而當夜間人們返家，則變為商業活動區的使用者數減少；且一般使用者白天使用服務的次數會較高，相對地在夜晚需要被服務的機會則降低。因此，若我們都使用相同的細胞涵蓋範圍，在使用效率上無法達到最佳。

換言之，若不將使用者的使用情況與整個網路的功率消耗一同加入討論，很有可能我們在某一區域佈建基地台時，使用上不夠符合效率而浪費能源，增加成本且影響環境。而在考慮使用者的使用行為下，細胞半徑大小該如何設計，以利在細胞佈建時有最大效益，則是我們欲探討的議題。

1.2 問題與解決方法

根據以上的討論，我們首要問題即在如何討論使用者的使用情況，亦可視為細胞內的流量負載 (Traffic Load) 情形。由我們收集到的參考文獻，整理發現有使用對稱式的模型來模擬流量；也有藉由量測有線網路的流量變化來類比無線網路之情形；而我們則採用文獻 [4] 及 [5] 中使用的方法，此兩篇文獻的出處為 EARTH (Energy Aware Radio and neTwork tecHnologies) 計畫的技術報告。EARTH 計畫為在能源及環境議題下，所進行的國際研究計畫。我們使用的方法，在第三章介紹系統模型時，會有更詳細的介紹。

為了達到能源更有效利用，我們也進行了一些文獻的探討，其中，「動態改變細胞大小以達到能源的節省」為我們所關注的議題。其精神如下：於系統流量負載較不繁忙的時刻，讓部分基地台進入休眠模式，降低整體網路的能量消耗。其原因正如上面所描述的，使用者的使用情形有空間及時間上的變化，於是我們便利用這特性，設計節能省電的方法。我們的目標即為針對不同時間點，使用者之使用情形去討論最佳的細胞半徑大小，作為基地台佈建規劃時的參考；並提出在維持系統的表現下，何時能切換部分的基地台進入休眠，達到節能效果。

1.3 論文綱要

因此，整篇論文所探討的，即在考慮不同的使用者使用情形以及維持系統的效能表現下，細胞半徑該如何決定，以利於在佈建上具有最大的效益。其餘章節的編排如下：第二章為一些背景介紹，討論綠色通訊 (Green Communications) 和細胞設計之目標，並有相關文獻之探討。第三章為系統模型，介紹系統架構及性能衡量指標。接著，第四章提出我們欲探討的問題。第五章與第六章則分別為性能分析與結果討論。最後，第七章為結論與未來研究方向之建議。

第2章 背景介紹

在這一章節，我們先對越趨重視的綠色通訊 (Green Communications) 做一簡單介紹；接著，瞭解細胞設計所要達到的目標，分析不同之細胞涵蓋範圍在佈建規劃中所造成影響，並說明細胞分割 (Cell Splitting) 之概念以及整篇論文中我們欲探討的參數；最後則是對相關文獻的整理與分析。

2.1 綠色通訊 (Green Communications)

近幾年，由於氣候的激烈變化，百年未見之天災紛紛威脅人類的生活，使得人們開始思考：對於環境的開發與破壞，大自然是否開始反撲？因此，使得許多傳統與新興的產業，開始重視環境及生態的維護，其中「碳足跡」(Carbon Footprint) 即為目前大家著重及推廣的觀念。

隨著溫室氣體 CO_2 的排放可能對環境造成傷害之警示不斷增加，以及非再生能源的消耗殆盡，大家越具共識且逐漸提高發展具能源效率之電信系統的需求 [6]。加上下一代的無線通訊網路，設計的目標為無論在何時何地，都能提供更快速的網際網路存取；而電信用戶的增加與智慧型手機之用戶越來越多，需要即時影音及遊戲等新興服務無疑創造了更多的流量負載 [7]。根據文獻 [1] 指出，傳輸資料量近乎以每五年 10 倍的因子成長，伴隨而來的為 16 到 20% 能量消耗的增加。而在文獻 [8] 中也說明：資訊及通訊科技產業 (Information and Communication Technologies, ICTs) 的碳排放占全球總量的 2~4%，且在運作階段，設備的功率消耗大約佔其整體 40~60% 之碳排放量；若不採取行動降低碳足跡，至西元 2020 年時這些數據會增加一倍。舉例來說，文獻 [6] 中推估蜂巢式行動通訊系統所消耗之能量佔 ICT 產業的十分之一，以西元 2008 年來說，大約相當於一年使用之能量為 600 億千瓦小時 (kWh)，約排放 4 億公噸的 CO_2 (以汽車排放量來做類比，約等於 800 萬台車每年溫室氣體的排放量)。

由以上討論我們得知：傳統無線系統的設計，著重在於隨時隨地都能存取以及大容量的訴求，但隨著能源不足及環境議題的抬頭，以節省能量消耗為導向的設計遂變成一股趨勢，也就是所謂的綠色通訊 (Green Communications)。在學術界已經舉辦多場研討會 (Workshops) 討論具未來發展性的綠色技術；同時，也有許多針對綠色通訊的研究計畫，在不同的國際研究平台下進行著：例如 OPERA-NET、Green Radio、EARTH、

Green Touch 等計畫 [6]。

此外，我們也可以說，降低蜂巢式網路的能量消耗、維持生態永續之發展，對於系統營運商除了是一種不得不為的責任外，在其經營成本上也是具有經濟效益的。若能增加能量使用效率，降低功率消耗，維持系統運作的成本開銷也就能減少，進而獲得更大的收益。因此，這議題是值得思考且也是許多營運業者已經投入的方向。

2.1.1 朝向以能源有效利用為導向的設計

根據以上種種原因，各個廠商積極嘗試許多方法來增加在蜂巢式網路中所有元件的能量使用效率 [6]，包括了行動裝置，基地台以及核心網路。對於行動裝置，有針對延長行動裝置電池之使用時間的研究；同樣地，具有使用效率的網路運作模式也被提出，並且有些技術也能擴展至核心網路階層使用；不過，在蜂巢式網路架構下，最主要的能量消耗來源還是基地台設備運作所需的能量 [6,8,9]。

我們已經知道 CO_2 的排放與能量消耗成正比關係，若我們能減少蜂巢式網路的能源使用，不僅能降低溫室氣體的產生，也能在營運成本上得到效益。從文獻 [10] 我們知道：由資源管理的角度來看，所謂的能量使用具有效率，可視為營運商所提供的容量大小恰好滿足使用者的資料量要求。然而，一般系統商在佈建細胞時，都是以尖峰時刻 (Peak Hours) 使用者的資料要求量當作基準去做規劃，雖然在服務上有較好的品質，但在非尖峰的時刻，頻譜以及功率使用上則不具效率。如圖 2.1 所示，在尖峰時刻使用者較多，為了滿足服務品質 (QoS, Quality of Service)，我們將細胞縮小以滿足要求；但同樣的細胞大小若在離峰時刻使用的話，我們應可將細胞的涵蓋範圍增加，以期服務更多的使用者，提高頻譜及功率的使用效率。

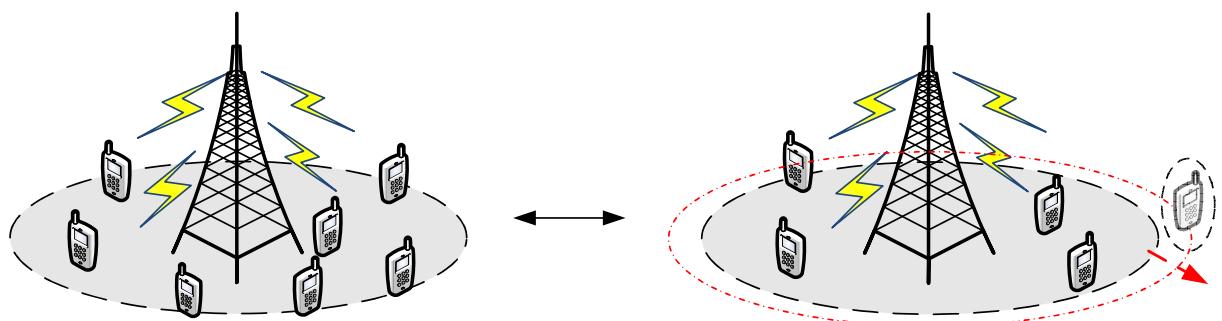


圖 2.1: 尖峰時刻與離峰時刻的使用效率比較

因此，我們可以這樣思考：若能在蜂巢式系統流量負載於離峰的時刻，增加細胞的涵蓋範圍，也就是說，降低基地台運作的個數，則有機會在不影響使用者服務品質的前

前提下，達到節能省電的目的 [1,6,9,10]。而整篇論文的討論動機即在這樣的論述下產生：根據使用者的服務要求，細胞的涵蓋範圍大小該如何設計以達到最大效益？而隨著時間點的不同，合適的細胞半徑大小也會跟著改變，則整個網路系統該如何規劃以符合綠色通訊節能省電的訴求？以下，我們就先對細胞設計做一簡單討論。

2.2 細胞設計之目標

在文獻 [11] 中提及，有五點目標在設計細胞時是需要注意的，這五點分別為：

1. 在一區域佈建細胞時，要保證此區域都有細胞涵蓋。每一細胞的涵蓋範圍要高於某個門檻值 (Threshold Level)，相鄰細胞間涵蓋範圍不足的缺洞 (Holes) 也應該盡量避免。並且，佈建細胞時，不同細胞間所涵蓋的範圍要為相同的值，這可以利用功率控制技術去達成。而在一細胞內所接收到的信號強度也要保證有一定機率 (例如：90%) 能大於接收器的靈敏度；且為了避免干擾其他相鄰細胞，基地台所送出的信號在超過本身細胞的涵蓋範圍後，其信號強度則要盡量減少。
2. 在細胞範圍內，接收端的載波干擾雜訊比 (C/I ratio: Carrier-to-interference ratio) 要有一定機率 (例如：90% 或是 95%) 能滿足最小接受信號品質的比值。
3. 在每一細胞範圍內，要達到一限定的尖峰時刻平均阻塞率 (GoS, Grade of Service)，以滿足新要求服務之使用者及需要換手服務 (Handoffs) 之使用者的傳輸要求。通常換手服務之使用者的阻塞機率 (Blocking Probability) 要較小於新要求服務之使用者的阻塞機率。
4. 基地台的佈建數目必須盡量最小化，以減少成本及細胞佈建所需花費的時間。而設計的步驟也必須具有彈性化以便於在可獲得的基地台位址 (Available Sites) 設置基地台的傳輸接收器，原因在於可獲得的位址是相當有限的，且大部分情況下是由非技術性的原因所限制。
5. 新設計的無線系統需要與固有網路 (Land-Fixed Network) 系統整合在一起。這表示新設計的細胞需要滿足一些要求以能正確與之前已佈建的固有系統連結，達到結合使用之目的。

綜觀以上幾點，我們可以發現在設計細胞時，如何決定細胞的涵蓋範圍是值得討論的；而在整篇論文裡，我們則著重於在細胞涵蓋範圍內的使用者，其服務品質是否滿足，以

及最佳化基地台的佈建數目以提高頻譜及功率之使用效率。

2.3 細胞大小在細胞佈建規劃 (Cell Planning) 中之討論

細胞佈建在行動網路規劃中扮演著基礎且相當重要的角色 [12]。細胞佈建的好壞會影響行動網路的服務品質、系統性能以及準確性之表現。而在文獻 [13] 也提及，細胞規劃欲解決的問題在於考量目前及將來資料量的需求、服務的品質與可具備的未來潛力下，如何佈建基地台以便讓整個需要服務的地區都能被細胞涵蓋。而細胞規劃主要可分為以下步驟 [14]：(1) 選擇細胞的位址，即設置基地台的地方；(2) 選擇無線電的設備，即根據所採用的系統以及技術，使用適合的硬體設施；(3) 設定、校正無線電設備，使其表現最佳化。前面已經說明我們著重於如何決定細胞的涵蓋範圍，便是這邊第一個步驟所要討論的，即如何決定細胞半徑的大小。原因以及討論的方法，我們在下面小節詳述之。

2.3.1 高頻寬需求與小細胞的設計

目前正在發展的第四代 (4G) 行動通訊系統，目標為提供需要更高速傳輸速率的服務，例如高品質的語音服務、HD 畫質的影音串流以及更快速的資料傳輸 [13]。而行動通訊服務的普及，電信用戶之人數一直增加，隨著新興服務的多元，使用者要求的頻寬也跟著上升，因此，若細胞涵蓋範圍內的使用者持續增加，有限的頻寬勢必不敷使用，解決的方法一般採取減少細胞的涵蓋範圍 (降低使用者人數)，以滿足細胞內使用者的服務品質。並且，4G 系統所使用的頻段介於 2~10GHz，在高頻的頻帶傳送信號，信號很快就會衰減，且也容易因為一些小物體阻擋在傳送路徑上而發生衍射現象，所以一般在設計上不得不將細胞的涵蓋範圍縮小，以降低干擾量並增加涵蓋範圍內的信號品質。於是，我們可以說，為了提供使用者更快速的資料傳輸，細胞大小採取了較小的涵蓋範圍。然而，反應的結果即為密集的佈建基地台。基地台的興建是需要成本的，維持運作所需要的能量更是龐大的支出 [15]。若涵蓋範圍內使用者的使用情形與細胞提供的服務量成正比之關係，電信業者才具有獲益空間；反之，則不僅浪費維持基地台運作的能源、對環境造成影響，電信營運商也平白耗費成本而無法獲利。所以，並非任何情況下小細胞的架構都能有最大之效益，還是需要考慮使用者的使用情形而有不同的策略。也因為如此，我們才有該如何設計細胞半徑大小，以達最大效益的議題產生。

2.3.2 細胞分割 (Cell Splitting) 的概念

在蜂巢式架構被提出以後，研究學者前仆後繼地發展了許多技術以增進系統的效能，其中一項即為細胞分割 (Cell Splitting) 的概念。當一細胞內的流量負載達到某一臨界值，使得細胞內可分配的傳輸通道不足以達到良好的平均阻塞率 (GoS) 時，細胞則會被分割成數個更小的細胞 (某些情況下小細胞能使用更低的傳輸功率)，前提為這些小細胞能涵蓋原本大細胞所服務的範圍 [16]。而當分割的小細胞也無法滿足服務需求時，這些小細胞則再分割成更小的細胞，如圖 2.1 所示。

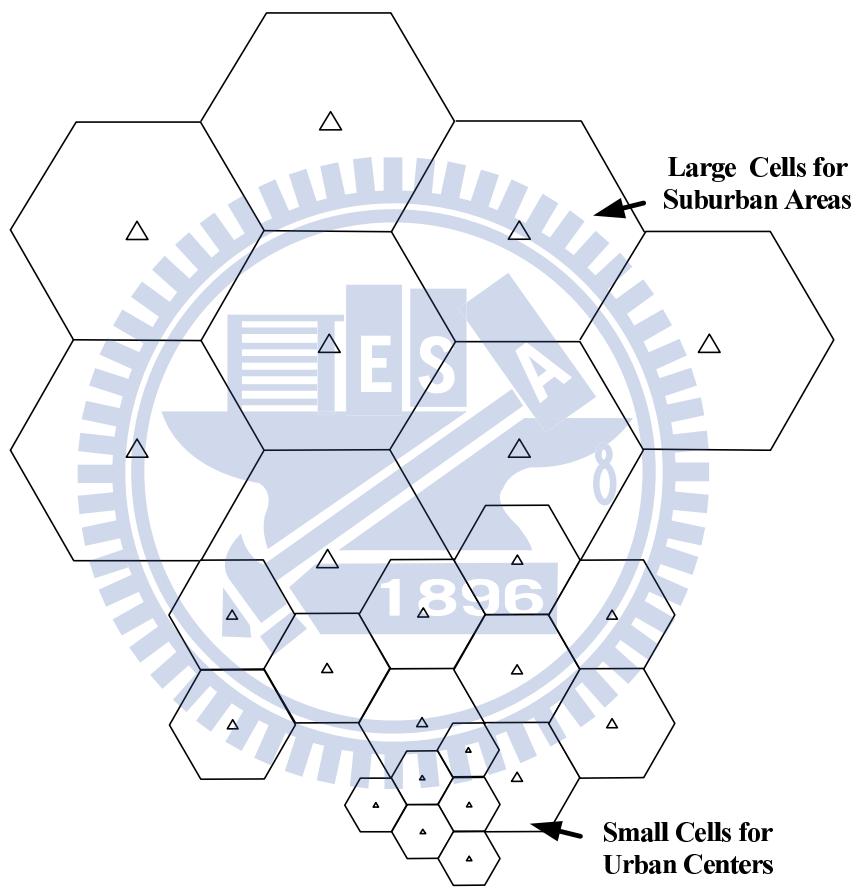


圖 2.2: 細胞分割的例子

細胞分割似乎可以提供許多好處：首先，原先所佈建的基地台並不會有影響，當需要細胞分割時，原先存在的基地台只需降低它的傳輸功率去符合新的涵蓋範圍即可；再者，使用細胞分割技術，電信業者較不怕一開始興建的基地台隨著地區的發展而不敷使用，反而可以根據使用者使用情況，在人口聚集的地方採取細胞分割策略，一來不怕初期投資失敗，二來也能從新加入的用戶累積收入，作為採用細胞分割技術的資金，提供更好的服務；最重要的，細胞分割可以視區域的使用情形而做動態的調整。例如在人口較密集的市區中心，有較大的機率其服務流量會超過原本細胞可以提供的最大值，此時

