

私立東海大學資訊工程學系研究所

碩士論文

指導教授：朱延平

無線射頻系統涵蓋範圍研究
RF System Design of Coverage
Optimization

研究生：呂志銘

中華民國九十九年一月

博碩士論文電子檔案上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

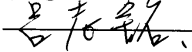
本授權書所授權之論文為授權人在 東海大學 資訊工程學系 _____ 組 98 學年度第一學期取得 碩士 學位之論文。

論文題目：無線射頻系統涵蓋範圍研究
指導教授：朱延平

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文(含摘要)，非專屬、無償授權國家圖書館及本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

- 讀者基非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

授權人：呂志銘

簽名： _____

中華民國 99 年 01 月 27 日

東海大學碩士學位論文考試審定書

東海大學資訊工程學系 研究所

研究生 呂志銘 所提之論文



無線射頻
商用無線電通訊系統涵蓋範圍研究

經本委員會審查，符合碩士學位論文標準。

學位考試委員會

召集人 王一泓 簽章

委員

朱延平

許昭河

王一泓

指導教授 朱延平 簽章

中華民國 99 年 1 月 13 日

中文摘要

隨著時代的進步發展，使用各種商用無線電系統的需求量增加，對於系統建置都必須謹慎規劃才足以應付系統對通訊量倍增的要求，如政府推動的 M-Taiwan[1]無線寬頻計劃的 Wi-Max System、國家通訊傳播委員會(NCC)所推行之高畫質數位電視 (HDTV) [2]，分別使用的是蜂巢(Cellular System)及同播(Simulcast System)系統。為達到系統有效的建置，須考量涵蓋、干擾與頻道阻塞等系統規劃的中心議題[5]，同播系統規劃僅考慮下行(Down-link)涵蓋，而蜂巢系統除了下行涵蓋還須考慮上行(Up-link)涵蓋，本文在此提出相關的研究，著重於系統的涵蓋面作分析，以路測及實際例子來證實本規劃方式有效的合理化基地台(Base Station, BS)的數量，使系統獲得最佳的涵蓋要求，並針對目前系統規劃的步驟，提出系統建置的標準作業流程(Standard Operating Procedure, SOP)，希望能提供給無線電系統建置商作為參考，而最佳化的步驟能提供更高的系統建置效率及通訊品質。

關鍵字： M-Taiwan、蜂巢系統、涵蓋、干擾、RF Planning。

Abstract

The demand of commercial wireless system has been increasing along with the recent technological development. Concerning building the system, careful planning has to be arranged to cope with more and more traffic capacity. There are two governmental policies involving Wi-Max system for M-Taiwan and high-definitions television (HDTV) promoted by National Communications Commission (NCC). Cellular system and Simulcast system were implemented to satisfactorily accomplish the aim of the policies. In order to reach an efficient system construction, coverage, interference and blocking are the major issues.

From the perspective of coverage, simulcast system only faces Down-link problem; however, cellular system faces both Down-link and Up-link problems.

The study stressed on the analysis of system coverage. The road test and genuine case were used to confirm the experimental result. Fine performance demonstrated that the efficient planning met the demand of system coverage.

The result of the experimentation leads to develop the standard operation procedure (SOP), that is, SOP can offer very valuable information for future users on the optimization of building a wireless communication system.

Key words: M-Taiwan, Cellular system, Coverage, Interference, RF Planning.

致謝

二年多的碩士生涯終究到了尾聲，回首這近千個日子以來令我感受良多，亦是造就我人生轉折最大的一個里程碑。就學期間除了在實驗室所屬的網路領域外，更有幸的接觸到各種不同的研究與計畫，大幅的擴展個人視野與應用實務上的磨練經驗。

在完成這篇論文的過程中，要感謝的人很多，感謝他們的幫助，才能夠成就出這篇論文。最重要的要感謝我的指導老師 朱延平教授，感謝他在我求學期間的教誨，除了一路以來論文的方向到最終的確認，給予很多的寶貴意見。朱老師也帶領我們學習更多不同方向的研究，讓我們參與多項的計畫，提早培養我們未來在職場上的經驗與解決問題的辦法，由衷的感謝他，謝謝!另外要感謝這篇論文的最大功臣 章其源先生，感謝他在這篇論文的指導，對實驗部分的細心解說與帶領，更感謝他在工作之餘每週親自的來到實驗室替我上課，讓我能快速的對這領域的熟悉，沒有他的幫助就不會有這篇論文的產生。

當然，在實驗室的日子裡感謝有你們的陪伴，感謝一泓學長、冠成學長在每次 Meeting 時的指導，特別感謝昭佑學長在網路的學習領域上給予我相當多的知識，指導我研究的方法與態度，在我遭遇困難時給予我最好的解決辦法，也感謝當初進實驗室時非常照顧我的學

長群智、祥明，感謝你們的經驗與在我碩一時的陪伴，讓我更快進入碩士生涯；感謝奇宏與鑫一大哥在我們一同參與多項計畫的同時，告訴我在工作上的寶貴經驗，從你們身上讓我學習到將來在工作上面臨問題時的應對方法，感謝學弟建德，對於計畫上的辛勤付出與帶來歡樂的氣氛，讓我們大家減輕了不少的壓力。

由衷感謝我的父母、姊姊，感謝你們的愛與包容、支持與鼓勵。在你們辛苦工作的同時，容忍我繼續的求學，你們的犧牲奉獻成就了今日我的一切，讓我心無旁騖的走過這段求學的路程，謝謝!最後感謝女友一路走來的陪伴與關懷，謝謝你在背後默默的支持，伴隨我走過的每段日子我謹記在心。謹以此小小的成果獻給你們，一同分享我的收穫與喜悅!

目錄

中文摘要.....	I
Abstract.....	II
致謝	III
目錄	V
圖目錄.....	VII
表目錄.....	IX
第一章 前言	1
1.1 簡介.....	1
1.2 動機.....	2
1.3 目的.....	3
1.4 論文結構.....	3
第二章 相關研究	4
2.1 系統涵蓋分析—同播及蜂巢系統.....	5
2.2 SA (Simulated Annealing) 模擬鍛法	6
2.3 RF的目的與重要性.....	7
2.4 各種參數定義.....	8
2.4.1 dB.....	9
2.4.2 dBm.....	9
2.4.3 dBi.....	9
2.4.4 EIRP	10
2.4.5 RSSI	11

2.4.6 SNR.....	12
2.5 Propagation Model.....	12
2.6 Fresnel zone現象	15
第三章 技術分析	19
3.1 以土地面積為標的做為涵蓋的處理方式	21
3.2 以人口密度為標的做為涵蓋的處理方式	23
第四章 實際案例、實驗與設計	24
4.1 案例 1：同播系統.....	24
4.2 案例 2：依人口劃分的涵蓋率.....	26
4.3 實驗 1：使用IRMA平台對蜂巢系統涵蓋做規劃	28
4.4 實驗 2：室內涵蓋.....	30
第五章 制定無線電系統規劃與建置之SOP	34
第六章 結論	38
參考文獻.....	39

圖目錄

圖 2-1：蜂巢系統架構.....	6
圖 2-2：EIRP示意圖	11
圖 2-3：不同的Propagation Model與Free Space的比較	15
圖 2-4：可視的訊號直線距離.....	16
圖 2-5：Fresnel Zone區域.....	16
圖 2-6：因Fresnel Zone產生的訊號衰減.....	17
圖 2-7：距離BS 18.6miles的測量點	18
圖 2-8：距離BS 18.5miles的測量點	18
圖 3-1：環境模擬圖	20
圖 3-2：同播系統的涵蓋及OK Cell.....	22
圖 3-3：蜂巢系統的涵蓋及OK Cell.....	22
圖 4-1：SDS示意圖.....	24
圖 4-2：45 個BS的同播系統	25
圖 4-3：最佳化後的同播系統.....	26
圖 4-4：依照人口密度規劃.....	27
圖 4-5：最佳化後移除 72 個BS	27
圖 4-6：標示出可架設之BS位置	28
圖 4-7：劃分 30983 個格子	29

