

國立交通大學

電信工程學系碩士班

碩士論文

中繼站輔助之蜂巢式系統對於
系統上載效能的改進



**The Uplink Performance Improvement on
Relay-assisted Cellular Systems**

研究生：謝宜勳

指導教授：沈文和 教授

中華民國九十七年十月

中繼站輔助之蜂巢式系統對於
系統上載效能的改進

**The Uplink Performance Improvement on
Relay-assisted Cellular Systems**

研究生：謝宜勳

Student : Yi-Hsun Hsieh

指導教授：沈文和 博士

Advisor : Dr. Wern-Ho Sheen

國立交通大學

電信工程學系碩士班



Submitted to Department of Communication Engineering

College of Electrical and Computer Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Communication Engineering

October 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年十月

中繼站輔助之蜂巢式系統對於 系統上載效能的改進

研究生:謝宜勳

指導教授:沈文和 博士

國立交通大學
電信工程學系



摘要

IEEE 802.16j 為 IEEE 802.16 無線寬頻接取標準之增修版本，其中增加了可支援多重躍進之中繼站的運作，此技術標準的目的為增進 IEEE 802.16e 系統涵蓋範圍、改善使用者之傳輸率並提升整體之系統容量。然而，雖然目前的研究顯示中繼站的佈放的確對於系統容量會有所提升，但卻極少去探討固定式中繼站要如何擺放在適當的位置，可以對系統效能有最好的改善。另一方面，中繼站的佈放也具有節省使用者的上載傳輸功率的好處。本篇論文提出了一套中繼站最佳佈放位置的搜尋方法，並且在此最佳佈放位置下，我們去分析系統上載時整體效能的改善程度，同時，我們比較了上載時選擇最適當傳輸路徑以及使用與下載相同路徑時對於系統容量的改善程度，結果建議我們將上載與下載分開選擇傳輸路徑，可以對系統整體效能達到更好的成果。

The Uplink Performance Improvement on Relay-assisted Cellular Systems

Student : Yi-Hsun Hsieh Advisor : Dr. Wern-Ho Sheen

Institute of Communication Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

IEEE 802.16j is an amendment to the IEEE 802.16 broadband wireless access standard to enable the operation of multi-hop relay stations (RS). It aims to enhance the coverage, per user throughput and system capacity of IEEE 802.16e. Although previous researches have showed that deploying RS can indeed enhance system capacity. However, very few have worked on how RSs are placed to maximize the system capacity. In this thesis, an efficient method of RS placement is proposed and the performance improvement with respect to the transmit power of MS and the system spectral efficiency is investigated in the uplink. In addition, the performance of optimal uplink path selection is compared to the one uses the same path as the downlink. The results show that if the transmission path of the uplink and downlink are selected separately, the system performance can be further improved.

誌謝

本論文的完成，首先要特別感謝指導教授沈文和博士兩年來的教導與訓練，沈老師在我的碩士生涯中不僅給予研究上的指導，在生活上也給予適時的關心，史的研究得以順利完成。此外，培養我們正確的研究態度與積極的學習精神，對我的未來無論在工作上或研究上都有正面的影響。在此也要特別感謝口試委員交通大學電子系黃經堯教授以及清華大學電機系蔡育仁副教授給予研究上的寶貴意見與指正。

另外，感謝香君學姊在研究上的協助與指教。再者，亦要感謝無線寬頻擷取實驗室的學長：倉緯、宸睿、東融、聖文、昱帆，同學：丞瑋、政揚、哲群，在他們的幫助與鼓勵下完成學業。最後感謝我的家人對我的關心、支持與陪伴。僅將本論文呈獻給各位。



民國九十七年十月
研究生 謝宜勳 謹識於交通大學

目錄

第一章	研究動機.....	1
第二章	IEEE 802.16j Multi-hop Relay 系統簡介.....	3
2-1	Multi-hop Relay 系統.....	3
第三章	基因演算法.....	8
3-1	基因演算法的由來與簡介.....	8
3-2	染色體與編碼結構.....	9
3-3	選擇與進化.....	10
3-4	終止的情況.....	16
第四章	最佳中繼站佈放位置下的中繼站輔助之蜂巢式系統效能.....	18
4-1	系統模型.....	18
4-2	中繼站佈放位置的最佳化.....	20
4-2-1	目標函數.....	21
4-2-2	基因演算法的應用.....	23
第五章	中繼站輔助之蜂巢式系統上載效能的改善.....	26
5-1	功率節省的改善.....	26
5-1-1	Time division transmission.....	27
5-1-2	Bandwidth division transmission.....	30
5-2	Spectral Efficiency 的改善.....	32
5-2-1	Time division transmission.....	32
5-2-2	Bandwidth division transmission.....	34
第六章	系統模擬.....	37
6-1	中繼站最佳佈放位置對系統下載效能的改善.....	37
6-2	中繼站輔助之蜂巢式系統上載效能的改善.....	42
6-2-1	功率節省的改善.....	42
6-2-2	Spectral Efficiency 的改善.....	51
第七章	結論與未來展望.....	60

7-1	結論.....	60
7-2	未來展望.....	60
Appendix A.1	61
Appendix A.2	62
參考文獻		



圖目錄

圖 2-1.1	中繼站輔助的無線通訊系統.....	3
圖 2-1.2	佈建成本示意圖.....	5
圖 2-1.3	提升使用者傳輸速度示意圖.....	5
圖 2-1.4	中繼站佈建幫助擴展基地台覆蓋範圍.....	6
圖 2-1.5	中繼站頻率重複使用示意圖.....	6
圖 2-1.6	傳輸速率均勻分佈示意圖.....	7
圖 3-3-1.1	轉輪盤法示意圖.....	11
圖 3-3-2.1	單點交配示意圖.....	12
圖 3-3-2.2	多點交配示意圖.....	13
圖 3-3-2.3	均勻交配示意圖.....	13
圖 3-3-2.4	突變示意圖.....	14
圖 3-3-2.5	基因演算法流程圖.....	15
圖 4-1.1	系統架構示意圖.....	18
圖 4-2-2.1	均勻交配示意圖.....	24
圖 6-1.1	Spectral Efficiency Contour for $N=1$	39
圖 6-1.2	Spectral Efficiency Contour for $N=2$	39
圖 6-1.3	Spectral Efficiency Contour for $N=3$	40
圖 6-1.4	Spectral Efficiency Contour for $N=6$	40
圖 6-1.5	Spectral Efficiency Contour for $N=7$	41
圖 6-1.6	Spectral Efficiency Contour for $N=14$	41
圖 6-2-1.1	User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=0.5$	44
圖 6-2-1.2	User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=0.54$	44
圖 6-2-1.3	User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=0.6$	45
圖 6-2-1.4	User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=1$	45
圖 6-2-1.5	CDF for different $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$	46
圖 6-2-1.6	User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=10$	48
圖 6-2-1.7	PS v.s. $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$	48
圖 6-2-1.8	User Transmission Power Contour for optimum UL path scheme.....	49
圖 6-2-1.9	User Transmission Power Contour for the same DL path scheme.....	50

圖 6-2-1.10	CDF for different path selection scheme.....	50
圖 6-2-2.1	Spectral Efficiency Contour for $P_m=0\text{dBm}$	53
圖 6-2-2.2	Spectral Efficiency Contour for $P_m=10\text{dBm}$	53
圖 6-2-2.3	Spectral Efficiency Contour for $P_m=20\text{dBm}$	54
圖 6-2-2.4	Spectral Efficiency Contour for $P_m=25\text{dBm}$	54
圖 6-2-2.5	CDF with different P_m for optimum UL path.....	55
圖 6-2-2.6	Spectral Efficiency Contour for $P_m=0\text{dBm}$	56
圖 6-2-2.7	Spectral Efficiency Contour for $P_m=10\text{dBm}$	56
圖 6-2-2.8	Spectral Efficiency Contour for $P_m=20\text{dBm}$	57
圖 6-2-2.9	Spectral Efficiency Contour for $P_m=25\text{dBm}$	57
圖 6-2-2.10	CDF with different P_m for the same DL path.....	58




表目錄

表 6-1.1 系統模型參數設定.....	37
表 6-1.2 中繼站與基地台相差距離與效能改善統計表.....	38
表 6-2-1.1 系統上載參數設定.....	43
表 6-2-1.2 系統上載效能改善統計表.....	43
表 6-2-1.3 系統上載效能改善統計表 for different path selection scheme.....	49
表 6-2-2.1 系統上載效能改善統計表 for optimum UL path scheme.....	52
表 6-2-2.2 系統上載效能改善統計表 for the same DL path scheme.....	52
表 6-2-2.3 系統上載效能改善統計表 for optimum UL path scheme.....	58
表 6-2-2.4 系統上載效能改善統計表 for the same DL path scheme.....	59



第一章 研究動機

隨著時代的進步，科技領域的技術也在不斷地創新與演化，在行動通訊系統(Mobile Communication Systems)的演化史中，從第一代的行動通訊系統為類比蜂巢式系統(Analog Cellular Systems)，在此系統下，人們可以享受到無線行動通訊的便利，隨時隨地可以用電話通訊，然而，此系統是以類比式的訊號做傳輸，使其功能受到很多限制，例如：容易受到雜訊干擾而不易恢復、保密性不佳、容易被盜用…等等。接下來屬於數位系統的第二代行動通訊系統問世，它包含歐規的 GSM、日規的 PDC 以及美規的 CDMA、D-AMPS 等多種標準，此代通訊系統主要提供語音(Voice)通訊的功能，而且採用數位訊號來傳輸，配合錯誤更正碼(Error-correction code)、資料分散(Interleaving)…等技術，可以讓受到雜訊干擾的訊號回復成原來的樣子，維持通訊品質，並且不容易被盜用，而且此代通訊系統加入數據功能，可以用行動電話傳送簡單的文字或利用筆記型電腦上網，相較於同時在蓬勃發展的有線服務，如：ADSL、Ethernet…等，有線服務最高可以提供使用者 10Mbps 至 100Mbps 的資料傳輸率，第二代行動通訊系統的數據傳輸速度仍是十分有限。



有別於前兩代的行動通訊系統，以高速度、高容量、多媒體、個人性的第三代行動通訊系統(3G Mobile Communication Systems)，同前兩代也是蜂巢式的結構，可以提供傳輸資料速率高達 2Mbps 的數據服務，相較於第二代系統每秒只能傳送 9.6Kbps，相差超過兩百倍，此代行動通訊系統是以寬頻分碼多工多重擷取(W-CDMA)技術為主軸，而 W-CDMA 主要是沿襲自 GSM，其優點是突破第二代行動通訊系統侷限於地區性服務的藩籬，進而做到整合全球所有無線通訊網路，即人在辦公室或世界各地訊息均可立即收發，就是能提供隨時隨地的行動電話順暢或無交感通話運作。雖然第三代通訊系統已經在數據傳輸速率較前幾代改善很多，然而隨著時代的進步，行動通訊商品化，更多行動通訊的服務需求，行動用戶量的增多，對於系統容量的要求，與更高的傳輸速率。此外，第三代通訊系統除了有在系統所能提供容量上的限制，在其細胞邊緣的用戶僅能提供較低的傳輸速率，這些有待改善的缺點，都將會是下一代行動通訊系統發展的趨勢。

在全球第三代行動通訊系統才剛開始普遍使用的今天，國際上第四代(4G)行動通訊系統的研發已經啟動。新一代的行動通訊系統期望能提供對於行動型(mobile)的使用者 100Mbps 的服務速率，而對於區域游牧型(nomadic/local area)的存取能提供高於 1Gbps 的服務速率，此外，設計第四代行動通訊的系統使其能夠和第三代有一樣的細胞涵蓋範圍(cell coverage)是一項重要的考量，因此，要在此考量下，達到更高的系統容量以及改善在細胞邊緣的使用者只能使用較低傳輸

速率的情況，在傳統只以基地台(base station, BS)為伺服器的蜂巢式系統架構中，加入中繼站來幫忙轉傳，來提高細胞的傳輸效能，此種中繼式傳輸技術被視為發展第四代行動通訊系統的可行架構。

IEEE802.16 與 WiMax 就是隨著行動通訊發展的趨勢越來越受注目，IEEE802.16 標準主要包括 802.16a、802.16d、802.16e 和 802.16j 四個標準。802.16a 是為支援 2-11GHz 頻段的非視距(NLOS, Non Line of Sight)寬頻固定接取系統而設計的，802.16d(802.16-2004)是 802.16a 的增強型，而 802.16e 是 802.16a/d 的進一步延伸，其目的是在已有標準中增加數據移動性，802.16j 則是對 802.16e 作更進一步的延伸，其目的就是加入中繼站的設計，來幫助提升以 IEEE802.16e 為基礎之 WiMax 的系統效能。

本篇論文主要就是針對傳統的蜂巢式系統架構在加入固定式中繼站幫忙傳輸訊號之後對系統效能的改善做深入的探討。在對於中繼站做研究的相關論文中，的確都提到了加了中繼站後，對於原本只有由基地台服務的蜂巢式架構其效能是有改善的，然而這些文獻中，幾乎都是直接給定一個固定式中繼站的佈放位置，之後根據他們所要探討的問題，給定適當的假設，以及提出的改善系統效能相關方法，例如：系統資源的有效分配…等，來觀察加了中繼站以及文獻中所提出的新方法對於系統整體效能的提升，卻很少提到究竟這些固定式中繼站為何要如此擺放，這樣的佈放方式究竟對系統效能的改善有多大幫助，這便是此篇論文首先要針對的問題，我們將在適當的系統架構設定下，來探討固定式中繼站要佈放在哪些位置，可以對系統的效能達到最好的改善。

首先，此篇論文會先針對系統下載(downlink)的部份，藉由基因演算法(genetic algorithms)來找出固定式中繼站最佳的佈放位置，在此佈放之下，可以讓系統整理的效能達到最佳，並且針對不同的中繼站個數，找出最適合該中繼站個數的佈放位置；之後，本篇論文會根據所找到的中繼站最佳位置，來探討對於系統上載(uplink)的部份，在有這些給定的固定式中繼站的幫助傳輸下，對於系統的效能，會有哪些方面的改善。

第二章 IEEE 802.16j Multi-hop Relay 系統簡介

本章將介紹 Multi-hop Relay 的基本網路架構。

2-1 Multi-hop Relay 系統

在傳統蜂巢式系統(cellular system)架構中，能提供資料傳輸的伺服器站(serving station)只有基地台(base station, BS)，但是在細胞架構所涵蓋的範圍內難免會受到地形、建築物等的阻擋而形成高遮蔽區域(highly-shadowed area)，基地台在有限的傳輸功率下，將無法滿足因受高遮蔽效應的使用者之服務品質需求，使得使用者無法進行資料傳輸，而造成傳輸死角(dead spot)，因而降低系統整體效能。

為了提升系統效能與解決上述的問題，中繼式的傳輸技術被視為下一代行動通訊系統可行的傳輸架構，而此中繼式傳輸技術就是指在傳統的蜂巢式系統架構中，加入中繼站(relay station, RS)，來協助基地台與使用者之間的資料傳輸，這就是所謂的 Multi-hop Relay 系統架構。在此 Multi-hop Relay 系統架構下，距離基地台近的使用者可以經過單躍(single hop)傳輸方式直接與基地台進行通訊，而在細胞邊緣(cell edge)或受地形與建築物影響的高遮蔽區域的使用者，則可以透過中繼站幫助傳送基地台與使用者之間的訊號，此稱為多躍(multi-hop)傳輸，以上所提到的兩種跳躍傳輸方式如圖 2-1.1 所示。

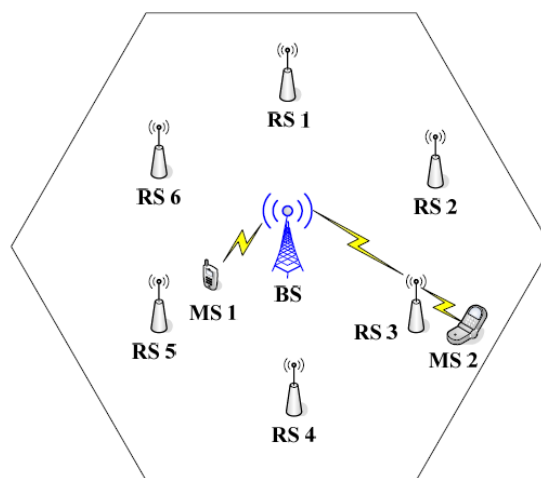


圖 2-1.1 中繼站輔助的無線通訊系統

中繼式傳輸技術依其佈建方式、功能、操作方式可以分分為以下幾類：

- 固定式中繼站(fixed RS)與移動式中繼站(mobile RS)：中繼站依其行動能力可以分為固定式中繼站與移動式中繼站。固定式中繼器可在系統設置之初事先規劃，根據細胞涵蓋範圍內的環境與傳輸情況來佈放，通常可能佈放在細胞邊緣或高遮蔽效應的區域，以提升這些區域的傳輸效能[1]。移動式中繼站則可由系統中一般閒置(idle)的行動裝置來協助周圍收訊不良的使用者作訊號傳輸，但是在移動式中繼站的系統中，當使用者密度低時，將無法保證每個使用者都能找到適當的中繼站來幫忙轉傳訊號[2]。
- 解碼遞送式中繼站(decode-and-forward RS)與放大遞送式中繼站(amplify-and-forward RS)：所謂的解碼遞送式中繼站就是中繼站在收到自基地台或使用者來的訊號後，會先經過數位解碼，再重新編碼過後，才將訊號發送出去，因此又稱(訊號)再生中繼站(regenerative relay)[3]。而放大遞送式中繼站則是僅放大、轉傳，不做任何訊號處理，又可稱為(訊號)非再生中繼站(non-regenerative relay) [4]。
- 同頻中繼技術(in-band relaying)和不同頻中繼技術(out-of-band relaying)：一旦訊號經過中繼站轉送，則需要消耗多份無線電資源(radio resource)，從基地台到中繼站，從中繼站到使用者。中繼站使用的頻段可以跟基地台相同(in-band relay)[4]，或是利用其他的頻段(out-of-band relay)[2]。若是同頻中繼，則中繼站、使用者可用一套傳送接收設備(transceiver)與基地台通訊；若是非同頻中繼，則中繼站需有兩套傳送接收設備(dual mode)分別與基地台與使用者溝通，相同的，使用者也需要有兩套傳送接收設備分別與基地台與中繼站溝通。

在中繼站輔助傳輸的相關議題中，各種不同的影響，例如：功率分配、路徑選擇的方式、資源配置與傳輸排程等等，透過分析或系統模擬的方式，可以歸納出經由中繼站輔助無線通訊系統的好處：

1. 降低網路佈建成本(reduce the network deployment cost)：

由於中繼站使用無線電資源與基地台溝通，使用中繼站協助基地台訊號傳輸，中繼站不需後端固接網路(wire-line backhaul network)的設置，可免去道路開挖以及連結後端網路的成本，因此中繼站設置的複雜度與成本將甚低於基地台的設置。

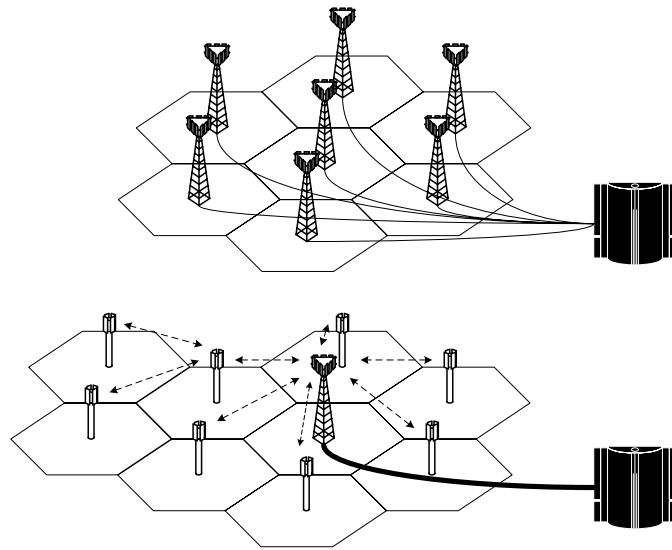


圖 2-1.2 佈建成本示意圖

2. 使用者傳輸速度提升(user throughput enhancement)：

適當的中繼站架設與運作，可將原本長距離的單躍傳輸切割成較短距離的多躍傳輸，因每段距離之傳播訊號衰減(propagation loss)減小，每一跳躍將有機會用較高速的傳輸模式進行。除此之外，經過適當的佈建，基地台與中繼站間或中繼站與使用者間可以在彼此的直視範圍內(LOS, Line of Sight)，使得彼此間有較佳的鏈路品質。綜合以上，中繼站的架設可使位於細胞邊緣或高遮蔽區域的使用者傳輸效率提升[5,6]。

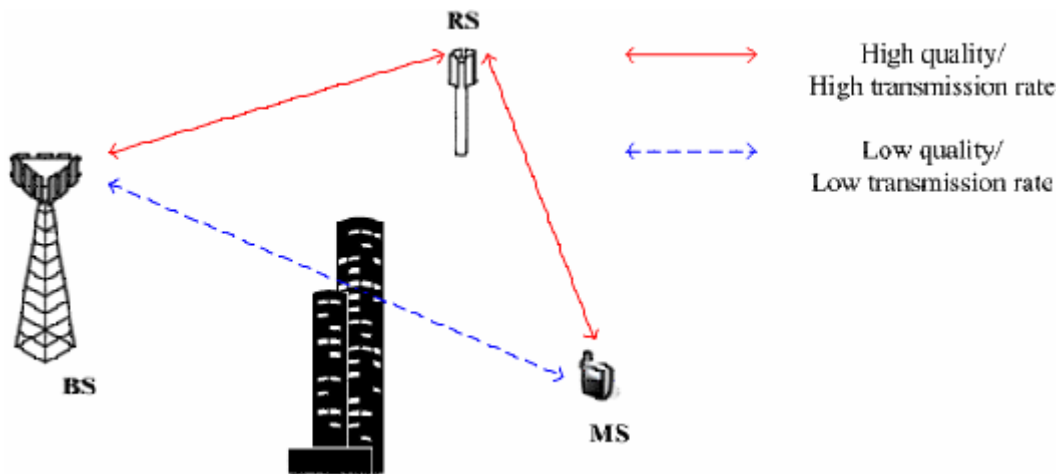


圖 2-1.3 提升使用者傳輸速度示意圖

3. 擴展細胞涵蓋範圍(extend cell coverage)：

將中繼站佈放在原基地台覆蓋範圍邊緣處，即可讓原本無法獲得服務的使用者藉由中繼站的轉傳而與基地台建立連線，此時等同於原基地台的覆蓋範圍獲得擴大[7]。

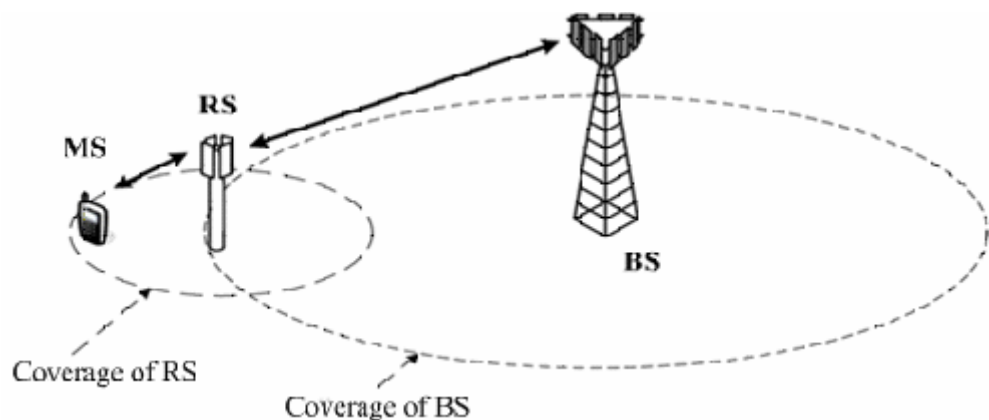


圖 2-1.4 中繼站佈建幫助擴展基地台覆蓋範圍

4. 更有效率地頻譜重複使用(efficiently frequency reuse)：

由於中繼站一般使用較小的傳輸功率幫助周圍的使用者轉傳訊號，中繼站的涵蓋範圍通常只佔基地台涵蓋範圍的一小部份，所以適當的中繼站佈置，將可妥善利用中繼站涵蓋範圍之間的遮蔽效應，則中繼站將有機會可以同時同頻地傳送訊號，達到頻率重複使用的效益[8]。