即可採用細胞分割的概念，滿足使用者需求；而人口稀疏的郊區，則可維持原本的細胞大小，達到頻譜與能源的最佳利用。

我們之所以會討論細胞分割，原因如前面所述：一般在設置基地台時，為了滿足不同時刻使用者的服務品質皆要達到，會以流量負載為最滿載 (Heavy Load) 的情況去考量，而在這條件下所得到的細胞半徑，雖然保證能滿足服務要求，但細胞的涵蓋範圍卻是最小的，因此一旦在非尖峰時刻的時候，使用者不需如此多的頻寬資源，則造成使用效率不佳。我們的想法是：同樣也從系統最滿載的情形去探討細胞最大可允許的半徑大小，但也去討論在什麼時刻，細胞半徑可以擴大，即將細胞分割的概念反向思考，當細胞半徑增大時，則部分基地台可進入休眠狀態、甚至停止運作，由鄰近之基地台維持原區域的服務涵蓋範圍即可，進而達到節能與能源的有效利用。例如圖 2.3 所示，若我們將細胞半徑增為兩倍，則等同於鄰近的三個細胞可進入休眠狀態，節省約 $3/4$ 的功率消耗。

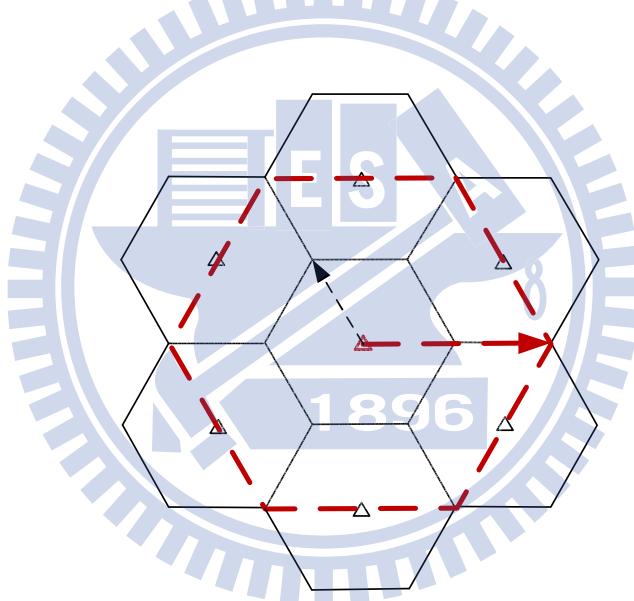


圖 2.3: 細胞分割之概念可減少 $3/4$ 的功率消耗

2.3.3 服務流量與涵蓋範圍的分析

細胞佈建規劃首先要針對服務量以及涵蓋範圍做分析 [14]，也就是在佈建前，我們要先預期可以得到的細胞容量以及基地台能提供服務的範圍。從前面的討論，我們預期使用者的使用情形會影響細胞半徑大小的決定 (這在第四章會討論)，因此，在分析細胞可以提供的服務量時，我們會考慮使用者的使用要求 (例如：使用者的服務品質)，去做適當的設計。而對於涵蓋範圍的分析，在實際環境下，信號的傳播會受到許多因素的影響，像是路徑衰減 (Path Loss)、遮蔽效應 (Shadowing) 或是多路徑衰減 (Multipath

Fading) [14]，更常見的是相鄰細胞間的干擾 (Inter-cell Interference) 限制了系統的表現。於是，我們除了加入使用者人數 (即人口密度、存取網路機率之不同) 的條件外，也討論細胞間使用頻段的方式對於細胞半徑大小的影響。在第三章系統模型時，會做更詳細的介紹。

2.4 文獻探討

在這一小節，我們針對所收集到的文獻做一分析，將其分為兩個觀點來討論，分別是：(1) 討論細胞的流量負載以及 (2) 動態改變細胞大小以達到能源的節省。

討論細胞的流量負載

我們所收集到的文獻，其主要的精神皆為在離峰時刻，系統的流量負載沒這麼繁重，可以將部分的基地台給關閉，以達到節能的目的。其中，有幾篇文獻討論了細胞內流量負載的變化 (Traffic Profile)：文獻 [9] 在時間上考慮了流量的變化，以梯形對稱的模型及實際量測得到的結果，討論不同形式的切換模式 (Switch-Off Scheme)，何者能節省的能量較多，然後這邊所使用的實際流量變化，是以有線網路的資料去類似的，與蜂巢式網路的結果仍有些差異。文獻 [17] 則在空間上討論流量的不同，考慮流量的變化非均勻分布在一個區域，可能有些地帶人口較密集，資料量要求較多，有些地帶則相反，所以作者以兩種對稱的模型，中心點為尖峰處，流量往外遞減，去討論適合的細胞半徑以符合要求不同的兩個區域。而在文獻 [18] 中，則同樣以時間的角度觀察流量的變化，進一步隨機設置基地台，假設使用者都位於基地台附近，討論切換基地台所能節省的能量消耗；且分析結果得知流量負載與基地台密度的大小，為討論節省能量多寡之關鍵。同樣地，文獻 [6] 也在時間上討論服務流量的變化，並以實際的基地台分佈圖為藍本觀察在離峰時段，細胞半徑與節省能量的關係，並提出不同營運商間若能合作使用相同基地台資源的話，更能達到綠色通訊的效果。

動態改變細胞大小以達到能源的節省

在上面的四篇文獻中，文獻 [17] 與 [6] 主要是根據流量負載之模型，討論不同細胞半徑所能達到的節能效果；而文獻 [9] 和 [18] 則更進一步分析在哪個時間點將基地台做模式切換更符合能量使用效率，不過得到的結果會根據不同的流量模型而不同。因此，

部分文獻提出了動態切換的想法，更能因應不同的情況，皆達到能源的節省。例如在文獻 [19]、[20] 及 [21] 中，作者們設計了中央控管 (Centralized) 與分散管理 (Distributed) 兩種演算法，動態地讓部分基地台在離峰時刻進入休眠模式，達到節能目的，最後也提到由於演算法與使用者流量的變化有密切關係，因此未來研究的方向包括流量負載的準確預測。而在文獻 [10] 與 [22] 裡，則藉由基地台間分享負載及涵蓋範圍的資訊，設計中央控管及兩兩一對的分散管理之演算法，讓細胞自我重新調整，達到能源的節省；同樣作者未來的研究目標為加入不同時間點，流量負載的變化，並考慮演算法實際在無線通訊環境下，像是路徑損耗與相鄰細胞干擾等對效能的影響。以上五篇文獻最後都說明集中管理的演算法能有較好的節能效益，但其代價為系統的負荷 (Overhead) 及複雜度會上升。

總結

綜合以上觀察以及前面章節的討論，我們想要探討的是：考慮使用者情形，細胞半徑該如何決定，以利於在佈建上具有最大的效益。因此，我們勢必需要討論細胞內流量的變化。於是參考上面文獻討論的方法，並考慮更真實的使用狀況，我們加入文獻 [4] 及 [5] 作為參考：這兩篇文獻提及流量負載的模擬方法，並有例子可供討論，在下一章我們會更詳細地介紹。而在考慮動態改變細胞的大小，以讓部分基地台進入休眠狀態，由於文獻中並沒有討論到一開始細胞半徑該如何決定，我們研究的成果也能對此做一建議，且根據討論所得到的結果，我們亦提出一系統負荷及複雜度不高，但仍能達到節能效果的運作方式。

第 3 章 系統模型

這一章節主要介紹我們所使用的系統模型。先從系統架構說明；接著，描述我們在無線傳播環境 (Radio Environments) 中所考量的因子；最後，指出在討論細胞大小時，我們用來衡量效能表現的指標。

3.1 系統架構

我們討論的情境是在 19 個細胞相鄰的架構下，討論中間細胞內使用者接受服務的情形。並且，根據 [23] 所建議的模擬參數，基地台採用方向性天線，將細胞分為三個扇區 (Sectors)，如圖 3.1 所示。

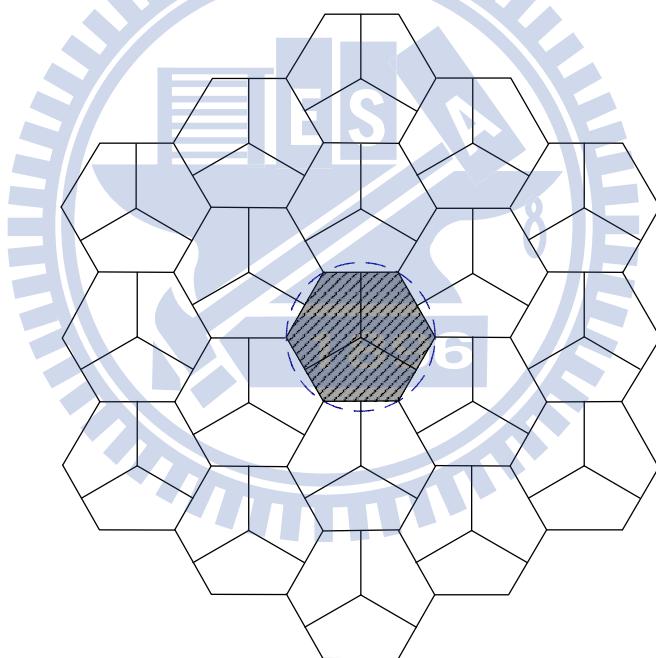


圖 3.1: 系統架構圖

方向性天線的好處在於能讓信號集中在某個角度範圍發射，使得信號強度更強，並且降低細胞內各扇區彼此間的干擾，進而讓頻譜可以重複使用，增加細胞容量。此外，我們也假設基地台使用多用戶多輸入多輸出的技術 (MU-MIMO, Multi-User MIMO)，這在設計下一代通訊系統時被廣泛討論。文獻 [13] 中有提及，在規劃 4G 系統時，基地台與行動端點被期望能使用自適應性天線 (Adaptive Antennas) 以及智慧型天線 (Smart Antennas)。這樣的系統可以自動地對應其信號環境而改變輻射模式，大幅地增加系統的表現 (如：容量增加)。多用戶多輸入多輸出的技術即在這樣的訴求下產生，其好處在

於基地台利用多根天線來傳送信號，可以將信號更集中傳送至接收端，一來信號強度增加，二來對其他使用者的干擾降低；並且，只要接收端彼此相距稍遠，還可以利用傳送集中的特性，分別將信號打向不同方位的使用者，讓這些使用者，可以同時使用相同的頻段，提高系統的傳輸容量。例如，若基地台具有兩根傳輸天線，則可以讓扇區內兩個在地理位置上有差距的使用者，同時使用相同頻段。而在之後的討論，我們則假設基地台一定能找到相對應的使用者實現多用戶多輸入多輸出的技術。

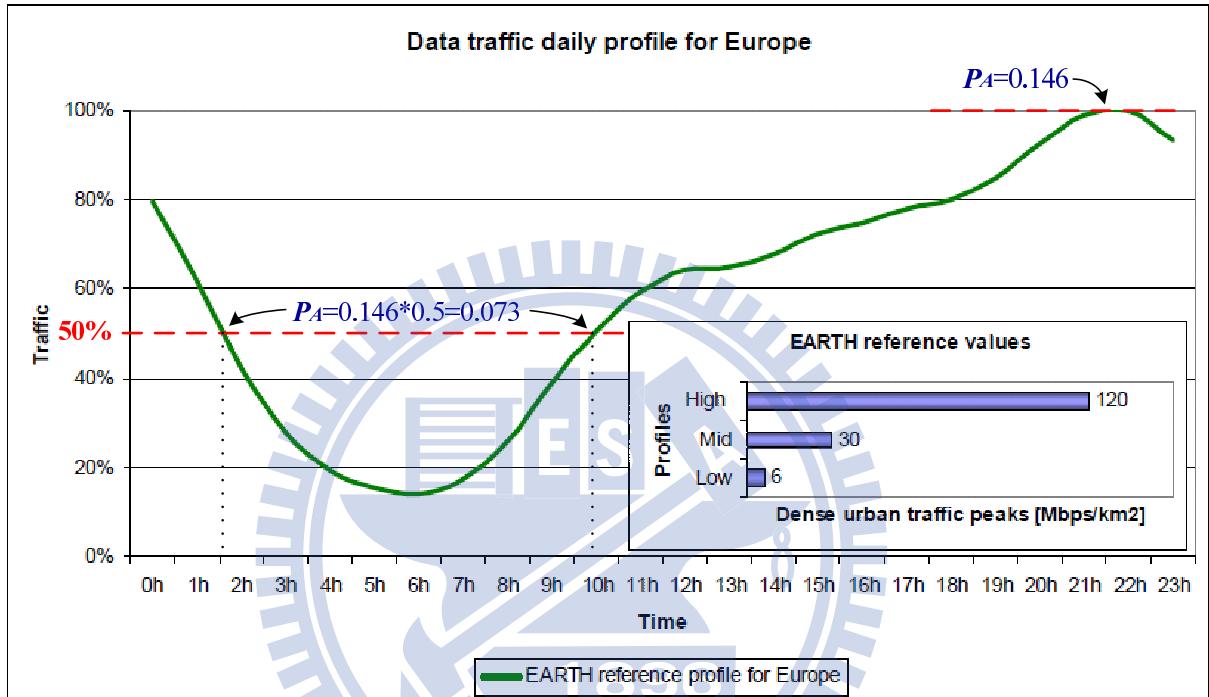


圖 3.2: 以每日流量負載圖估計不同時刻之 P_A 值

而我們也對細胞內使用者的使用情形做一討論。這邊主要想討論的是隨著細胞涵蓋範圍的不同，細胞內有效使用者人數的變化。我們參考文獻 [4]，定義了參數 P_A ：使用者存取網路的機率。由前面的討論我們知道，隨著不同時刻，細胞的流量負載也會跟著不同，而在 [4] 中發現，一天中不同時刻之有效使用者數的變化，能用流量負載的變動情形去類比；並且在尖峰時刻約有 10~30% 的用戶會存取網路。因此，以在文獻中討論尖峰時刻用戶存取網路的機率為例，其決定的方法為：假定 10% 的歐洲人口註冊了寬頻服務，而在尖峰時刻有效之使用者數為所有用戶的 20%，則可以推得使用者存取網路的機率為 $0.1 \times 0.2 = 0.02$ 。而考慮台灣使用者的情形，由 [24] 我們得知，台灣開通 3G 數據服務之用戶約佔總人口數的 73%，參考文獻相同方法，我們設定於尖峰時刻，使用者存取網路的機率為 $P_A = 0.73 \times 0.2 = 0.146$ ，則一地區的人口數乘上 P_A 值後，即為尖峰時刻需要服務的使用者數。