圖 4-8：全部可架設點都已架設的涵蓋率為 73.1%.....	29
圖 4-9：移除掉 7 個綠色的點後涵蓋率剩 72.85%.....	30
圖 4-10：紅色表示AP位置，藍色數字表示測量點.....	31
圖 4-11：使用Network Stumbler測量情形	32
圖 4-12：FCC制定環境衰減係數	33
圖 5-1：系統建置SOP流程圖	34

表目錄

表 2-1：相同情況下對於各Model的比較	14
表 2-2：不同計算模組下平均數與標準差比較.....	14
表 3-1：模擬參數	19
表 4-1：AP到各點所測得之Signal值(dBm)	32

第一章 前言

1.1 簡介

隨著資訊與通信技術的不斷創新，使得不論是在網路的通訊頻寬、行動化的通訊設備以及整合性的資訊應用等層面皆出現新一代的標準與應用需求，而無線電系統的演變已有相當長的一段時間，不論蜂巢系統及同播系統都有很大的演變，蜂巢系統的 GSM、3G、Wi-Fi、Wi-Max 與同播系統的呼叫器系統或是廣播系統，除了頻寬越來越大、傳輸速率也越來越快，但相對的干擾及涵蓋的議題也必須更加重視，因此系統在建置之初，就必須對於涵蓋做良好的規劃，才能有效達到系統建置的效益。

在一般無線電通訊系統裡，單一基地台(BS)的涵蓋越大，則干擾越小，通話量也越小;反之涵蓋越小，則干擾越大，但通話量也越大。為達到干擾最小，通話量最大的目的，必須考量涵蓋(Coverage)、干擾(Interference)與頻道阻塞(Blockage)[7]等系統規劃的中心議題，而對於不同的系統則需有不同的規劃方式，同播系統規劃僅考慮下行(Down-link)涵蓋，而蜂巢系統除了下行涵蓋還須考慮上行(Up-link)涵蓋，在無線電通訊系統的規劃中，硬體設備的各項參數及控制軟體的功能，對 RF(Radio Frequency)最佳化(Optimization)的結果影響是很重要的，所以在系統規劃之前，首先應找出該系統中所有可變動的參

數，如：可使用的頻道數量、天線的最大輸出功率(EIRP)、通話量的記錄、人口的分佈、環境中雜訊分佈(Signal to Noise Ratio, SNR)、以及系統中 SIR(Signal to Interference Ratio)的參數值、天線的最低接收功率(Received Signal Strength Indicator, RSSI)的參數值、可建置 BS 的位置等等，然而 RF 的最佳化，卻是將系統所在位置的外在環境和系統設備的各項參數加以整合，利用 OR(Operations Research)及統計的原理，規劃出系統建置的各種最佳參數組合，對於訊號涵蓋、干擾、頻道阻塞這三個系統規劃的議題，本文僅就系統涵蓋的問題提出相關的討論及研究。

1.2 動機

在 M-Taiwan 無線寬頻計劃裡的 Wi-Max System、NCC 所推行之 HDTV(高畫質數位電視)，不外乎是對於行動(Mobility)的便利性做規劃，而分別使用的是 Cellular System 及 Simulcast System 系統，對於這廣大的商業無線電系統，最重要的首推涵蓋面的議題，而規劃涵蓋之前必須找出環境的影響係數，才能有最準確的涵蓋率計算，所以本文在此提出相關的研究，著重於系統的涵蓋面作分析，分別探討蜂巢系統及同播系統的涵蓋，提出對於涵蓋的規劃方式，並以路測及實際例子來規劃如何有效減少系統建置 BS 的數量，提供更高的系統建置效率。

1.3 目的

以作業研究 OR 的觀點及模擬鍛法(Simulated Annealing, SA)提出對於系統的規劃，提出對於涵蓋的規劃方式，最後並以 IRMA(Integrated Radio Frequency Modeling Aid)實驗，探討如何有效的減少 BS 的建置數量，而實驗的地方以台中市西屯區為規劃區域，來規劃如何以最少的 BS 來達到最好的涵蓋，並探討環境影響係數對於系統規劃是非常重要的，如此才能達到更高的系統建置效率。

本文也針對目前電信業者架設無線基地台的情形提出看法，設計出一套建置系統的 SOP 標準流程，以路測及實際規劃的例子來證實本規劃方式能有效減少系統建置 BS 的數量與時間。

1.4 論文結構

本篇提出對於系統的規劃，首先於第二部份提出目前對於無線電涵蓋的做法，並提出我們的規劃方式，於第三部份提出技術分析，接下來我們在第四部份以實際的規劃案例與實驗來證實我們的規劃方式有效的達到最好的系統涵蓋，以簡單的路測來探討環境間對於涵蓋的影響，第五部份提出規劃系統的 SOP，最後第六部分為結論。

第二章 相關研究

涵蓋—涵蓋的規劃可以用三個方法來考慮：土地面積、人口密度與通話量。

土地面積：依照土地面積劃分，以目前較常見的作法是將土地依經緯度來定位劃分，以達到多少的土地面積覆蓋百分比為標準，首先得知土地面積等相關地理資訊，再依面積來規劃 BS，這種劃分的方法優點是設計規劃容易，建置時間較短，缺點則是會造成系統建置的浪費或不足，如土地面積小的商業中心，人口較多卻分配到較少的 BS 數量，造成使用上的不足。

人口密度：依照人口密度來規劃涵蓋，在使用人口密度做涵蓋規劃時，須先得到該地區的人口分佈情形，來做為涵蓋率計算的權數 (Weight)，再進行 BS 的規劃，以達到多少百分比的人口覆蓋量為標準，而系統的建置則擺放在人口較密的地區上，但人口會移動，例如白天的工作人口或晚上的居住人口其分佈都不相同，可能會依上班的環境而遷移，而造成某些系統使用情形不足或浪費，所以對於使用人口密度的方式來做涵蓋規劃，只能取平均值，並假設人口已平均分佈。這種規劃的方法優點是預測未來頻道使用率的結果會較接近於預期的目標，而缺點是規劃的程序比以土地面積來規劃的方法還要複雜

許多。

通話量：依通話量來計算涵蓋範圍，這種規劃方式必須要在系統已經建置完成後，實際使用才有辦法得到實際數值(如通話量)，再依照使用的情形對系統做調整。

2.1 系統涵蓋分析—同播及蜂巢系統

同播系統，如國內系統業者所建置之無線電呼叫器系統、與 HDTV 計畫案，即建構在同播系統上，由於同播系統是對外廣播訊號，所以對於涵蓋僅須考慮下行部份，也就是僅須滿足接收方的最低接收功率(RSSI)即算涵蓋，而同播系統的同頻干擾(Simulcast Co-channel Interference)則來自於許多基地台訊號到達某一定點的時間差異，也就是說當主要 BS 的訊號和其他 BS 訊號到達某一定點時，因為時間差異而造成干擾，若訊號到達的時間完全相同，則訊號強度反而增強，而不會有干擾的情形。

蜂巢系統如 Wi-Fi、Wi-Max、GSM 等(圖 2-1)，訊號發送的方式包含傳送及接收雙向，所以 BS 送出訊號時須考慮 Down-link 的涵蓋，而接收方回送訊息時則必須也考慮到 Up-link 的涵蓋，也就是只有上下行的相交集部分才可算有效涵蓋區域；以 GSM 設計觀點，蜂巢系統的規劃基本原則為：涵蓋越大，通話量越小，干擾也越小；反之涵