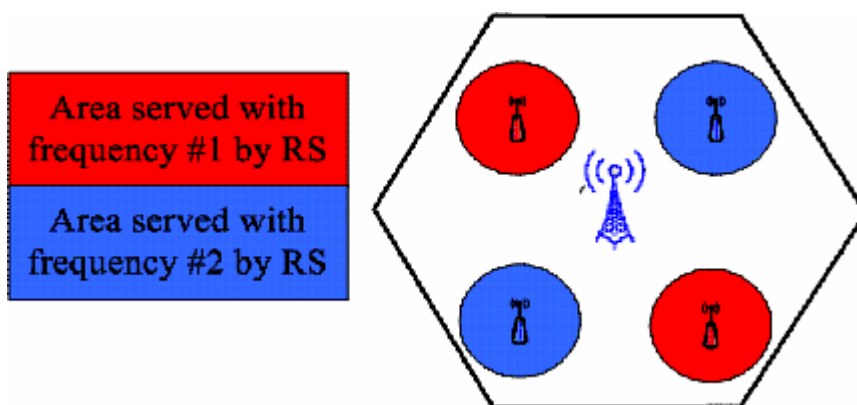


圖 2-1.5 中繼站頻率重複使用示意圖

5. 傳送速率均勻分佈(uniform data rate coverage)：

將中繼站佈放在細胞中使用者傳輸速率較低的區域，可以改善使用者與基地台間的鏈路品質(link quality)，提升使用者傳輸速率。從系統層面觀之，中繼器的佈放可以讓系統中使用者的資料傳輸速率趨於一致(uniform data rate coverage)。

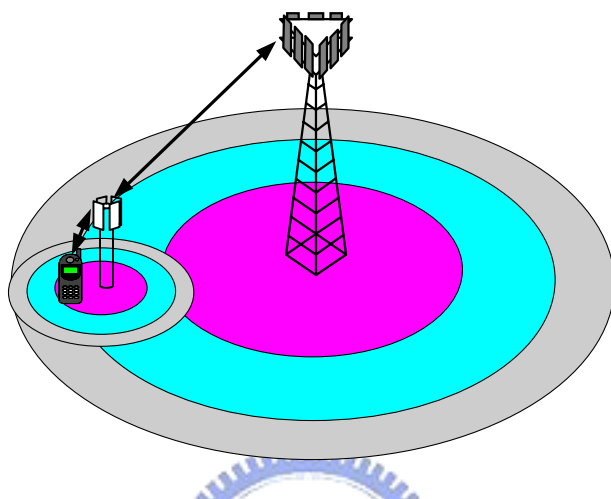


圖 2-1.6 傳輸速率均勻分佈示意圖

6. 傳輸功率節省特性(power saving characteristic)：

除了上述幾件中繼站所帶來的好處，對於上傳資料的使用者而言，有了中繼站的幫忙轉傳，是能夠有機會使得使用者的行動裝置節省傳輸功率的。因為傳輸的無線訊號會隨著路徑的長度不斷地衰減，如果中繼站佈放的位置與使用者的距離是近很多相對於使用者與基地台間的距離，那麼使用者可以用較小的傳輸功率與中繼站做傳輸，而達到用比較多的功率與基地台直接傳輸所能達成相同的傳輸品質，如此達到同樣無線連結的傳輸品質，而且還能節省傳輸功率，這樣可以延長電池的使用時間，這是中繼站輔助傳輸對於上傳這方面一個值得注意的好處。

由以上幾點可以看出，使用中繼站輔助基地台傳輸，也就是 Multi-hop Relay 系統，不僅可以降低網路之佈建成本，其提昇使用者傳輸速率、擴展細胞涵蓋範圍、有效率地頻譜重複使用、使得細胞內傳輸速率均勻分佈與節省上傳所需的傳輸功率等優點，亦可達到提升細胞容量(cell capacity increment)之目的。

第三章 基因演算法

本章將介紹基因演算法(genetic algorithms)的基本概念以及之後是如何利用此演算法來幫助解決我們所面臨的問題。

3-1 基因演算法的由來與簡介

基因演算法是一種最佳化與或然率的搜尋技術，它的概念根源自自然界中基因的原則與自然淘汰定律。基因演算法的基本概念是由 John Holland 於 1960 年代末期到 1970 年代初期所提出，此後此演算法便在許多領域上被廣泛的使用，如：計算機程式設計、人工智慧、神經網路訓練、最佳化問題等許多方面。

以下將列出基因演算法的幾項主要優點並與傳統的最佳化演算法作一些比較，基因演算法的主要優點如下：

- 可以對連續性的變數或離散式的變數做最佳化。
- 不需要微分(derivative)的資訊。
- 從價值表面(cost surface)的寬廣取樣做同時地搜尋。
- 可以處理大量的變數。
- 是很適合平行處理的電腦。
- 能夠最佳化有著極為複雜的價值表面的變數(亦即基因演算法可以讓搜尋跳出局部的最小值(local minimum))。
- 基因演算法的結果可以提供一連串的最佳化變數，並非只是單一的解。
- 可以對變數做編碼(encode)，因此最佳化的過程是對這些編碼後的變數做最佳化。

從上所描述基因演算法的特性與優點，我們可以看出它與傳統最佳化方法的

差異在於：1) 基因演算法是將候選的解轉換成含有一群參數的”個別染色體 (individual chromosome)”；2) 在搜尋的過程中，基因演算法藉由染色體所組成的族群與具體的運算子(operators)去進行染色體之間資訊的交換，因此基因演算法是在其搜尋空間中能有效率地找出最理想的解，也就是有很高機率可以找到總體的最佳解而不是局部的最佳解。

簡單說明基因演算法的概念，假設我們希望要去解一個最佳化的問題有著以下的形式：

$$\begin{array}{ll} \text{maximize} & f(x) \\ \text{subject to} & x \in \Omega \end{array}$$

以下將把基因演算法的基本概念套用到上述的問題上。我們將從 Ω 中取出一些點做為一開始的集合，意指 $P(0)$ 。我們稱 $P(0)$ 為最初族群(initial population)，然後計算出 $P(0)$ 中每一點的目標函數(objective function)，以此計算為根據，將可產生出另一群新的點集合 $P(1)$ ，而 $P(1)$ 的產生包含了對 $P(0)$ 中的點進行了一些操作分別有：選擇(selection)、交配(crossover)與突變(mutation)，如此重複以上的步驟，可以產生出新的族群 $P(2)$ 、 $P(3)$...直到停止的準則被達成。交配與突變這兩種操作的目的是為了要產生出平均目標函數高於上一代族群的新族群，所以基因演算法就是藉由不斷地交配與突變的運作產生出越來越好的結果，讓我們可以有很大的機會找出問題的最佳解。

3-2 染色體與編碼結構(Chromosomes and Encoding Schemes)

建構基因演算法的第一階段是對原本的問題裡的可能的候選解轉換成基因形式來代表，這過程中包含了定義與分配染色體中的參數，當這決定之後，我們將要設定適當的目標函數，而這目標函數就是用來量化來自每個染色體中的候選解，目標函數的值可以是最大值或最小值。

由之前的例子來解釋這一階段的作法，我們首先對 Ω 作配對成一組集合包含數個符號(symbols)的串列(strings)，這些串列的長度都相同，這些串列就被稱為染色體。每個染色體裡所包含的元素(或基因 gene)來自所選擇的符號的集合，稱為符號系統(alphabet)。舉例來說，集合 $\{0, 1\}$ 在此例子下的染色體就是簡單的二位元串列(binary strings)。我們在此定義 L 為染色體的長度，所以對於每一


個染色體 x 它的目標函數就是 $f(x)$ 。

染色體的長度、符號系統與編碼方式的選擇就是所謂的編碼結構(encoding schemes)，當適合的編碼結構被選定後，下一個步驟就是初始化染色體的第一代族群 $P(0)$ ，通常的作法是隨機地選擇出一群染色體，當我們建構完最初的族群之後，我們就可對這一染色體族群實行交配與突變的操作，進而產生出下一代的族群，經由 k 次重複的過程，我們計算出族群 $P(k)$ 中每個成員 $x^{(k)}$ (member) 的目標函數 $f(x^{(k)})$ 。

3-3 選擇與進化(Selection and Evolution)

本節將對選擇、交配與突變這三個基因演算法核心的運作做詳細的介紹與說明。

3-3-1 選擇



選擇是試圖對族群加上權重(weight)的一種方法類似生物系統中的自然淘汰，相當於適者生存，不適者就遭淘汰。在族群中有較好基因(較大或較小的目標函數，根據問題的目的而定)的染色體，將會有較大的機率存活到下一代的族群中，正因為這種適者生存的選擇操作特性，使得經過多次重複產生的後代，能夠有高機率獲得高於前代的平均目標函數。典型的選擇操作者(selection operators)可以被區分成兩類：雙親選擇(parent selection)和存活者選擇(survivor selection)。雙親選擇是負責允許較適合生存的染色體可以變成下一代的雙親；存活者選擇則是在已經經由雙親產生完的子代中，來決定哪些染色體可以存活到下一代，以下將介紹最常被使用的雙親選擇方法：轉輪盤法(roulette-wheel scheme)和錦標賽法(tournament scheme)，以及存活者選擇方法：等級法(ranking scheme)。

轉輪盤法：

我們先建立一組與 $P(k)$ 有相同元素數目的集合 $M(k)$ ，這所謂的相同數目我們定義成 N ，稱為族群大小(population size)，而集合 $M(k)$ 則稱為配對池(mating pool)，由 $P(k)$ 使用如下的程序所形成，在 $M(k)$ 中的每一個點 $m^{(k)}$ 有著以下所列的機率會相等於在 $P(k)$ 中的 $x^{(k)}$ ：

$$\frac{f(x^{(k)})}{F(k)}, \quad (3.1)$$

其中，

$$F(k) = \sum f(x_i^{(k)}) \quad (3.2)$$

上式的總和 Σ 是對整個 $P(k)$ 做總和，這個方法是選擇有著機率正比於目標函數大小的染色體到配對池中，就是所謂的轉輪盤法，也就是說有著越大的目標函數的染色體它所佔輪盤中的凹槽就越多，此染色體就有越大的機率存活到下一代。所以當每個染色體所佔的凹槽分配號好後，我們就轉動輪盤看彈珠最後落到哪個染色體所代表的凹槽，就將此染色體放到配對池中，如此重複 N 次，最後配對池裡就會有 N 個我們所選出的染色體。

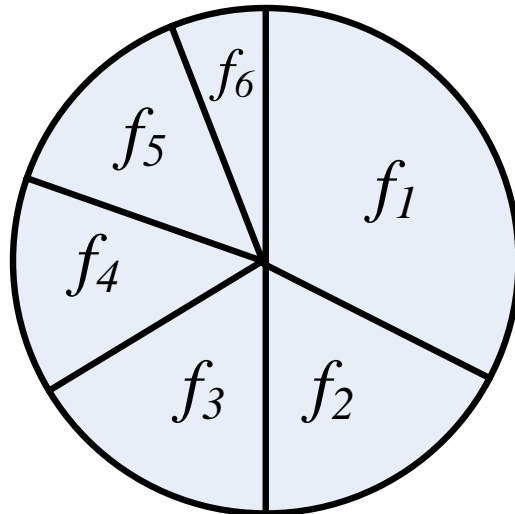


圖 3-3-1.1 轉輪盤法示意圖

錦標賽法：

首先，我們從 $P(k)$ 中隨機選出一對染色體，然後比較兩者的目標函數並且將兩個裡面較適合的一個放到配對池 $M(k)$ 中，接著重複這個過程直到配對池中包含了 N 個染色體。

等級法：

等級法是存活性選擇方法中最簡單的一種。這個方法是將最差的 (worst) $P_s \times N$ 個染色體用最好的 (best) $P_s \times N$ 個染色體取代掉，形成新的族群，其中

P_s 是選擇機率(selection probability)，此方法雖然簡單，但是等級法具有能有效地加快族群的收斂速度與增近整個族群平均的品質等優點。

3-3-2 進化

進化這一階段指就是進行交配與突變的步驟。首先我們會先介紹交配這一步驟的運作，之後則對突變進行詳細的說明。

交配運作簡單的說就是取出一對染色體，將此對染色體稱為雙親，讓它們交換彼此的子串列(substrings)來形成新的一對子代染色體，每一對從配對池中被選中來當雙親的染色體是隨機被選擇的，而每個染色體被選擇到來做交配的機率為 p_c ，也就是所謂的交配率(crossover rate)，將交配運作與選擇運作的互相合作之下，一旦有更適合生存的子代產生，也就是此子代相較於其他子代有較大的目標函數，在經由選擇之後此子代將有高的機率可以存活下來，這樣將使得下一代族群的平均目標函數成功地得到改善。一旦要進行交配的雙親染色體決定之後，接下來就是對它們進行交配運作，交配運作的形式有很多種，接下來我們將介紹三個最常被使用的交配運作：單點交配(one-point crossover)、多點交配(multi-point crossover)以及均勻交配(uniform crossover)。

單點交配：

首先，我們從1到 $L-1$ 的數字中隨機挑選一個數字，其中 L 是指染色體的長度，將這選出來的數字當成交叉點(crossing site)，交換雙親染色體在此交叉點之後的所有子串列，就會產生經由單點交配之後的一對新子代，如圖3-3-2.1所示。

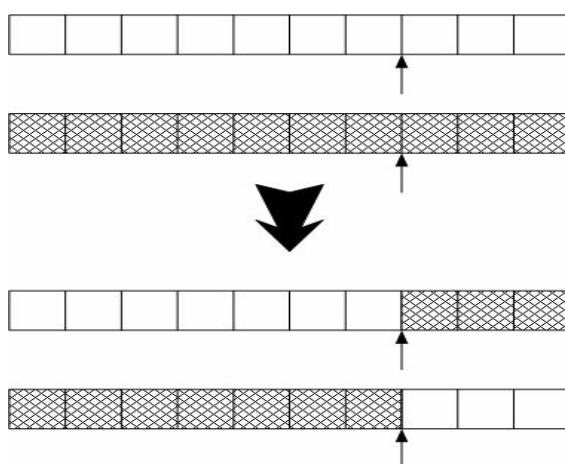


圖 3-3-2.1 單點交配示意圖

多點交配：

先隨機產生多個交叉點，之後根據決定好的交叉點對雙親染色體的子串列作交換，圖 3-3-2.2 所表示就是多點交配的示意圖。

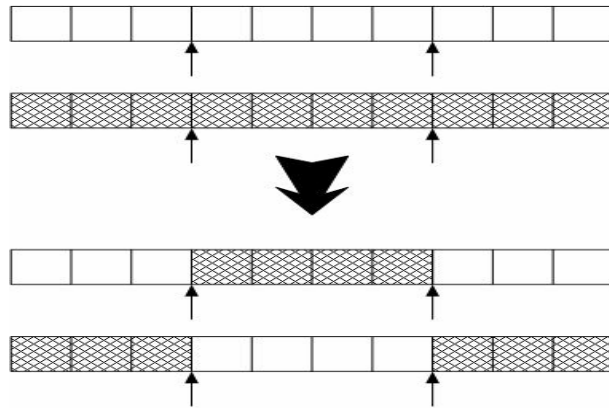


圖 3-3-2.2 多點交配示意圖

均勻交配：

在進行均勻交配之前，要隨機產生一組長度與染色體長度相同的二位元串列，此二位元串列將被如同遮罩(mask)一般地使用，也就是說如果位元的值是 1，則意味著此位置上的串列必須互相交換，反之，如果位元的值是 0，則此位置上的串列不需互相交換，圖 3-3-2.3 將清楚解釋均勻交配的運作。

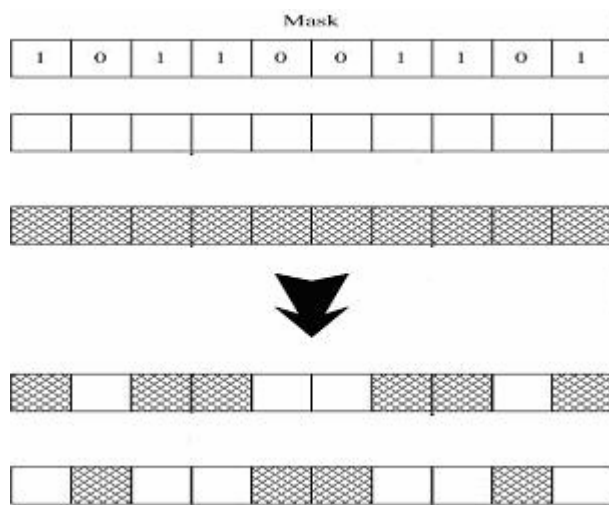


圖 3-3-2.3 均勻交配示意圖

接下來我們將介紹突變的運作，當執行突變運作時，在配對池中每一個染色體的每一個字串或位元將基於一個機率 p_m 來決定是否這些值要做改變， p_m 也就是所謂的突變率(mutation rate)，以染色體的串列是二位元的字母系統為例，每個位元都有 p_m 的機率從 0 變 1 或是由 1 變 0，就醫學科學與生物學的研究，突變發生的機率是很小的，所以通常的 p_m 值都是很小的，例如：0.01。雖然突變發生的機率很小，但是它在基因演算法演化的過程中，仍然有著重要的地位，當選擇與交配運作的過程中，的確是令族群平均的品質隨著每一世代不斷的改善，然而當演化到一定次數以後，族群的目標函數將會開始收斂，族群中就只剩那幾組良好的資訊在做演化，到最後每個染色體的包含資訊幾乎都相同，所以說如果只讓基因演算法執行選擇與交配的運作，而沒有加上突變此一運作，來產生一些新的資訊或參數，此基因演算法將很容易落入局部的最佳解，而不是整個解空間的最佳解，所以突變運作可以將新的資訊帶到族群之中，讓基因演算法可以跳出局部的最佳解而找到總體的最佳解(global optimum)。

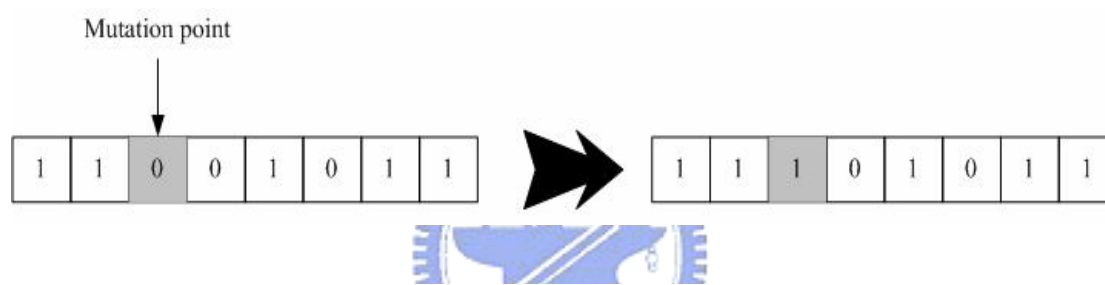


圖 3-3-2.4 突變示意圖

對於配對池 $M(k)$ 進行了交配與突變的運作之後，我們可以獲得一組新的族群 $P(k+1)$ ，之後我們不斷重複著評價、選擇與進化的步驟，如此不斷產生出新的子代，以下我們將對基因演算法的流程做一個總結，圖 3-3-2.5 就是基因演算法的流程圖。

基因演算法：

1. 設定 $k:=0$ ；從最初族群 $P(0)$ ；
2. 計算 $P(k)$ ；
3. 如果停止的標準被滿足，則停止運作；
4. 從 $P(k)$ 中去選擇出 $M(k)$ ；
5. 對 $M(k)$ 進行演化然後形成 $P(k+1)$ ；

6. 設定 $k:=k+1$ ，跳至步驟 2。

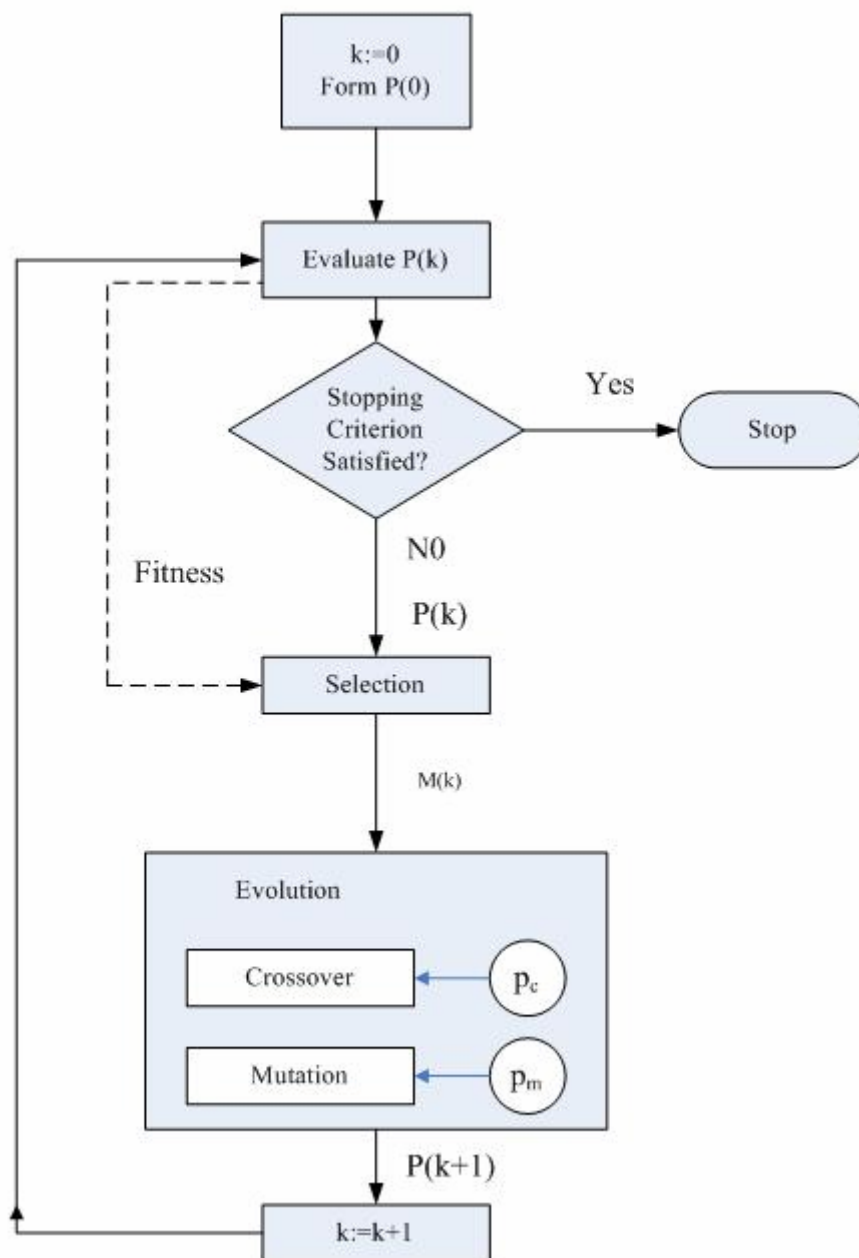


圖 3-3-2.5 基因演算法流程圖

3-4 終止的情況(Termination Condition)