決定尖峰時刻使用者的存取機率後，我們接著估計不同時間點的 P_A 值：同樣參考文獻 [4] 中歐洲地區每日的流量負載圖 (圖 3.2)，利用流量變化趨勢去推估使用者存取網路之機率值。舉例來說，我們已經知道在尖峰時刻 (約 21h 至 22h 間) 的 P_A 值，則在流量負載為 50% 的時間點 (約於 1h 至 2h 間以及 10h)，其 P_A 值可以預期為 $0.146 \times 0.5 = 0.073$ ，如圖 3.2 中所示。而表 3.1 列出我們預期在不同時間點的 P_A 值，由於是參考 EARTH 計畫所使用的資料，為歐洲地區的流量負載變化圖去估計的，表現上與台灣使用者的使用情形仍有差異，但趨勢應為相同，待日後有資料指出台灣每日的流量變化圖，我們便可以套用相同方式，推估在各時間點使用者存取網路的機率，以計算有效使用者人數。

表 3.1: 不同時刻之 P_A 值

Time	0h	1h	2h	3h	4h	5h
P_A	0.1168	0.0934	0.0613	0.0423	0.0277	0.0234
Time	6h	7h	8h	9h	10h	11h
P_A	0.0204	0.0248	0.0394	0.0584	0.073	0.0861
Time	12h	13h	14h	15h	16h	17h
P_A	0.0934	0.0949	0.1007	0.1051	0.1095	0.1139
Time	18h	19h	20h	21h	22h	23h
P_A	0.1183	0.1241	0.1372	0.1431	0.146	0.1387

3.2 無線傳播環境

為了方便探討，本篇論文所討論的無線傳播環境，先只考慮天線方向圖 (Antenna Pattern) 以及路徑耗損模型 (Path Loss Model)。根據文獻 [23] 的定義，每一扇區的水平天線方向圖如 (3.1) 所示：

$$A_H(\varphi) = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}} \right)^2, A_m \right], \text{ in dB} \quad (3.1)$$

其中 A_m 為最大衰減值 (25dB)， φ_{3dB} 的定義為增益相對峰值降低了 3dB 的角度，於細胞劃分為三個扇區的基地台天線模組，其值通常為 70° ，而 φ 則為信號方向與天線所夾的角度，範圍為 $0 \sim \pm 180^\circ$ 。圖 3.3 即為在不同方位的天線增益圖。在之後的討論，我

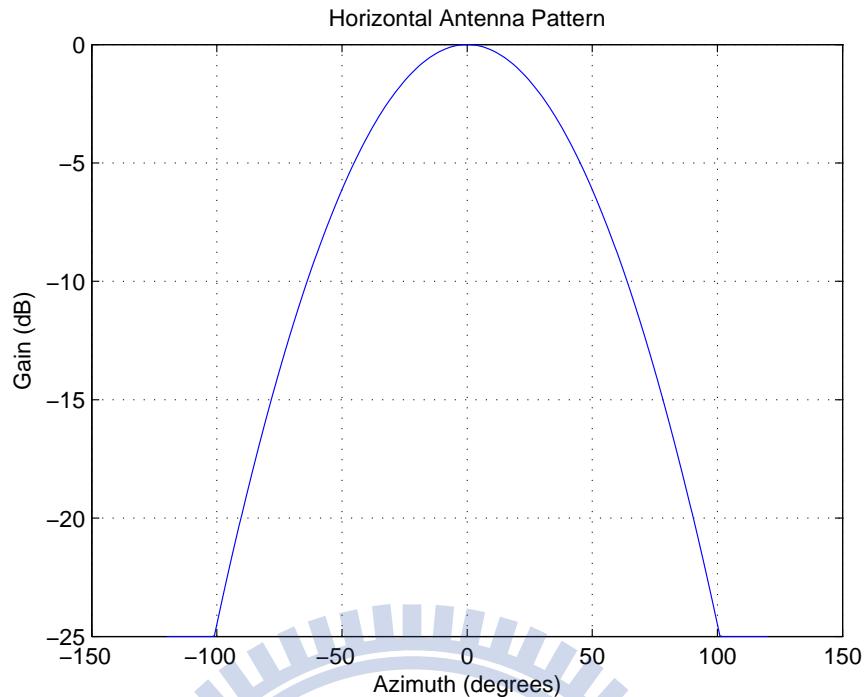


圖 3.3: 不同方位之天線增益圖

們用等效的天線增益值來表示，如下所示：

$$G_{AP}(\varphi) = 10^{(A_H(\varphi)/10)} \quad (3.2)$$

而路徑損耗的產生則是因為信號在空間中傳遞會隨距離遠近而衰退，在文獻中定義為：

$$L(d) = 128.1 + 37.6 \log_{10} \left(\frac{d}{1000} \right), \text{ in dB} \quad (3.3)$$

其中 d 為接收端與基地台的距離遠近，單位為公尺。同樣地，我們使用等效的增益值來表示，其數學式如 (3.4)：

$$G_{PL}(d) = 1/10^{(L(d)/10)} \quad (3.4)$$

因此，在接收端接受到的信號強度，即為傳送端天線送出的功率，乘上數學式 (3.2) 與 (3.4) 所計算的值。

3.3 性能衡量指標

這一小節我們說明在之後的討論，衡量不同細胞大小之效能表現所使用的兩個條件。在第二章的時候，我們已經知道細胞佈建規劃需要針對服務量以及涵蓋範圍做分析，因此，主要的衡量指標即為這兩個條件。我們參考文獻 [5] 中討論的方法，定義了涵蓋範圍條件 (Coverage Condition)，以及容量大小條件 (Capacity Condition)，茲說明如下：

涵蓋範圍的限制條件

在文獻 [4] 中先行定義了細胞在尖峰時刻，三種不同程度的流量負載，分別是高、中以及低流量負載，其內容如下：

- **高流量負載：** 在密集的都市區域，依據每月使用約 68GB 的電信用戶來換算，每平方公里細胞要能提供 120 Mbps 的容量大小 ($120\text{Mbps}/\text{km}^2$)。這樣的容量大小可以在尖峰時刻提供有效使用者，同時使用高解析度電視 (HDTV) 的服務。
- **中流量負載：** 在密集的都市區域，依據每月使用約 17GB 的電信用戶來換算，每平方公里細胞要能提供 30 Mbps 的容量大小 ($30\text{Mbps}/\text{km}^2$)。這樣的容量大小可以在尖峰時刻提供有效使用者，同時使用標準解析度電視 (SDTV) 的服務。
- **低流量負載：** 在密集的都市區域，依據每月使用約 3GB 的電信用戶來換算，每平方公里細胞要能提供 6 Mbps 的容量大小 ($6\text{Mbps}/\text{km}^2$)。

而這裡所謂密集的都市區域 (Dense Urban Areas)，定義為平均每平方公里有 3000 個居民。由於細胞的流量負載會與細胞所涵蓋範圍內人口密度有關，因此，文獻也定義了不同區域的人口密度：

- 都市地區 (Urban Areas) 為平均每平方公里有 1000 個居民。
- 近郊地區 (Suburban Areas) 為平均每平方公里有 500 個居民。
- 鄉村地區 (Rural Areas) 為平均每平方公里有 100 個居民。

並且列出相對應不同程度的流量負載量，如表 3.2 所示 [4]：

表 3.2: 尖峰時刻不同地區之細胞流量負載 (單位: Mbps/km²)

不同地區	高流量負載	中流量負載	低流量負載
都市地區	40	10	2
近郊地區	20	5	1
鄉村地區	4	1	0.2

而涵蓋範圍的條件限制定義為：細胞內接收到的信號強度為最差的 10% 區域 (10% worst areas)，其最小可獲得的位元速率 (Bit Rate) 需要大於某一個設定值 [5]。此限制條件的目的是為了保證能滿足使用者的服務品質，所以，會隨著使用者使用的情形而有不同的條件值。例如，在文獻 [5] 中所使用的值即為考慮在都市地區 (Urban Area) 中，高流量負載下，細胞設計須達到的限制值，其值為 2 Mbps。這邊計算的方法是：已知在都市地區，高流量負載下每平方公里細胞要能提供 40 Mbps 的容量大小，而文獻中採用的使用者存取網路之機率值為 2%，乘上一般都市地區的人口密度，可以知道在尖峰時刻會有 20 個使用者存取網路。若所有有效使用者同時存取，則每人至少須獲得的傳輸速率為 $40/20 = 2$ Mbps。因此，依據不同區域的人口密度，我們可以依照相同方法計算應設定的條件值。

容量大小的限制條件

容量大小的限制條件定義為：每平方公里系統最少提供的服務流量，有最小值的要求 [5]。換句話說，我們可以視其為一細胞的細胞容量除上它的涵蓋範圍，需大於某一條件值。而這邊條件設定的方式，是以使用者至少須獲得的傳輸速率，乘上有效使用者的人數。同樣地，可以發現，此一條件會與服務地區的人口密度及使用者存取網路的機率有關，這在之後的討論，會有更詳細的說明。

上面所介紹的兩個限制條件，即為之後在設計細胞半徑時，需要檢驗是否滿足的衡量指標。在第五章的時候，會以數學式來討論這兩個條件。

第 4 章 問題規劃與擬定

在這一章節中，我們利用一些假設，先行做簡單的觀察；並結合第二章文獻探討所做的整理，擬定我們欲討論的問題。

4.1 簡單假設下的觀察

在第二章時，我們預期使用者的使用情形會影響細胞半徑的決定，我們在這一小節說明之。我們考慮在細胞邊界上使用者的情形，並為單一細胞的環境。之所以先行考慮細胞邊界，原因在於欲討論最糟的情況下，效能表現為何。根據 Shannon 容量理論，細胞邊界上之使用者可得到的容量總和為

$$C_{cell_edge} = \sum_{i=1}^K w_i \log_2 \left(1 + \frac{P_i/r_i^\alpha}{N_0 w_i} \right) \quad (4.1)$$

其中， K 為在細胞邊界的使用者人數， w_i 為第 i 個使用者分配到的頻寬大小， P_i 為基地台對第 i 個使用者所傳送的功率， r_i (單位：公尺) 則為第 i 個使用者到基地台的距離；並且為了討論的方便，我們使用與基地台距離之四次方成反比的路徑損耗模型 $\propto 1/r_i^\alpha$ ($\alpha = 4$)。

這邊再做個假設：假設基地台只服務在細胞最外圍之圓上的使用者 (即 $r_i = r$)。因此，考慮有效的使用者人數 (EU, Effective Users)，利用在第三章所訂立的參數： P_A ，我們可以得到在最外圍的圓周上，於尖峰時刻需要服務的使用者人數如下列數學式所示：

$$EU = 2\pi r \cdot D \cdot P_A \quad (4.2)$$

其中， r 為細胞的半徑大小， $2\pi r$ 為圓周長。在這式子中，我們可以將二維的人口密度 ($D_{two_dim}, 1/m^2$)，直接代入一維 ($D_{one_dim}, 1/m$) 的情況使用。可以簡單證明之：若使用一圈一圈的方式來看細胞內人口數之情況，只要 (1) 所等分的圓圈個數與細胞半徑大小相等，且 (2) $D_{one_dim} = D_{two_dim}$ 時，則計算下來的數目也會與原本計算方式接近相等。證明數學式如下 (此處假設 R 為細胞半徑，單位為公尺)：

以一圈一圈的方式來看細胞內涵蓋人數：

$$\begin{aligned}
 & \sum_{r_i} 2\pi r_i \cdot D_{one_dim} , \text{ 其中 } r_i = \{1, \dots, R\}, \text{ 等分 } n \text{ 圈} \\
 & = 2\pi D_{one_dim} \sum_{r_i} r_i \\
 & = 2\pi D_{one_dim} \cdot \frac{1+R}{2} \cdot n \\
 & = \pi R^2 D_{one_dim} + \pi R D_{one_dim} , \text{ if } n = R \text{ 使用條件 (1)} \tag{4.3}
 \end{aligned}$$

而原本二維的計算的方式：

$$\pi R^2 \cdot D_{two_dim} \tag{4.4}$$

若我們令 (4.3) 與 (4.4) 兩式相等，則當 $D_{one_dim} = D_{two_dim}$ ，兩式相差 $\pi R D_{two_dim}$ 的差距。由於我們所討論的 R 值，其範圍不大，例如，當 $R = 300m$ 、 $D_{two_dim} = 4000 \text{ } 1/km^2 = 0.004 \text{ } 1/m^2$ 時， $\pi R D_{two_dim} \doteq 3.77$ ，與 $\pi R^2 D_{two_dim} \doteq 1131$ 相比，可以忽略不計。因此，我們將二維的人口密度直接代入我們的方式去計算，所得結果仍屬合理範圍內。

因為基地台使用方向性天線，並採用多用戶多輸入多輸出技術，則在細胞每一扇區 (Sector) 內，相同的頻段可以根據天線數同時分配給相同數量的使用者使用，而不會彼此干擾。因此，我們假設基地台的天線數永遠比有效使用者人數多一，換句話說，即滿足所有使用者皆能同時存取網路。則在有效使用者人數為 EU 個時，每一根天線的傳輸功率為

$$P_i = \frac{P}{EU} = \frac{P}{2\pi r D P_A} \tag{4.5}$$

而每一扇區內，細胞邊界上之使用者可分配到的頻寬為

$$w_i = W \tag{4.6}$$

其中 P 為基地台總共的傳輸功率， W 為細胞可使用的頻寬大小。由以上的假設，我們

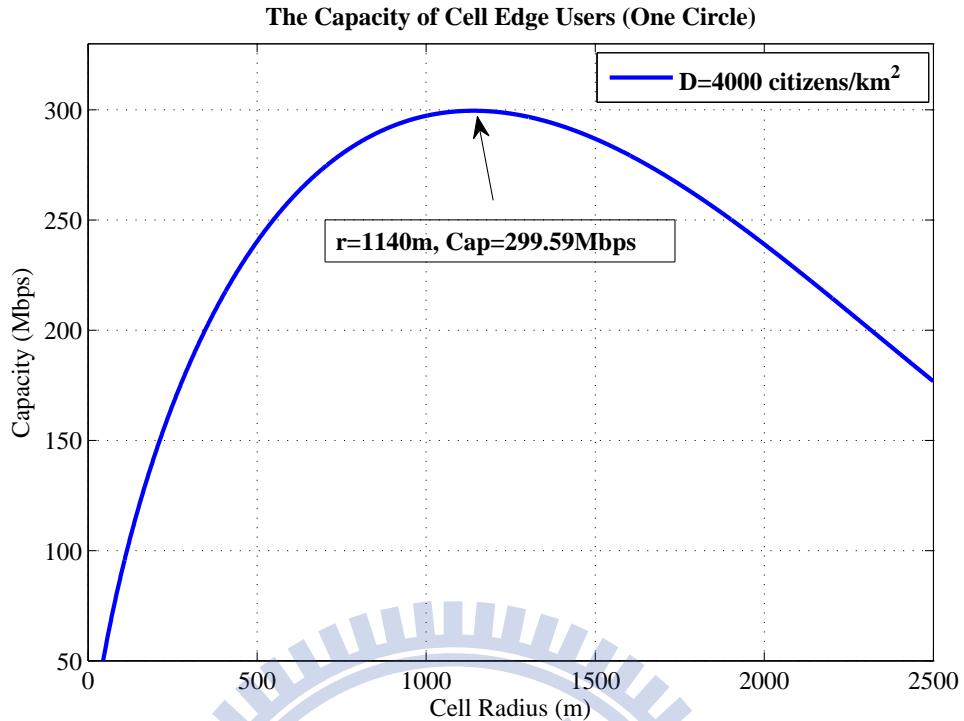


圖 4.1: 細胞邊界上使用者可得容量之總和

可以得到在細胞邊界上之使用者可以得到的容量總和為

$$\begin{aligned}
 C_{cell_edge} &= \sum_{i=1}^K w_i \log_2 \left(1 + \frac{P_i/r_i^\alpha}{N_0 w_i} \right) \\
 &= 2\pi r D P_A \cdot W \log_2 \left(1 + \frac{P/2\pi r D P_A}{r^4} \cdot \frac{1}{N_0 W} \right) . \quad (4.7)
 \end{aligned}$$