蓋越小，通話量越大，干擾則越大。

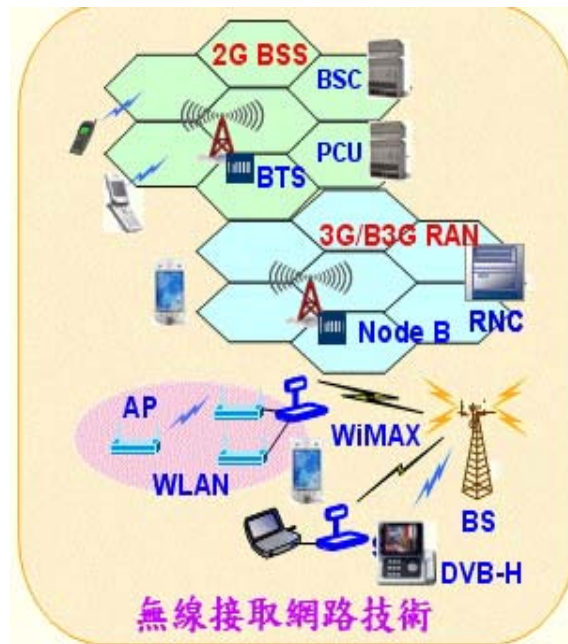


圖 2-1：蜂巢系統架構

圖片來源：中華電信研究所網站

2.2 SA (Simulated Annealing) 模擬鍛法

模擬鍛法演算法(Simulated Annealing, SA)，是種模擬鍛造過程而生的演算法，屬於萬用啟發式演算法的一種，最早於1953年由Metropolis所提出，當時並沒有受到研究者的重視，一直到了1983年由S.Kirkpatrick 等人利用SA來求解組合最佳化的問題，其原理是採取原料加溫，鍛造成鋼的觀念。鍛造過程中，一開始先高溫熔鐵使其塑型，然後開始慢慢降溫，再用鐵槌敲打高溫狀態的鐵，最後淬鍊成鋼，達到最好的狀態。而模擬鍛法就是用在鍛造過程中物理系統結晶

概念而生的演算法，可使演算法在搜尋的過程中跳脫區域最佳解，溫度降低的速度將影響最後的品質。這個慢慢降溫的過程在系統設計中即為逐步找出最佳解的方法，慢慢的移除BS然後計算出系統涵蓋最佳化的結果。

模擬鍛法可應用在連續及不連續變數的系統中，系統的目標函數 (Object Function, OF)[6]需先確立，此OF代表系統中我們要最佳化的函數，而此函數可以是系統的通訊容量，或者是同播系統中的訊號擴散(Signal Delay Spread, SDS)，做為系統優劣的一個衡量標準。

2.3 RF 的目的與重要性

在無線電通訊系統 RF Planning 的工作中，硬體設備的各項參數及控制軟體的功能及對最佳化(Optimization)的結果，影響是很重要的，所以在系統作規劃之前，選擇適當的設備是非常重要的工作，然而 RF 的最佳化，卻是將系統所在位置的外在環境和系統設備的各項參數加以整合，計算出要達成通話量最大，干擾最少的各項參數最適當的數據，所以 RF 最佳化的工作，不能只針對單一 BS 或單一位置的涵蓋或干擾作單獨的處理。系統在最佳化的過程中，由於受限於外在的自然環境及設備的功能等因素的影響，其最佳化的結果並不能滿足系統業者的要求，此時 RF 工程師可針對重要的局部地區，作特殊

的處理，而犧牲部份重要性較低地區的涵蓋或干擾，這種選擇既可滿足特殊地區的要求，又可在設備尚未增加的情況下，使網路系統的功能發揮到最大。

在網路系統營運的過程中，常會面臨一些突發的狀況，如臨時大型的聚會，使得某一特定的地區通話量突然大量增加，又如人口的移動，造成網路通話量的負荷極度的不均衡，這些狀況都會造成通話品質的不良負擔，則此時就必須計算出最佳的系統平衡點，達到通話量最高與擁塞的情況最低。有關其它可能影響到 RF 系統設計的因素，如頻道的安排、天線增益、天線水平和垂直方向的定位、輸出功率的控制等，在一個完整的系統設計裡，這些因素都應該被考慮在內的，除此之外，訊號接受範圍的外形因為地形的不規則，使得它的輪廓並不是一個圓形的，由於外在環境的限制，使得正確的系統天線選址及佈建變得更加復雜。

2.4 各種參數定義

無線電通訊的規劃中，涉及到許多的應用參數，以下分別對於這些參數作簡單的描述：

2.4.1 dB

dB 為一個表徵相對的比值，表示兩個量的相對大小關係，當考慮甲地或乙地的功率比值大小時，使用 dB 的計算公式如下：

$$\text{公式： } \text{dB} = 10 \times \log(\text{接收功率}/\text{輸出功率})$$

例如：輸出到線路的功率比接收到的功率大一倍，那麼 $10 \times \log(\text{接收功率}/\text{輸出功率}) = 10 \times \log 2 = 3\text{dB}$ 。衰減 3dB 表示訊號強度變成原來的一半，增加(Gain)3dB 表示訊號強度變為原來的兩倍。

2.4.2 dBm

dBm 為表示功率絕對值的值，1×milliwatt 為比較基準的一個比值，計算公式如下：

$$\text{公式： } \text{dBm} = 10 \times \log(\text{功率值}/1\text{mw})。$$

當輸出功率為 1mw 時，由公式得知為 0dBm，再假設當 dBm 為 30 時，帶入公式得知輸出功率為：

$$10^{(30/10) \times (1 \times \text{milliwatt})} = 10^3 \times (1 \times \text{milliwatt}) = 1000 \times \text{milliwatt}。$$

2.4.3 dBi

對天線增益作量化的測量單位為 dBi，i 在此代表的意思是“isotropic”，也就是 dBi 測量的參考值是等向放射體（isotropic

radiator)，這個等向放射體實際上並不存在，而是一個理論上的理想發射體，產生的電磁波在每個方向的強度都一樣，為一 360 度的等向球狀發射體。而在同樣的輸出電壓下，天線角度改變小，則訊號傳送的距離越遠，若天線角度增加，則訊號傳送距離越近。

2.4.4 EIRP

最大輸出功率(Effective Isotropic Radiated Power, EIRP)，EIRP 表示由天線射出的 RF 功率，此功率與波束密度有關，亦即 EIRP 愈高則表示 RF 波束愈密，而天線輸入前端的所有 RF 裝置、纜線及連接端子，但是不包含天線，這部分稱為 Intentional Radiator[3]。EIRP 為輸出天線之功率 dBm 值再加上天線之 dBi 值，從輸出開始直到天線間任何元件所造成的增益(Gain)或衰減的值的總和，此過程還需考慮輸出功率的大小與天線的角度，才可得到最終 EIRP 的值，下圖 2-2 為 EIRP 的示意圖。

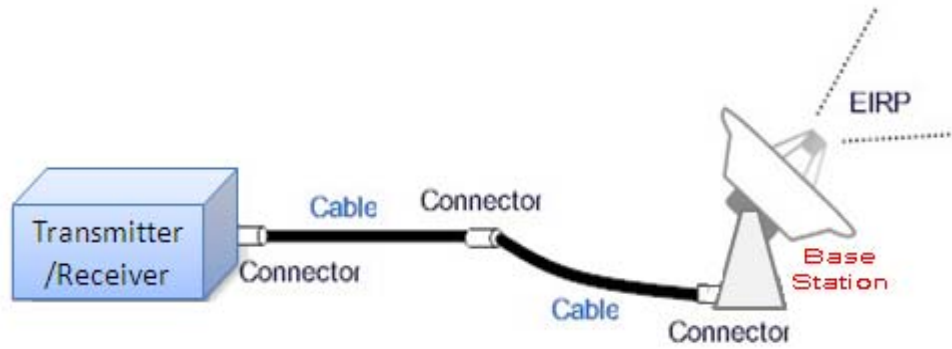


圖 2-2：EIRP 示意圖

2.4.5 RSSI

接收訊號強度(Received Signal Strength Indication, RSSI)，RSSI 越大則表示接收訊號強度越強，最低接收訊號強度必須再加上環境中的雜訊(Noise)，以及路徑遺失所造成的訊號衰減問題，才可得最低 RSSI 訊號值。因接收端接收到的資料不同，資料的型態包含有 Voice、Data 與 Video 等，不同的資料類型所需的訊號接收強度皆不同，而 BS 的訊號會因距離及環境中的雜訊、建築物等造成干擾與衰減，到達接收端的 RSSI 必須大於訊號強度，如此才可以正確的接收與解析資料內容。

在 CPE 端為移動的情況下，訊號在移動的過程會遇到環境中不同雜訊干擾與建築物的阻礙而得到不同的 RSSI，唯有在系統涵蓋的區域下以劃分格子的方式，來計算是否滿足 Up-link 的涵蓋。每個格子代表一手持裝置的位置，而每個格子的 RSSI 必須為 EIRP 扣掉距

離、雜訊、建築物與環境造成的影響，如此才可正確求得此格子的 RSSI，最後取 Up-link 與 Down-link 兩相交集的部分，才可得知目前此區域的涵蓋率。