經由上面幾節對基因演算法實際運作的詳細介紹之後，基因演算法該在何時停止演化，就是接下來要探討的問題，基因演算法終止的情況就是一種終止演化的搜尋或是停止計算基因演算法的標準，針對各種不同問題與情況用基因演算法來求最佳解，其終止的條件會有所不同，所以以下我們將歸納出幾樣比較常被使用來做為何時該停止基因演算法的條件[9]：

1. 正確的答案或是預設的最佳值。確定用基因演算法所找出最好的染色體是否為我們所針對問題的預設最佳解或可接受的答案，如果是的話，就可以停止基因演算法的運作。
2. 不再有所改善(no improvement)。如果基因演算法持續演化許多次以後，所找出的最好染色體仍然是同樣的，此時就應該停止演化。但這邊值得注意的是，有時演化的過程中，可能會在一組相同的最佳解停留多次以後，才會演化出更好的一個解答，所以在此終止條件下，應該經過重複多次基因演算法以及每做一次基因演算法要有足夠多次的演化之後，所得出的最佳解仍然一樣時，才確定此為終止條件。
3. 統計(statistics)。如果族群的目標函數之平均(mean)或標準差(standard deviation)已經達到某一程度，那麼就停止基因演算法。這意味著整體的值已經不會在改變。
4. 重複的次數(number of iterations)。如果基因演算法並沒有因為滿足上述的其中一個理由而停止的話，此時應該限制最大的演化重複次數，否則演算法將會無限制的不斷演化下去。
5. 局部最佳解(local optimizer)。如果都一直停留在同一個局部最佳解而不再改善，此時就該停止，可以考慮使用這組局部最佳解。

如果所做出的基因演算法並沒有找到一組好的答案，或是都沒達到上述所列的終止條件，可以試著改變基因演算法的一些參數，例如：族群大小、突變率、交配率，或是轉換基因演算法的編碼結構，由二位元基因演算法(binary genetic algorithms)轉換到實數值基因演算法(real-number genetic algorithms)，這裡所提的二位元基因演算法，指的就是將所要解決的問題其參數都先經過編碼以二位元的形式來進行基因演算法；而實數值基因演算法則是不對問題的參數經過編碼，直接對它進行基因演算法的運作來求出我們所要的最佳解，這兩種基因演算法，各有

其優缺點，主要就是要視所要解決的問題的特性與複雜度，來選擇較適當的一種來做基因演算法。舉例來說，如果我們所要解決問題的可能解答範圍是在一個很大的實數空間，而我們用二位元基因演算法來求最佳解，在起初編碼將實數轉換成二位元的時候可能就有一些誤差，而經過演化所得到的最佳解也是二位元的形式，再將它經由解碼轉回實數的形式，可能也會造成一些誤差，也就是問題真正的最佳解可能並非是我們用二位元基因演算法找出來的。因此要根據所針對的問題本身，先了解其特性與複雜度，選擇一個最適合的基因演算法，來找出我們所要的最佳解。



第四章 最佳中繼站佈放位置下的中繼站輔助之蜂巢式系統效能

本章首先會對於我們所要探討的中繼站輔助的蜂巢式系統環境(System Model)做介紹，然後針對系統的下載部分，說明我們如何利用基因演算法來搜尋出最佳的固定式中繼站佈放位置，並且在觀察在此最佳佈放位置下，對於系統究竟有哪些方面的改進；接下來，根據所找出的最佳位置，我們另外探討系統上載部分，在有中繼站幫助轉傳下，又有哪些效能得到改善。

4-1 系統模型(System Model)

我們所觀察的系統環境是一個包含一個基地台(BS)、行動裝置(MSs)與若干個無線的固定式中繼站(RSs)的無線網路架構，圖 4-4.1 顯示我們所考慮的系統架構圖，從圖中可以知道，基地台是位於細胞的中心點，有 N 個中繼站分布在細胞中用來增進網路的效能，其中 R 表示細胞的半徑， \vec{r}_j 代表第 j 個中繼站 RS_j 的位置向量(position vector)，而 \vec{m} 則表示行動裝置的位置向量，我們假設此行動裝置是均勻的座落在細胞的範圍 Ω 中。

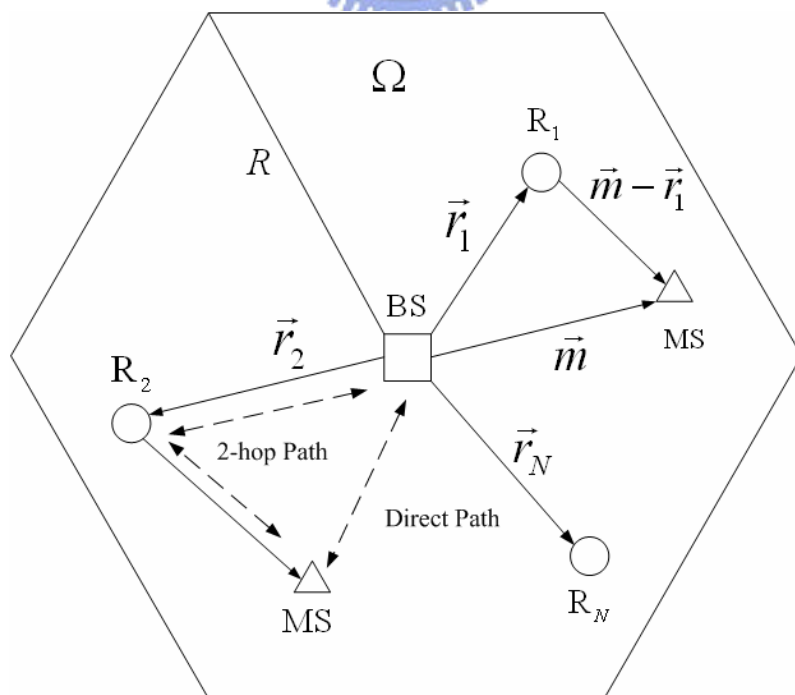


圖 4-1.1 系統架構示意圖

在此系統中，中繼站是操作在解碼遞送式(decode-and-forward)的模式下，並且使用與基地台在相同頻帶上的一樣的無線傳輸技術，所有的基地台、中繼站與行動裝置都配置一個 RF 無線電收發機(transceiver)，而且都是使用全方向的天線(omni-directional antennas)，行動裝置可以透過 direct path 與基地台直接進行通訊，或是經由 2-hop path 透過中繼站轉傳來與基地台進行通訊，其中所說的 2-hop path 則包含 BS-RS link 和 RS-MS link 這兩段 link。我們假設正交的無線電資源(orthogonal radio resource)是分別地分配給 direct path 與 2-hop path，此外，2-hop path 此段路徑的無線資源更進一步被切割分配給 BS-RS link 和 RS-MS link。接下來，要對此一系統下所使用的傳輸路徑模型(propagation model)、基地台與中繼站功率設定(power setup)以及 RS-MS link 的頻率重複使用(frequency reuse)做較詳細的介紹。

Propagation model :

路徑衰減(path-loss)是我們在此系統中，主要考量的一種傳輸路徑損傷。我們採用了針對 suburban macro-cell environment 可視距(LOS)與非可視距(NLOS)這兩樣路徑衰減模型，式子 4.1 與 4.2 分別表示這兩樣 path-loss：

$$PL_{path}(d)_{dB} = 23.8 \log_{10}(d) + 41.9 \text{ dB} \quad (4.1)$$

$$PL_{path}(d)_{dB} = 40.2 \log_{10}(d) + 27.7 \text{ dB} \quad (4.2)$$

其中 $PL_{path}(d)_{dB}$ 是 path loss (in dB)，而 d 表示傳送端與接收端間的距離以公尺為單位，因為中繼站的天線可架設在高處，可得到較佳的位置來接收來自基地台的傳輸訊號，所以 LOS model 被 BS-RS link 所使用，另外 BS-RS link 和 RS-MS link 這兩段 link 則是使用 NLOS model。

Power setup of BS and RS :

我們會將使用者在細胞邊緣預先定義好的頻譜效益(spectral efficiency)的理論值用來設定基地台與中繼站的傳送功率。在有 path loss 的效應之下，一段 link 的 spectral efficiency 將是下列式子所表示[10]

$$S(d) = \log_2 \left(1 + \frac{P_T \cdot PL_{path}(d)}{N_0 + I_0} \right) \text{ bits/s/Hz}, \quad (4.3)$$

上式中的 p_T 是傳輸的功率頻譜密度(power spectral density, PSD)， N_0 則是

AWGN的PSD，此外此處的 $PL_{\text{path}}(d)$ 是已經由dB domain轉為linear domain的值。

我們令 S_{target} 為在細胞邊緣期望可以達到的spectral efficiency，然後根據(4.3)式，我們可以推導出基地台所需傳送的PSD， p_{BS} 為下

$$p_{\text{BS}} = \frac{(2^{S_{\text{target}}} - 1) \cdot N_0}{PL_{\text{path}}(R)} \text{ Watts/Hz} \quad (4.4)$$

相同地，在由中繼站所服務的情況下，也是要達到上面所描述的spectral efficiency，此時中繼站($\text{RS}_j, j=1,2,\dots,N$)所需傳送的PSD，就是以下所列的式子：

$$p_{\text{RS}_j} = \frac{(2^{S_{\text{target}}} - 1) \cdot N_0}{PL_{\text{path}}(R - \|\vec{r}_j\|)} \text{ Watts/Hz} \quad (4.5)$$

上式中的 $\|\vec{r}\|$ 意指向量 \vec{r} 的 Euclidean norm，這種功率設定的方式可以確保不管選擇哪條路徑(direct path or 2-hop path)來通訊都可以在細胞邊緣達到我們所期望的 spectral efficiency 以及在多細胞的環境(multi-cell environment)下對於其他細胞的有相同的干擾(interference)量。

Frequency reuse over RS-MS link :

從圖 4-1.1 可以清楚看出因為中繼站在空間上被分開有相當的距離，所以相同的無線資源(radio resource)在RS-MS link上是有機會被重複使用的，進而增加系統的spectral efficiency。利用頻譜重複使用這項優點，我們令在同一細胞中的中繼站(RSs)被分割成 $L \leq N$ 的群組(groups)，每一個group共用相同的無線資源，因此reuse pattern可以被簡單的定義成集合 $\mathbf{G} = \{G_i\}_{i=1}^L$ ，其中 $G_i = \{R_{j_i}\}$ 表是在第 i 群group中的中繼站集合(set of RSs)，我們可以清楚的知道 $\sum_{i=1}^L |G_i| = N$ ，其中 $|G_i|$ 指的就是 G_i 的cardinality，也就是在此集合中所佔的元素個數。

4-2 中繼站佈放位置的最佳化

接下來本節中，將詳細說明我們是在上節所提的系統設置下如何找出中繼站

最佳的位置。我們的目標是搜尋中繼站最好的佈放位置，讓它能夠將 downlink spectral efficiency 達到最大。根據此系統所要觀察末端使用者經歷品質(quality of end-user experience, QoE)的 criterion 為：“fixed-bandwidth” criterion，就是分配給使用者固定的頻寬，不管他是選擇 direct-path 或是 2-hop path 來傳輸資料都只能使用所給定的這段頻寬來進行傳輸。

4-2-1 目標函數(Objective Function)

令 $w_{B \rightarrow M}(\vec{m})$ 、 $w_{B \rightarrow R_j}(\vec{m})$ 與 $w_{R_j \rightarrow M}(\vec{m})$ 分別代表配置給 BS-MS、BS-RS 與 RS-MS 這三段 link 的每單位面積的頻寬(Hz/m²)，而 \vec{m} 就是使用者的所在位置向量，對於一個 frequency reuse pattern \mathbf{G} ，其關於該細胞中合計的頻寬(aggregate bandwidth)為下式：

$$W_{\text{cell}} = W_{\text{direct}} + W_{2\text{-hop}} \quad \text{Hz} \quad (4.6)$$

其中，

$$W_{\text{direct}} = \int_{\vec{m} \in \Omega_{\text{direct}}} w_{B \rightarrow M}(\vec{m}) \cdot dA \quad (4.7)$$

$$W_{2\text{-hop}} = \sum_{j=1}^N W_{B \rightarrow R_j} + \sum_{l=1}^L W_{R \rightarrow M, l} \quad (4.8)$$

上是右項的值又分別為

$$W_{B \rightarrow R_j} = \int_{\vec{m} \in \Omega_{R_j}} w_{B \rightarrow R_j}(\vec{m}) \cdot dA \quad (4.9)$$

$$W_{R \rightarrow M, l} = \max_{R_j \in G_l} \{W_{R_j \rightarrow M}\} \quad (4.10)$$

在這裡所討論的 Ω_B 與 Ω_{R_j} 分別是基地台和中繼站的服務覆蓋區域(coverage areas)，而且 $\{\Omega_B, \Omega_{R_1}, \dots, \Omega_{R_N}\}$ 是細胞範圍 Ω 的分割(partition)，此外，由 BS-MS、BS-RS 與 RS-MS 這三段 link 所提供的理論上的 throughput 分別為以下所列：

$$T_{B \rightarrow M}(\vec{m}) = w_{B \rightarrow M}(\vec{m}) \log_2 \left(1 + \frac{p_B \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{m}\|)}{N_0} \right) \quad \text{bps/m}^2 \quad (4.11)$$

$$T_{B \rightarrow R_j}(\vec{m}) = w_{B \rightarrow R_j}(\vec{m}) \log_2 \left(1 + \frac{p_B \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j\|)}{N_0} \right) \text{ bps} / m^2 \quad (4.12)$$

$$T_{R_j \rightarrow M}(\vec{m}) = w_{R_j \rightarrow M}(\vec{m}) \log_2 \left(1 + \frac{p_{R_j} \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)}{N_0 + I_0(\vec{m})} \right) \text{ bps} / m^2 \quad (4.13)$$

其中，

$$I_0(\vec{m}) = \begin{cases} \sum_{R_i \in G_k} p_{R_i} \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_i - \vec{m}\|), & \text{if } R_i \neq R_j, \text{ and } R_j \in G_k \\ 0 & \end{cases} \quad (4.14)$$

我們令 $T_{B \rightarrow R_j \rightarrow M}(\vec{m})$ 代表透過 R_j 來傳輸的 2-hop path 之 effective throughput，我們知道 $T_{B \rightarrow R_j \rightarrow M}(\vec{m}) = \min\{T_{B \rightarrow R_j}, T_{R_j \rightarrow M}\}$ ，而且在 Appendix A.1 中會說明當

$T_{B \rightarrow R_j \rightarrow M}(\vec{m}) = T_{B \rightarrow R_j}(\vec{m}) = T_{R_j \rightarrow M}(\vec{m})$ 時，將可以得到最高的 spectral efficiency，所以在細胞中總計的 throughput 將由下式表示：

$$T_{\text{cell}} = T_{\text{direct}} + \sum_{j=1}^N T_{2\text{-hop}, R_j} \quad \text{bps} \quad (4.15)$$

其中，

$$T_{\text{direct}} = \int_{\vec{m} \in \Omega_{\text{direct}}} T_{B \rightarrow M}(\vec{m}) dA \quad (4.16)$$

$$T_{2\text{-hop}, R_j} = \int_{\vec{m} \in \Omega_{R_j}} T_{B \rightarrow R_j \rightarrow M}(\vec{m}) dA \quad \text{bps} \quad (4.17)$$

對於我們所要觀察的“fixed-bandwidth” criterion，direct path 與 2-hop path 都是被分配到相同的固定頻寬，就是 $w_{\text{target}} = w_{B \rightarrow M}(\vec{m}) = w_{B \rightarrow R_j}(\vec{m}) + w_{R_j \rightarrow M}(\vec{m}) \forall \vec{m}$ 。

根據這樣的系統構想，我們的目標就是找出中繼站最佳的擺放位置 $\Upsilon \doteq \{\vec{r}_i\}_i^N$ 使得 system spectral efficiency 能夠最大，而下式指的就是 system spectral efficiency：

$$S_{\text{cell}} \doteq \frac{T_{\text{cell}}}{W_{\text{cell}}} \text{ bps/Hz} \quad (4.18)$$

很顯然地，關於 system spectral efficiency 的大小是取決於基地台與使用者之間的通訊是如何去選擇經由 direct path 或 2-hop path 來傳送訊息，在此論文中，

路徑選擇的策略(path selection scheme)是以 spectral efficiency 為依據(spectral efficiency based)來決定選擇的路徑。對於“fixed-bandwidth” criterion，在 spectral efficiency based selection 下，direct path 被選到的情況為

$$\frac{T_{B \rightarrow M}(\vec{m})}{W_{\text{target}}} \geq \frac{T_{2\text{-hop}}(\vec{m})}{W_{\text{target}}} \quad (4.18)$$

其中，

$$T_{2\text{-hop}}(\vec{m}) = \max_{R_j} \left\{ T_{B \rightarrow R_j \rightarrow M}(\vec{m}) \right\} \quad (4.19)$$

(4.19)式表示在多個中繼站位於同一細胞中提供服務時，使用者根據其所在的位置向量 \vec{m} ，選擇能提供它最大 throughput 的中繼站來接收資料時，其等效 2-hop path 的 throughput，之後再將此式代入(4.18)來決定使用者最後所選擇的傳輸路徑。

4-2-2 基因演算法的應用

經由前面的敘述，我們已經了解本論文中所要探討的系統模型與目標函數，接下來就是要介紹我們究竟是如何應用基因演算法來找出此系統模型下中繼站最佳的佈放位置。

為了簡化問題，首先我們將細胞的範圍切割成格子狀(grid)，這樣之後，我們就可以以總和(summation)的方式去逼近對整個細胞面積作積分，也就是當我們把切割的格子分的夠細時，我們所統計出來的系統效能，如上面所提的目標函數 system spectral efficiency，將十分接近真的對細胞中的每一點的 spectral efficiency 都做計算所算出的系統效能。緊接著就要根據我們的問題，來決定基因演算法的參數。

(a) 染色體的設定：

在此問題中，我們將每個中繼站的座標作為一組染色體的基因，並且我們是使用實數值的基因演算法，也就是中繼站的位置不需經過編碼成另一形式來代表基因，所以在此方式下，根據所要探討的 N 個中繼站的佈放位置所產生的染色體可以表示成

$$\text{Chromosome} = [\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_N]$$

(b) 初始族群：

我們會給定一個族群大小(population size) Λ ，意思是說基因演算法演化的每一代都會有 Λ 個染色體，所以對於初始的族群我們將會用一個隨機的數字

產生器，產生出第一代的 Λ 個染色體，這些染色體裡面的每個基因所代表的位置向量是不超出我們所探討的細胞半徑 R 的大小，並且因為我們是以 grid 的方式來簡化系統的模擬，所以產生出的中繼站位置距離都會將它以最近的整數值來代表。

(c) 選擇與進化：

在使用基因演算法尋找中繼站最佳擺放位置的過程中，我們是採用第三章所介紹的轉輪盤法來當作雙親選擇的方法，此方法是依據每個染色體的目標函數大小來決定它被選擇為雙親的機率，也就是其目標函數越大的染色體，被選為雙親的機率就越大，此機率就是由(3.1)式所表示。

在被選擇出來進行演化的雙親被決定後，我們會以均勻交配的運作來產生子代，圖 4-2-2.1 是我們的均勻交配的示意圖，而我們是將兩個雙親染色體的偶數基因做對調並且在對染色體中的每組基因都加上一個隨機的位置向量來產生出新的子代，會有加上隨機位置向量的這一動作，是因為要避免以實數值編碼來做基因演算法時，演化的過程會被少數的基因(或實數值)所支配，所以在經過交配後的每個基因上加了一個有著 zero mean 的隨機位置向量；由此我們可以看出二位元編碼與實數值編碼的差異，二位元編碼的染色體經過交配之後，其產生的子代染色體經由解碼後出來的數字是一個全新的數字，然而，實數值編碼的染色體經由交配後產生的子代，只是原本的實數在位置上做調換，並不會產生出不同於雙親原本基因的新數字，這也就是實數值編碼經由交配後，需要加上一個隨機產生有著 zero mean 的值來避開最後只被少數的相同基因所支配，而導致落入局部最佳解的情況。

接著就是突變的操作，我們會給定一個突變率 p_m ，對於要進行演化的每個染色體的每個基因以此機率來決定是否發生突變，一旦該基因發生突變，就用隨機的數字產生器產生一個新的位置向量來取代原本的基因。

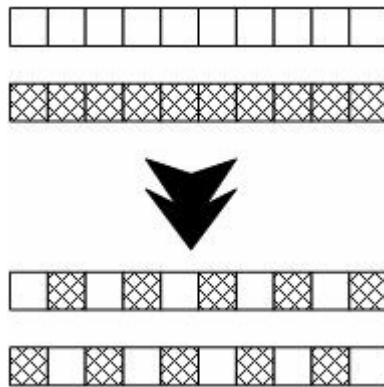


圖 4-2-2.1 均勻交配示意圖

因為根據不同的問題，基因演算法的操作與參數設定就會有所不同，以符合所要解決問題的情況，所以我們根據所要找的中繼站最佳擺放位置可以達到最大的 system spectral efficiency 問題下，經過多次的模擬以及參數的改變，決定出最適合我們研究問題的參數設定，而這些主要參數包括：族群大小(population size)、交配率(crossover rate)與突變率(mutation rate)。



第五章 中繼站輔助之蜂巢式系統上載效能的改善

從上一章中，我們介紹了本篇論文所要探討的系統模型，並且在此系統架構下，藉由基因演算法來幫助我們搜尋到在“fixed-bandwidth” criterion 下能讓下載的 system spectral efficiency 達到最高的中繼站最佳佈放位置。在本章中，我們將探討中繼站輔助的蜂巢式系統對於系統上載(uplink)的部份又會有哪些方面效能的改善。

5-1 功率節省的改善(Power Saving Improvement)

對於中繼站輔助之蜂巢式系統上載與下載效能改善的觀察，其實有很多效能方面的觀察點是相同的，例如：system spectral efficiency、throughput enhancement…等，也就是說對於上載與下載在這些效能方面的改善都是依樣可以觀察的，然而，對於系統上載部份有一項重要的效能觀察點是有別於系統下載的，那就是在系統上載時，在有中繼站幫忙轉傳下，對於使用者傳輸功率的消耗是否能夠有所減少。因為傳輸功率會隨著路徑長度而衰減，當使用者對基地台做資料上載時，若使用者附近有一中繼站可以幫忙轉傳，並且不會降低傳輸的品質下，使用中繼站來幫助上載傳輸，是有機會幫使用者節省傳輸功率的消耗，延長電池的待機時間。

在本節中，我們就是將要探討“fixed throughput” criterion，“fixed throughput” criterion 指的是說使用者不管位於細胞中的何處，它選擇 direct path 或是 2-hop path 來作上傳都能達到相同的 throughput，也就是在“fixed throughput” criterion 下，使用者究竟選擇哪條路徑來作上傳，可以比較節省平均的傳輸功率(average transmission power)，並且我們會分成兩種不同的 radio resource 分配方式來討論，第一種是對 radio resource 在時間上做分割來上載資料，就是所謂的 time division transmission，第二種是對 radio resource 在頻率上做分割來上載資料，就是 bandwidth division transmission。

基本上，在這邊討論的問題其系統架構是與第四章所定義的是相同的，並且我們會以上一章所找出中繼站的最佳佈放位置當做給定的中繼站位置，相當於已經給定了中繼站的位置之下，而且因為中繼站所使用的傳輸功率，與當初下載時的功率設定是相同的，就是在細胞邊緣維持一定的 spectral efficiency 所使用的功率設定，所以此時 RS-BS 此段 link 的 spectral efficiency 已經是固定的，與系統下載時的設定是相同的，我們來分析究竟在系統上傳的部份，有了中繼站來幫助