4.1.1 最大值的最小細胞容量

針對上面所得到的數學式 C_{cell_edge} ，我們代入一些參數去看不同的 r 值，會有怎樣的結果。設定參數 $D = 4000 \text{ citizens/km}^2$ ，約等於新竹市的人口密度；在尖峰時刻使用者存取機率 $P_A = 0.146$ ；基地台傳輸總功率 $P = 46\text{dBm}$ ，細胞頻寬大小 $W = 10\text{MHz}$ ，雜訊功率頻譜密度 $N_0 = -174\text{dBm/Hz}$ ，得到結果如圖 4.1。可以觀察到，在 $r = 1140\text{m}$ 時，會有最大值。

我們從數學式發現 C_{cell_edge} 與 D 、 P_A 的乘積會有關係，並知道此數學式為一凹函數 (Concave Function)，在某一點具有最大值，於是，我們試著想解出這一點。我們對 C_{cell_edge} 做 r 的偏微，並令其值為零，得到下面結果：

$$\begin{aligned}
 & \frac{dC_{cell_edge}}{dr} \\
 &= 2\pi r DP_A \cdot W \log_2 \left(1 + \frac{P/2\pi r DP_A}{r^4} \cdot \frac{1}{N_0 W} \right) \\
 &= 2\pi DP_A W \left[\log_2 \left(1 + \frac{P}{2\pi DP_A N_0 W} \cdot \frac{1}{r^5} \right) + r \cdot \frac{1}{1 + \frac{P}{2\pi DP_A N_0 W} \cdot \frac{1}{r^5}} \cdot \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{d}{dr} \left(1 + \frac{P}{2\pi DP_A N_0 W} \cdot \frac{1}{r^5} \right) \right] \\
 &= 2\pi DP_A W \left[\log_2 \left(1 + \frac{P}{2\pi DP_A N_0 W} \cdot \frac{1}{r^5} \right) + r \cdot \frac{2\pi DP_A N_0 W \cdot r^5}{2\pi DP_A N_0 W \cdot r^5 + P} \cdot \frac{1}{\ln 2} \cdot \frac{P}{2\pi DP_A N_0 W} \cdot \frac{-5}{r^6} \right] \\
 &= 2\pi DP_A W \left[\log_2 \left(1 + \frac{P}{2\pi r DP_A N_0 W} \cdot \frac{1}{r^5} \right) + \frac{-5P}{\ln 2} \frac{1}{2\pi DP_A N_0 W \cdot r^5 + P} \right] \stackrel{let}{=} 0
 \end{aligned}$$

左右移項，可得

$$\begin{aligned}
 \log_2 \left(1 + \frac{P}{2\pi DP_A N_0 W} \cdot \frac{1}{r^5} \right) &= \frac{5P}{\ln 2} \frac{1}{2\pi DP_A N_0 W \cdot r^5 + P} \\
 \Rightarrow \ln \left(1 + \frac{P}{2\pi DP_A N_0 W} \cdot \frac{1}{r^5} \right) &= \frac{5P}{2\pi DP_A N_0 W \cdot r^5 + P}
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

令 $u = \frac{2\pi DP_A N_0 W r^5}{P}$ ，則式 (4.8) 可以化簡為

$$\ln \left(1 + \frac{1}{u} \right) = \frac{5}{1+u} \tag{4.9}$$

再解式 (4.9)，得到

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{2\pi DP_A N_0 W r^5}{P} \cong 0.007 \\
 \Rightarrow r &= \left(\frac{0.007P}{2\pi DP_A N_0 W} \right)^{1/5}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

得到的結果，我們觀察到細胞半徑大小會與人口密度 (D) 及使用者存取機率 (P_A) 呈反比關係，並且若給定這兩個值，藉由式 (4.10) 我們可以得到一細胞半徑，其在細胞邊界上的使用者具有最大的容量總和。

然而這邊只是針對在細胞最外圍之圓上的使用者做討論，若考慮整個細胞的容量 (即細胞內圈也出現使用者時)，情況會變為如何？因為假設基地台具有滿足使用者總人

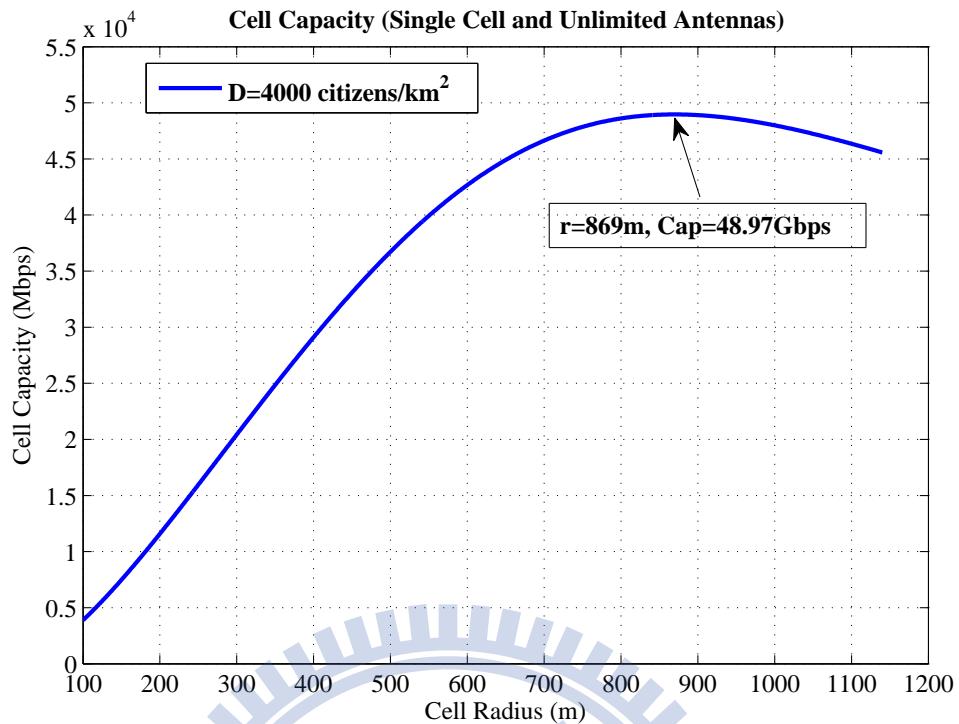


圖 4.2: 細胞容量 (假設單一細胞且無窮多根天線)

數的天線數目，所以使用者可以同時被服務，並且推測當細胞內部也出現使用者時，由於所在位置與邊界上的使用者相比，離基地台更加接近，接收到的信號強度較佳，可得到的容量也相對較大，對整體細胞容量的貢獻是增加的。因此，我們也可以這樣說，式 (4.10) 所得到的細胞半徑，是使細胞具有最大的最小容量 (這邊最小容量指的是：細胞邊界上使用者所得到的值) 之細胞半徑值 (Max-Min Capacity)。這樣的意思是指，我們選取細胞至少能提供的容量中 (對細胞邊界上的使用者而言)，具有最大值的 r 來當作細胞半徑。若細胞半徑大於式 (4.10) 所得到的值，由於細胞最外圍之使用者的容量開始降低，儘管細胞內的使用者對細胞容量貢獻增加，但整體而言不會有最大的細胞容量總和；反之，當細胞涵蓋範圍小於式 (4.10) 所得到的值時，因為使用者距離基地台更接近，可以預期某一細胞半徑會得到最大的細胞容量。於是，我們接著考慮整個細胞的容量來驗證上面的推測。利用與上面相同的方法，一圈一圈討論細胞內的使用者數，假設使用者均勻分布在細胞內，則整體細胞容量可以寫成下列式子：

$$C = \sum_{r_i=0}^r 2\pi r_i D P_A \cdot W \cdot \log_2 \left(1 + \frac{P/EU}{r_i^4} \cdot \frac{1}{N_0 W} \right) \quad (4.11)$$

其中， r 為所選擇的細胞半徑大小， EU 為有效使用者數，其值為

$$EU = \sum_{r_i=0}^r 2\pi r_i D \cdot P_A \cong \pi r^2 D P_A \quad (4.12)$$

同樣，我們使用與之前相同的參數設定討論不同細胞半徑所對應的結果，不過我們所選擇 r 之上限為式 (4.10) 所解出的值，得到結果如圖 4.2。可以發現式 (4.11) 同樣為一凹函數，並在 $r = 869\text{m}$ 時，會有最大的細胞容量，驗證之前所做的推論：若選擇的細胞半徑大於式 (4.10) 所得之值，其細胞容量會越趨越小，不會有最大值出現；而在半徑小於式 (4.10) 解得之值，細胞具有最大容量。

4.2 問題的擬定

由以上的觀察，我們可以推知，隨著細胞涵蓋範圍的增加，信號強度逐漸衰減，細胞邊界上單一使用者能得到的容量雖然會遞減，但因為細胞可以服務的使用者數變多，整體細胞容量隨著細胞半徑擴大仍有增加的趨勢，直到涵蓋範圍到某一程度，需要服務的使用者太多，每根天線的傳輸功率開始不足，細胞容量才開始減少。也進一步發現，隨著區域人口密度 (D) 以及使用者存取網路機率 (P_A) 的不同，會影響我們決定細胞半徑的大小，所以在不同的使用情況下應有不一樣的細胞佈建規劃，以達到最佳頻譜使用效率及能源有效利用。

由於前面的討論假設基地台永遠比使用者人數多一根天線，這樣的假設在實際情況下無法達成。實際上基地台的天線數會有限制，不論是在技術上或是法令上，天線個數都無法無止盡增加，因此在無線通訊中會使用多工存取 (Multiple Access) 的技術，例如 WiMAX 或 LTE 在第四代行動通訊系統所使用的正交多頻分工存取技術 (OFDMA)，即為了滿足更多使用者的使用需求，所採用之方法。

另外，雖然隨著細胞涵蓋範圍的增加，可以服務的使用者數增多，但並不是基地台都能滿足所有使用者的服務需求。因此，我們也必須對細胞內使用者的服務品質加以討論，讓細胞大小之設計更具實際效益。

我們想要探討的問題是：考慮使用者的分布情況及使用情形，細胞大小應如何設計，以期能滿足使用者服務品質，並在細胞佈建規劃上，具有最大的效益，達到頻譜與能源有效之利用。

第 5 章 性能表現分析

上一章節所討論的例子，是假設基地台永遠具有比服務人數多一根天線。然而，在實際情況下，此假設是無法實現的。因此，下面我們針對真實的環境，討論細胞大小應如何設計，以利在細胞佈建規劃上，能有最大的效益。

5.1 考慮實際情況下系統環境的假設

延續前一章節的討論，我們不只考慮在細胞邊界上使用者可得之容量，更好奇整個細胞可以提供的容量多寡。我們先討論不同細胞涵蓋範圍，使用者平均可以得到的容量大小；接著，再討論平均的細胞容量。

5.1.1 將扇區 (Sectors) 分割成不同地帶 (Zones)

在實際情況下，基地台的天線個數是有限的。根據第三章的討論，我們假設使用了 120 度的方向性天線，細胞即被劃分為三個扇區 (Sectors)，如圖 5.1 所示。同時，我們也假設基地台使用多用戶多輸入多輸出之技術，讓多個使用者能同時間使用相同的頻段。

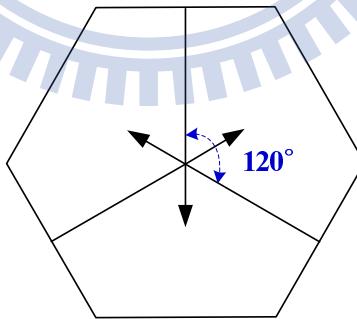


圖 5.1: 120 度方向性天線將細胞分為三個區域 (Sectors)

我們假設每一扇區使用 k 根天線，則一細胞內總共會有 $K = 3k$ 根天線。若基地台總傳輸功率為 P ，則平均每一根天線可以分配到的傳輸功率為

$$P_t = \frac{P}{K} \quad (5.1)$$

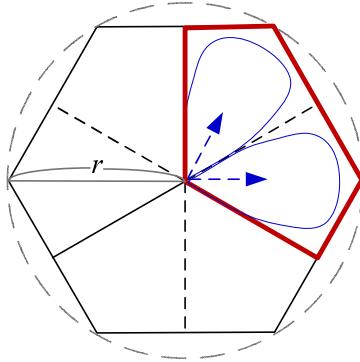


圖 5.2: k (此例 $k = 2$) 根天線將一區域分為 $K = 3k$ 個地帶 (Zones)

再者，由於每一扇區有 k 根天線，可以同時服務 k 個使用者，可以看作是這 k 根天線將一扇區劃分為 k 個地帶 (Zones)，而每一根天線負責服務一個地帶。如此一來，每一細胞內會有 $K = 3k$ 個地帶，如圖 5.2。因此，根據第三章的討論，假設使用者均勻分布在細胞內，我們可以換算在每一地帶需要服務的有效使用者人數為

$$EU_{zone} = \frac{\pi r^2 D \cdot P_A}{K} \quad (5.2)$$

其中， r 為細胞半徑。而為了之後討論方便，我們以圓形面積 (πr^2) 來計算細胞的涵蓋範圍。

5.1.2 扇區間分不同頻段使用與否

這邊我們討論一細胞內，不同扇區間使用同一頻段與不同頻段在效能表現上的差異。之所以會有這樣的考量，原因在於前面所設定的系統環境下，細胞邊界上的使用者，若離提供服務的基地台與相鄰基地台間的距離差不多相等時，有機會接收到的干擾信號強度與需要之信號強度相差無幾，使得使用者的 SINR 降低，得到的傳輸容量也就沒那麼高，因此，我們想看在不同的設定下，對於細胞涵蓋範圍之決定是否有影響。

假設一細胞內各個扇區間都使用相同的頻段，由於多用戶多輸入多輸出之技術，我們可以看成扇區間的每一地帶，都能使用同一頻段；反之，若扇區間分不同頻段使用，則每一地帶可使用的頻段僅所處扇區分配到之頻段。如下面數學式所示：

$$W_{zone} = \begin{cases} W, & \text{if using the same spectrum} \\ \frac{W}{3}, & \text{if using different spectrum} \end{cases} \quad (5.3)$$

其中 W 為細胞可用的頻寬大小，而式中分母為 3 是因為使用了 120 度方向性天線，將細胞分成 3 個扇區。

5.2 使用者平均可得容量與平均細胞容量

考慮上一節的假設，我們接著討論細胞內使用者平均可得的容量，先求得使用者的 SINR，再利用 Shannon 容量定理計算使用者能獲得之容量大小。首先，針對使用者可接收到的信號強度進行探討：接收到的信號強度與使用者距離基地台之遠近及天線間的夾角有關。我們利用上一章討論的方法，將一細胞從最外圈，向內分成一圈一圈來看，如此一來，使用者 U_i 與基地台距離 (d_{S,U_i} ，S 表示提供使用者服務的細胞) 為 r_i (單位：公尺) 的機率密度函數為

$$f(r_i) = \frac{2r_i}{r^2}, r_i = 0 \sim r \quad (5.4)$$

這邊 r 為細胞的半徑。同時，也假設使用者隨機出現在這一圓上，機率密度函數為

$$g(\theta_i) = \frac{1}{2\pi}, \theta_i = 0 \sim 2\pi \quad (5.5)$$

於是，我們可以利用 r_i 與 θ_i 來代表使用者 ($U_i = (r_i, \theta_i)$)，並推得使用者的座標位置：假設細胞 S 的基地台位於原點，使用者的座標即為

$$(x_i, y_i) = (r_i \cos \theta_i, r_i \sin \theta_i) \quad (5.6)$$

其機率密度函數為 $f(r_i) \cdot g(\theta_i)$ 。利用餘弦定理，我們便可求得與天線間的夾角大小，舉例來說，如圖 5.3 所示，使用者與天線間的夾角即為

$$\phi_{S,U_i} = \cos^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{SZ_{S,1}} \cdot \overrightarrow{SU_i}}{\|\overrightarrow{SZ_{S,1}}\| \|\overrightarrow{SU_i}\|} \right) \quad (5.7)$$