2.4.6 SNR

訊號雜訊比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)，SNR 以 dB 為單位，訊號的能量與輸出電壓的平方成正比，與距離的平方成反比；當訊噪比過低時，表示訊號與雜訊難以分辨，即代表訊號強度較低，反之當訊噪比高時則表示訊號強度較高，而 SNR 的參數對系統的功用為計算正確 RSSI 的參數。

假設有一手持裝置的最低 RSSI 為 -80dBm，則接收到的訊號必須大於此值才能正確的接收並分析訊號，而在接收的過程中，環境的 Noise 為 -82dBm，兩訊號相差了 2dBm，手持裝置將無法正確接收到訊號。為有效並正確接收到訊號，則 SNR 值必須大於 4dBm 才能有效蓋過雜訊，故必須提高訊號來源至 -78dBm，如此相差 4dBm 情況下，手持裝置才能達到最低接收功率的門檻。

2.5 Propagation Model

由於 BS 的設立，常受地形地物及人為因素的影響，無法按照傳

統理論上的計劃來執行，而在選定系統規劃的定點後，依照不同的 Model 可計算出不一樣結果，在規劃的過程中，Model 需因地制宜設計，每個地方地形、氣候、都市景觀、環境變化都不一樣，對訊號衰減影響也都不同，所以 Propagation Model 計算也須配合做一局部調整，T. C. Sheives[10]對於不一樣的 Propagation Model 提出比較，如下表 2-1 顯示在相同的條件下，不同的計算模組，所計算出來的平均數和標準偏差之間的差異，計算最低接收功率的結果與路測的實測值做對比，TIREM 所計算出來的結果，在兩個測量點上和路測所測量的數據是非常接近的。表 2-2 顯示在相同的條件下與不同的計算模組，所計算出來的平均數和標準偏差之間的差異，TIREM 所計算的結果是最接近的。

表 2-1：相同情況下對於各 Model 的比較

Wide Area Median Signal Statistics of Differences Between Predicted Values and Measured Median Values for Different Computer Loss Models.

MODEL	STATISTIC	
	MEAN (dB)	STANDARD DEVIATION (dB)
CSPM	-12.1	+ 9.3
QKPFL	+13.4	+10.5
TIREM	+ 9.6	+ 8.0
Eg11	-36.0	+11.0
FREE-SPACE	+15.8	+ 9.9

表 2-2：不同計算模組下平均數與標準差比較

Table I. Line-of-Sight Differences Between Predicted Median Signal Values and Measured Values for Different Computer Loss Models.

MODEL	MEAN DIFFERENCE (dB)	
	LOCATION VP	LOCATION L
CSPM	-21.2	-16.0
QKPFL	+ 3.4	+ 7.2
TIREM	+ 2.4	- 2.4
Eg11	-43.1	-51.8
FREE-SPACE	+ 3.7	+ 7.3

由圖 2-3 結果得知 TIREM 和其他計算模組計算的結果與實際測量結果的比較下，TIREM 為較接近 Free Space 的測量值。

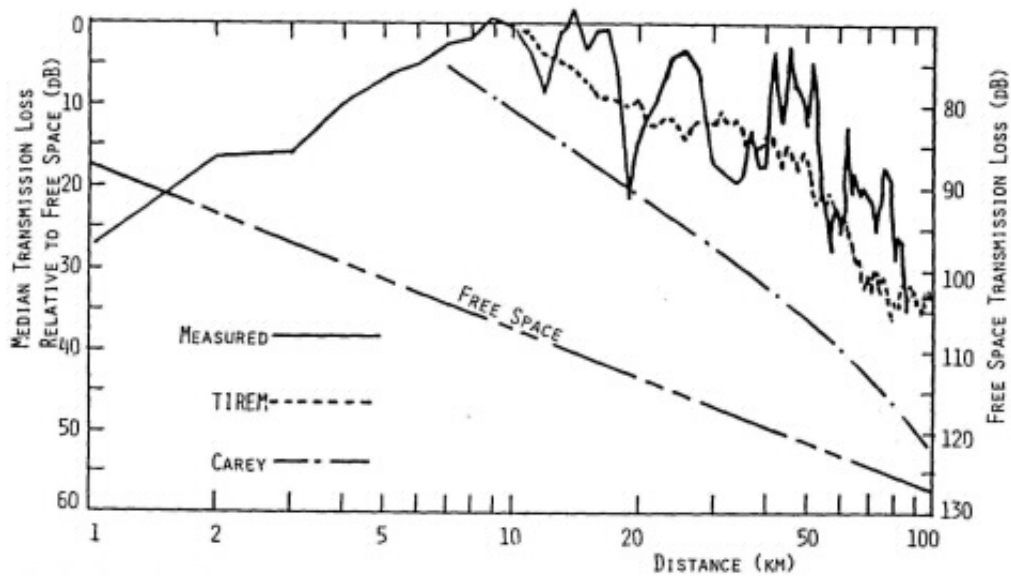


圖 2-3：不同的 Propagation Model 與 Free Space 的比較

2.6 Fresnel zone 現象

當電磁波自發射端(Transmitter, TX)傳達至接收端(Receiver, RX)，所發出電磁波能量應被限制於發射端天線(Antenna)的訊號角錐(Signal Cone)中，而最短的路徑就是兩點之間的直線[4]，以下圖 2-4 來說，黑色線段即為可視距離，而圖 2-5 顯示的為 Fresnel zone 的範圍。

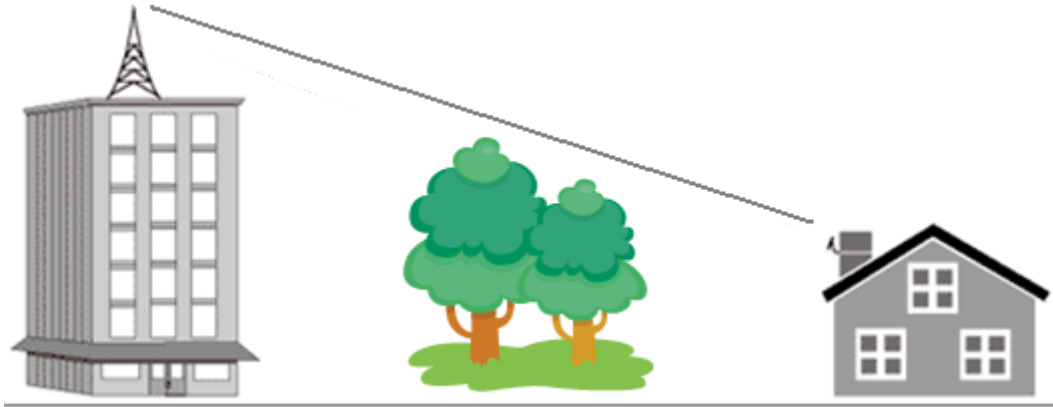


圖 2-4：可視的訊號直線距離

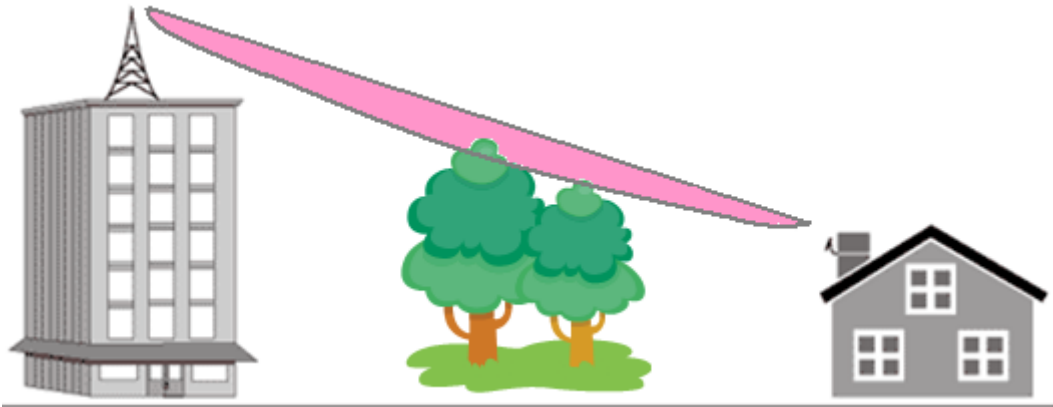


圖 2-5：Fresnel Zone 區域

Fresnel Zone[8]受氣候的影響，不同的地點與氣候將改變其上凸或下凹的程度，當氣候較低溫時，地表空氣密度較大，故曲線會下凹，當曲線下凹時，會碰觸到地面的障礙物，這時就會造成訊號的反射或繞射，甚至阻礙了訊號的傳遞，而相反的當氣溫較高的夏季時，因空中的空氣密度較高，則曲線會凸起。下圖 2-6 為使用 Platform 於南臺灣的同播系統所分析的訊號傳輸路徑區間，橫軸表是的為距離，縱軸