傳輸之下，系統效能的改善。

5-1-1 Time division transmission

以time division transmission來作為 2-hop path的傳輸方式，也就是在first link由使用者傳送資料給中繼站傳完之後，下一個時間再以second link經由中繼站將資料傳輸給基地台，這樣的傳輸方式之下我們來討論達到“fixed throughput” criterion的時候，我們令此要達到的每單位面積throughput為 $T(\text{bps}/\text{m}^2)$ ，而且限制進行資料上傳的使用者最多可以使用的每單位面積頻寬為 W ，此時使用者在怎樣的情況下選擇由中繼站來服務，可以節省平均的傳輸功率。

首先我們針對 direct path 來分析，對於 MS-BS 此段 link 理論值的上載 through 為(5.1)式所表示：

$$\begin{aligned}
 T &= T_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m}) \\
 &= w_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m}) \cdot S_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m}) \\
 &= w_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m}) \log_2 \left(1 + \frac{P_{t_mb}(\vec{m}) \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{m}\|)}{N_0 \cdot w_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m})} \right) \text{ bps}/\text{m}^2
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

將此式經由轉換，此處 $P_{t_mb}(\vec{m})$ 指的是每單位面積的功率(Watt/ m^2)而非 PSD，我們可以得到達到每單位面積throughput T 時使用者所需的傳輸功率(5.2)式：

$$P_{t_mb}(\vec{m}) = \left(2^{\frac{T}{w_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m})}} - 1 \right) \cdot \frac{N_0 \cdot w_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m})}{PL_{\text{path}}(\|\vec{m}\|)} \text{ Watt}/\text{m}^2 \tag{5.2}$$

因為對於使用者而言，他最多可以使用的每單位面積頻寬為 W ，也就是 $0 < w_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m}) \leq W$ ，我們必須決定 $w_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m})$ 應該為何值時，可以令該使用者經由 direct path 傳送資料時，所使用的傳輸功率(5.2)式是最小的，經由 Appendix A.2 使用的 KKT condition 的驗證，我們可以得知，當 $w_{\text{M} \rightarrow \text{B}}(\vec{m}) = W$ 時，所需使用的每單位面積傳輸功率 $P_{t_mb}(\vec{m})$ 是最小的，將此結果代入(5.2)式，就是使用者以

direct path 作上載時，達到每單位面積 throughput T 所需的最小傳輸功率：

$$P_{t_mb}(\vec{m}) = (2^{\frac{T}{W}} - 1) \cdot \frac{N_0 \cdot W}{PL_{\text{path}}(\|\vec{m}\|)} \text{ Watt} / m^2 \quad (5.3)$$

接下來我們要分析 2-hop path 達到 throughput T 所需的每單位面積最小功率，因為在此處的 2-hop path 是用 time division transmission，所以 2-hop path 等效的 throughput 為下式：

$$T = T_{M \rightarrow R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = \frac{1}{\frac{1}{T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})} + \frac{1}{T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})}} = \frac{T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \cdot T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}{T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})} \text{ bps} / m^2 \quad (5.4)$$

其中，

$$\begin{aligned} T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) &= w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \cdot S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \\ &= w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \log_2 \left(1 + \frac{P_{t_mr_j}(\vec{m}) \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)}{N_0 \cdot w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})} \right) \text{ bps} / m^2 \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = w_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) \text{ bps} / m^2 \quad (5.6)$$

(5.5)式 $P_{t_mr_j}(\vec{m})$ 的是指使用者經由 2-hop path 作上載時的每單位面積傳輸功率而非 PSD，此時 MS-RS 與 RS-BS 兩段 link 頻寬的分配仍須滿足我們的假設 $0 < w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \leq W$ 、 $0 < w_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) \leq W$ ，所以我們遇到類似 direct path 所面臨的問題，參考 Appendix B，我們可以得知當 $w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = W$ 與 $w_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = W$ 時，

$P_{t_mr_j}(\vec{m})$ 將會有達到 throughput T 所需的最小傳輸功率(5.7)式：

$$P_{t_mr_j}(\vec{m}) = (2^{\frac{T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})}{W}} - 1) \cdot \frac{N_0 \cdot W}{PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)} \text{ Watt} / m^2 \quad (5.7)$$

(5.7)式中的 $T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ 可以由(5.4)與(5.6)式代入 $w_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = W$ 經由適當的轉換而算出，因為此處使用 $P_{t_{mr_j}}(\vec{m})$ 來傳輸的時間只佔 $P_{t_{mb}}(\vec{m})$ 所用來傳輸時間的 $\frac{T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}{T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}$ ，所以 2-hop path 與 direct path 使用相同時間下使用者的每單位面積平均傳輸功率(average user transmission power)應為(5.8)式與(5.9)式：

$$P_{mr_j}(\vec{m}) = P_{t_{mr_j}}(\vec{m}) \cdot \frac{T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}{T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})} \text{ Watt/m}^2 \quad (5.8)$$

$$P_{mb}(\vec{m}) = P_{t_{mb}}(\vec{m}) \text{ Watt/m}^2 \quad (5.9)$$

由上述的結果，我們可以決定路徑的選擇，direct path 被選到的條件為

$$P_{mb}(\vec{m}) \leq P_{2\text{-hop}}(\vec{m}) \quad (5.10)$$

其中，

$$P_{2\text{-hop}}(\vec{m}) = \min_{R_j} \{P_{mr_j}(\vec{m})\} \quad (5.11)$$

因此我們可以決定出此細胞範圍內整體的使用者傳輸功率(aggregate user transmission power)為：

$$P = P_{\text{direct}} + \sum_{j=1}^N P_{2\text{-hop}, R_j} \text{ Watt} \quad (5.12)$$

其中，

$$P_{\text{direct}} = \int_{\vec{m} \in \Omega_B} P_{mb}(\vec{m}) \cdot dA \text{ Watt} \quad (5.13)$$

$$P_{2\text{-hop}, R_j} = \int_{\vec{m} \in \Omega_{R_j}} P_{mr_j}(\vec{m}) \cdot dA \text{ Watt} \quad (5.14)$$

最後在此細胞內平均每單位面積使用者傳輸功率 P_{cell} 可以(5.15)表示，其中 A 為此細胞的面積。

$$P_{\text{cell}} = \frac{P}{A} \text{ Watt/m}^2 \quad (5.15)$$

5-1-2 Bandwidth division transmission

在本小節中，我們也是觀察“fixed throughput” criterion (throughput 為 T)，在有中繼站幫忙轉傳下，對使用者究竟能夠節省多少的平均傳輸功率。此處不同於 5-1-1 的地方在於我們假設使用者使用固定的每單位面積頻寬 W 來傳送訊號不管是經由 direct path 或是 2-hop path，並且對於 2-hop path 的 radio resource 分配而言，是在頻寬上做分割來進行訊號的上載傳送，不同於上一小節是在時間上做切割來進行訊號的上載，在這些假設下，我們來觀察平均傳輸功率的使用情形。

首先針對 direct path，在使用固定的每單位面積頻寬 W 達到所要求的每單位面積 throughput 為 T 時，使用者應該使用的每單位面積平均傳輸功率與(5.3)式相同。對於 2-hop path 而言，因為我們固定使用每單位面積頻寬 W ，並且對於 MS-RS 與 RS-BS 兩段 link 是對 W 做分割來進行訊號上載，所以會有(5.16)的頻寬分配，另外，2-hop path 的 radio resource 分配是在頻寬上做分割，因此我們可以清楚地知道 2-hop path 等效的每單位面積 throughput 為(5.17)，分別由以下兩式表示：

$$W = w_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) + w_{R_j \rightarrow B}(\bar{m}) \text{ Hz/m}^2 \quad (5.16)$$

$$T_{M \rightarrow R_j \rightarrow B}(\bar{m}) = \min \left\{ T_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}), T_{R_j \rightarrow B}(\bar{m}) \right\} \text{ bps/m}^2 \quad (5.17)$$

其中，

$$\begin{aligned} T_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) &= w_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) \cdot S_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) \\ &= w_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) \log_2 \left(1 + \frac{P_{t_mrj}(\bar{m}) \cdot PL_{\text{path}}(\|\bar{r}_j - \bar{m}\|)}{N_0 \cdot w_{M \rightarrow R_j}(\bar{m})} \right) \text{ bps/m}^2 \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$T_{R_j \rightarrow B}(\bar{m}) = w_{R_j \rightarrow B}(\bar{m}) S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m}) \text{ bps/m}^2 \quad (5.19)$$

根據(5.17)我們得知 2-hop path 要達到等效的每單位面積 throughput T 必須要滿足： $T_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) \geq T$ and $T_{R_j \rightarrow B}(\bar{m}) \geq T$ ，才能夠達到我們的要求，因此我們必須要決定出 $T_{M \rightarrow R_j}(\bar{m})$ 與 $T_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$ 的值，可以使得經由 2-hop path 的使用者所需的

每單位面積傳送功率 $P_{t_{mr_j}}(\vec{m})$ 最小，類似前一小節使用 KKT condition 來驗證，最後的結果顯示當 $T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = T$ 與 $T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = T$ 時，會有最小的每單位面積傳送功率 $P_{t_{mr_j}}(\vec{m})$ 。

由上述的結果，我們將 $T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = T$ and $T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = T$ 代回到(5.5)與(5.6)用他們個別的 throughput 與 spectral efficiency 來表示頻寬，最後將此結果代回(5.16)式，經由整理之後我們可以得到 MS-RS 與 RS-BS 兩段 link 對於 W 的分割結果(5.20)與(5.21)，以及 $S_{M \rightarrow B}(\vec{m})$ 、 $S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ 和 $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$ 之間的關係式(5.22)。

$$w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = \frac{S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}{(S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}))} \cdot W \text{ Hz/m}^2 \quad (5.20)$$

$$w_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = \frac{S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})}{(S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}))} \cdot W \text{ Hz/m}^2 \quad (5.21)$$

$$S_{M \rightarrow B}(\vec{m}) = \frac{T}{W} = \frac{S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \cdot S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}{(S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}))} \quad (5.22)$$

最後我們就可以從(5.5)式回推出選擇 2-hop path 來上載訊號，並且達到每單位面積 throughput T 時，使用者所需的傳輸功率(5.23)

$$P_{t_{mr_j}}(\vec{m}) = (2^{\frac{T}{w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})}} - 1) \cdot \frac{N_0 \cdot w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})}{PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)} \text{ Watt} \quad (5.23)$$

此時把我們之前得出的結果(5.20)與(5.22)代入(5.23)中，便可以算出 $P_{t_{mr_j}}(\vec{m})$ ，因為在此種傳輸方式下，不管是經由 direct path 或是 2-hop path，使用者用 $P_{t_{mr_j}}(\vec{m})$ 或 $P_{t_{mb}}(\vec{m})$ 來上載訊號的時間都相同，所以相同時間的平均傳輸功率仍是此兩個值，相當於 $P_{mr_j}(\vec{m}) = P_{t_{mr_j}}(\vec{m})$ 而且 $P_{mb}(\vec{m}) = P_{t_{mb}}(\vec{m})$ ，由此便可決

定最後路徑的選擇，direct path被選到的條件為下列， P_{cell} 的定義同上一節。

$$P_{mb}(\vec{m}) \leq P_{2-hop}(\vec{m}) \quad (5.24)$$

其中，

$$P_{2-hop}(\vec{m}) = \min_{R_j} \{P_{mr_j}(\vec{m})\} \quad (5.25)$$

5-2 Spectral Efficiency 的改善

我們已在上一節中，分析了加上中繼站的幫助之下，對於進行上載的使用者能夠怎樣節省傳輸功率，而且維持相同的傳輸品質。本章則是要分析，中繼站輔助之蜂巢式系統對於上載的 spectral efficiency 相較於傳統只有基地台提供服務的蜂巢式系統能夠有多大的改善。

在這邊的系統模型，仍是與前面章節相同，我們同樣依據第四章所找到的中繼站最佳位置來擺放，因此隨著中繼站位置的給定，RS-BS此段link的spectral efficiency已經是固定的，只是我們會根據我們所要觀察的效能改善，在設定上做一些變更。在本節中，我們會固定使用者作上傳時的每單位面積平均傳輸功率，也就是不管使用者在細胞中的何處以及他選擇direct path或是 2-hop path來上傳資料，他所使用的每單位面積平均功率皆相同，在此處我們定義此固定每單位面積平均功率為 P_m ，我們同樣會用跟上一節所提針對 2-hop path以兩種不同的radio resource分配方式來進行資料上載，路徑的選擇以能達到較高的spectral efficiency為選擇的標準，就是所謂的spectral efficiency based selection。

5-2-1 Time division transmission

對於time division transmission就如同 5-1-1 所提到，first link由使用者傳送資料給中繼站傳完之後，下一個時間再以second link經由中繼站將資料傳輸給基地台，在本節中，我們是給定使用者固定的每單位面積平均傳輸功率 P_m ，而且固定進行資料上傳的使用者使用的每單位面積頻寬為 W ，此時在有中繼站來幫助資料轉傳下，可以對system spectral efficiency有多大的改善。

首先針對direct path而言，在給定每單位面積平均傳輸功率 P_m 以及使用每單位面積的頻寬 W 之後，我們可以由(5.26)式表示它上載時throughput的理論值，如下所示：

$$\begin{aligned} T_{M \rightarrow B}(\vec{m}) &= W \cdot S_{M \rightarrow B}(\vec{m}) \\ &= W \log_2 \left(1 + \frac{P_m \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{m}\|)}{N_0 \cdot W} \right) \text{ bps} / m^2 \end{aligned} \quad (5.26)$$

另外，對於 2-hop path 因為是 two phase transmission 的傳輸，所以 2-hop path 等效的 throughput 跟(5.4)相同，此時由於是使用固定的每單位面積頻寬，加上是 time division transmission，我們可以得知 MS-RS 與 RS-BS 兩段 link 都是使用 W 來做資料傳送，也就是 $w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = w_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = W$ ，將此結果代入下面所列的 MS-RS 與 RS-BS 兩段 link 上載 throughput 的理論值(5.27)與(5.28)，我們就能得到此兩段個別的 throughput，然後代回(5.4)就可求出 2-hop path 等效的 throughput。

$$\begin{aligned} T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) &= w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \cdot S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \\ &= w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \log_2 \left(1 + \frac{P_m \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)}{N_0 \cdot w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})} \right) \text{ bps} / m^2 \end{aligned} \quad (5.27)$$

$$T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = W \cdot S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) \text{ bps} / m^2 \quad (5.28)$$

最後就是路徑的選擇，使用 spectral efficiency based selection，就是選擇讓 spectral efficiency 較高的路徑來傳輸其 direct path 被選擇作為上載路徑的條件為：

$$\frac{T_{M \rightarrow B}(\vec{m})}{W} \geq \frac{T_{2\text{-hop}}(\vec{m})}{W} \quad (5.29)$$

其中，

$$T_{2\text{-hop}}(\vec{m}) = \max_{R_j} \{ T_{M \rightarrow R_j \rightarrow B}(\vec{m}) \} \quad (5.30)$$

因此在細胞內整體的 throughput(aggregate throughput)便可以(5.31)表示，另外，整體的頻寬消耗(aggregate bandwidth)由於在細胞內每個位置向量上都是消耗相同的頻寬所以可以(5.34)來表示，最後我們就定義出上載時的 system spectral efficiency(5.35)

$$T_{\text{cell}} = T_{\text{direct}} + \sum_{j=1}^N T_{2\text{-hop}, R_j} \text{ bps} \quad (5.31)$$

其中，

$$T_{\text{direct}} = \int_{\vec{m} \in \Omega_B} T_{M \rightarrow B}(\vec{m}) \cdot dA \text{ bps} \quad (5.32)$$

$$T_{2\text{-hop}, R_j} = \int_{\vec{m} \in \Omega_{R_j}} T_{M \rightarrow R_j \rightarrow B}(\vec{m}) \cdot dA \text{ bps} \quad (5.33)$$

$$W_{\text{cell}} = \int_{\vec{m} \in \Omega} W \cdot dA \text{ Hz} \quad (5.34)$$

$$S_{\text{cell}} \doteq \frac{T_{\text{cell}}}{W_{\text{cell}}} \quad (5.35)$$



5-2-2 Bandwidth division transmission

此小節探討的問題與上一小節基本相同，也是固定使用者的每單位面積平均傳送功率 P_m 以及使用固定的每單位面積頻寬 W 來上載訊號，讓使用者選擇有較高 spectral efficiency 的路徑來傳送訊號，以此來分析使用中繼站輔助傳輸下的效能改善，但與 5-1-1 主要的差別在於此處針對 2-hop path 的傳輸是對 radio resource 在頻率上做分配來進行資料傳送。

分析 direct path 此路徑的 throughput 與(5.26)式相同；接下來，考慮 2-hop path，因為我們對於每個使用者固定使用每單位面積頻寬 W ，並且對於 MS-RS 與 RS-BS 兩段 link 是對 W 做分割來進行訊號上載，所以會有與(5.11)相同的頻寬分配，另外，2-hop path 的 radio resource 分配只是在頻寬上做分割，2-hop path 等效的 throughput 與(5.17)相同，我們可以應用與 Appendix A.1 類似的證明，得到當 MS-RS 與 RS-BS 兩段 link 的 throughput 相同($T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$)時，會有最大的 2-hop path 等效 spectral efficiency，因此我們藉由這些結果也能夠推導出，MS-RS 與 RS-BS 兩段 link 對於 W 的分割情形，同(5.20)和(5.21)，得到這些

關係式之後，我們必須決定 $S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ (5.36) 與 $w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ (5.37) 來求出 MS-RS link 的 throughput $T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ ，因為它等同於 2-hop path 等效的 throughput。

$$S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = \log_2 \left(1 + \frac{P_m \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)}{N_0 \cdot w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})} \right) \quad (5.36)$$

$$w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = \frac{S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}{(S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}))} \cdot W \text{ Hz/m}^2 \quad (5.37)$$

將(5.37)代入(5.36)經化簡之後，我們可以得到(5.38)，此時我們必須去解(5.38)此一個 nonlinear equation，我們會採用數值分析的方法找出這個解，這邊使用了 Newton's Method。

$$S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = \log_2(a \cdot S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + b) \quad (5.38)$$

其中，

$$a = \frac{P_m \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)}{N_0 \cdot W \cdot S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})} \text{ and } b = \frac{P_m \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)}{N_0 \cdot W} + 1$$

在得到 MS-RS link 的 spectral efficiency $S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ 之後，我們就可把它代回到(5.37)式，可得 $w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ ，最後將此兩值相乘便是 2-hop path 等效的 throughput $T_{M \rightarrow R_j \rightarrow B}(\vec{m})$ 。

以 spectral efficiency based selection 來決定上載路徑，此時 direct path 被選擇的條件便如下表示，最後 system spectral efficiency 同上一小節：

$$\frac{T_{M \rightarrow B}(\vec{m})}{W} \geq \frac{T_{2\text{-hop}}(\vec{m})}{W} \quad (5.39)$$

其中，

$$T_{2\text{-hop}}(\vec{m}) = \max_{R_j} \{T_{M \rightarrow R_j \rightarrow B}(\vec{m})\} \quad (5.40)$$



第六章 系統模擬

本章的重點就是將第四章與第五章所要觀察的中繼站輔助之蜂巢式系統效能改善，經由適當的參數設定與模擬，將結果呈現出來。首先，在 6-1 節中我們會針對系統下載部份，使用基因演算法來找出中繼站最佳佈放位置，並呈現在此最佳位置的擺放下對系統效能提升的程度；6-2 節就是針對第五章所討論的部份，在給定由第四章所決定的中繼站佈放位置下，用模擬結果呈現系統效能改善的程度。

6-1 中繼站最佳佈放位置對系統下載效能的改善

一開始我們會對前兩章所提系統模型的參數作設定，同時也設定基因演算法對於此問題的主要參數：族群大小(population size)、交配率(crossover rate)與突變率(mutation rate)。

Cell radius R	2 km
Propagation model	(4.1)、(4.2)
Cell edge spectral efficiency S_{target}	0.5 bps/Hz
N_0	-174 dBm
w_{target}	1kHz/m ²
population size Λ	100
crossover rate p_c	0.6
mutation rate p_m	0.01

表 6-1.1 系統模型參數設定

從表 6-1.1 對系統模擬的參數設定之後，我們可以開始經由模擬來計算出在多了中繼站輔助傳輸之下相較於只有基地台提供資料傳輸服務的蜂巢式系統效能上的改善，我們在這邊會改變中繼站的數目，分別找出針對不同數目的中繼站最佳的佈放位置，並且統計此時中繼站距離細胞中心(相當於基地台位置)的平均距離 RS_d 以及距離細胞中心的最大距離 $\text{Max}(RS_d)$ 與最小距離 $\text{Min}(RS_d)$ ，這

些結果將由表 6-1.2 統計出來，在這邊的目標函數是(4.18)式所表示的 system spectral efficiency，所以下表所列的第二行指的就是在有中繼站輔助傳輸相較於只有基地台服務時 system spectral efficiency 的增益(gain)。

RS numbers N	System Spectral Efficiency Gain (%)	Gain per RS(%)	Min(RS_d) (m)	Max(RS_d) (m)	Average RS_d(m)
1	4.42	4.42	958	958	958
2	8.84	4.42	958	960	959
3	13.27	4.42	958	960	958
4	17.69	4.42	958	967	961
5	22.1	4.42	950	960	956
6	26.53	4.42	960	967	965
7	30.63	4.38	961	985	971
8	34.39	4.3	982	1009	994
9	37.6	4.18	1005	1050	1024
10	40.34	4.03	1020	1060	1047
11	42.69	3.88	1037	1093	1069
12	44.71	3.73	1056	1122	1086
13	46.48	3.58	1061	1128	1101
14	48.06	3.43	802	1284	1102

表 6-1.2 中繼站與基地台相差距離與效能改善統計表

緊接著我們將列出不同中繼站數目的情況下，在細胞範圍內每個位置上所感受到 spectral efficiency 的輪廓圖(contour)，圖中黑色的框線所包圍的範圍，代表每個中繼站服務的覆蓋區域，而且圖上黑色的小點就是代表中繼站所擺放的位置，將如下列出：