，其中 $\overrightarrow{SZ_{S,1}}$ 為 S 細胞第一個地帶，天線增益為 0dB 的向量表示法。

因此，由第三章討論，我們可以得到使用者位於距離基地台為 r_i 、角度為 θ_i ，其接

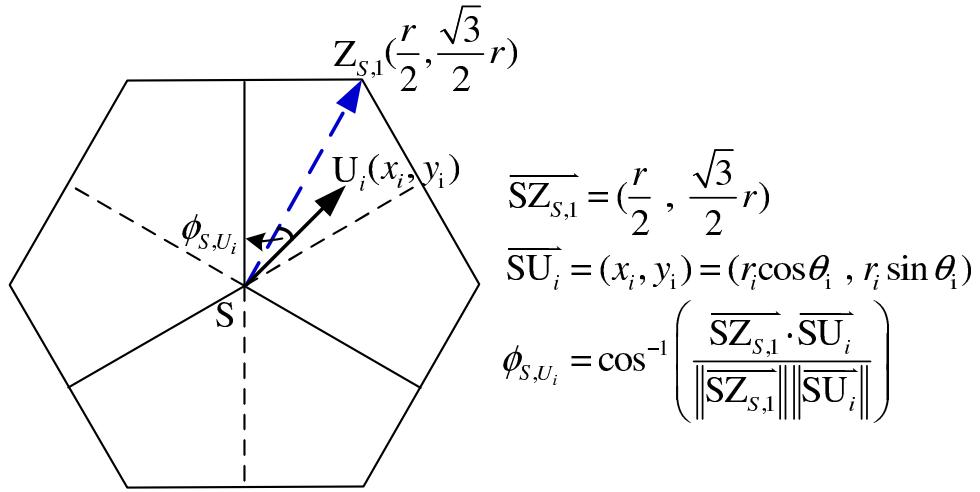


圖 5.3: 使用者與天線間的夾角

收到的信號強度為

$$P_{t,S} \cdot G_{AP}(\phi_{S,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{S,U_i}) \quad (5.8)$$

其中， $P_{t,S}$ 為服務基地台對使用者傳輸的功率大小，其值為天線的傳輸功率除上每一地帶的有效使用者人數，數學式為 P_t/EU_{zone} ，而 $G_{AP}(\varphi)$ 為第三章所提到的等效天線增益， $G_{PL}(d)$ 則為等效的路徑損耗之增益。

接著，討論使用者所受到的干擾。隨著涵蓋範圍的不同，細胞半徑的大小會影響來自其他細胞之干擾；再者，扇區間分不同頻段使用與否也會影響接收到的干擾量。例如，考慮 19 個細胞之架構，會有兩階層的干擾 (2-tier Interference)，假若細胞內扇區間使用相同頻段，則圖 5.4 中間細胞的第一地帶使用者會受到來自第一階層 (細胞 A 至細胞 F) 及第二階層 (細胞 G 至細胞 R) 之干擾。這邊我們只考慮主要影響的地帶，其餘地帶雖仍會影響，但由於使用者與產生干擾地帶的天線夾角過大，天線增益小，影響可忽略不計。然而，若區域間分不同的頻段使用，則在中間細胞內的使用者，會受到來自第一階層 (細胞 B 至細胞 D) 及第二階層 (細胞 I 至細胞 M) 的干擾，如圖 5.5 所示。

所以，我們計算來自其他細胞的干擾量：如圖 5.6 所示說明，依照前面相同的方法，當使用者座標位置為 $(x_i, y_i) = (r_i \cos \theta_i, r_i \sin \theta_i)$ ，則與細胞 A 基地台的距離為

$$\begin{aligned} d_{A,U_i} &= \sqrt{(x_i - 0)^2 + (y_i - \sqrt{3}r)^2} \\ &= \sqrt{(r_i \cos \theta_i - 0)^2 + (r_i \sin \theta_i - \sqrt{3}r)^2} \end{aligned} \quad (5.9)$$

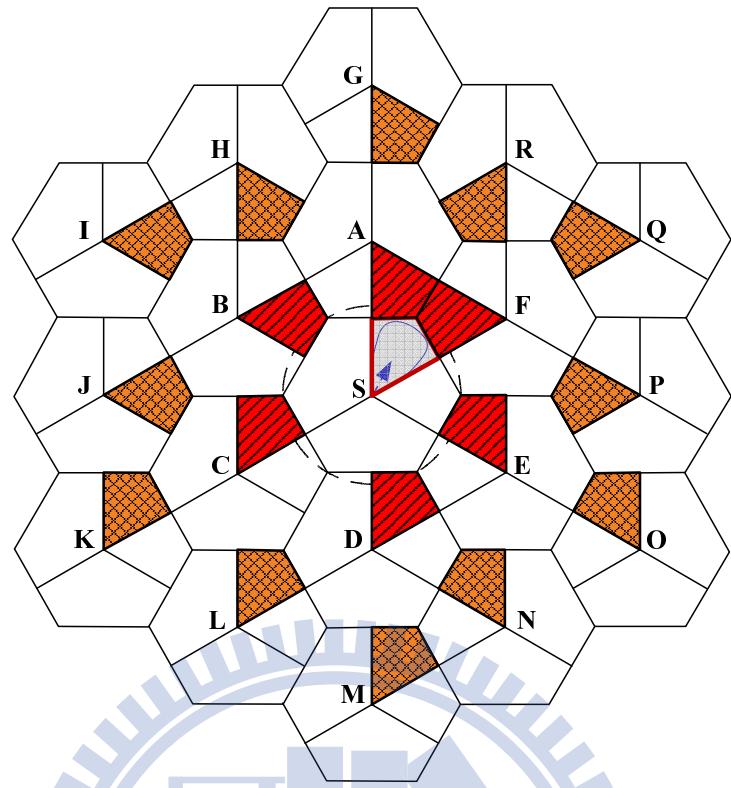


圖 5.4: 扇區間使用相同的頻段下使用者所受之干擾 (此例 $k = 2$)

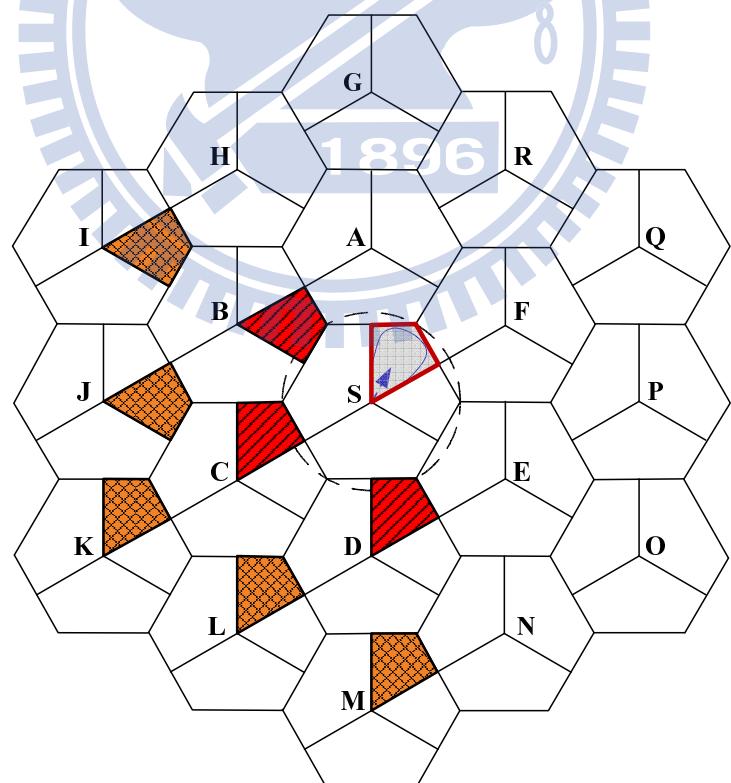


圖 5.5: 扇區間使用不同的頻段下使用者所受之干擾 (此例 $k = 2$)

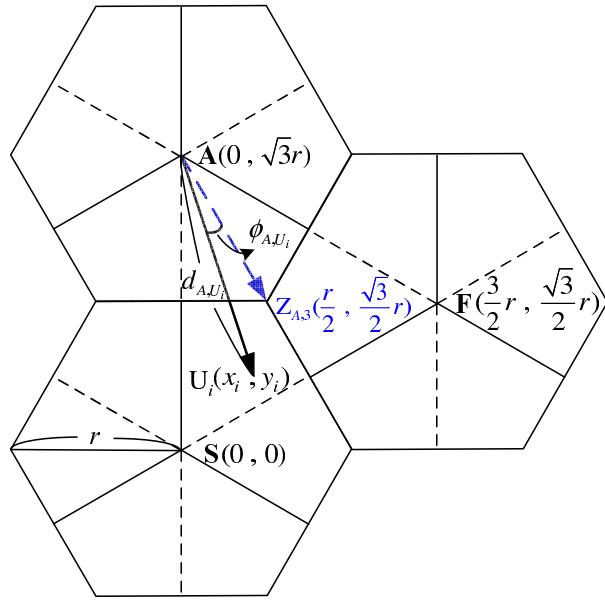


圖 5.6: 使用者與相鄰細胞基地台之距離及天線間的夾角

與天線的夾角則為

$$\phi_{A,U_i} = \cos^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{AZ_{A,3}} \cdot \overrightarrow{AU_i}}{\|\overrightarrow{AZ_{A,3}}\| \|\overrightarrow{AU_i}\|} \right) \quad (5.10)$$

於是，使用者 U_i 受到來自細胞 A 的干擾可以用下列數學式表示：

$$P_{t,A} \cdot G_{AP}(\phi_{A,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{A,U_i}) \quad (5.11)$$

其中， $P_{t,A}$ 為細胞 A 的基地台服務其細胞內使用者所傳輸的功率大小。因此，我們可以計算使用者 $U_i = (r_i, \theta_i)$ ，其所受到細胞間的干擾為

$$I(U_i) = \begin{cases} \sum_{b=A}^F P_{t,b} \cdot G_{AP}(\phi_{b,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{b,U_i}) + \sum_{b=G}^R P_{t,b} \cdot G_{AP}(\phi_{b,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{b,U_i}) \\ \quad \text{, if using the same spectrum} \\ \sum_{b=B}^D P_{t,b} \cdot G_{AP}(\phi_{b,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{b,U_i}) + \sum_{b=I}^M P_{t,b} \cdot G_{AP}(\phi_{b,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{b,U_i}) \\ \quad \text{, if using different spectrum} \end{cases} \quad (5.12)$$

綜合以上的討論，我們現在可推知使用者 U_i 的 SINR 的值為

$$SINR(U_i) = \frac{P_{t,S} \cdot G_{AP}(\phi_{b,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{S,U_i})}{N_0 w_{U_i} + I(U_i)} \quad (5.13)$$

其中， U_i 可視為 r_i 及 θ_i 的函數， N_0 為雜訊功率頻譜密度， w_{U_i} 為使用者分配到的頻寬大小：根據式 (5.3)，我們知道在不同設定下每個地帶可使用的頻寬大小，也由式 (5.2)，得到在尖峰時刻，每一地帶平均會出現的有效使用者個數，假設我們平均分配頻寬，則在系統負載最重的情況下，每位使用者能分配到的頻寬為

$$w_{U_i} = \frac{W_{zone}}{EU_{zone}} = \frac{K \cdot W_{zone}}{\pi r^2 DPA} \quad (5.14)$$

利用 Shannon 容量定理，我們得到在細胞半徑為 r 時，使用者平均可得的容量為

$$C_{avg_per_user}(r) = \int_0^r \int_0^{2\pi} f(r_i) \cdot g(\theta_i) \cdot w_{U_i} \log_2 [1 + SINR(U_i)] d\theta_i dr_i \quad (5.15)$$

其中， r 為細胞半徑。舉例來說，若我們假設扇區間使用相同頻段，則式 (5.15) 變為

$$C_{avg_per_user}(r) = \int_0^r \int_0^{2\pi} \frac{2r_i}{r^2} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{K \cdot W}{\pi r^2 DPA} \cdot \log_2 \left[1 + \frac{\frac{P_t}{EU_{zone}} \cdot G_{AP}(\phi_{S,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{S,U_i})}{\frac{K \cdot N_0 W}{\pi r^2 DPA} + \sum_{b=A}^R P_{t,b} \cdot G_{AP}(\phi_{b,U_i}) \cdot G_{PL}(d_{b,U_i})} \right] d\theta_i dr_i \quad (5.16)$$

式中的 ϕ_{b,U_i} 與 d_{b,U_i} 如前面所述，為 r_i 與 θ_i 的函數。而觀察上面數學式可以發現，人口密度的不同或使用者存取網路的機率改變，都會影響使用者平均可得的容量大小，符合前面我們所做的假設：細胞內使用者的分布情況及使用情形，皆會影響細胞半徑的決策。

在得到不同細胞半徑下，使用者平均可得的容量之後，我們也可以簡單推知細胞的平均容量：為細胞涵蓋範圍內有效的使用者數目 ($EU_{cell} = \pi r^2 DPA$) 乘上使用者平均可得之容量。如下式所示：

$$\begin{aligned} C_{avg}(r) &= C_{avg_per_user}(r) \cdot EU_{cell} \\ &= C_{avg_per_user}(r) \cdot \pi r^2 DPA \end{aligned} \quad (5.17)$$

5.3 涵蓋範圍與容量大小之限制條件的驗證

由前面的討論，可以知道在不同細胞涵蓋範圍下，使用者平均可得之容量 ($C_{avg_per_user}$) 和細胞平均容量 (C_{avg})，若我們有了這兩個數值，該如何決定最佳的細胞半徑，以具有最佳的佈建效益？為達到此目標，我們結合第三章所討論的細胞大小之條件限制：(1) 在細胞邊界最小可達到的位元速率，以及 (2) 每平方公里可提供的服務流量。

在細胞邊界最小可達到的位元速率

根據在第三章所定義的，此條件為細胞內接收到的信號強度最差的 10% 區域，其最小可獲得的位元速率需大於某一個設定值。因此，我們先討論如何定義所謂「最差的 10% 區域」。

正常情況而言，在不使用其他技術下，距離基地台越遠的使用者，能得到的容量越小；而由式 (5.4)、(5.5)，我們知道使用者與基地台間距離遠近之結合機率密度函數。因此，若我們可以推出從細胞最外圍 ($r_i = r$) 往內，使用者坐落之機率累計為百分之十的區域，由於使用者有 10% 的機率若在此區域，且得到的容量也較非位於這些區域的使用者為低，所以我們可以說這區域即為「最差的 10% 區域」。數學式表示如下：

$$\Pr(r_i \in r_{10\%-worst_areas}) = \int_{r_{cell_edge}}^r \int_0^{2\pi} f(r_i) \cdot g(\theta_i) d\theta_i dr_i \cong 0.1 \quad (5.18)$$

其中 r 為細胞半徑， r_{cell_edge} 表示位於細胞邊界範圍內與基地台的最小距離。換言之，若使用者與基地台的距離為

$$r_{10\%-worst_areas} = \left\{ r_i \geq r_{cell_edge} \cong \sqrt{0.9r^2} \right\} \quad (5.19)$$

則表示此使用者位於最差的 10% 區域，即細胞邊界。再依照前面討論的方法，我們可以得到使用者位於細胞邊界的平均容量為

$$C_{10\%-worst_area}(r) = \int_{r_{cell_edge}}^r \int_0^{2\pi} \frac{2r_i}{r^2} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot w_{U_i} \log_2 [1 + SINR(U_i)] d\theta_i dr_i \quad (5.20)$$