表示的是海拔高度，藍色箭頭為測量的地點，距離 BS 約 18.5 miles，而 BS 的 RSSI 設定為 -36dB，而圖右方藍色的線條，代表訊號在兩個 BS 之間傳遞的路徑，紅色的斜線被計算出代表“Fresnel zone”的訊號傳輸路徑區間。此圖可看得測量結果藍色為直視訊號距離，並未被地形給阻擋，而紅色為 Fresnel Zone 線段，實際的結果可看到訊號被地形給阻擋，導致訊號範圍只有一個小三角型的紫色區域。為解決此問題，則必須提高 BS 的高度，讓 Fresnel Zone 的區段可以通過障礙物。

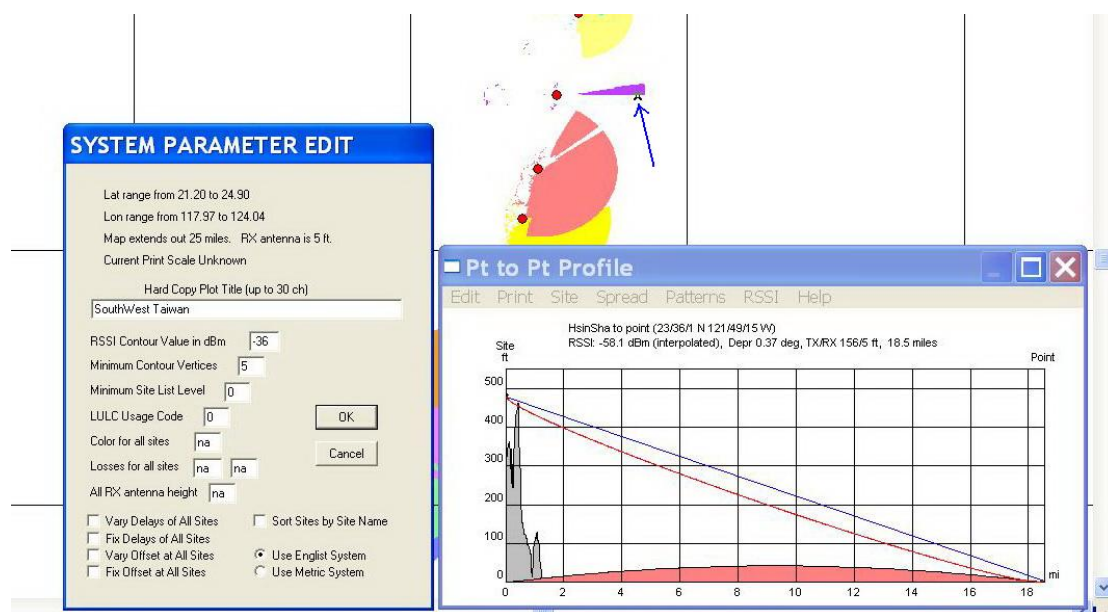


圖 2-6：因 Fresnel Zone 產生的訊號衰減

另外以下兩張圖為相同距離的實際測試比較，結果顯示測試距離相同但卻有不一樣的結果。圖 2-7 顯示的 RSSI 為 -35.2 dBm，Fresnel

Zone 通過了地形的阻擋，而圖 2-8 顯示出測得的 RSSI 為 -58.1 dBm，結果得知因為 Fresnel Zone 所造成的訊號衰減，相同的距離但不同的發射角度下，圖 2-8 可看到訊號被地形所阻礙，而產生較低的 RSSI。



圖 2-7：距離 BS 18.6miles 的測量點

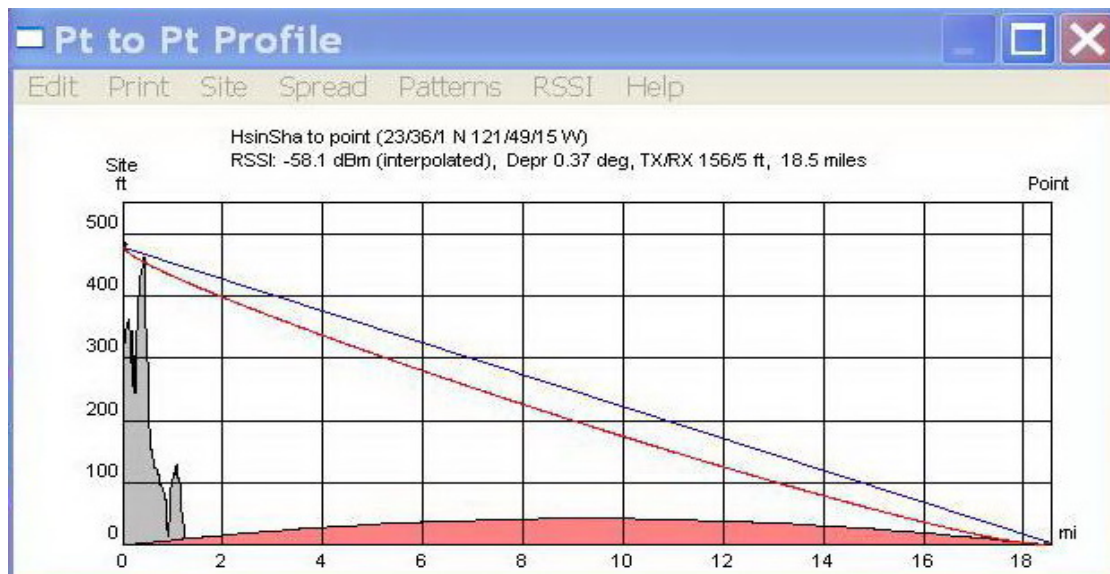


圖 2-8：距離 BS 18.5miles 的測量點

第三章 技術分析

涵蓋的規劃方式包含了以土地面積、人口分佈及通話量的規劃方式，以土地面積的規劃方式可獲得最大的移動區域，而以人口密度的規劃方式可涵蓋重要的區域，以通話量的分佈來規劃則無法在系統營運之前取得資料。涵蓋的範圍並不會因輸出功率較高而有較高的涵蓋率，當遇到下列情況時，較低的輸出功率卻會有較高的涵蓋。假設接收端的最低接收功率為 -80Bm，其餘參數如下表 3-1，環境模擬如圖 3-1：

表 3-1：模擬參數

最大輸出功率 (EIRP)	BS= 100mw，20dBm CPE= 25mw，14dBm
最低接收功率 (RSSI)	BS= -80dBm CPE= -80dBm
設備高度	BS= 9M CPE= 1.5M
雜訊干擾(Noise)	10dBm
Path loss	90dBm

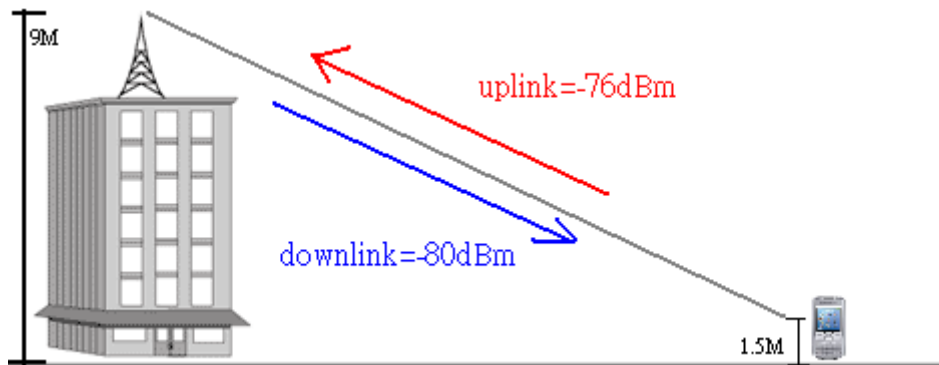


圖 3-1：環境模擬圖

當 BS 的訊號向下傳遞時，須扣掉 Path loss，又由於 Noise 是由地面的環境所造成的，所以須再扣掉 Noise 的干擾，到達地面後的訊號即剩下： $20\text{dBm} - 90\text{dBm} - 10\text{dBm} = -80\text{dBm}$ ，而接收端的 Up-link 不需要扣掉 Noise 的干擾，故到達 BS 後所剩餘的訊號為 -76dBm ，Up-link 大於 Down-link 4dBm ，所以 BS 有較高的輸出功率，卻因環境的衰減因素而低於接收端的訊號。