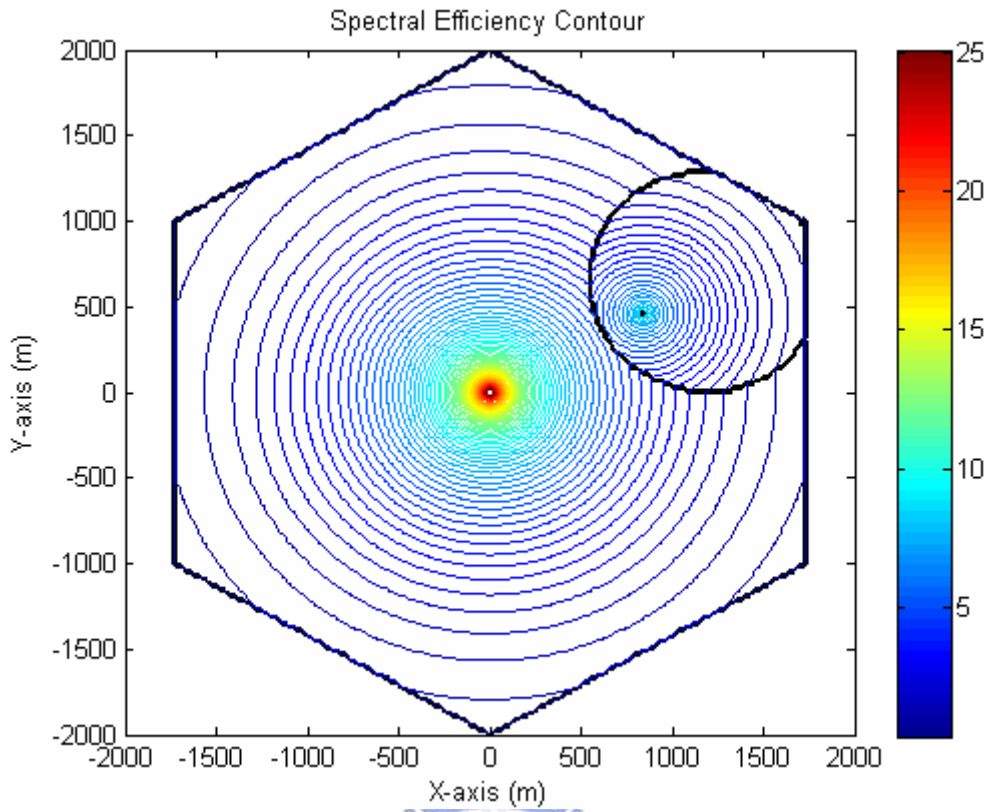


圖 6-1.1 Spectral Efficiency Contour for $N=1$

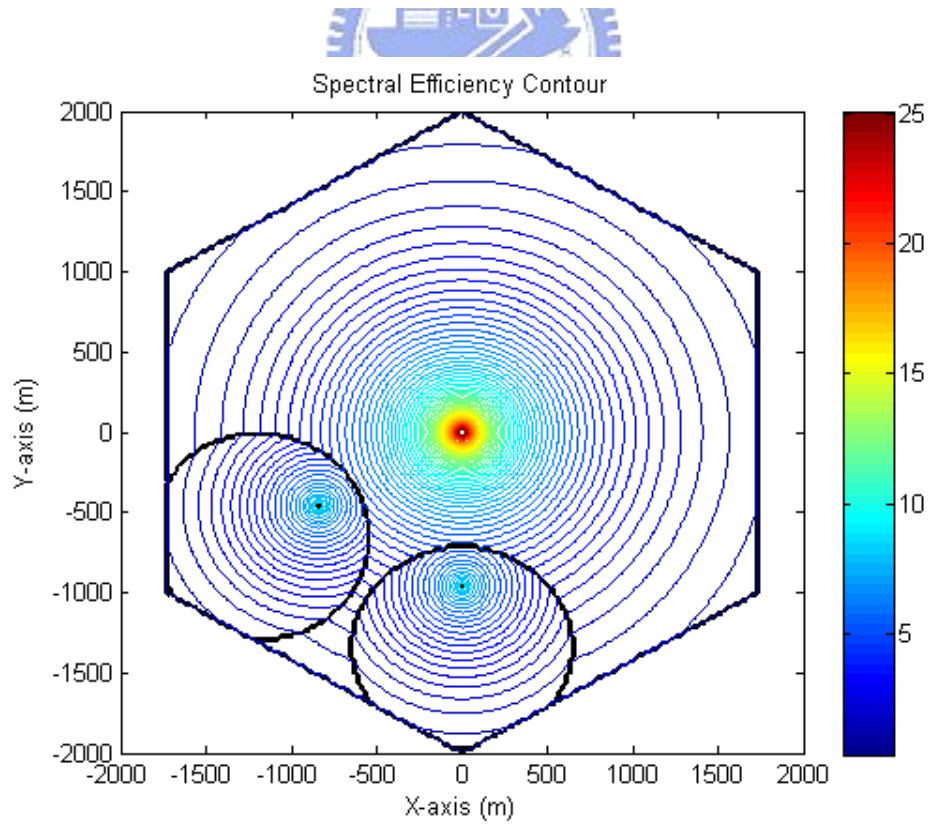


圖 6-1.2 Spectral Efficiency Contour for $N=2$

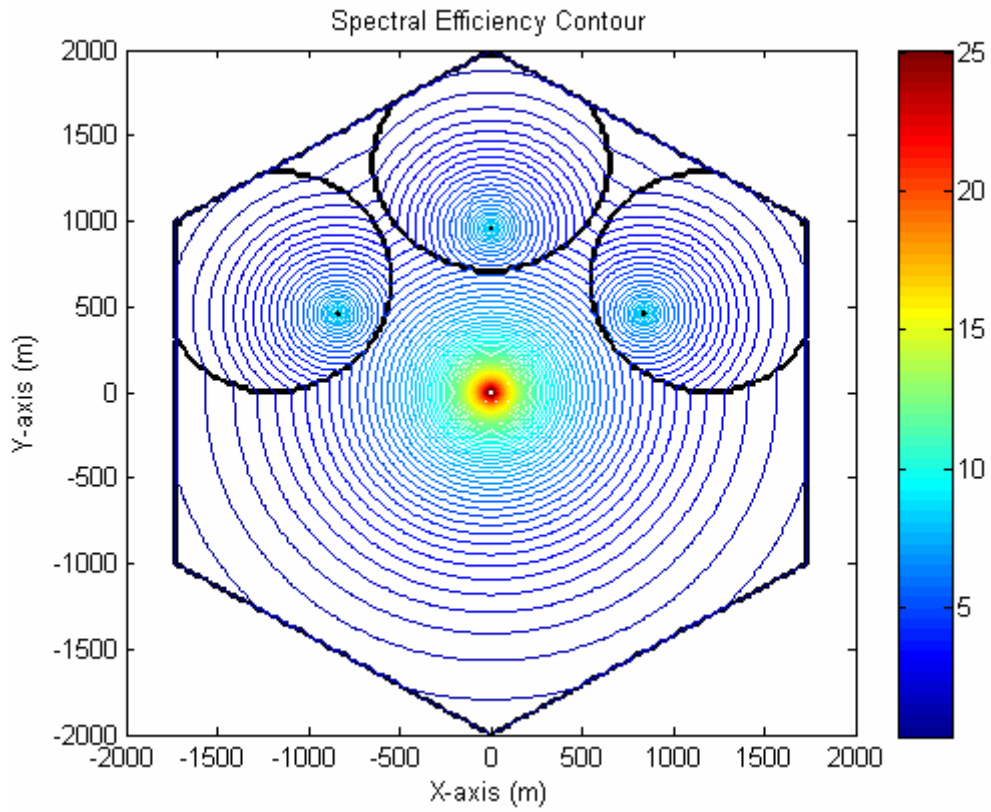


圖 6-1.3 Spectral Efficiency Contour for $N=3$

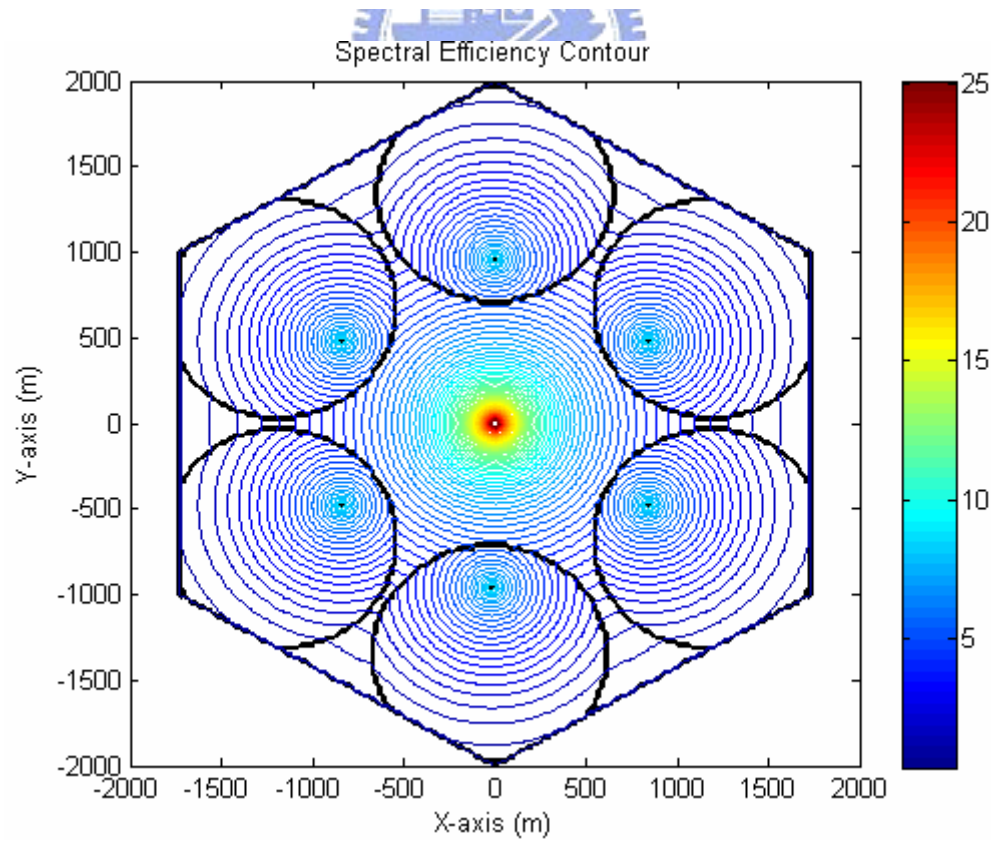


圖 6-1.4 Spectral Efficiency Contour for $N=6$

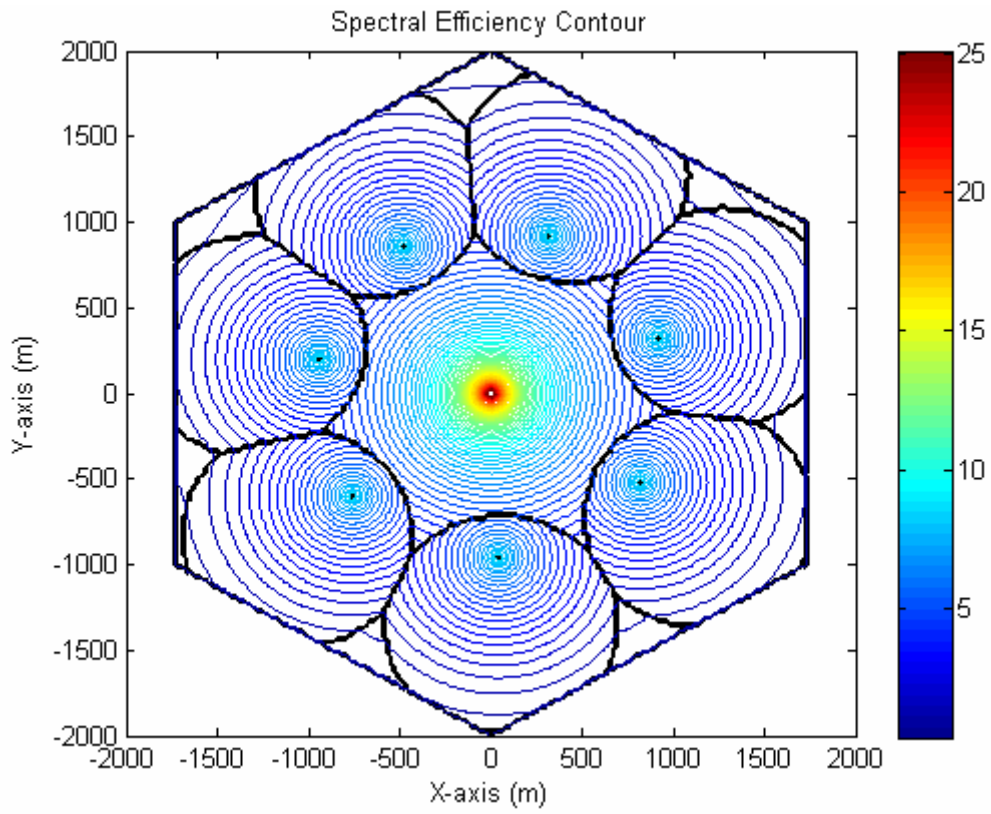


圖 6-1.5 Spectral Efficiency Contour for $N=7$

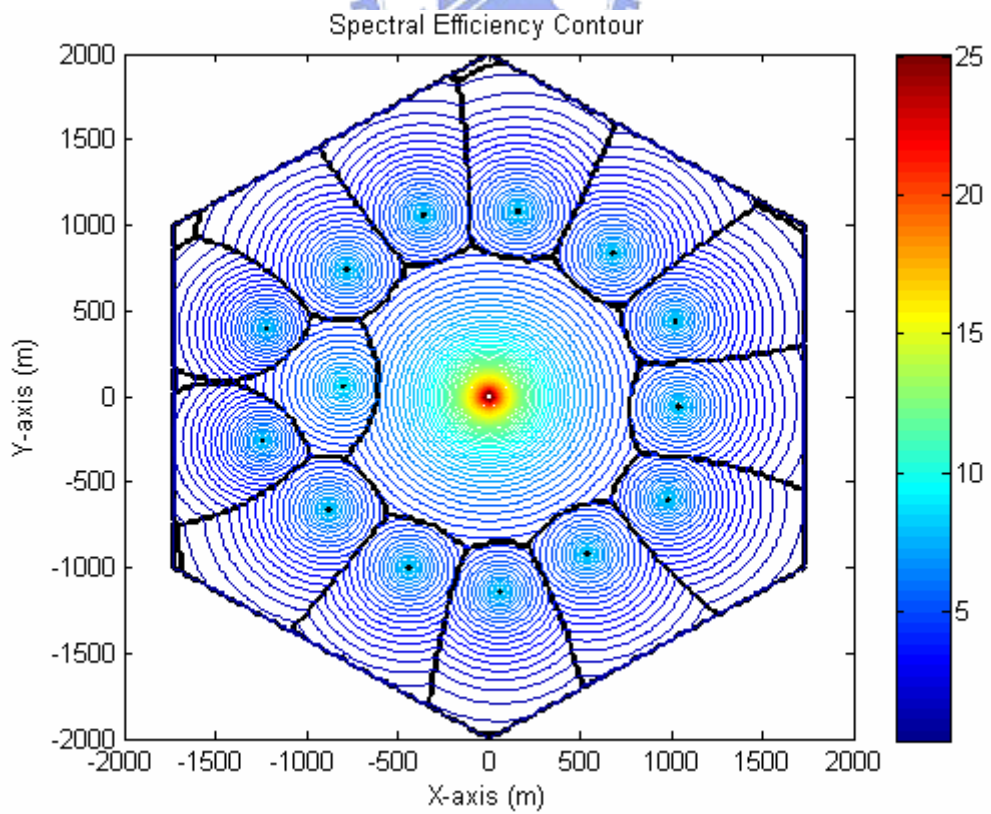


圖 6-1.6 Spectral Efficiency Contour for $N=14$

經由對表 6-1.2 以及上列的 spectral efficiency contour 的觀察，當中繼站的數目在 13 個以內，能使 system spectral efficiency 達到最大時，中繼站的最佳佈放位置基本上都是分佈在以細胞中心為圓心的同一圓上，差不多就是位於距離細胞中心一半的 R 上，而且當中繼站數目是 1~6 之間的時候，中繼站距離細胞中心的平均距離 average RS_d 大概就是 960m 左右，此時可以達到最大的 system spectral efficiency。

然而當中繼站數目繼續增加時($N>6$)，中繼站距離細胞中心的平均距離 average RS_d 開始隨著中繼站個數而增加，這是由於 $N\leq 6$ 時，不同的中繼站彼此的服務範圍彼此不會互相覆蓋(overlap)，所以中繼站的最佳擺放位置平均都落在 960m 左右；但當 $N>6$ 時，中繼站彼此之間的覆蓋區域開始會互相 overlap，我們可以從圖 6-1.5 和圖 6-1.6 看出，中繼站的服務範圍不再像 $N\leq 6$ 時是一個完整的圓，而是中繼站之間的服務範圍會開始互相擠壓，因此中繼站最佳的佈放位置在基因演算法的搜尋下，會趨向讓 average RS_d 擴大，來減少中繼站之間互相 overlap 的區域，最後使得 system spectral efficiency 達到最大。這邊所探討的情況，從表 6-1.2 的第二和三行也可以反應出來，就是當 $N>6$ 時，隨著中繼站數目的增加，對於 system spectral efficiency 改善的幅度開始減少，換句話說，中繼站數目的增加，還是會令系統整體的 system spectral efficiency 逐漸增加，但是增益的程度會逐漸的變小。

另一個，值得觀察的重點是當 $N>13$ 時，從表 6-1.2 的 $N=14$ 還有圖 6-1.6 可以發現，中繼站的最佳佈放位置已經不再是每個中繼站都是均勻的落在以細胞中心為圓心的同一圓上，而是中繼站開始有彼此交錯的擺放位置出現。

6-2 中繼站輔助之蜂巢式系統上載效能的改善

本節主要就是針對第五章所要觀察的系統效能改善，經由適當的參數設定與系統模擬，來看出有了中繼站的幫助下，對於系統上載效能的改善程度，我們會依照第五章討論的順序來觀察模擬結果。

6-2-1 功率節省的改善(Power Saving Improvement)

這邊主要的參數設定將如下表 6-2.1 所表示，因為對於系統上載而言，使用者所使用的傳輸功率必須有所限制，否則傳輸功率用的太大將會危害到使用者的健康，因此此處會限制使用者最大的傳送功率(maximum user transmission power

constrain)，當使用者為了達到每單位面積 throughput T 但卻得使用超過此最大限制傳輸功率，此時就會發生 Outage。

Fixed throughput T	14.25 kbps/m²
Allocation bandwidth W	28.5 kHz/ m²
Maximum user transmission power constrain	26 dBm

表 6-2-1.1 系統上載參數設定

此處同 5-1 節會分 time division transmission 與 bandwidth division transmission 兩種傳送方式，模擬結果則是會改變 RS-BS link 的 spectral efficiency 來看對系統效能的影響，包含 average user power saving percentage(PS)、中繼站與基地台個別的服務範圍比例以及 outage probability。此外，根據相同的 $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$ 下，針對上載時可以選擇最佳路徑傳輸和選擇與下載時相同的路徑來做資料上載兩種 case，比較其系統效能的差異。

Time division transmission：模擬結果如下所列

$N=6$

PS(%)	0	27.63	87.66	94.67
BS service area ratio (%)	100	34	10	8
RS service area ratio (%)	0	66	90	92
Outage probability (%)	1.66	1.66	0	0
$S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$ (bps/Hz)	0.5	0.54	0.6	1