如此一來，我們所決定的細胞半徑 (r)，必須滿足這樣的條件：

$$C_{10\%-worst_area}(r) \geq Cov_Req \quad (5.21)$$

式中的 Cov_Req ，為需要達到的最小位元速率之限制值。

每平方公里可提供的服務流量

根據第三章得知，此條件的定義為每平方公里細胞所能提供的容量大小，其值有一限制。而檢驗的方法如下：我們由前面討論推得細胞的平均容量大小，只要除上細胞的涵蓋範圍，即可檢查是否符合。數學式表示如下：

$$C_{per_area}(r) = \frac{C_{avg}(r)}{\pi(r/1000)^2} \quad (5.22)$$

其中， r 的單位為公尺。同樣地，我們決定的細胞半徑，必須滿足

$$C_{per_area}(r) \geq Cap_Req \quad (5.23)$$

式中的 Cap_Req ，為每平方公里需要達到的容量大小。

5.4 不同流量負載下決定最佳細胞大小之程序

綜合這章所討論，現在我們可以決定最佳的細胞涵蓋範圍，以利細胞佈建之規劃：我們已經知道，若考慮使用者的分布情況及使用情形，在不同的流量負載下，最佳的細胞半徑大小也會隨之不同，因此，若我們知道一區域其人口密度 (D) 及使用者存取網路之機率 (P_A) 大小，則可以根據第三章所討論的，計算出不同使用情形下，細胞涵蓋範圍與容量大小的限制條件 (Cov_Req 、 Cap_Req)；再利用式 (5.15)、(5.17) 求得細胞內使用者平均可得容量與平均細胞容量 ($C_{avg_per_user}$ 、 C_{avg})，之後由式 (5.21)、(5.23) 驗證細胞邊界最小可達到的位元速率及每平方公里可提供的服務流量是否滿足，我們即可決定最佳的細胞半徑大小。圖 5.7為簡單的流程示意圖。

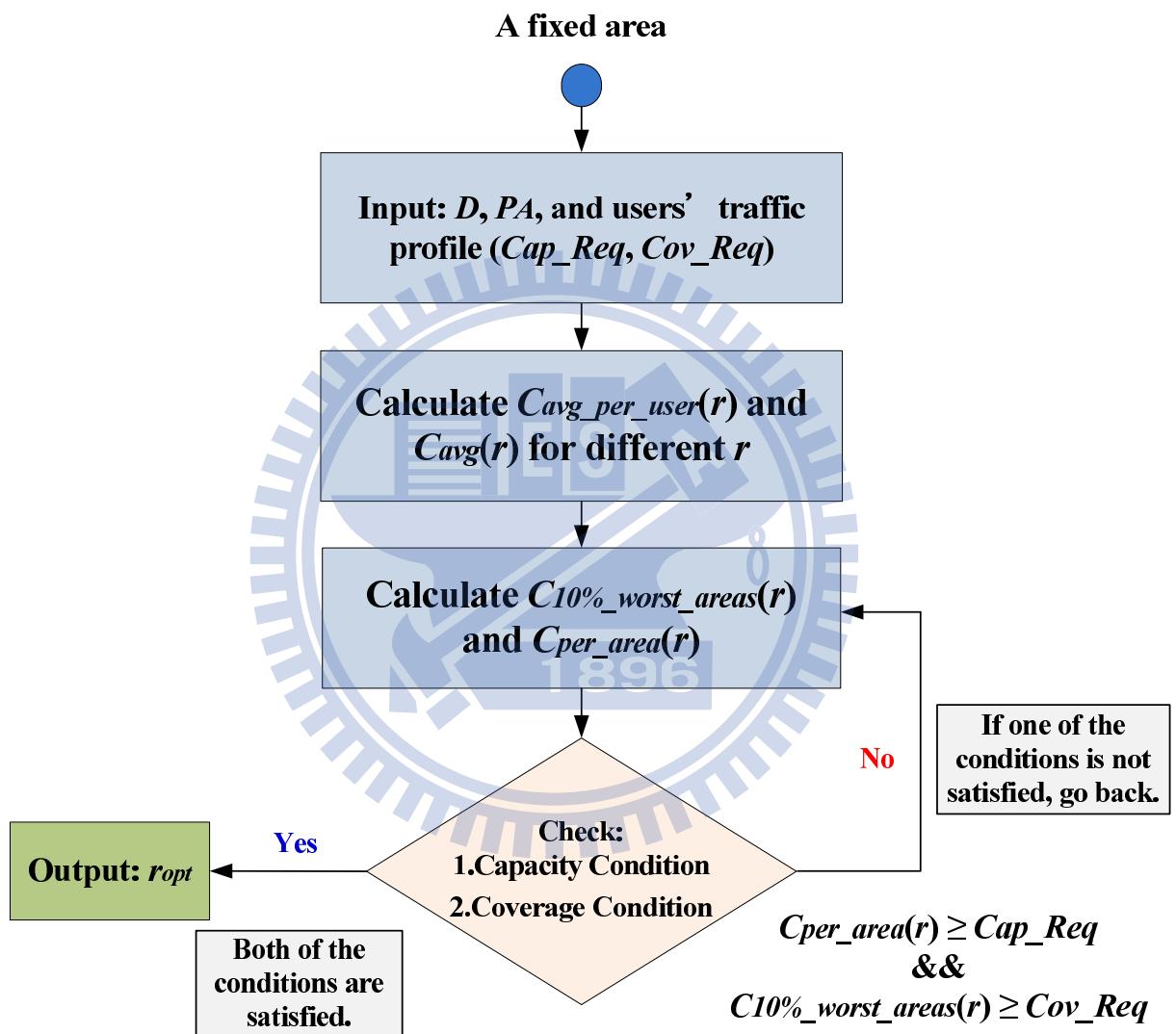


圖 5.7: 決定最佳細胞半徑大小的流程示意圖

第 6 章 結果與討論

以下，我們根據前一章討論的結果，對於在不同流量負載下，決定最佳細胞半徑的程序做數值上的分析。實際代入一些系統參數，觀察並探討所得到的結果。首先，下表是我們所使用的一些參數設定：

表 6.1: 主要的模擬參數

Parameters	Values
Number of Cells	19
Deployment	Hexagonal Layout with 3 Sectors per Cell
System Bandwidth	10 MHz
BS Transmit Power	46 dBm
Noise Power Density	-174 dBm/Hz
Antennas per Sector	2
Antenna height at the BS	32m
Antenna height at the UE	1.5m
Minimum Distance between UE and BS	35m
Antenna Pattern	$A_H(\phi) = -\min \left[12 \left(\frac{\phi}{\phi_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$ $A_m = 25dB, \phi_{3dB} = 70^\circ$
Path Loss Model	$L(d) = 128.1 + 37.6 \log_{10} \left(\frac{d}{1000} \right), d \text{ in m}$
Area Type	Outdoors
User Distribution	Random with Uniform Probability
Population Density (D)	4000, 3000, 2000, 1000 citizens/km ²
Probability of Active (P_A)	0.146 (Peak Hours)

其中，之後探討的情況，主要是以人口密度每平方公里具有 4000 個人口為代表。這樣的密度大小，約等同於新竹市的人口密度。

根據之前的討論，在決定最佳細胞半徑前，我們需要先知道「涵蓋範圍」以及「容量大小」兩個限制條件的資料。而這兩個限制條件也會依據使用者的使用情況而不同。因此，接下來說明在我們模擬的環境下，條件限制值是如何決定的。由第三章，我們已

經推得在不同時刻，使用者存取網路的機率 (表 3.1)，因此，以人口密度 $D=4000$ 人/ km^2 為例，我們可以計算得到：尖峰時刻，每平方公里會有 $584 (1^2 \times 4000 \times 0.146 = 584)$ 個使用者同時存取網路。而我們以中流量負載之情況來模擬使用者的使用情形，即每位使用者所要求的最低位元速率為 0.5 Mbps (參照第三章說明)。於是，我們得到在這樣的使用情形下，細胞大小需要達到的限制條件為：

1. Cov_Reg ：在細胞邊界最小需達到的位元速率，其值為 0.5 Mbps；
2. Cap_Reg ：每平方公里可提供的服務流量，其值為 $0.5 \times 584 = 292 \text{ Mbps}/\text{km}^2$ 。

表 6.2 所列即以人口密度 4000 人/ km^2 、 $P_A = 0.146$ 為例，在不同程度的流量負載下，所需要的條件限制值。注意的是，在不同的 P_A 值或人口密度下，表中的數值也會有所差異。在確定參數的設立後，下面即為針對不同的數值結果進行討論。

表 6.2: 尖峰時刻不同流量負載之條件限制值 (以 $D=4000$ 人/ km^2 為例)

Traffic Profile	Cov_Reg	Cap_Reg
High Traffic Profile	2 Mbps	1.168 Gbps/ km^2
Medium Traffic Profile	0.5 Mbps	292 Mbps/ km^2
Low Traffic Profile	0.1 Mbps	58.4 Mbps/ km^2

不同人口密度 (D) 下使用者平均可得之容量

我們先觀察在不同的人口密度下，使用者平均可得的容量與細胞半徑之關係：由式 (5.15)，假設扇區間使用相同頻段，我們得到結果如圖 6.1 所示。

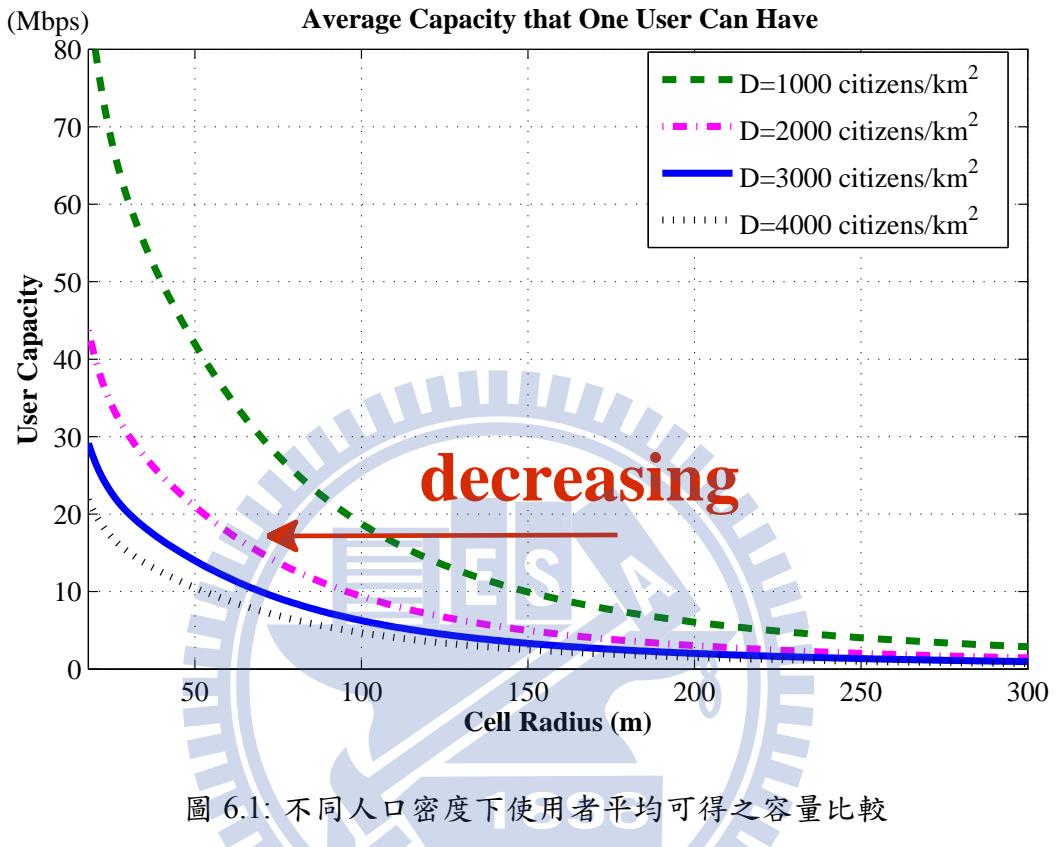


圖 6.1: 不同人口密度下使用者平均可得之容量比較

可以發現在相同的容量下，人口密度越大時，可允許的細胞半徑越小。原因在於同樣的細胞涵蓋範圍，人口密度越密集，有效的使用者數越多，平均每位使用者可分配到的頻寬減少，容量也就降低。這樣的結果符合我們之前期望的：不同區域應針對其使用者人數多寡而設計最合適的細胞半徑大小。

不同存取機率下 (P_A) 使用者平均可得之容量

我們也針對不同的存取機率，討論使用者平均可得的容量與細胞半徑的關係。同樣，假設 $D=4000$ 人/km²，並且扇區間使用相同頻段，得到結果如圖 6.2。

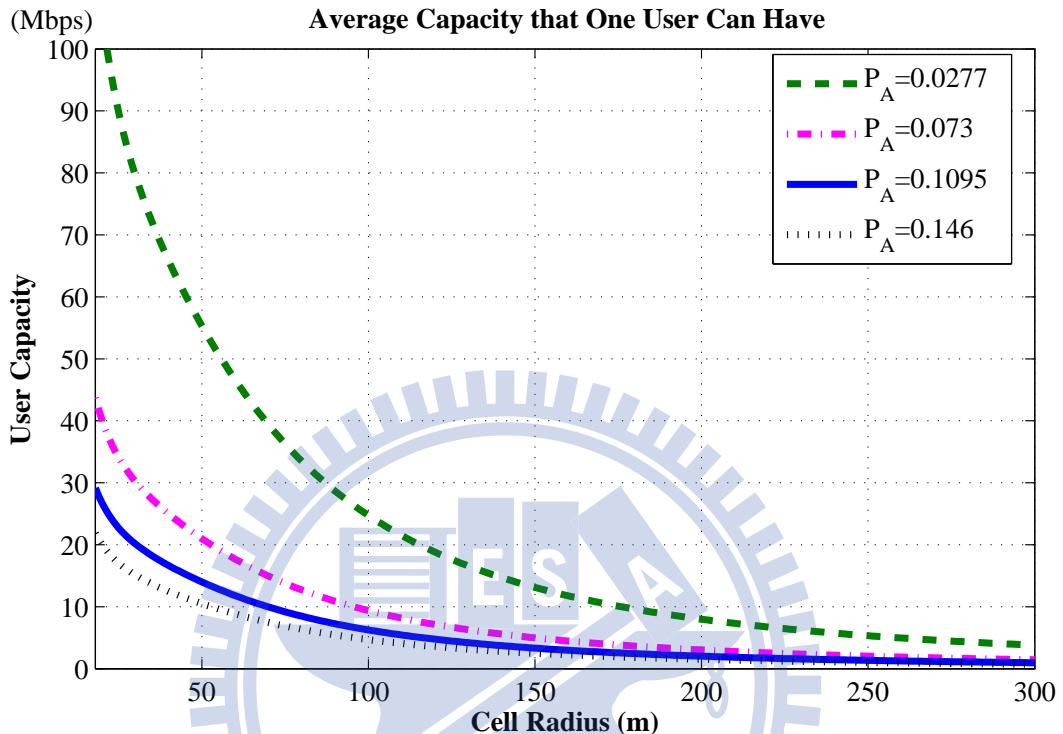


圖 6.2: 不同存取機率下使用者平均可得之容量比較

圖中所代入的機率值，分別為表 3.1 中，4h、10h、16h 及 22h 四個不同時刻的 P_A 值。觀察結果得知，使用者存取機率越大時，提供同樣的容量下，細胞能涵蓋的範圍越小。原因如下： P_A 值越大，有效的使用者數越多，則使用者可分配到的頻寬減少，需要縮小細胞半徑以滿足使用者服務品質。由此結果亦可說明，使用者的使用情形也會影響細胞半徑的決定。

扇區間分不同頻段使用與否之結果比較

討論完人口密度與存取機率對細胞半徑的影響後，我們接著討論在第五章提及的：「區域間分不同頻段使用與否」對於細胞性能表現的影響為何。如前面所述，我們固定人口密度為 $D=4000$ 人/ km^2 ，針對扇區間使用相同頻段與不同頻段下，使用者平均可得之容量結果如圖 6.3。