涵蓋範圍的界定必須先確定涵蓋的定義，以蜂巢系統的規劃為例，由於基地台與 CPE 雙方都有傳送及接收雙向的功能，所以必須考量 Up-link 與 Down-link 的接收，其接收到的功率若大於最低的接收功率(RSSI)則可算是有涵蓋，對於 RSSI 的計算公式如下：

公式： $\text{RSSI} = \text{EIRP} - \text{Path loss} - \text{Building and Environmental Cluttering}$

EIRP：(Effective Isotropic Radiated Power)最大輸出功率

Path loss：路徑遺失

Building and Environmental Cluttering：環境對訊號的衰減參數，單位為(dBm)。

3.1 以土地面積為標的做為涵蓋的處理方式

使用土地面積的規劃方式目的是為了考慮室外移動的功能。首先在規劃系統時，我們取得土地的面積資訊，繪出系統架設區域，在這區域裡，依照經緯度來劃分等份的小格子，而對於下行的涵蓋定義於每個格子內至少有一 BS 的訊號大於 CPE 的最低接收功率，上行的涵蓋則定義將每個格子視為一個 CPE，至少有一 BS 接收到的訊號必須大於它的最低接收功率，則這樣的格子即滿足上下行的涵蓋了，再將有涵蓋的格子(OK cell)與全部的格子數相比，就可以得到以土地面積做為標的的涵蓋率，如圖 3-2 與圖 3-3 所示即為同播系統及蜂巢系統的涵蓋，首先繪出欲規劃的區域，並以經緯度劃分格子，圖中粉色的格子即為滿足涵蓋的 OK Cell，而手機所在的灰色格子為無法滿足涵蓋的格子。

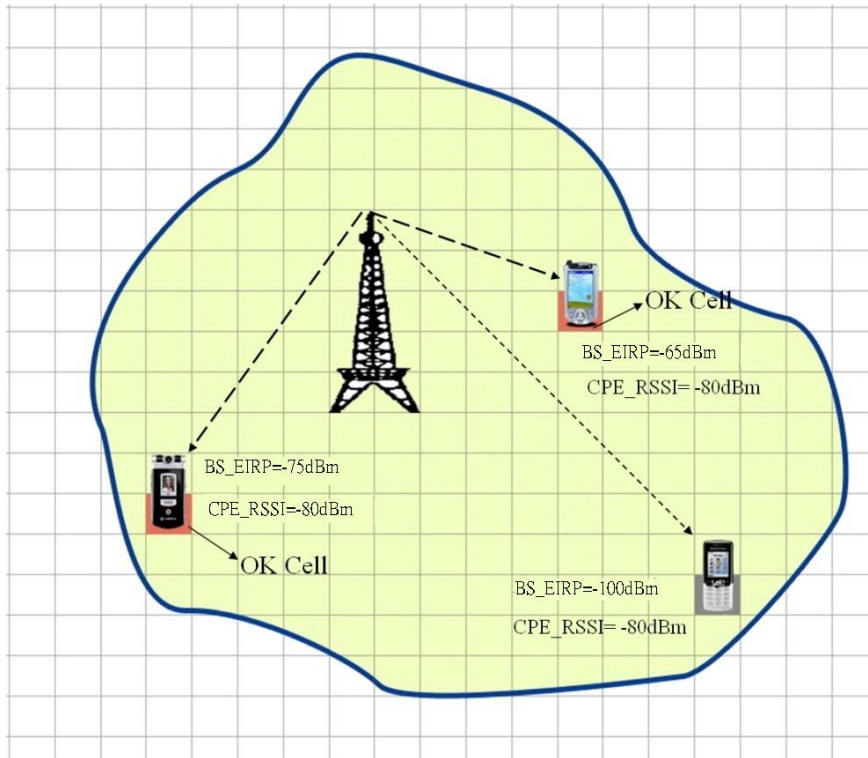


圖 3-2：同播系統的涵蓋及 OK Cell

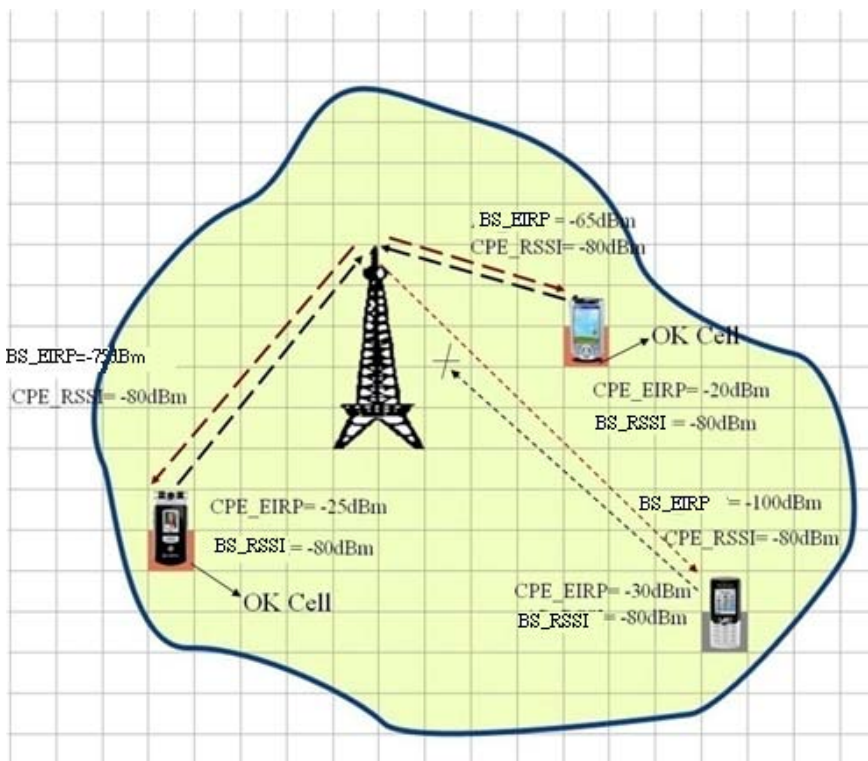


圖 3-3：蜂巢系統的涵蓋及 OK Cell

若涵蓋率大於系統的建置，則必須移除一些 BS 來優化系統，優化的方式則是必須找出一 OF(Object Function)的值，公式如下：

公式：Objective Function = % Coverage + f × # of sites removed

% Coverage：系統涵蓋所規定的涵蓋目標百分比

f：為一使用者自訂參數，由使用者自行決定大小，最大為 1，依系統需求的區域給予較高的值，例如一定需要架設 BS 之區域，或人口密度較高的區域，即給予較高權重。

3.2 以人口密度為標的做為涵蓋的處理方式

首先在規劃系統時，我們取得人口的分佈圖，一樣將系統規劃區域依經緯度劃分成許多小格子，將人口資料當作每一小格的權數，再與格子的總權數相比，計算加權的平均值，即可得到以人口規劃的涵蓋率，若人口為平均分佈在於每個格子(即每個格子都涵蓋)，則也可視為依土地面積為標的的涵蓋率，人口涵蓋率的計算方法如下：

$$[(\text{使用人口所佔格子數} \times \text{參數 } f) / (\text{全部格子數} \times \text{參數 } f)]\% = \text{人口涵蓋比率}(\%)$$