表 6-2-1.2 系統上載效能改善統計表

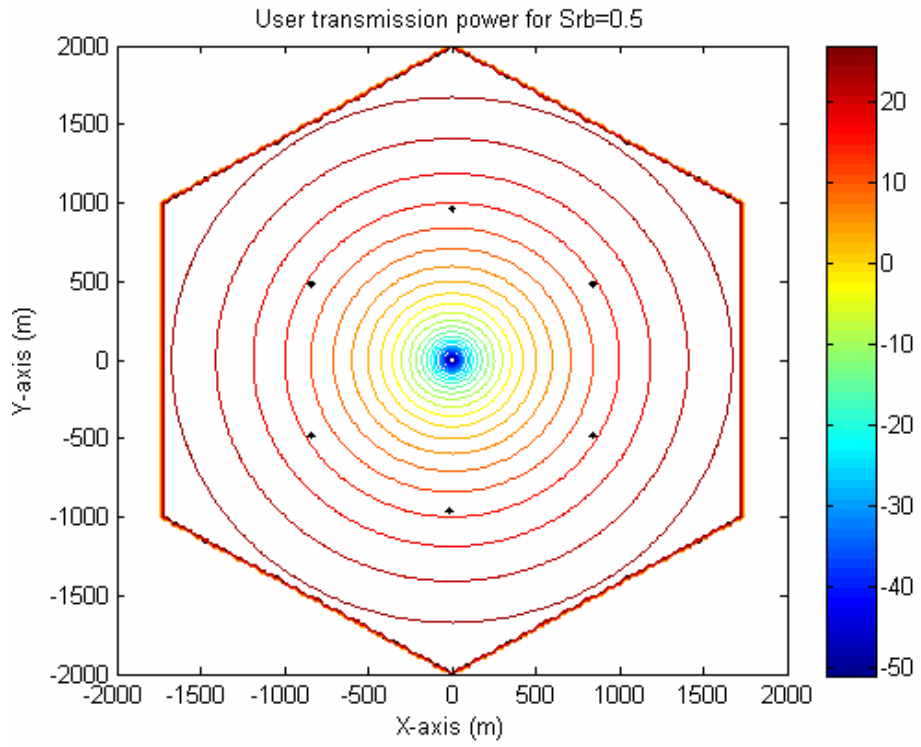


圖 6-2-1.1 User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=0.5$

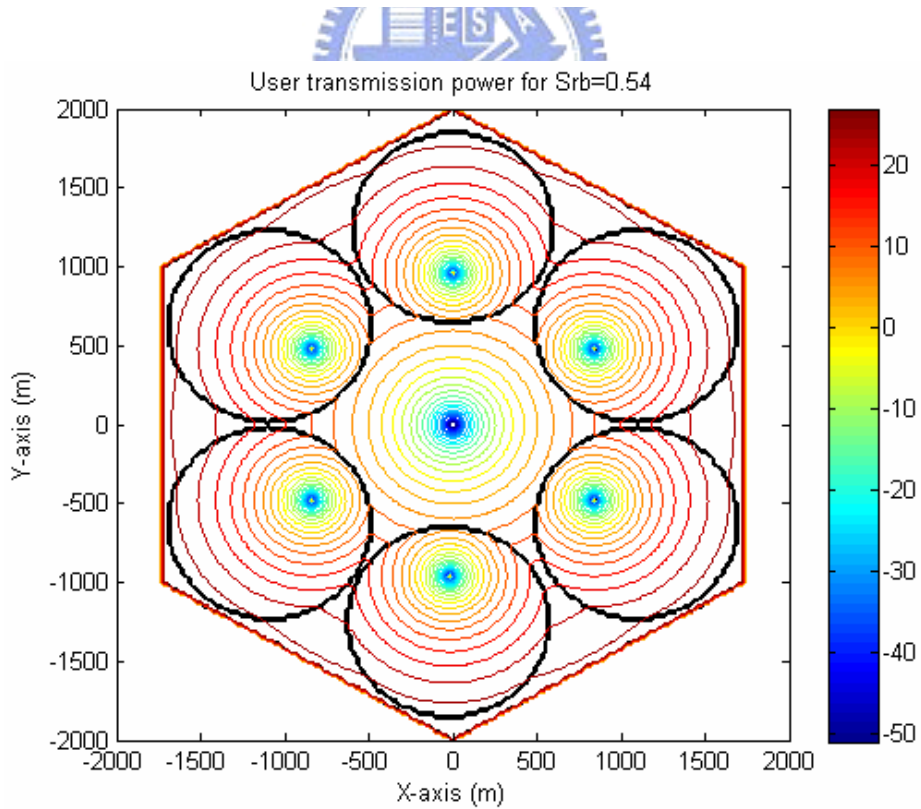


圖 6-2-1.2 User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=0.54$

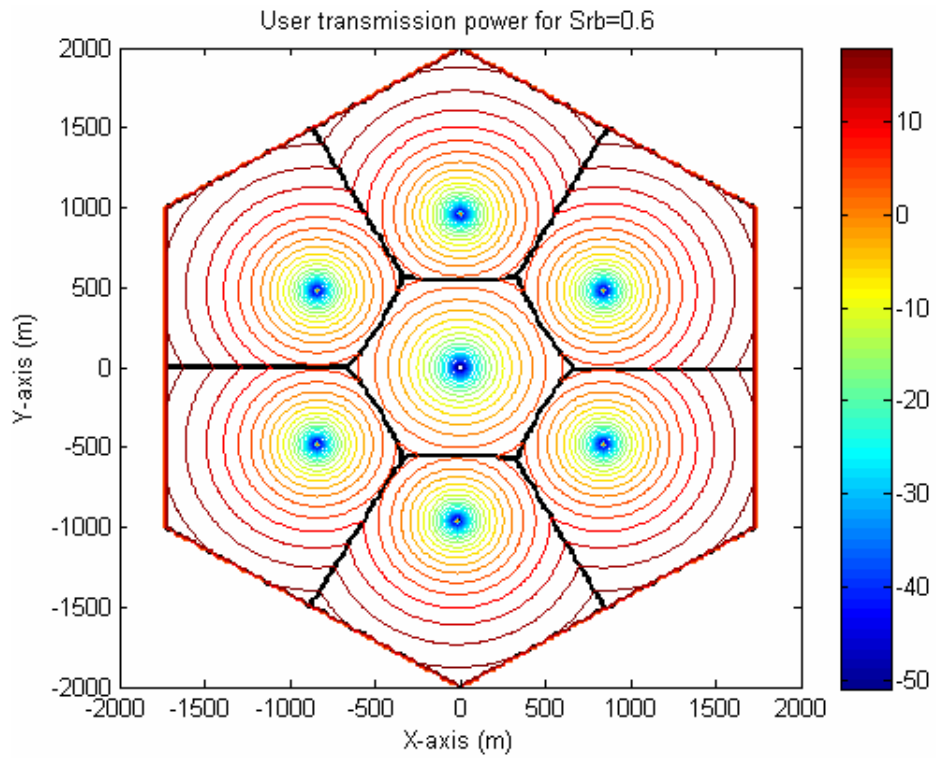


圖 6-2-1.3 User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=0.6$

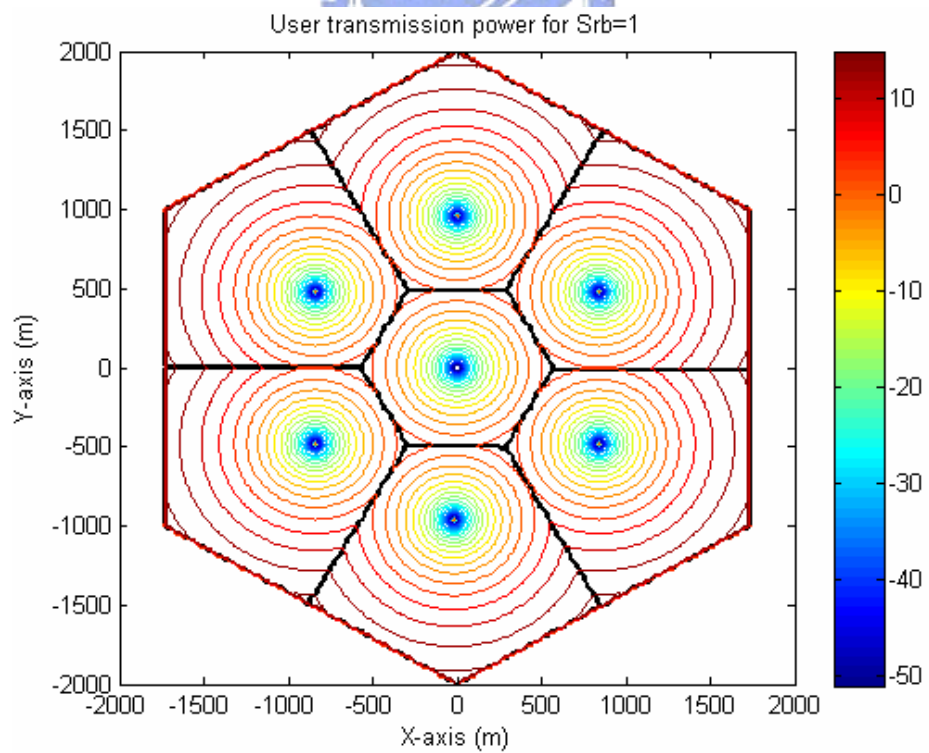


圖 6-2-1.4 User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})=1$

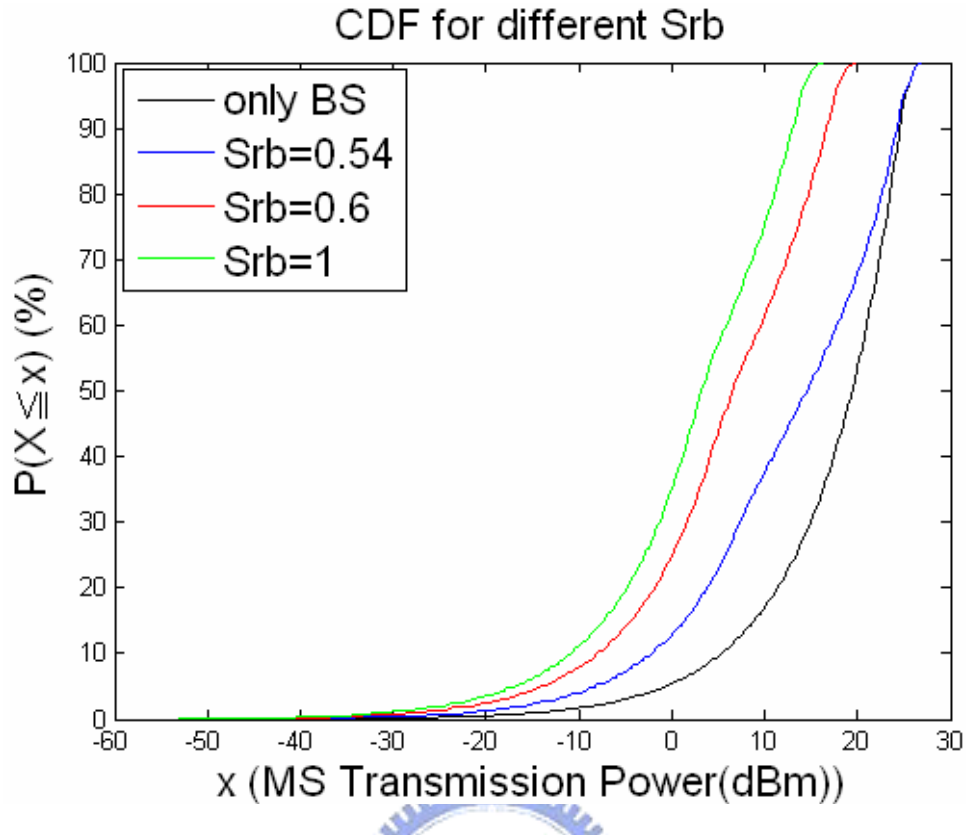


圖 6-2-1.5 CDF for different $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$

上面的輪廓圖裡的黑色框線是用來將中繼站與基地台服務的覆蓋區域劃分開來，其中黑色的小點為中繼站所在位置，並且從上列的模擬圖，可以很清楚的知道隨著 $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$ 的增大，中繼站所覆蓋的範圍也有所增加，意味著 RS-BS link 的傳輸品質越好時，選擇 2-hop path 來進行資料上載的使用者增多，因為此時使用者既可以達到與 direct path 相同的傳輸品質又能節省更多的平均傳輸功率，而且同時也使得發生 Outage 的機率下降，由此可見在有中繼站輔助傳輸的情況下，對於系統效能是有顯著的改善。圖 6-2-1.5 是使用者針對不同 $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$ 下，使用者傳輸功率的 CDF 圖，當 $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$ 越大，CDF 的曲線就越往左移，表示節省使用者平均傳輸功率的程度越明顯。另外，我們可以發現當 $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$ 大到某種程度之後，對於平均傳輸功率的改善將會趨向飽和，也就是 PS 會趨於一定值，這我們可以由以下的推導來說明。

$$\because T = T_{M \rightarrow R_j \rightarrow B}(\bar{m}) = \frac{T_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) \cdot T_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})}{T_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) + T_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})}$$

$$PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|) = k_2 \cdot (\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)^{-\alpha_2}, \quad PL_{\text{path}}(\|\vec{m}\|) = k_2 \cdot \|\vec{m}\|^{-\alpha_2}$$

$$\text{when } S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) \rightarrow \infty \Rightarrow T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) = S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) \cdot W \rightarrow \infty$$

$$\Rightarrow T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m}) \gg T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) \Rightarrow T \cong T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$$

$$\Rightarrow P_{mr}(\vec{m}) = (2^{\frac{T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})}{W}} - 1) \cdot (\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)^{\alpha_2} \cdot \frac{N_0 \cdot W}{k_2} \cdot \frac{T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}{T_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) + T_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})}$$

$$P_{mb}(\vec{m}) = (2^{\frac{T}{W}} - 1) \cdot \|\vec{m}\|^{\alpha_2} \cdot \frac{N_0 \cdot W}{k_2} \quad (6.1)$$

$$\Rightarrow P_{mr}(\vec{m}) = (2^{\frac{T}{W}} - 1) \cdot (\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)^{\alpha_2} \cdot \frac{N_0 \cdot W}{k_2} \quad (6.2)$$

經由上列的推導，我們可以最後的結果(6.1)和(6.2)看出，當 $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$ 很大時，最後達到相同 throughput T 時 direct path 或 2-hop path 所需使用者的平均傳輸功率只差別在距離的遠近，也就是路徑的選擇只取決於使用者與中繼站還有基地台之間的距離，因此 direct path 被選擇的條件為：

$$\|\vec{m}\| \leq d_{2\text{-hop}}(\vec{m}) \quad (6.3)$$

其中，

$$d_{2\text{-hop}}(\vec{m}) = \min_{R_j} \{\|\vec{r}_j - \vec{m}\|\} \quad (6.4)$$

這個結果，我們分別由以下所列的兩個圖可以看出，圖 6-2-1.6 顯示當 $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$ 夠大時，路徑的選擇就只是取決於使用者與服務站的距離，所以最後中繼站與基地台服務範圍的劃分就是以彼此的中垂線來分割，圖 6-2-1.7 表示 $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$ 越來越大時，會開始趨於一條漸近線，也就是對 average power saving

的改善會達到飽和。

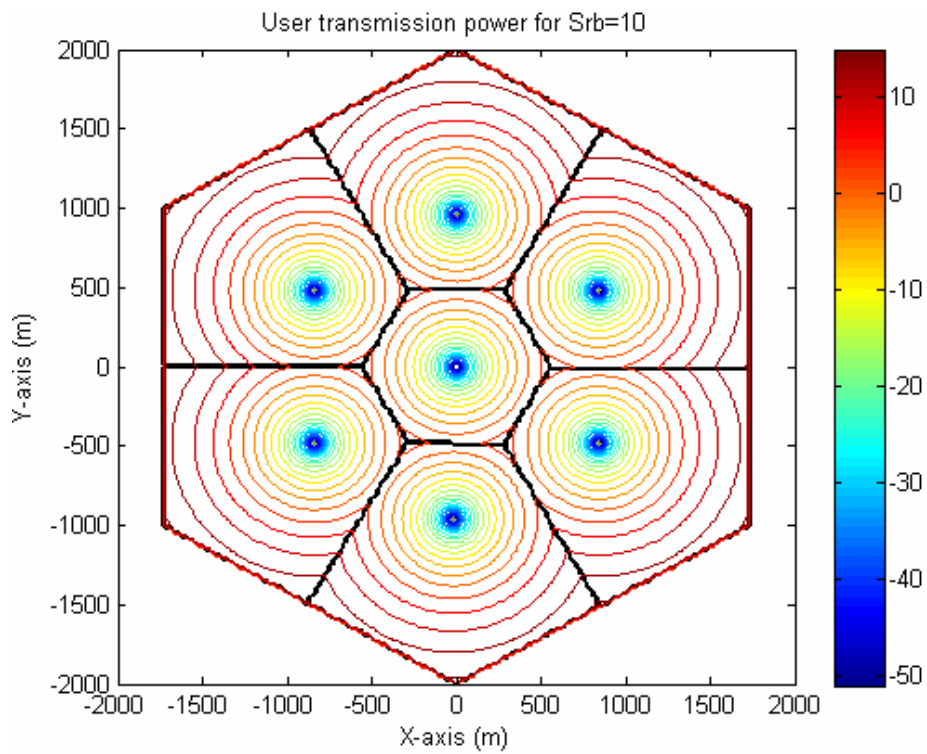


圖 6-2-1.6 User Transmission Power Contour for $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})=10$

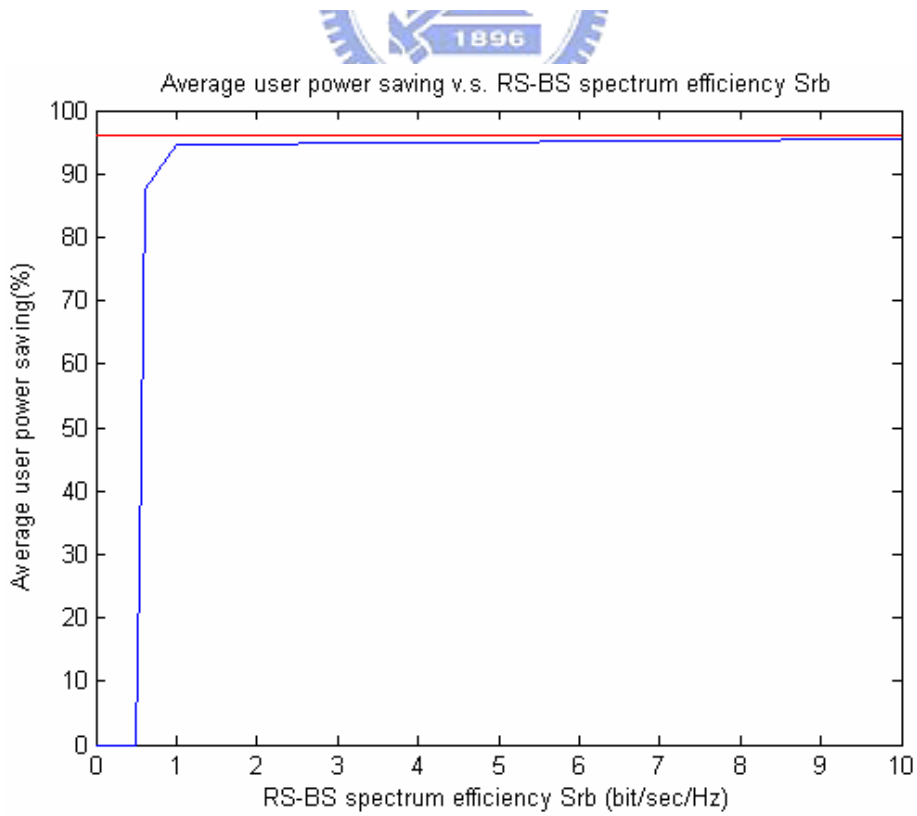


圖 6-2-1.7 PS v.s. $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$

緊接著，此處要將不同路徑選擇方式(different path selection scheme)下，系統上載效能改善的模擬結果展示出來，路徑選擇方式分為兩種：a)選擇讓使用者最省平均傳輸功率的路徑上載(with optimum UL path)和 b)選擇與下載時相同的路徑來上載資料(with the same DL path)，這兩種路徑選擇方式下對系統效能改善的統計將以表 6-2.2 列出，圖 6-2-1.8 與圖 6-2-1.9 為個別的用户 Transmission Power Contour，而圖 6-2-1.10 則是平均傳輸功率的 CDF 比較圖。

	optimum UL path	the same DL path
PS(%)	95.54	81.01
BS service area ratio (%)	7.85	29.88
RS service area ratio (%)	92.15	70.12
Outage probability (%)	0	0.06
$S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m})$ (bps/Hz)	10.7	10.7

表 6-2-1.3 系統上載效能改善統計表 for different path selection scheme

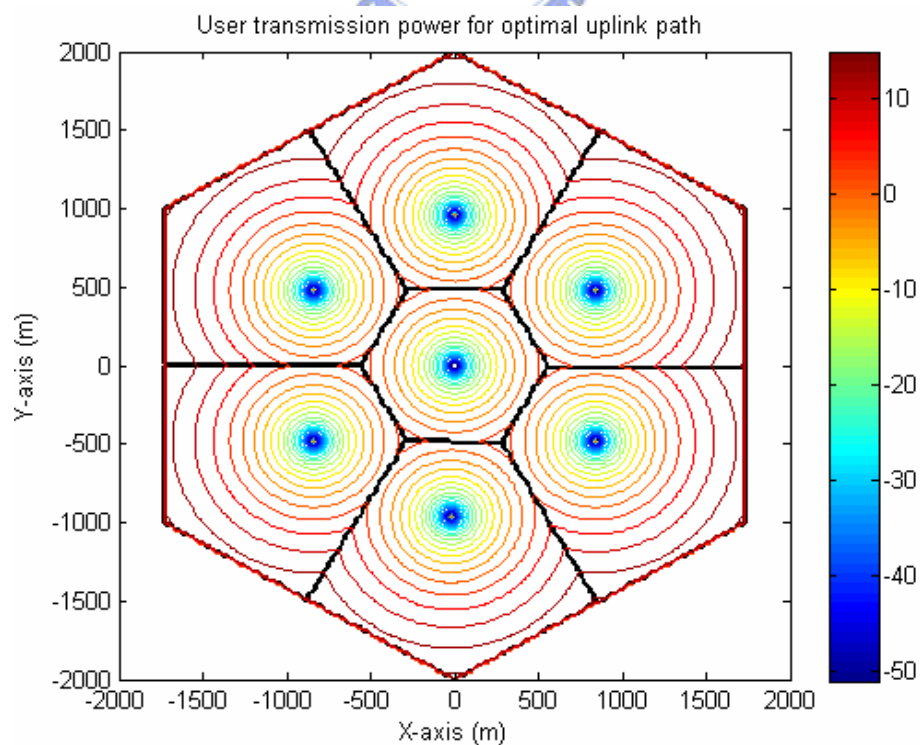


圖 6-2-1.8 User Transmission Power Contour for optimum UL path scheme

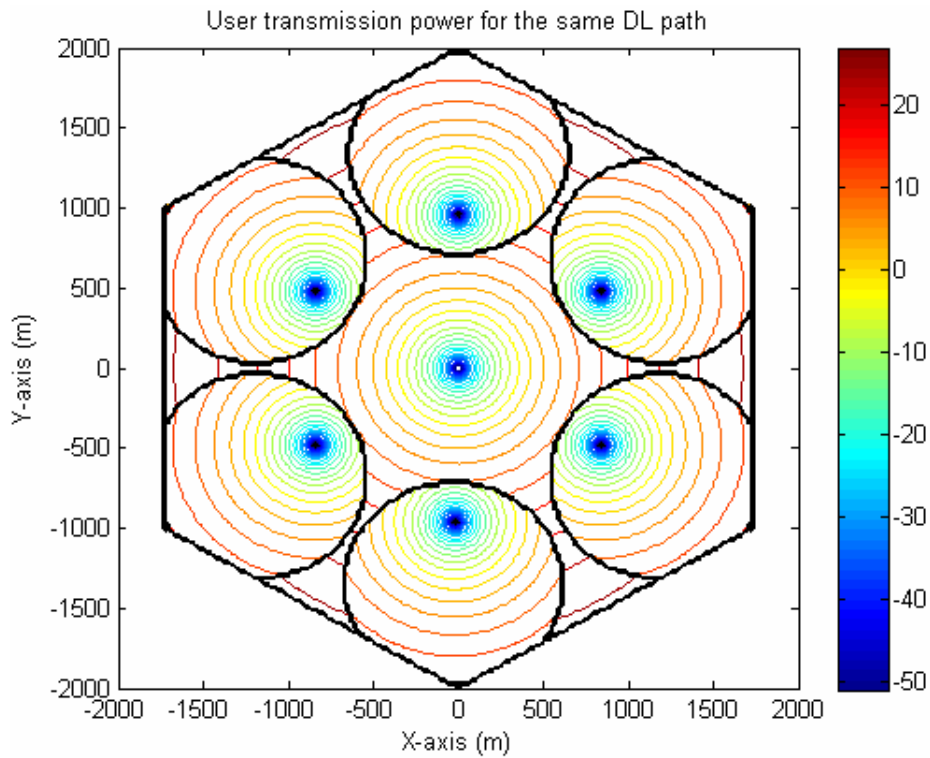


圖 6-2-1.9 User Transmission Power Contour for the same DL path scheme

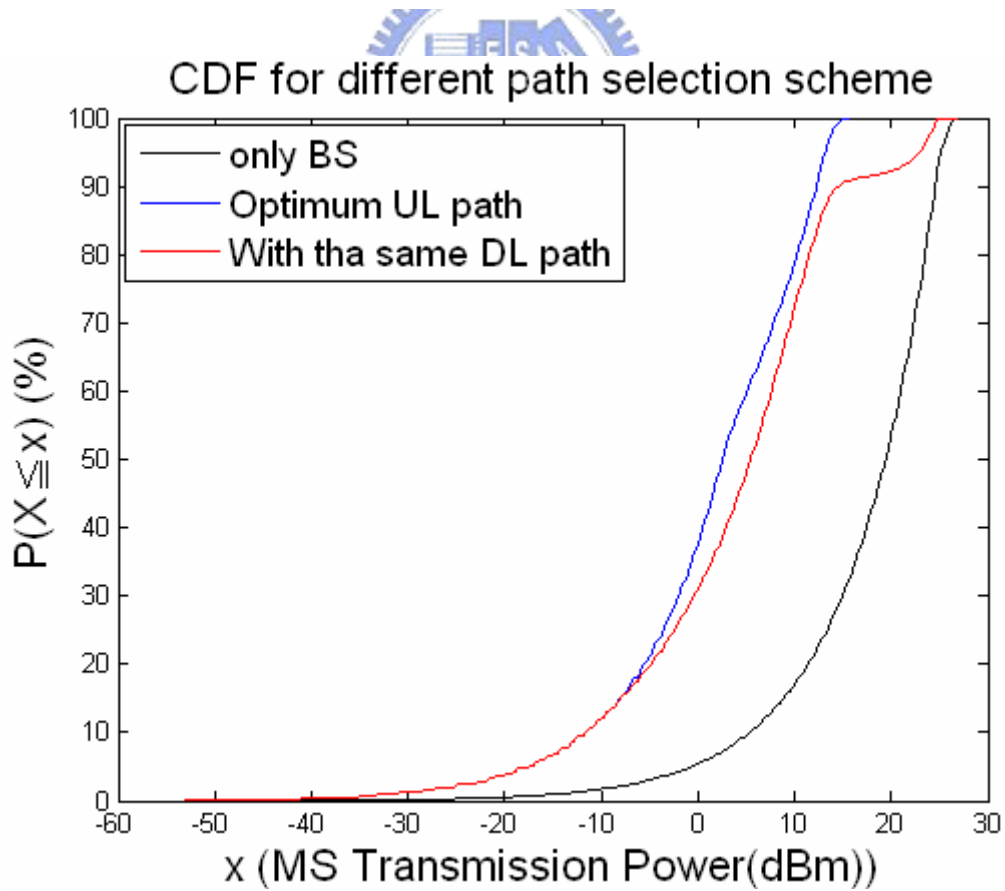


圖 6-2-1.10 CDF for different path selection scheme

由上列的圖可以觀察到 optimum UL path scheme 能讓平均傳輸功率節省的程度最大，而 the same DL path scheme 雖然也是能夠幫助節省平均傳送功率，但是增益的幅度就沒那麼大，這是因為我們使用與 DL 時相同的傳輸路徑，它並不能增對我們所要改善的效能(平均傳送功率)去做最佳化，也因為此關係選擇 the same DL path scheme 下，中繼站服務的範圍也與當初下載時相同才會有圖 6-2-1.9 的結果，此圖中在細胞邊緣的區域大部分都是由基地台所服務，而位於細胞邊緣的使用者要達到相同的 throughput T 所需的傳輸功率相對的也較大，所以才會有圖 6-2-1.9 中 the same DL path scheme 的 CDF 曲線在高 user transmission power 的地方是往右貼近只有基地台服務的黑色 CDF 曲線。