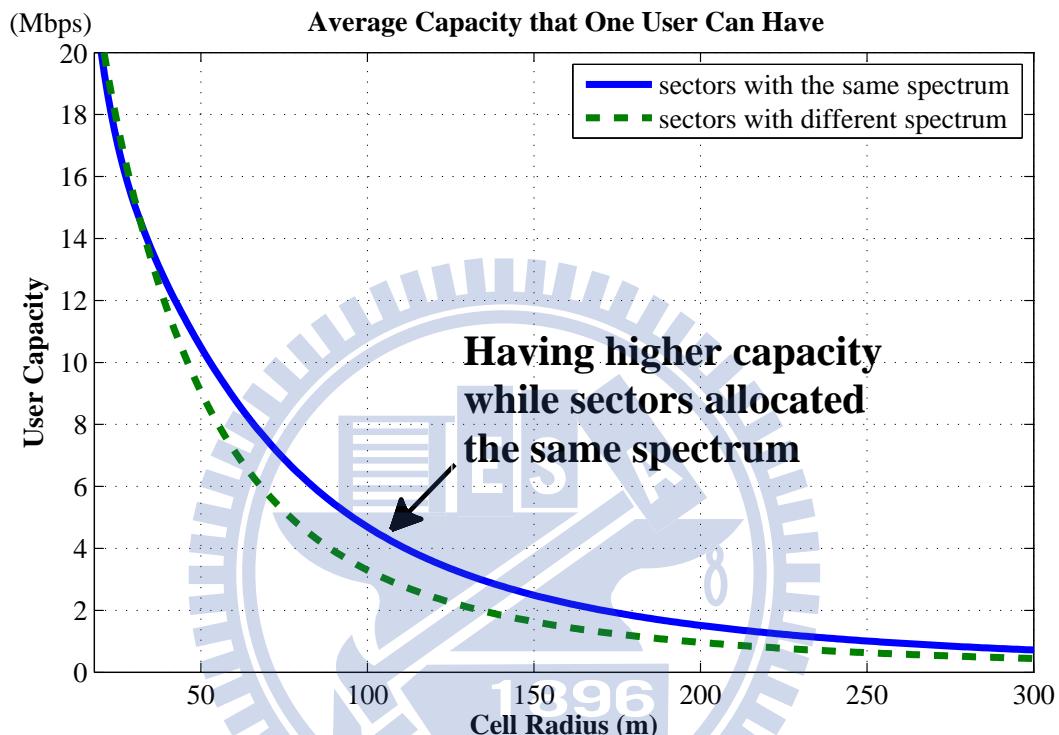


圖 6.3: 扇區間不同頻段使用方式下使用者平均可得容量之比較

發現當扇區間使用相同頻段時，使用者平均可得的容量較大。理由在於，不同扇區間若使用相同頻段，由於採用多用戶多輸入多輸出之技術，可視為每個地帶可使用較大的頻寬大小。頻寬資源多，使用者平均可得到的容量也就提升。

而觀察頻段使用方式與細胞平均容量的關係，可以得到如圖 6.4 之結果。

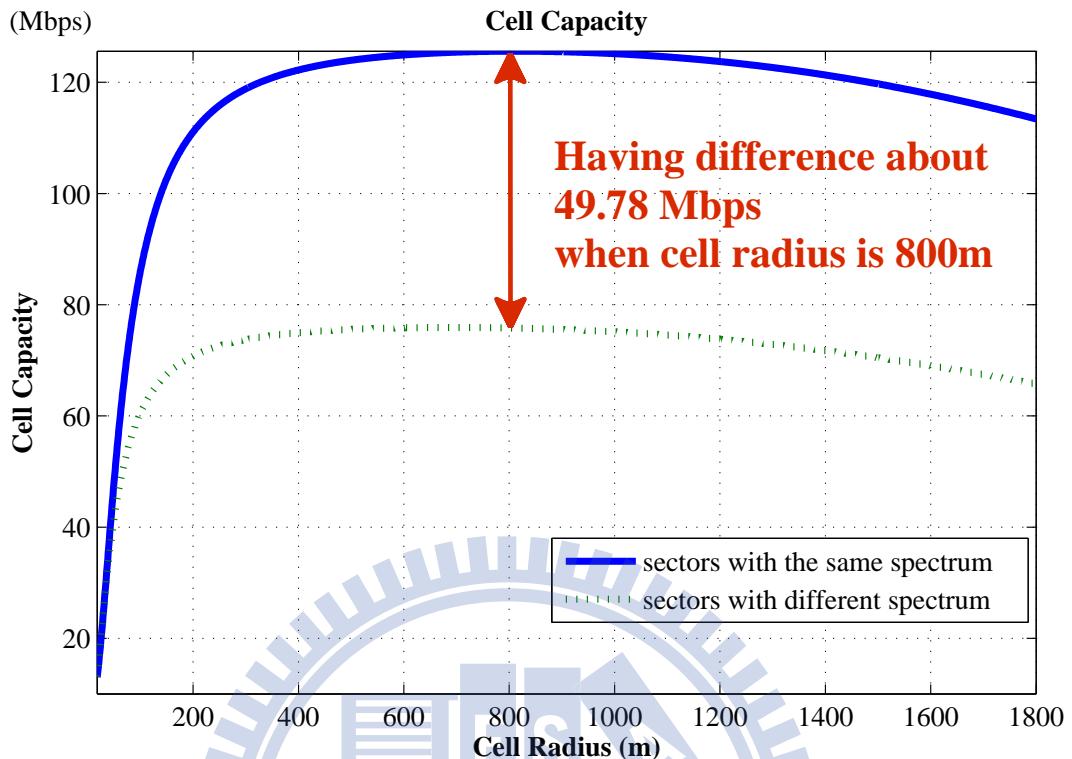


圖 6.4: 扇區間不同頻段使用方式下平均細胞容量之比較

結果說明扇區間使用相同頻段，可得到較大的平均細胞容量。由式 (5.17)，我們知道細胞平均容量的計算方式為：細胞涵蓋範圍內有效使用者人數乘上使用者平均可得之容量。因此，若使用者有較大的平均容量 (扇區間使用相同頻段)，整體細胞容量也就較大。

不過，注意的是，隨著細胞半徑的擴大，平均細胞容量的增加會趨緩，且超過一半徑大小後，細胞容量會開始下降，並不會無止盡的上升。理由在於，細胞可使用的頻寬資源有限，雖然細胞涵蓋範圍增大，可服務的人數變多，但每位使用者可分配到的頻寬相對減少，且細胞半徑越大，外圍使用者接收到的信號強度越弱，平均得到的容量逐漸減小。因此，細胞的性能表現有一限度，除非使用新的技術提高傳輸容量，或是分配更多頻寬資源、增加基地台傳輸的功率。

如此一來，扇區間使用相同頻段，對於決定最佳的細胞半徑，是否為較好的系統設定？以上討論還不足以確定。雖然細胞的平均容量越大，表示系統效能越好，但每個使用者的使用情形，是否有滿足其服務品質，也是我們需要考量的一個因素。因此，下一節中，我們便依照第五章決定最佳細胞半徑大小的程序，討論頻段使用方式對於決定細胞涵蓋範圍的影響為何。

6.1 中流量負載的使用情形下決定最佳細胞半徑

我們欲討論扇區間頻段使用方式對於決定最佳細胞半徑的影響。前面已說明決定條件限制值 (Cap_Req 、 Cov_Req) 的方法。以下，即依照決定流程，探討得到的結果：我們先利用式 (5.15)、(5.17) 求得細胞內使用者平均可得容量與平均細胞容量 ($C_{avg_per_user}$ 、 C_{avg})，再由式 (5.21)、(5.23) 驗證是否滿足條件限制值。

容量大小限制條件下之結果

依流程圖，我們得到不同的頻段使用方式，在滿足每平方公里可提供的服務流量下，最大允許的細胞半徑大小，如圖 6.5 所示。

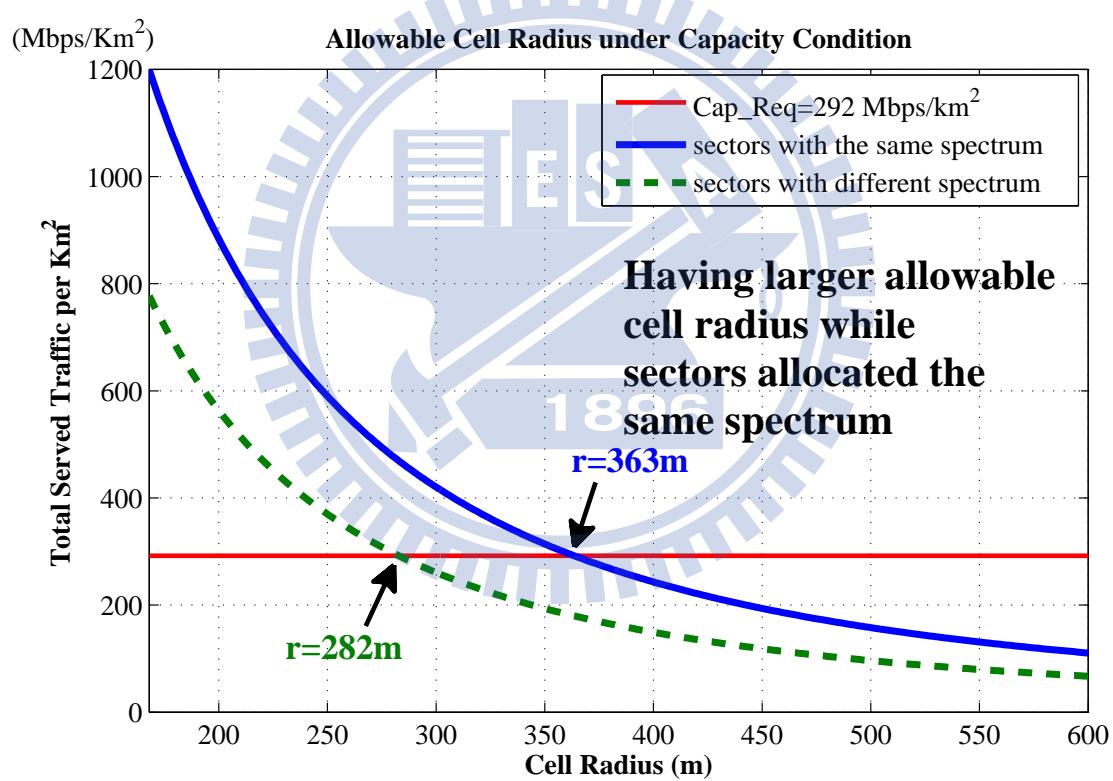


圖 6.5: 不同的頻段使用方式在滿足容量大小條件下最大可允許之細胞半徑

可以發現在滿足 Cap_Req 的限制條件下，扇區間使用相同頻段能有較大的細胞半徑。原因如前面所描述：使用相同頻段，細胞的平均容量較大，單位面積上可以提供的資料量也就較多。

涵蓋範圍限制條件下之結果

同樣討論不同的頻段使用方式，在滿足細胞邊界最小需達到的位元速率下，可允許的細胞半徑大小，如圖 6.6 之結果。

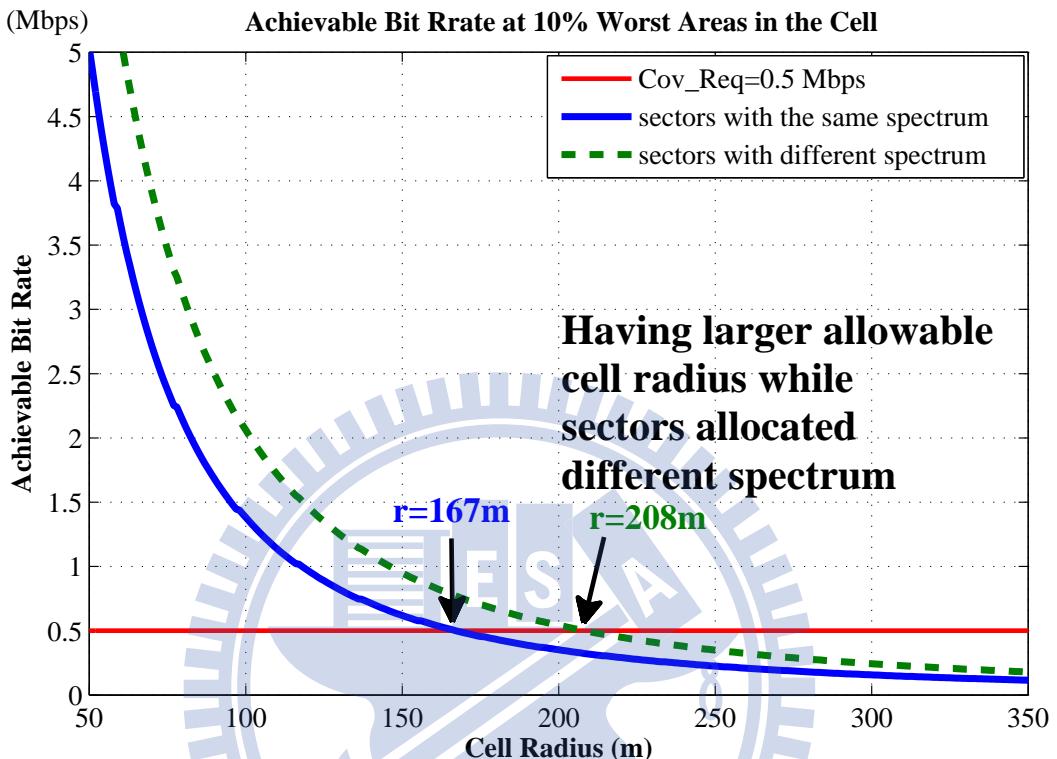


圖 6.6: 滿足涵蓋範圍條件下不同頻段使用方式最大可允許的細胞半徑

觀察可發現，在滿足 Cov_Req 的條件下，扇區間使用相同頻段能允許的最大細胞半徑反而較使用不同頻段之情形來的小。主要的理由為：若扇區間使用相同頻段，則在細胞邊界上的使用者，受到來自相鄰細胞的干擾會較大，因而需減少細胞的涵蓋範圍，增加使用者接收到的信號強度以提高 SINR 值，滿足使用者的服務要求。於是，根據討論結果，我們在不同條件下可得到的最佳細胞半徑如圖 6.7 所示。

$D=4000 \text{ citizens/km}^2$, $P_A=0.146$	Satisfied capacity condition	Satisfied coverage condition
Sectors with the same spectrum	Max allowable cell radius: 363m	Max allowable cell radius: 167m
Sectors with different spectrum	Max allowable cell radius: 282m	Max allowable cell radius: 208m

圖 6.7: 不同頻段使用方式下滿足限制條件中最大可允許之細胞半徑

為了同時滿足容量大小與涵蓋範圍兩個限制條件，我們先在每一列間找出最小值，再從這中間選擇較大的作為最佳的細胞半徑。可以發現，扇區間使用不同頻段的設定，可以允許有較大的細胞涵蓋範圍。由以上的討論我們可以觀察到，為了滿足細胞邊界上使用者的使用條件(即最小需達到的位元速率)，涵蓋範圍之限制條件似乎為決定細胞半徑的主要因素。因此，為了驗證這點，我們討論在不同的人口密度下，結果為何。我們得到如圖 6.8 所示。

$D=3000 \text{ citizens/km}^2$	Capacity condition (Average Cell Capacity)	Coverage condition (Edge User's Capacity)
Sectors with the same spectrum	422m	193m
Sectors with different spectrum	328m	241m
$D=2000 \text{ citizens/km}^2$	Capacity condition (Average Cell Capacity)	Coverage condition (Edge User's Capacity)
Sectors with the same spectrum	520m	237m
Sectors with different spectrum	404m	296m
$D=1000 \text{ citizens/km}^2$	Capacity condition (Average Cell Capacity)	Coverage condition (Edge User's Capacity)
Sectors with the same spectrum	739m	336m
Sectors with different spectrum	574m	419m

圖 6.8: 不同人口密度下最大可允許的細胞半徑 ($P_A = 0.146$)

可以發現，涵蓋範圍之限制條件確實為決定細胞半徑大小的主要因素；而且，若扇區間分配不同的頻段使用，細胞半徑能有更大的選擇。

因此，為了減省佈建的成本，我們建議系統的設定為扇區間使用不同的頻段。以下，我們整理在這樣的設定下，使用者使用的情形(即不同的細胞流量負載情況)，分別可允許的最大細胞涵蓋範圍，如表 6.3 所示。