第四章 實際案例、實驗與設計

涵蓋的範圍依人口密度劃分，以下使用實際例子，使用 IRMA 平台對系統進行最佳化。

4.1 案例 1：同播系統

以下為測試地區為台北盆地(圖 4-2)，紅色點表示 45 個 BS 的同播系統，由於同播系統會造成接收訊號的擴散(Signal Delay Spread, SDS)，使用訊號發射的延遲與分裂就可以來評估此系統的好壞，SDS 即造成干擾。

以下圖 4-1 來說，SDS 秒差越大則訊號擴散越嚴重，兩 BS 中的 A 訊號先到達接收端，而隨後 B 的訊號較晚到達，則兩訊號間的秒差即為 SDS，SDS 越高則系統涵蓋率越差。

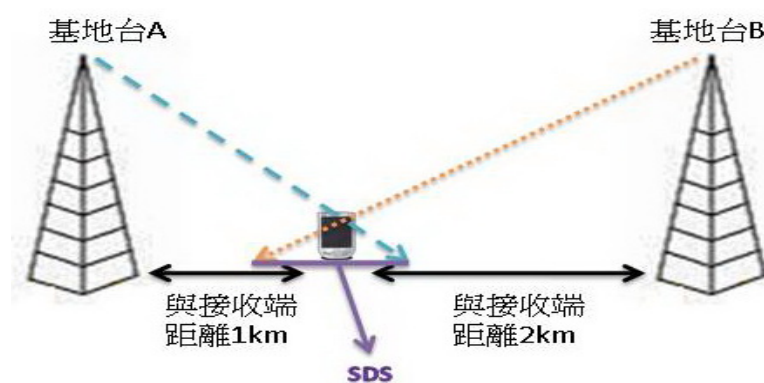


圖 4-1：SDS 示意圖

此案例的 45 個 BS 同時傳輸，EIRP 也調整成最大功率，多邊型顯示區域範圍，BS 下方的數值”0”代表時間差，較黑的部分表示為高 SDS，此次測得的平均 SDS 為 20.6msec。

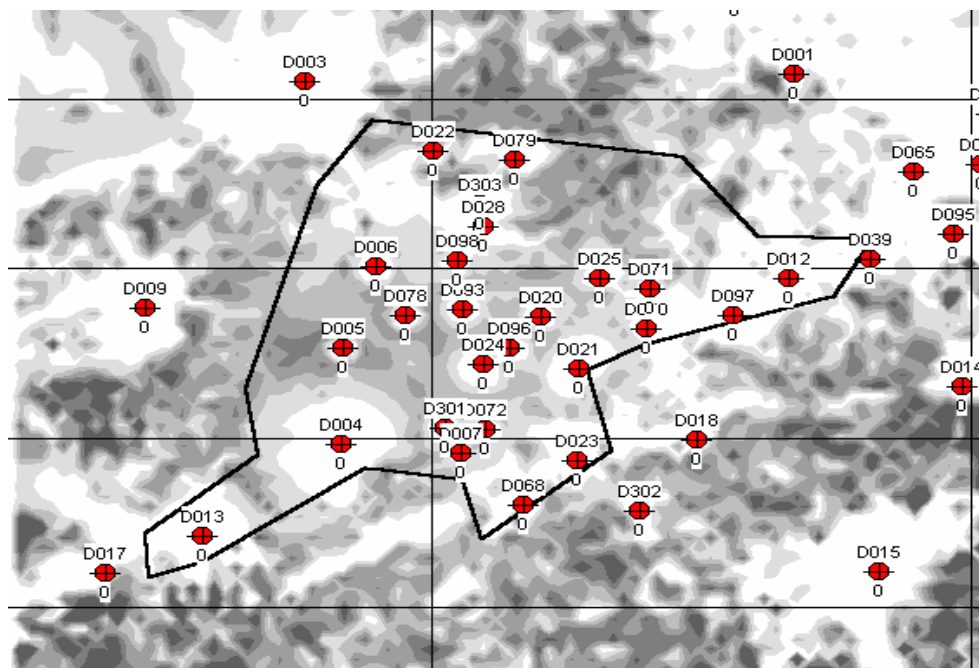


圖 4-2：45 個 BS 的同播系統

使用 SA 對系統最佳化，最佳化後有 15 個 BS 被移除了，移除後的 SDS 已經降低至 9.9msec.(圖 4-3)，這證明了當初建置系統時若有良好的規劃，則可省下裝設這 15 個 BS，不會因為增加了 BS 而導致 SDS 變的更糟。

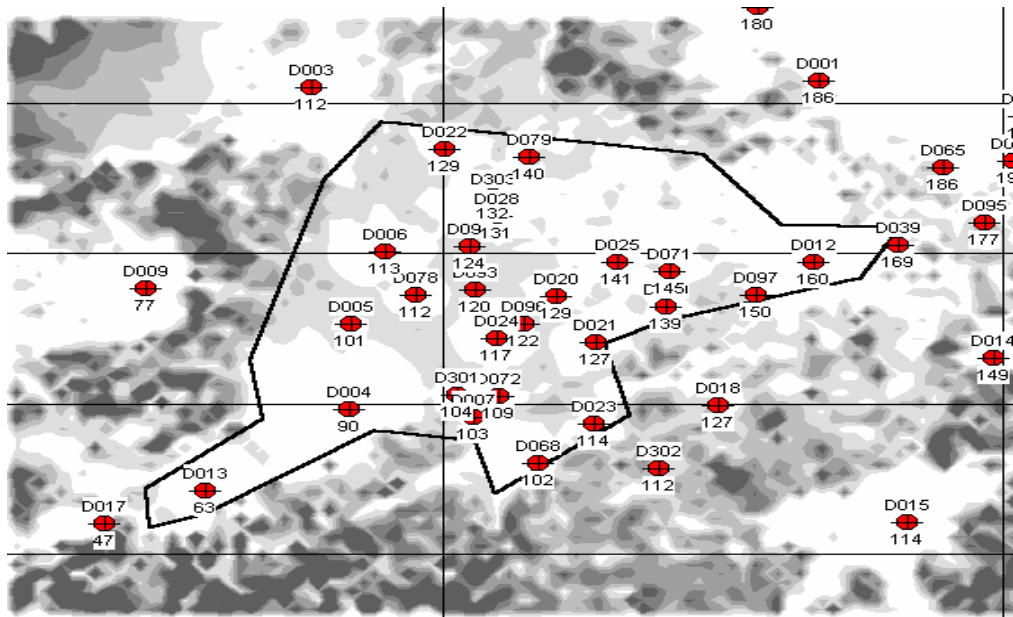


圖 4-3：最佳化後的同播系統

4.2 案例 2：依人口劃分的涵蓋率

圖 4-4 為蜂巢系統的涵蓋圖，它是 Wi-Max 系統的涵蓋規劃。地區為美國德州達拉斯、渥斯堡與丹頓市的範圍，面積約 10,000 平方公里，在此顯示的是以人口分佈的比率為基礎，依人口密度擺放了 125 個 BS(圖中紅色三角形)，並且涵蓋率達 66.4%。