Bandwidth division transmission : 我們可以從第五章分析的結果中發現，兩種不同 radio resource 分配的傳送方法，其最後決定路徑選擇的條件(5.10)和(5.24)裡面所代表的值是完全相同的，這個結果只要將分析過程中的式子經過適當的代入與轉換就可證實，因此在以頻率分割的傳送方式下的模擬結果，與上面描述的 time division transmission 的模擬結果是完全相同的，此處的模擬結果就不再重複，只須參考上面的結果即可。

6-2-2 Spectral Efficiency 的改善



本節所要觀察的系統模擬結果就是 5-2 節中所討論的東西，這邊主要的參數設定是 W 與 P_m ，其中 W 與表 6-2-1.1 相同，本節主要觀察的方向為給定幾組不同的 P_m 觀察在有中繼站輔助傳輸下對系統效能(system spectral efficiency)的影響，同時我們也會觀察選用與下載相同的路徑來作訊號上載時，系統效能改善的情形，這邊 radio resource 分配的傳送方式也會同上節討論分成兩種(time division transmission 與 bandwidth division transmission)。

Time division transmission :

模擬結果的數值統計將由表 6-2-2.1 與表 6-2-2.2 分別針對兩種 path selection scheme 來展示。圖 6-2-2.1 到圖 6-2-2.4 分別是不同的傳輸功率 P_m 下的 spectral efficiency contour 對於 Optimum UL path scheme，黑色框線清楚地將基地台與中繼站服務區域劃分出來，這四張圖，依序可以看出隨著 P_m 變大，基地台服務範圍隨之變大，表示當使用者的平均傳輸功率增大時，在基地台周圍有更多區域裡的使用者選擇 direct path 上載會有較高的 spectral efficiency。圖 6-2-2.5 為在此路徑選擇方法下，不同 P_m 時 uplink spectral efficiency 的 CDF 分布圖，圖中的實線代表有中繼站輔助傳輸時的 CDF 曲線，虛線則為只有基地台服務時的 CDF 曲線在一組，在

同一組 P_m 下，可以觀察到中繼站的確是能增進spectral efficiency，而且隨著 P_m 增加，不管是否有中繼站幫助傳輸，CDF曲線都往右移，表示spectral efficiency都會隨著變大。

P_m (dBm)	-10	0	10	20	25
(RSs+BS) S_{cell} (bps/Hz)	0.27	0.78	1.88	3.47	4.29
(Only BS) S_{cell} (bps/Hz)	0.05	0.16	0.48	1.4	2.27
Gain(%)	444	399	291	148	89
BS service area ratio (%)	7.85	7.87	8.22	10.8	13.51

表 6-2-2.1 系統上載效能改善統計表 for optimum UL path scheme

P_m (dBm)	-10	0	10	20	25
(RSs+BS) S_{cell} (bps/Hz)	0.26	0.71	1.67	3.21	4.06
(Only BS) S_{cell} (bps/Hz)	0.05	0.16	0.48	1.4	2.27
Gain(%)	420	352	247	130	79
BS service area ratio (%)	30	30	30	30	30

表 6-2-2.2 系統上載效能改善統計表 for the same DL path scheme

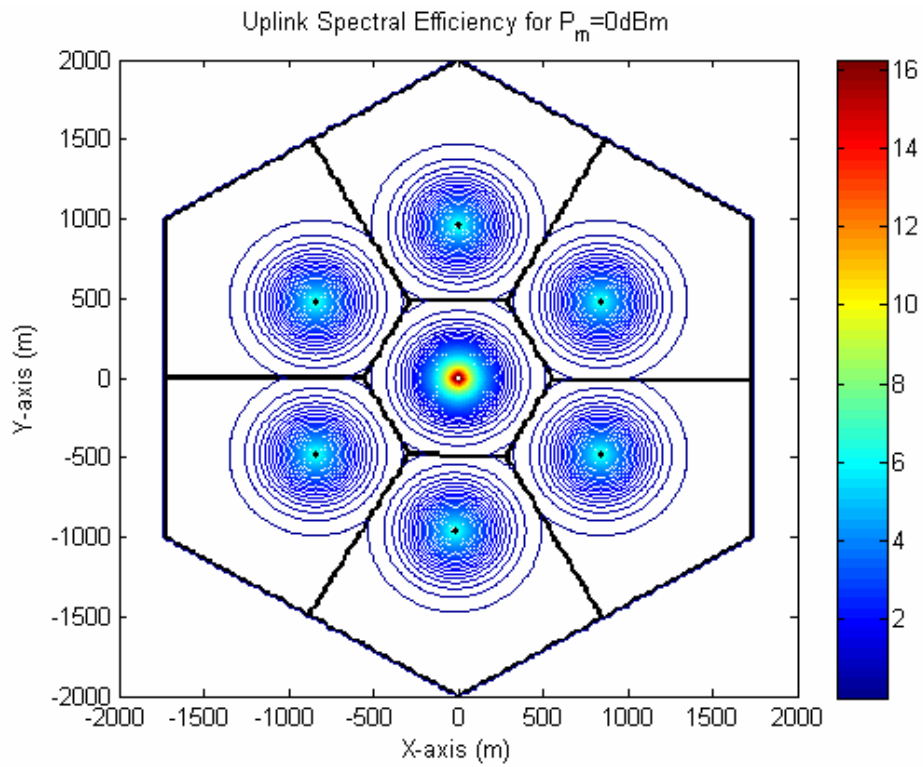


圖 6-2-2.1 Spectral Efficiency Contour for $P_m=0\text{dBm}$

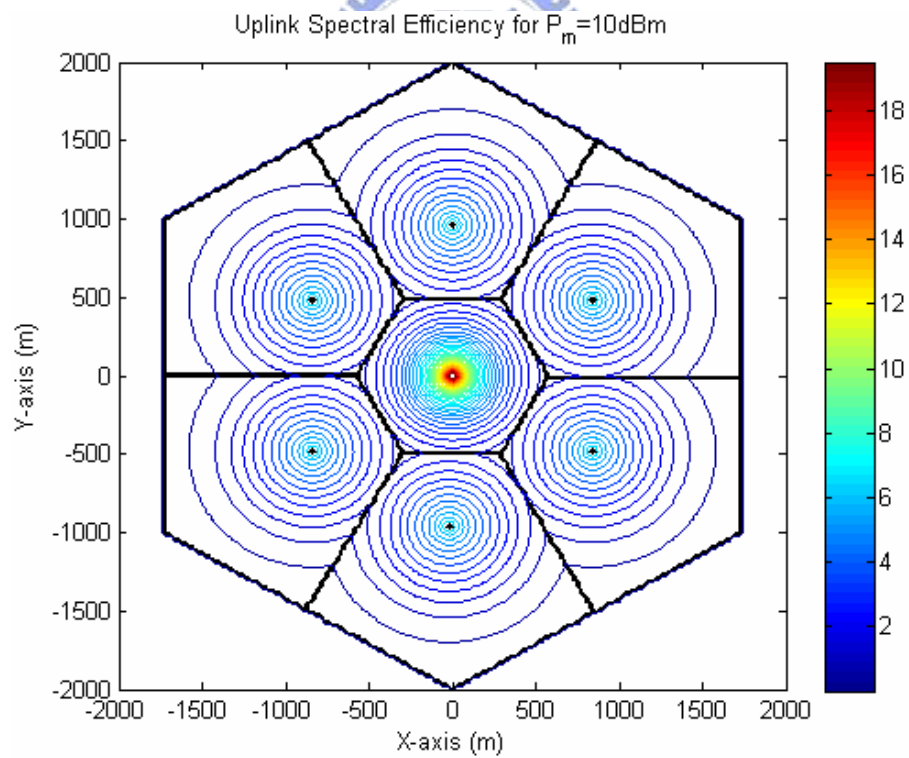


圖 6-2-2.2 Spectral Efficiency Contour for $P_m=10\text{dBm}$

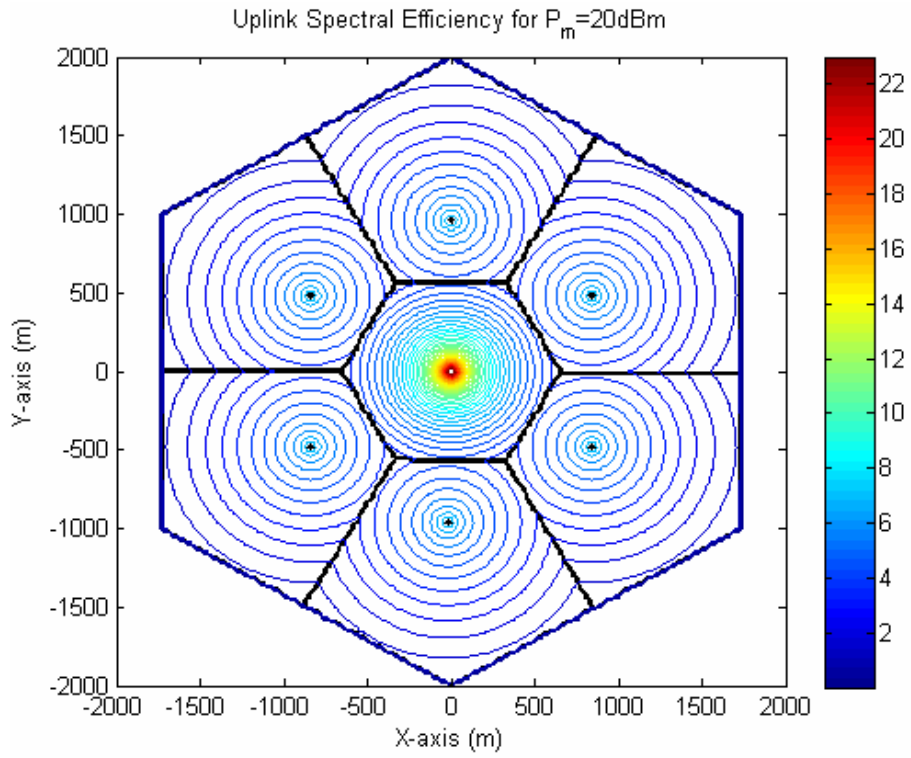


圖 6-2-2.3 Spectral Efficiency Contour for $P_m=20\text{dBm}$

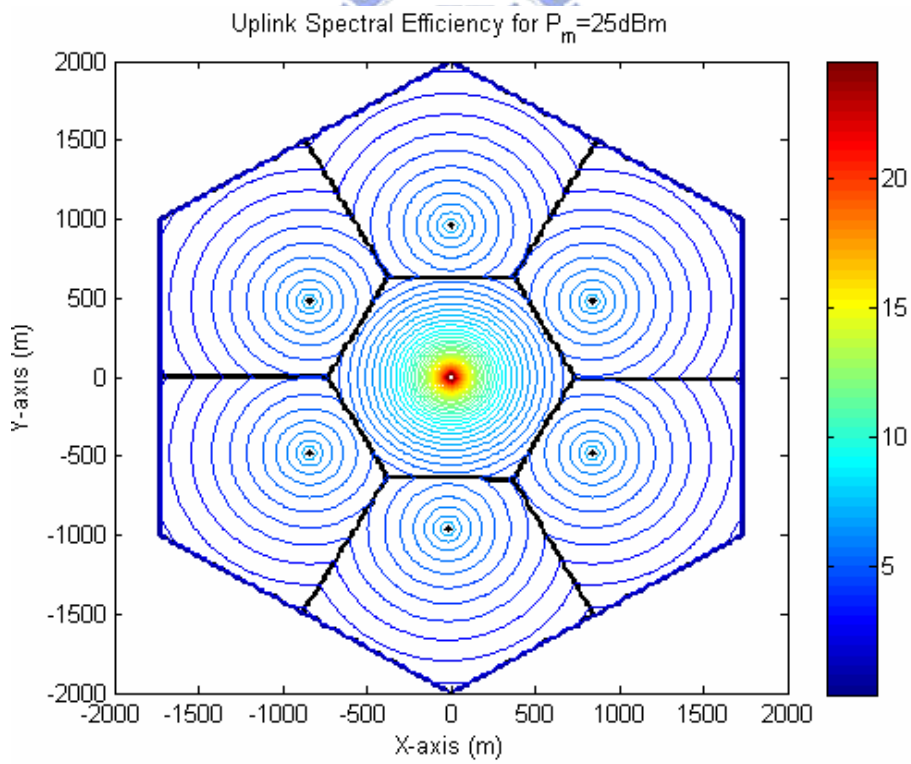


圖 6-2-2.4 Spectral Efficiency Contour for $P_m=25\text{dBm}$

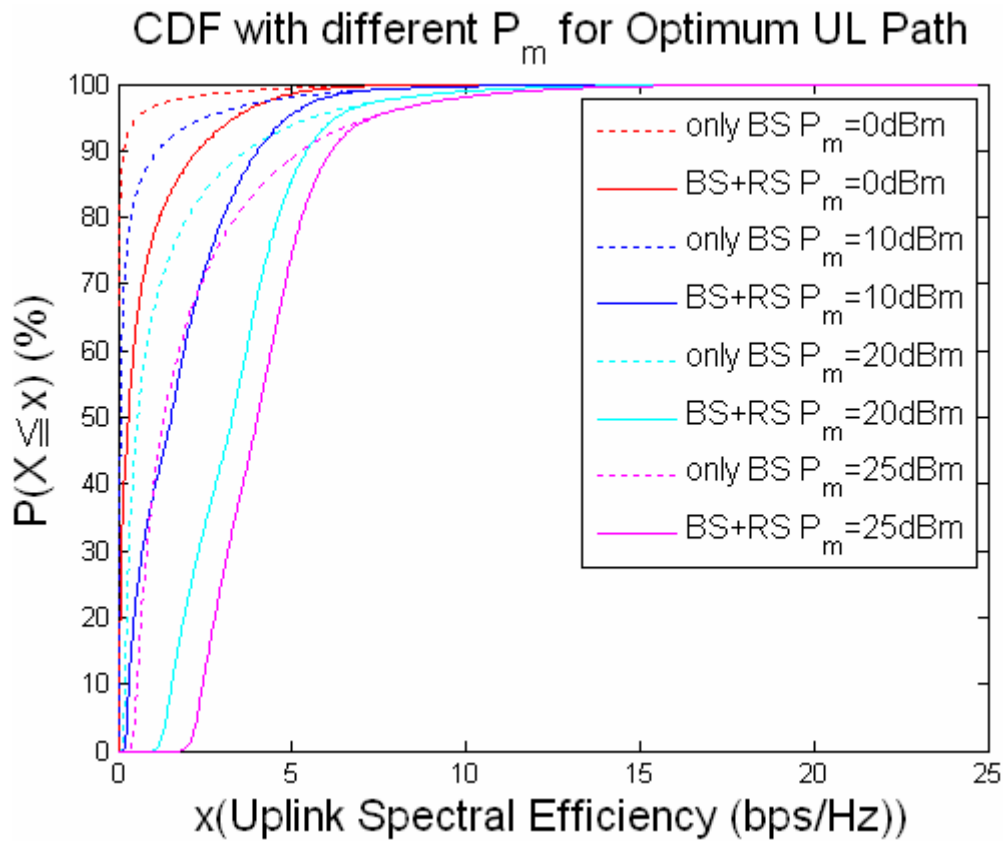


圖 6-2-2.5 CDF with different P_m for optimum UL path

接下來所列的圖則是針對the same DL path scheme下的模擬結果，圖 6-2-2.6 到圖 6-2-2.9 是不同 P_m 時的spectral efficiency contour，圖 6-2-2.10 為不同 P_m 時 spectral efficiency的CDF圖，這些結果與上面所討論的相類似，主要的差別是受 path selection scheme的影響，而導致中繼站的服务範圍有所不同，此處因為細胞邊緣部分的區域還是由基地台服務，而這些區域的spectral efficiency值又是屬於細胞內最小的部份，所以才會有圖 6-2-2.10 在低spectral efficiency的地方，實線部份都是往左接近與它相同 P_m 的虛線這樣的情況發生。