表 6.3: 不同流量負載下最大可允許之細胞涵蓋範圍

Population	High	Medium	Low
Density	Traffic Profile	Traffic Profile	Traffic Profile
$D=4000$	101m	208m	468m
$D=3000$	118m	241m	540m
$D=2000$	146m	296m	660m
$D=1000$	208m	419m	924m

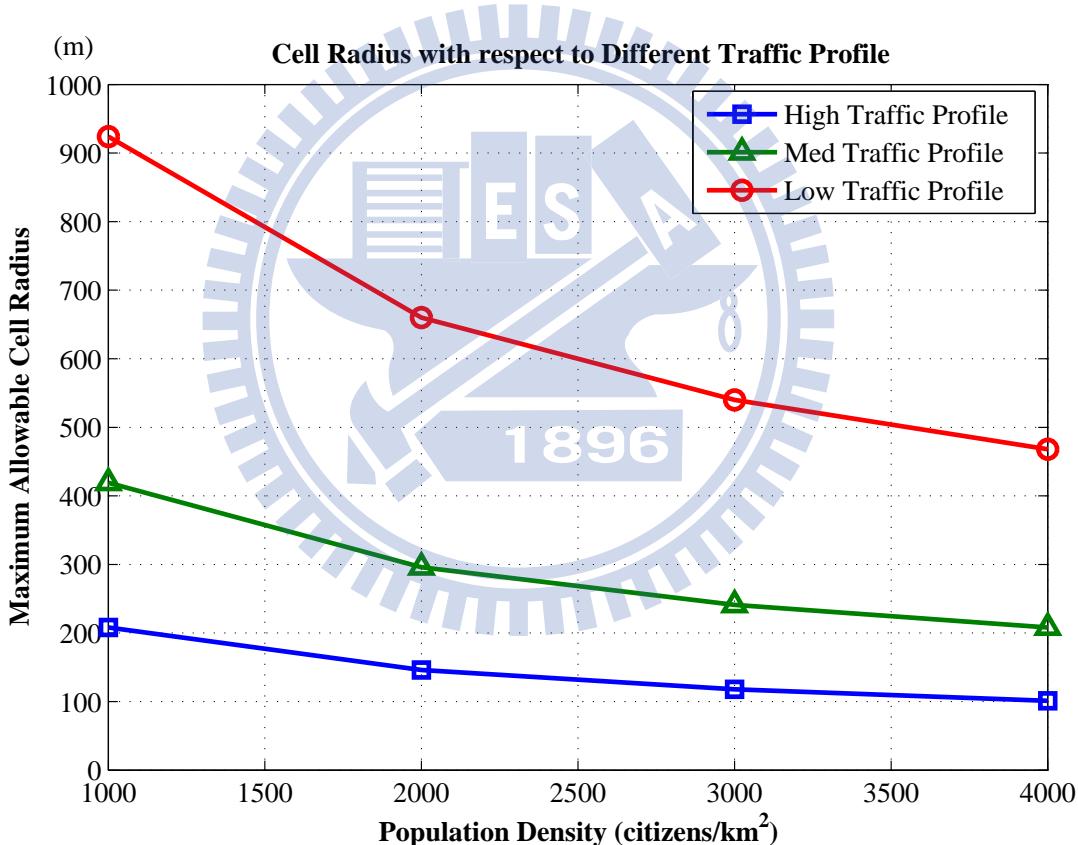


圖 6.9: 不同流量負載下最大可允許之細胞半徑

由圖 6.9 可以觀察到，若我們能依使用者的使用情形來決定細胞半徑大小，在不同的情況下，我們可以設計適當的細胞涵蓋範圍，提供足夠的頻寬資源給使用者，達到頻寬資源有效利用以及減少整體網路的能量損耗。

6.2 具節能效果的運作模式

經過上一節的討論，我們已經知道如何決定最佳的細胞半徑，以同時滿足使用者需求且降低佈建成本。然而，我們也從中發現，細胞流量負載的不同，對應的涵蓋範圍也會隨之變動，我們不禁好奇：如果能決定不同情況下最佳的細胞半徑，該怎樣設計一套運作方式，以達到節能省電、能源有效利用的目標？以下，即為探討這議題。

我們同樣還是以滿足使用者在不同時刻的服務品質為最優先條件，並以減少佈建成本為目標，所以我們先求得在尖峰時刻，細胞可允許的最大半徑。以前面討論為例，在人口密度為 $4000 \text{ 人}/\text{km}^2$ ，細胞為中流量負載下，得到的最佳結果為 208 公尺，我們把它定義為 r_{peak} ，即尖峰時刻建議採用的細胞半徑。而根據我們在第二章討論的細胞分割之概念，可以把這半徑視為細胞反覆分割，最後所產生的最小細胞半徑值。因此，若我們反推回去，已知在尖峰時刻，細胞會分割至 r_{peak} 的涵蓋範圍，則在離峰的時刻，細胞能擴大至多大呢？這邊，我們先定義一參數： $r_{off-peak}$ ，其值我們定為兩倍的 r_{peak} ，理由為若以 $r_{off-peak} = 2r_{peak}$ 為細胞涵蓋範圍，則可以重複使用最大量的基地台，不需再額外佈建，減少成本支出。於是，假設細胞在離峰時刻，半徑可以擴大至 $r_{off-peak}$ ，則我們所要決定的，即為在那個時間點，細胞使用這樣的涵蓋範圍，仍可滿足使用者的服務要求。

由表 3.1 所推估的使用者存取網路之機率大小，我們可以求得在不同時刻所對應的最佳細胞半徑值，如圖 6.10 中的曲線。我們也在圖中標示 $r_{off-peak}$ 的值。可以發現約莫在 3h 至 8h 的時段，若細胞的涵蓋範圍為 $r_{off-peak}$ ，其仍可滿足使用者的服務品質。於是，我們在 3h 至 8h 的時候，將細胞半徑擴大至兩倍，便可將部分的基地台切換至休眠模式或是關閉，原本服務的地區由仍持續運作的細胞負責即可。如此一來，根據第二章所討論的（如圖 2.3 所示），在這段期間，我們便能達到降低能量消耗之目的，減少 75% 的功率消耗；而以維持一天基地台運作所需消耗之能量觀點來看，其可達到的效率如式 (6.1) 所計算：

$$\frac{24 \cdot P_{total_BSs} - (19 \cdot P_{total_BSs} + 5 \cdot \frac{P_{total_BSs}}{4})}{24 \cdot P_{total_BSs}} \cong 15.6\% \quad (6.1)$$

其中， P_{total_BSs} 為尖峰時刻，維持整個網路基地台運作所需消耗之能量。而在 3h 至 8h 整個網路所消耗的能量僅為尖峰時刻的四分之一。

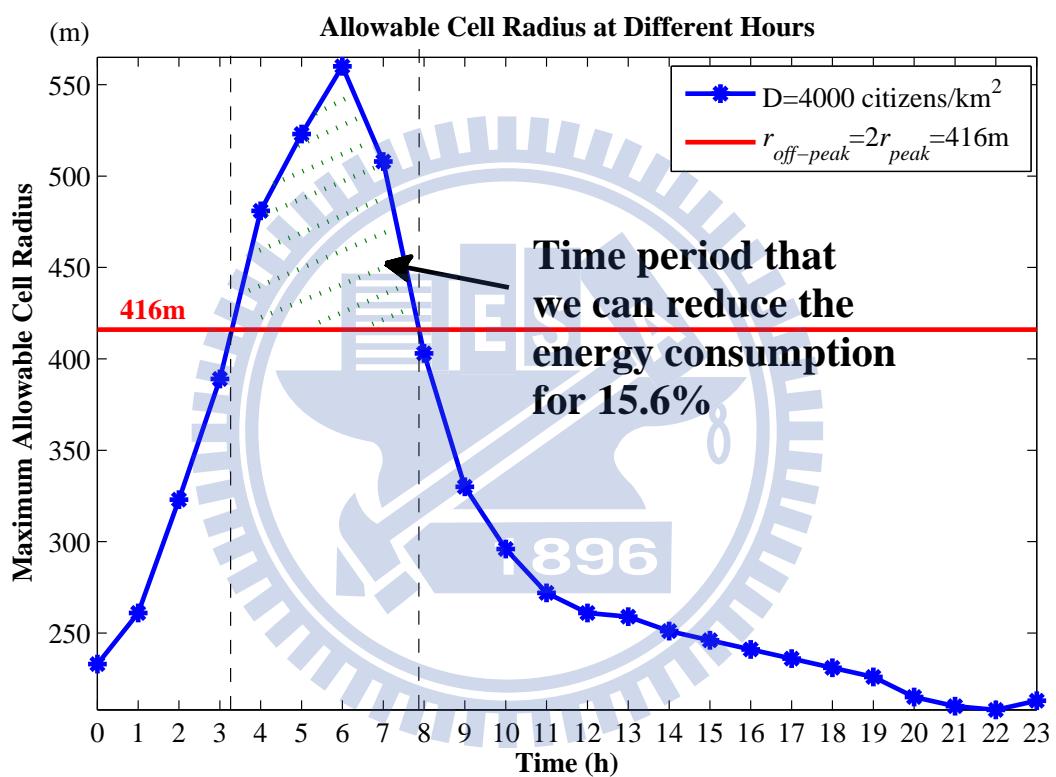


圖 6.10: 不同時刻之最佳細胞半徑以及具有節能潛力之時段

第 7 章 結論與未來研究方向之建議

整篇論文主要在探討的議題是：考慮使用者的分布情況及使用情形，細胞大小應如何設計，以期能滿足使用者服務品質；並在細胞佈建規劃上具有最大的效益，達到頻譜與能源有效之利用。經由對細胞性能所做的討論，我們提出一在不同流量負載下，決定最佳細胞大小之程序。而所決定的細胞半徑，是以資源管理的角度來看，細胞提供之容量大小恰好滿足使用者的資料量要求，達到所謂的能量使用具有效率。此外，在討論過程中發現，為了滿足使用者的服務品質，我們所使用的涵蓋範圍之限制條件，即細胞邊界上使用者須達到的位元速率，為決定細胞半徑的主要因素；並建議扇區間分配不同的頻段使用，以降低使用者所接收到的干擾雜訊，提高 SINR 值以期細胞的涵蓋範圍能更廣。最後，討論得到的結果，可以提供系統在初期設置細胞大小時，有參考依據；此外，我們也提出一運作方式，在具節能潛力的時段，切換部分基地台進入休眠模式或停止運轉，降低 75% 的功率消耗。宏觀而言，可節省網路的能量消耗約達 15.6%，且也能維持使用者的服務品質。

而對於未來研究方向之建議，有以下幾點：

- 由於我們假設使用者分布的情況為均勻分布，並以討論的區域範圍為小範圍來達到這假設。然而，實際情況下使用者的分布在一區域還是會有部分密集或稀疏的差別，若考慮這樣的情形，細胞的涵蓋範圍該如何設計是我們所關注的。
- 在佈建基地台時，由於位址之選擇有法規的規範與實際的考量，並不能如假設般等距離佈建。若加入可真正佈建基地台之位址資料，細胞涵蓋的範圍應如何決定，以及如何達到頻譜與能源有效之利用，也是值得討論的議題。
- 為了討論具定量化，本篇論文中我們並沒有考慮通道響應，而在真實環境中，通道的好壞也會決定傳輸品質，進而影響細胞半徑的大小。所以，此點為我們之後改進的目標。

參考文獻

- [1] B. Badic, T. O'Farrrell, P. Loskot, and J. He, "Energy efficient radio access architectures for green radio: large versus small cell size deployment," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Fall (VTC '09-Fall)*, pp. 1-5, Sept. 2009.
- [2] G. Fettweis and E. Zimmermann, "ICT energy consumption - trends and challenges," in *Proc. of the 11th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*. Citeseer, 2008.
- [3] A. Fehske, F. Richter, and G. Fettweis, "Energy efficiency improvements through micro sites in cellular mobile radio networks," in *Proc. IEEE International Workshop on Global Telecommunications (GLOBECOM Workshops '09)*, pp. 1-5, Dec. 2009.
- [4] M. A. Imran and Project Partners, "Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown," EARTH project, Tech. Rep., Dec. 2010.
- [5] I. Góðor and Project Partners, "Most promising tracks of green network technologies," EARTH project, Tech. Rep., Dec. 2010.
- [6] E. Oh, B. Krishnamachari, X. Liu, and Z. Niu, "Toward dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 56-61, June 2011.
- [7] Y. Chen, S. Zhang, S. Xu, and G. Li, "Fundamental trade-offs on green wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 30-37, June 2011.
- [8] W. Vereecken, W. Van Heddeghem, M. Deruyck, B. Puype, B. Lannoo, W. Joseph, D. Colle, L. Martens, and P. Demeester, "Power consumption in telecommunication networks: overview and reduction strategies," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 6, pp. 62-69, June 2011.
- [9] M. Marsan, L. Chiaraviglio, D. Ciullo, and M. Meo, "Optimal energy savings in cellular access networks," in *Proc. IEEE International Workshop on International Conference on Communications (ICC Workshops '09)*, pp. 1-5, June 2009.

[10] K. Samdanis, D. Kutscher, and M. Brunner, "Self-organized energy efficient cellular networks," in *Proc. IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '10)*, pp. 1665-1670, Sept. 2010.

[11] M. F. Cátedra and J. Pérez-Arriaga, *Cell Planning for Wireless Communications*, 1st ed. Artech House, 1999.

[12] A. Jain, "Cell Planning in Mobile Communication," in *Proc. IEEE International Conference on Personal Wireless Communications (PWC '96)*, pp. 190-194, Feb. 1996.

[13] D. Amzallag, M. Livschitz, J. Naor, and D. Raz, "Cell planning of 4G cellular networks: algorithmic techniques and results," in *Proc. IEE International Conference on 3G and Beyond*, pp. 1-5, Nov. 2005.

[14] I. H. Cavadar and O. Akcay, "The optimization of cell sizes and base stations power level in cell planning," in *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference Spring (VTC '01-Spring)*, vol. 4, pp. 2344-2348, 2001.

[15] NEC, "Green Radio: NEC's Approach towards Energy-Efficient Radio Access Networks," Feb. 2010, White Paper. [Online]. Available: http://www.nec.com/global/solutions/nsp/mwc2010/pdf/greenradio_1.pdf

[16] G. Calhoun, *Digital Cellular Radio*, 1st ed. Artech House, 1988.

[17] Y. Qi, M. Imran, and R. Tafazolli, "On the energy aware deployment strategy in cellular systems," in *Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Workshops (PIMRC Workshops '10)*, pp. 363-367, Sept. 2010.

[18] E. Oh and B. Krishnamachari, "Energy savings through dynamic base station switching in cellular wireless access networks," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '10)*, pp. 1-5, Dec. 2010.

[19] S. Zhou, J. Gong, Z. Yang, Z. Niu, and P. Yang, "Green mobile access network with dynamic base station energy saving," in *Proc. of ACM MobiCom*, vol. 9, 2009.

[20] J. Gong, S. Zhou, Z. Niu, and P. Yang, "Traffic-aware base station sleeping in dense cellular networks," in *18th International Workshop on Quality of Service (IWQoS)*, June 2010.

- [21] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong, and Z. Yang, "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 11, pp. 74-79, Nov. 2010.
- [22] K. Samdanis, D. Kutscher, and M. Brunner, "Dynamic energy-aware network re-configuration for cellular urban infrastructures," in *Proc. IEEE International Workshop on Global Telecommunications (GLOBECOM Workshops '10)*, pp. 1448-1452, Dec. 2010.
- [23] 3GPP, TR 36.814 v9.0.0, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); further advancements for E-UTRA physical layer aspects," Mar. 2010.
- [24] 資策會 FIND, "2011 年第 1 季我國行動上網觀測," June 2011. [Online]. Available: <http://www.find.org.tw/find/home.aspx?page=many&id=288>