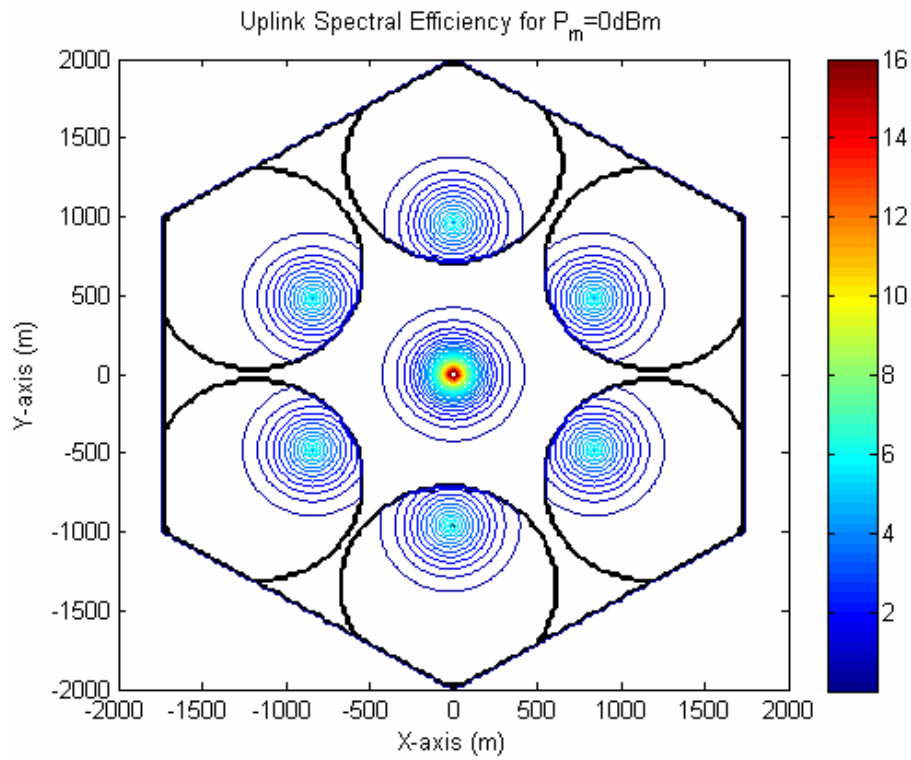


圖 6-2-2.6 Spectral Efficiency Contour for $P_m=0\text{dBm}$

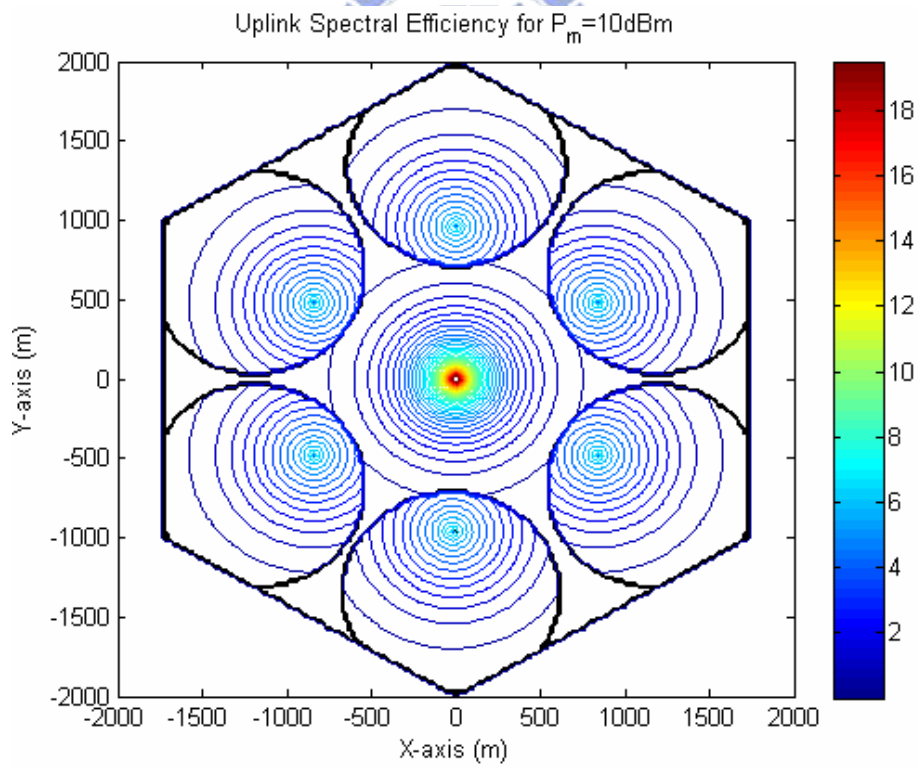


圖 6-2-2.7 Spectral Efficiency Contour for $P_m=10\text{dBm}$

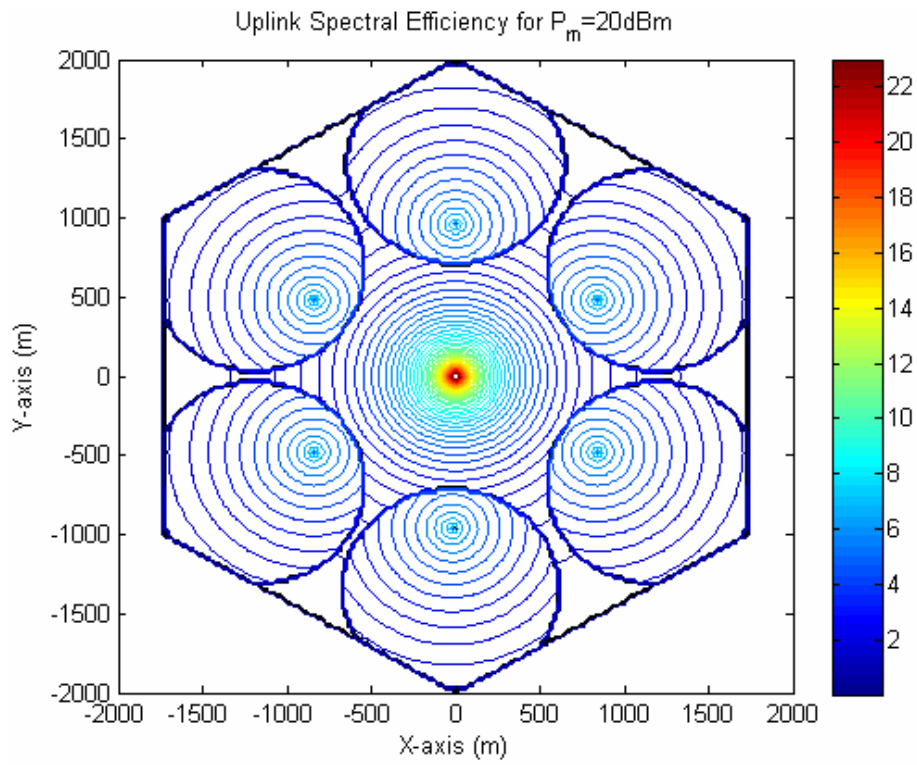


圖 6-2-2.8 Spectral Efficiency Contour for $P_m=20\text{dBm}$

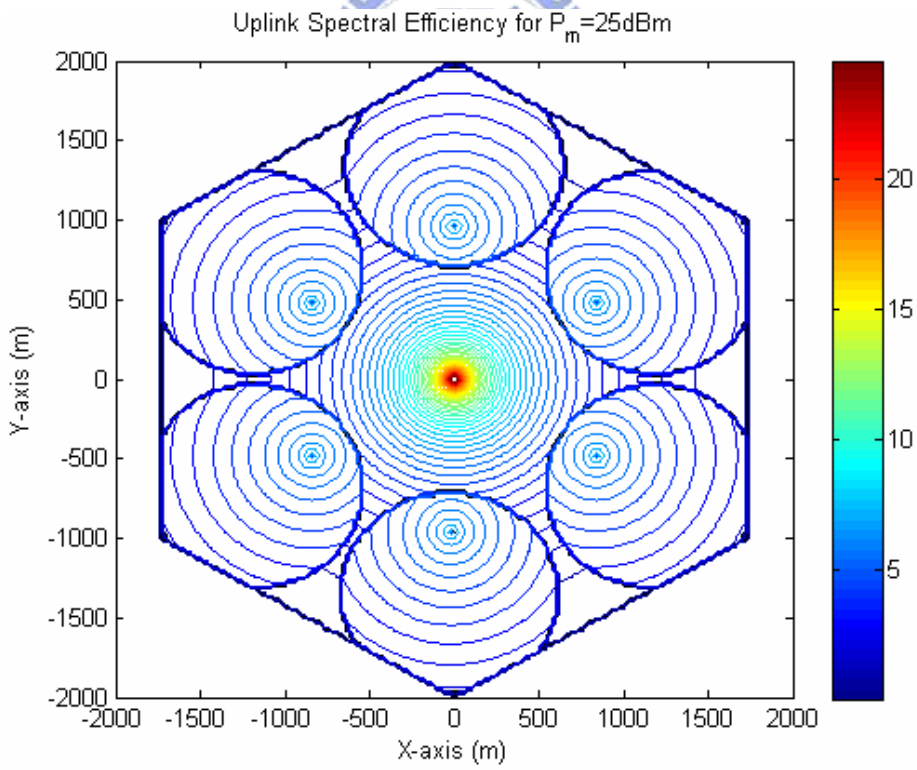


圖 6-2-2.9 Spectral Efficiency Contour for $P_m=25\text{dBm}$

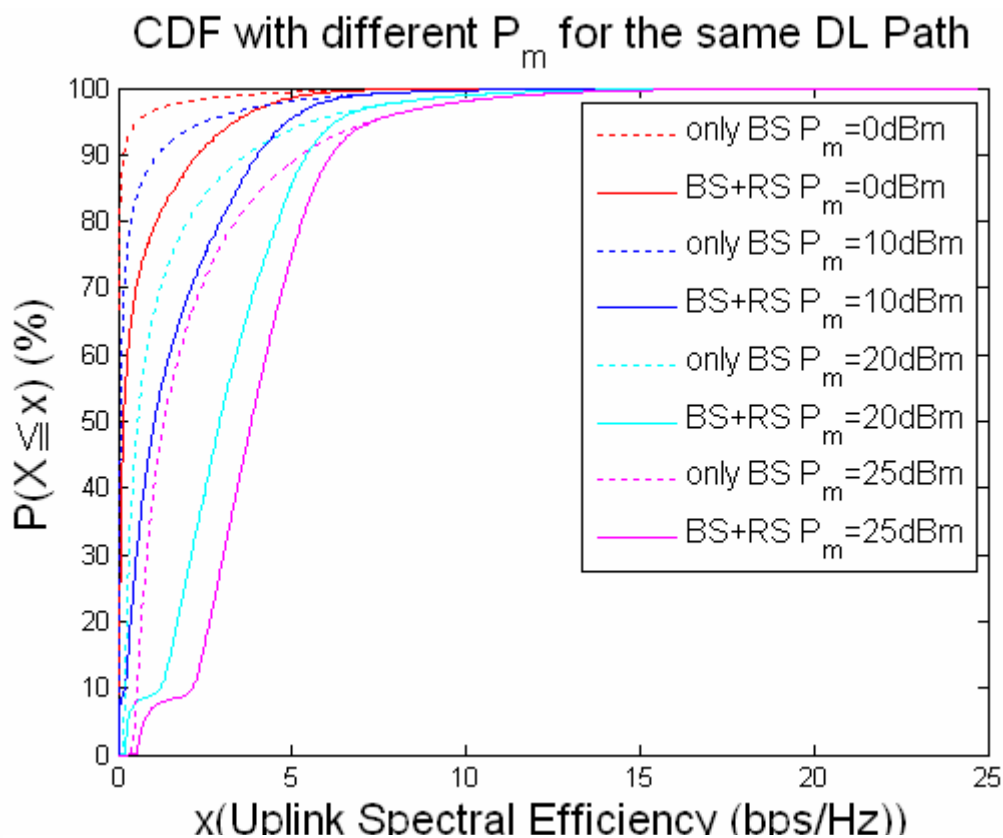


圖 6-2-2.10 CDF with different P_m for the same DL path

Bandwidth division transmission :

在這種傳送方式下，其模擬結果與採用 two phase transmission 的模擬結果很相似，差別只在於效能改善的程度，頻率分割的傳送方式會比 two phase transmission 在 system spectral efficiency 方面有較好的增益，表 6-2-2.3 與表 6-2-2.4 將分別統計出兩種不同路徑選擇方式下的模擬結果，這邊我們就省略類似上面所討論的 spectral efficiency contour 與 CDF 的圖，因為基本上都相雷同。

P_m (dBm)	-10	0	10	20	25
(RSs+BS) S_{cell} (bps/Hz)	0.28	0.82	1.99	3.67	4.5
(Only BS) S_{cell} (bps/Hz)	0.05	0.16	0.48	1.4	2.27
Gain(%)	471	425	315	162	99
BS service area ratio (%)	7.85	7.85	8.03	10.08	12.6

表 6-2-2.3 系統上載效能改善統計表 for optimum UL path scheme

$P_m(\text{dBm})$	-10	0	10	20	25
(RSs+BS) $S_{\text{cell}}(\text{bps/Hz})$	0.27	0.74	1.76	3.36	4.24
(Only BS) $S_{\text{cell}}(\text{bps/Hz})$	0.05	0.16	0.48	1.4	2.27
Gain(%)	447	376	265	141	87
BS service area ratio (%)	30	30	30	30	30

表 6-2-2.4 系統上載效能改善統計表 for the same DL path scheme

在此我們要討論為何頻率分割的傳送方式對 system spectral efficiency 有較大的增益，我們可以從(5.29)與(5.39)兩式來分析，它們個別代表此兩種傳輸方式路徑選擇的條件，此兩式唯一的差別就在於等號的右式($\frac{T_{2\text{-hop}}(\vec{m})}{W}$)，我們可以藉由已知的式子將兩個不同的右式經由轉換發現，此兩右式都等同於 $S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ 和 $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$ 的 harmonic mean，其中兩邊的 $S_{R_j \rightarrow B}(\vec{m})$ 都相同，差異就在於 $S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ ，對於 two phase transmission 的 $S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ 為(6.5)式，而頻率分割傳送方式的 $S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ 為(6.6)式，(6.6)式的 $w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})$ 是對 W 的分割，也就是一定小於 W ，意味著在同一位置向量下(6.5)式會小於(6.6)式，因此頻率分割傳送方式下的 $\frac{T_{2\text{-hop}}(\vec{m})}{W}$ 是比 two phase transmission 的 $\frac{T_{2\text{-hop}}(\vec{m})}{W}$ 大，最後才會導致在 system spectral efficiency 方面的增益較大。

$$S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = \log_2 \left(1 + \frac{P_m \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)}{N_0 \cdot W} \right) \text{ bps / Hz / } m^2 \quad (6.5)$$

$$S_{M \rightarrow R_j}(\vec{m}) = \log_2 \left(1 + \frac{P_m \cdot PL_{\text{path}}(\|\vec{r}_j - \vec{m}\|)}{N_0 \cdot w_{M \rightarrow R_j}(\vec{m})} \right) \text{ bps / Hz / } m^2 \quad (6.6)$$

第七章 結論與未來展望

7-1 結論

對於第四代無線通訊系統的發展，中繼站輔助之蜂巢式系統是個值得關注的可行方法，本篇論文就是討論在有中繼站幫助傳輸之下相較於傳統只有基地台提供服務的蜂巢式系統會有哪些效能上面的提升，在我們適當的系統設定下，我們發現加了中繼站的確是能提升系統效能的，從系統下載方面它提昇了 system spectral efficiency，而且我們利用基因演算法的搜尋找出最佳的中繼站佈放位置，讓系統效能提升到最佳。

此外對於系統上載的部份，在與下載使用相同的中繼站擺放位置下，我們也由模擬結果發現有中繼站的幫助，除了可以提升 system spectral efficiency，對於使用者也具有不降低傳輸品質下節省傳輸功率的好處，讓達到相同傳輸品質的使用者藉由選擇 2-hop path 作上傳可以使用較小的平均傳輸功率，同時降低了 outage probability，另外，我們也從模擬結果與分析，發現當 RS-BS link 的通道狀況好到某一程度之後，對於使用者傳輸功率的改善程度會趨近一個定值；並且我們也對上載時可以重新選擇對整體效能較佳的路徑做傳輸以及使用和下載時相同的路徑做資料上載的路徑選擇方式做比較，可以發現上載時可以自己選擇最佳路徑是對系統效能提升較多的，因此上載與下載分開選擇傳輸路徑的話，對整體系統效能的應該會更好，這是值得作為參考的。

7-2 未來展望

這篇文章所做的模擬主要都針對單一細胞來探討，並且目前的模擬結果都是沒有考慮 frequency reuse，也就是 MS-BS、MS-RS 與 RS-BS 這三段 link 都沒有 frequency reuse 下，來模擬出中繼站輔助之蜂巢式系統的效能改善，因此這邊論文探討的範圍是還可以再進一步延伸的，我們可以在擴展到多重細胞，探討在有其他細胞的影響下，對中繼站最佳的佈放位置又會有怎樣的改變；另外，當開始考慮 frequency reuse 後，對系統效能的影響又會是如何，我們可以同時對中繼站的最佳佈放位置以及頻率重複使用的分配同時利用基因演算法去做搜尋，對於不同的中繼站個數以及不同的頻率分配，都能找出一個最佳化系統效能的擺放法與分配，來擴展我們這篇論文對實際情況的實用性，增加本篇論文的價值。

Appendix A.1

對於 fixed bandwidth allocation scheme, 所有被分配的頻寬 w_{target} 在選擇 2-hop path 來傳輸時是被分割成兩個部份: $w_{\text{B} \rightarrow \text{R}}$ 分配給 BS-RS link 此段的 spectral efficiency 是 $S_{\text{B} \rightarrow \text{R}}$, 而 $w_{\text{R} \rightarrow \text{M}}$ 分配給 RS-MS link 此段 link 的 spectral efficiency 是 $S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}$, 因此要滿足 $w_{\text{target}} = w_{\text{B} \rightarrow \text{R}} + w_{\text{R} \rightarrow \text{M}}$ 。此外 BS-RS 與 RS-MS link 個別的 throughput 分別是 $T_{\text{B} \rightarrow \text{R}} = w_{\text{B} \rightarrow \text{R}} \cdot S_{\text{B} \rightarrow \text{R}}$ 與 $T_{\text{R} \rightarrow \text{M}} = w_{\text{R} \rightarrow \text{M}} \cdot S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}$, 對於 2-hop path 的 throughput 為 $T_{\text{B} \rightarrow \text{R}_j \rightarrow \text{M}} = \min\{T_{\text{B} \rightarrow \text{R}_j}, T_{\text{R}_j \rightarrow \text{M}}\}$ 。在 fixed bandwidth allocation scheme 下, 2-hop path 的 throughput 為 $T_{\text{B} \rightarrow \text{R} \rightarrow \text{M}}^{(\text{opt})} = \frac{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} \cdot S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}}{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} + S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}} w_{\text{target}}$ 時是可以最大的 throughput, 此時 BS-RS 與 RS-MS link 的頻率分配將會是

$$w_{\text{B} \rightarrow \text{R}}^{(\text{opt})} = \frac{S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}}{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} + S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}} w_{\text{target}} \quad \text{和} \quad w_{\text{R} \rightarrow \text{M}}^{(\text{opt})} = \frac{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}}}{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} + S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}} w_{\text{target}}。$$

Proof : (矛盾法)

首先假設 BS-RS link 和 RS-MS link 的頻寬分配為下式:

$$w_{\text{B} \rightarrow \text{R}} = \left(\frac{S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}}{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} + S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}} + \alpha \right) w_{\text{target}} \quad (\text{A.1})$$

$$w_{\text{R} \rightarrow \text{M}} = \left(\frac{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}}}{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} + S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}} - \alpha \right) w_{\text{target}} \quad (\text{A.2})$$

其中, $\alpha \in \mathbb{R}$, $\alpha < w_{\text{target}}$ 以及 $\alpha \neq 0$, 從上面的結果我們可以分別推導出這兩段 link 的 throughput 如下:

$$T_{\text{B} \rightarrow \text{R}} = \left(\frac{S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}}{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} + S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}} + \alpha \right) w_{\text{target}} \cdot S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} = \frac{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} \cdot S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}}{S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} + S_{\text{R} \rightarrow \text{M}}} w_{\text{target}} + \alpha \cdot S_{\text{B} \rightarrow \text{R}} w_{\text{target}} \quad (\text{A.3})$$

$$T_{R \rightarrow M} = \left(\frac{S_{B \rightarrow R}}{S_{B \rightarrow R} + S_{R \rightarrow M}} - \alpha \right) w_{\text{target}} \cdot S_{R \rightarrow M} = \frac{S_{B \rightarrow R} \cdot S_{R \rightarrow M}}{S_{B \rightarrow R} + S_{R \rightarrow M}} w_{\text{target}} - \alpha \cdot S_{R \rightarrow M} w_{\text{target}} \quad (\text{A.4})$$

最後 2-hop path 的 throughput 將是(A.5)，我們可以從此式子看出，當 $\alpha \neq 0$ 時， $T_{B \rightarrow R \rightarrow M}$ 永遠小於 $\frac{S_{B \rightarrow R} \cdot S_{R \rightarrow M}}{S_{B \rightarrow R} + S_{R \rightarrow M}} w_{\text{target}}$ ，只有當 $\alpha=0$ 時，才會有最大值也就是 $\frac{S_{B \rightarrow R} \cdot S_{R \rightarrow M}}{S_{B \rightarrow R} + S_{R \rightarrow M}} w_{\text{target}}$ ，此時 BS-RS link 和 RS-MS link 的頻寬分配將如上面所說的結果。

$$T_{B \rightarrow R \rightarrow M} = \min \left\{ \left(\frac{S_{B \rightarrow R} \cdot S_{R \rightarrow M}}{S_{B \rightarrow R} + S_{R \rightarrow M}} w_{\text{target}} + \alpha \cdot S_{B \rightarrow R} w_{\text{target}} \right), \left(\frac{S_{B \rightarrow R} \cdot S_{R \rightarrow M}}{S_{B \rightarrow R} + S_{R \rightarrow M}} w_{\text{target}} - \alpha \cdot S_{R \rightarrow M} w_{\text{target}} \right) \right\}$$

$$< T_{B \rightarrow R \rightarrow M}^{(\text{opt})} = \frac{S_{B \rightarrow R} \cdot S_{R \rightarrow M}}{S_{B \rightarrow R} + S_{R \rightarrow M}} w_{\text{target}}$$

(A.5)



Appendix A.2

首先我們先介紹用來找出最小傳輸功率的方法 KKT (KARUSH-KUHN-TUCKER) condition[11]，它主要就是用來分析具有不等式限制的最佳化問題，以下我們用式子來描述它的主要概念

minimize $f(\mathbf{x})$

subject to $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$,

$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \leq 0$,

where $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $\mathbf{h}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$, $m \leq n$, and $\mathbf{g}: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$.

KKT condition:

1. $\boldsymbol{\mu}^* \geq \mathbf{0}$;
2. $Df(\mathbf{x}^*) + \boldsymbol{\lambda}^{*T} Dh(\mathbf{x}^*) + \boldsymbol{\mu}^{*T} Dg(\mathbf{x}^*) = \mathbf{0}^T$;
3. $\boldsymbol{\mu}^{*T} \mathbf{g}(\mathbf{x}^*) = \mu_1^* g_1(\mathbf{x}^*) + \dots + \mu_p^* g_p(\mathbf{x}^*) = 0$;
4. $\mathbf{h}(\mathbf{x}^*) = \mathbf{0}$;
5. $\mathbf{g}(\mathbf{x}^*) \leq \mathbf{0}$.

我們就是要搜尋滿足上面所列 KKT condition 五個式子的點，而尋找出來的

這些點將被視為候選的最小值(candidate minimizer)，上面的 λ^* 與 μ^* 分別為 Lagrange multiplier vector 與 KKT multiplier vector，另外，我們可以從 1.與 5.式的條件發現，要滿足 3.式只有在 $\mu_j^* = 0$ 或 $g_j(\mathbf{x}^*) = 0$ 。

接下來，我們就開始針對我們的問題用 KKT condition 來找出我們所要的答案，在這邊我們是對搜尋 2-hop path 的傳輸功率最小值來說明，其他類似的證明都可以參考這邊的證明過程。為了方便說明我們會簡化一些符號的標示，例如：

$w_{M \rightarrow R_j}(\bar{m}) = W_1$ 、 $w_{R_j \rightarrow B}(\bar{m}) = W_2$ 和 $S_{R_j \rightarrow B}(\bar{m}) = S_2$ 依此類推，將我們所要最小化的傳輸功率經由適當的轉化之後，我們所要面對的問題就如下所示：

$$\begin{aligned} \text{minimize } f(\mathbf{W}) &= (2^{\frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)}} - 1) \cdot W_1 \\ \text{subject to } & 0 < W_1 \leq W, \quad 0 < W_2 \leq W, \quad f(\mathbf{W}) > 0 \end{aligned}$$

因此我們可以計算出所要滿足的 KKT condition 如下：

KKT condition:

1. $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4, \mu_5 \geq 0$
2. $(2^{\frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)}} - 1) - \ln 2 \cdot \frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)} \cdot 2^{\frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)}} + \mu_1 - \mu_3 = 0$
 $-\ln 2 \cdot \frac{T^2S_2}{(W_2S_2-T)^2} \cdot 2^{\frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)}} + \mu_2 - \mu_4 - \mu_5S_2 = 0$
3. $\mu_1(W_1 - W) + \mu_2(W_2 - W) + \mu_3(-W_1) + \mu_4(-W_2) + \mu_5(T - W_2S_2) = 0$
4. $W_1 \leq W, \quad W_2 \leq W, \quad -W_1 < 0, \quad -W_2 < 0, \quad T - W_2S_2 < 0$

從 4.我們知道 $-W_1 < 0, -W_2 < 0, T - W_2S_2 < 0$ ，此時要滿足第 3.式只有 $\mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 0$ 才會發生，所以問題又可以進一步簡化成下面所列：

1. $\mu_1, \mu_2 \geq 0, \quad \mu_3 = \mu_4 = \mu_5 = 0$
2. $(2^{\frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)}} - 1) - \ln 2 \cdot \frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)} \cdot 2^{\frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)}} + \mu_1 = 0$
 $-\ln 2 \cdot \frac{T^2S_2}{(W_2S_2-T)^2} \cdot 2^{\frac{TW_2S_2}{W_1(W_2S_2-T)}} + \mu_2 = 0$
3. $\mu_1(W_1 - W) + \mu_2(W_2 - W) = 0$
4. $W_1 \leq W, \quad W_2 \leq W, \quad -W_1 < 0, \quad -W_2 < 0, \quad T - W_2S_2 < 0$

緊接著我們就要分case討論就是 W_1 與 W_2 為何值時可以滿足上面的KKT condition，此時所得到的值將會是我們所要的答案的候選者，討論分別如下，經由下面四個case的討論，我們發現只有在 $W_1=W$ 且 $W_2=W$ 的時候才會滿足KKT condition，它們是唯一的一組解，因此我們可以得知 $W_1=W$ 且 $W_2=W$ 的時候會有最小的平均傳輸功率：

Case1: $W_1 = W, W_2 = W$

$$\begin{aligned} \Rightarrow \mu_1 &= \left[\ln 2 \cdot \frac{TWS_2}{W(WS_2 - T)} - 1 \right] \cdot 2^{\frac{TWS_2}{W(WS_2 - T)}} + 1 \\ &= \left[\ln 2 \cdot \frac{TS_2}{(WS_2 - T)} - 1 \right] \cdot 2^{\frac{TS_2}{(WS_2 - T)}} + 1 \geq 0 \\ \mu_2 &= \ln 2 \cdot \frac{T^2 S_2}{(WS_2 - T)^2} \cdot 2^{\frac{TS_2}{(WS_2 - T)}} \geq 0 \end{aligned}$$

\therefore When $W_1 = W, W_2 = W$, it satisfies KKT condition.

$\Rightarrow W_1 = W, W_2 = W$ is a local minimizer.

Case2: $W_1 = W, W_2 < W$

$$\Rightarrow \mu_2 = 0$$

$$\Rightarrow -\ln 2 \cdot \frac{T^2 S_2}{(W_2 S_2 - T)^2} \cdot 2^{\frac{TW_2 S_2}{W_2 S_2 - T}} \neq 0$$

It doesn't satisfy KKT condition.

\therefore Case2 is not a minimizer.

Case3: $W_2 = W, W_1 < W$

$$\Rightarrow \mu_1 = 0$$

$$\Rightarrow \left[\ln 2 \cdot \frac{TWS_2}{W_1(WS_2 - T)} - 1 \right] \cdot 2^{\frac{TWS_2}{W_1(WS_2 - T)}} + 1 \neq 0$$

It doesn't satisfy KKT condition.

\therefore Case3 is not a minimizer.

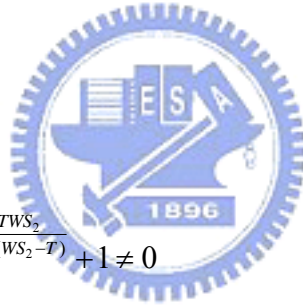
Case4: $W_2 < W, W_1 < W$

$$\Rightarrow \mu_2 = 0, \mu_1 = 0$$

$$\Rightarrow -\ln 2 \cdot \frac{T^2 S_2}{(W_2 S_2 - T)^2} \cdot 2^{\frac{TW_2 S_2}{W_2 S_2 - T}} \neq 0$$

It doesn't satisfy KKT condition.

\therefore Case4 is not a minimizer.



參考文獻

- [1] R. Pabst et al., “Relay-Based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 42, no. 9, pp. 80–89, Sept. 2004.
- [2] 3GPP TR 25.924 v.1.0.0, “Opportunity Driven Multiple Access,” Dec. 1999.
- [3] “Relay-based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Cellular Radio,” *WWRF/WG4/Subgroup on New Air Interface White Paper*, July 2003.
- [4] A. Adinoyi et al, “Description of Identified new Relay Based Radio Network Deployment Concepts and First Assessment by Comparison against Benchmarks of well known Deployment Concepts using Enhanced Radio Interface Technology,” *IST-2003-507581 WINNER D3.1*, Nov.2004.
<https://www.ist-winner.org/>
- [5] J. Cho and Z. J. Hass, “On the throughput enhancement of the downstream channel in cellular radio networks through multihop relaying,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, no. 7, pp. 1206-1219, Sept. 2004.
- [6] Ming Yang and Chong, P.H.J., “Cross Time Slot Capacity Analysis for Uplink Transmission in Multihop Cellular System,” in *Proc. 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings*, vol.2, pp.1377-1381, June 2006.
- [7] Z. Dawy, S. Davidovic, and I. Oikonomidis, “Coverage and capacity enhancement of CDMA cellular systems via multihop transmission,” in *Proc. IEEE GLOBECOM*, vol. 2, pp. 1147–1151, Dec. 2003.
- [8] I. K. Fu, W. H. Sheen and F. C. Ren, “Shadow-assisted Resource Reuse for Relay-augmented Cellular Systems in Manhattan-like Environment,” *International Journal of Electrical Engineering*, pp. 11-20, February 2007.
- [9] L. Haupt, *Practical Genetic Algorithms*, New Jersey: Wiley, 2004.
- [10] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamental of Wireless Communications*, New York: Cambridge University Press, 2004.
- [11] K. P. Chong and H. Zak, *An Introduction to Optimization*, New York: Wiley, 2001.