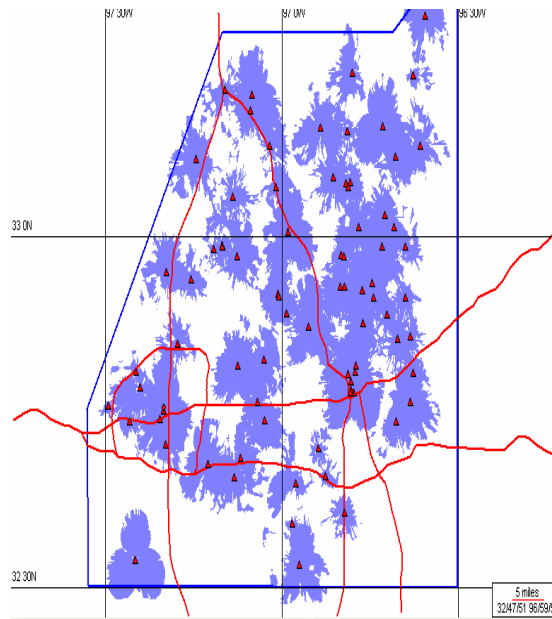


圖 4-4：依照人口密度規劃

圖 4-5 顯示的是經過系統規劃後，SA 處理的結果，涵蓋率降到了 64.88%，但是移除了 72 個 BS(圖中綠色三角形)。

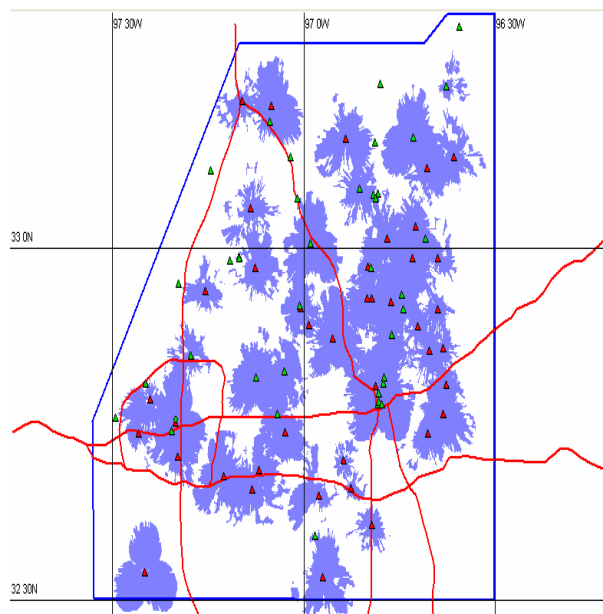


圖 4-5：最佳化後移除 72 個 BS

4.3 實驗 1：使用 IRMA 平台對蜂巢系統涵蓋做規劃

本實驗依據台中市西屯區做規劃，使用 IRMA(Integrated Radio Frequency Modeling Aid)模擬平台來規劃，首先繪出該區規劃區域，並選出可架設之 BS 位置(圖 4-6)。圖中綠色的點表示 BS 可架設的地點，紅色表示已架設之地點，詳細步驟(步驟一~步驟五)如下：

步驟一：畫出規劃之區域，並標出此區 BS 可架設位置(圖 4-6)。

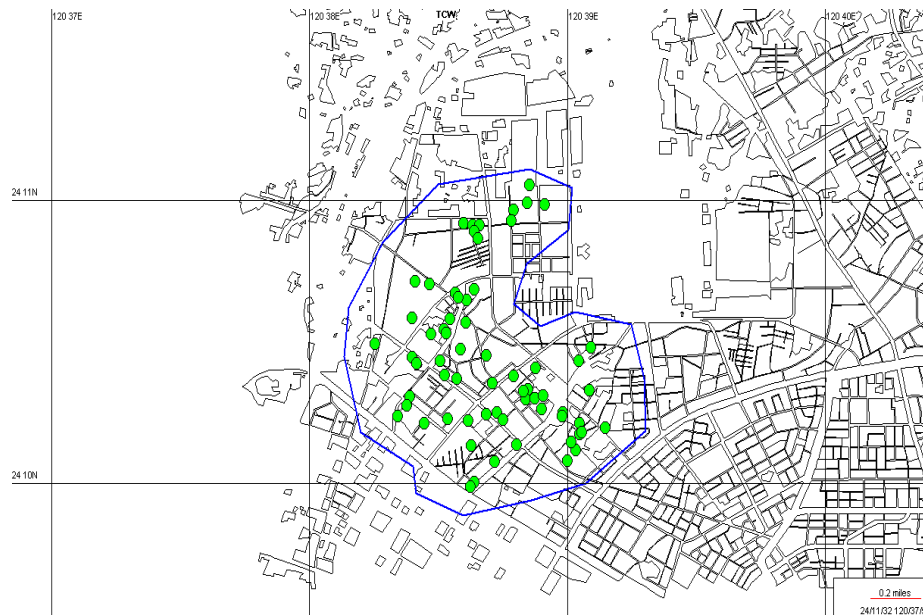


圖 4-6：標示出可架設之 BS 位置

步驟二：接下來將所標的之區域依照經緯度來劃分等份格子，共劃分 30983 個格子(圖 4-7)。

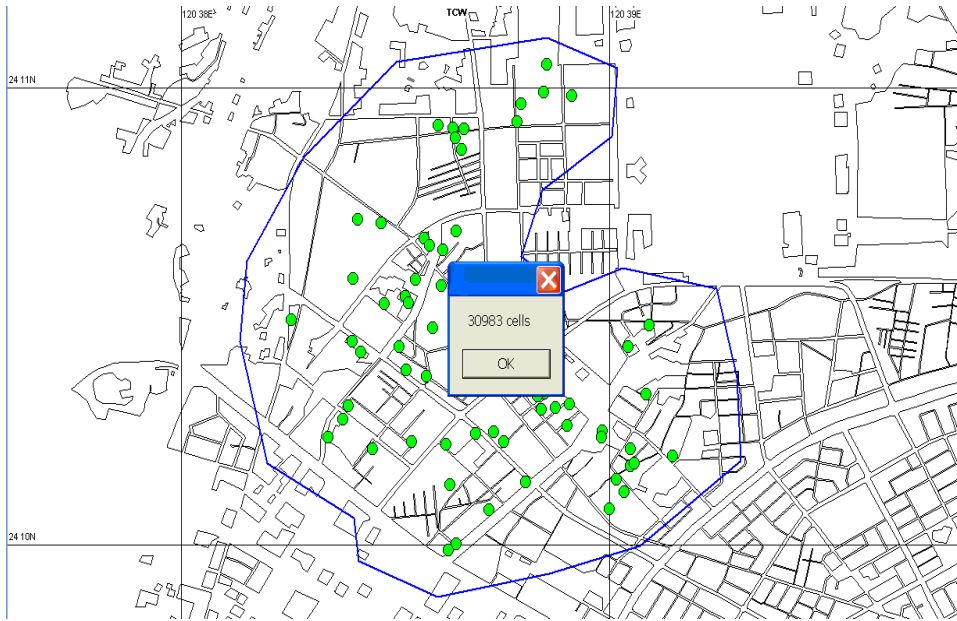


圖 4-7：劃分 30983 個格子

步驟三：假設全部 BS 已架設，計算全區涵蓋率結果為 73.1%(圖 4-8)，代表這區可架設的 BS 點只能涵蓋 73.1%。

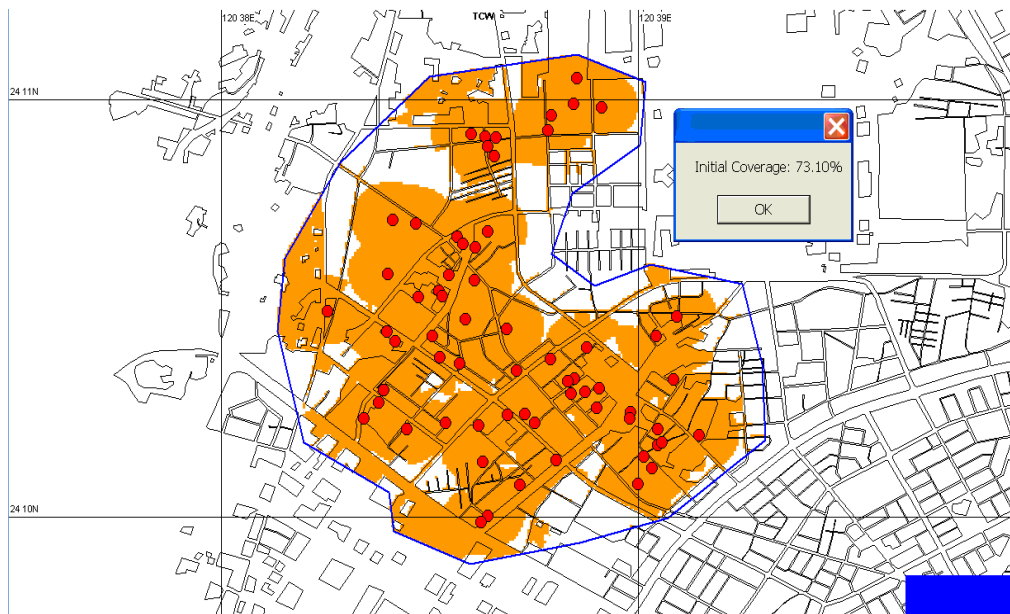


圖 4-8：全部可架設點都已架設的涵蓋率為 73.1%

步驟四：假設有 7 個綠色的點是 BS 重疊的部份，我們將它移除掉，並計算涵蓋之區域剩下 72.85%(圖 4-9)。

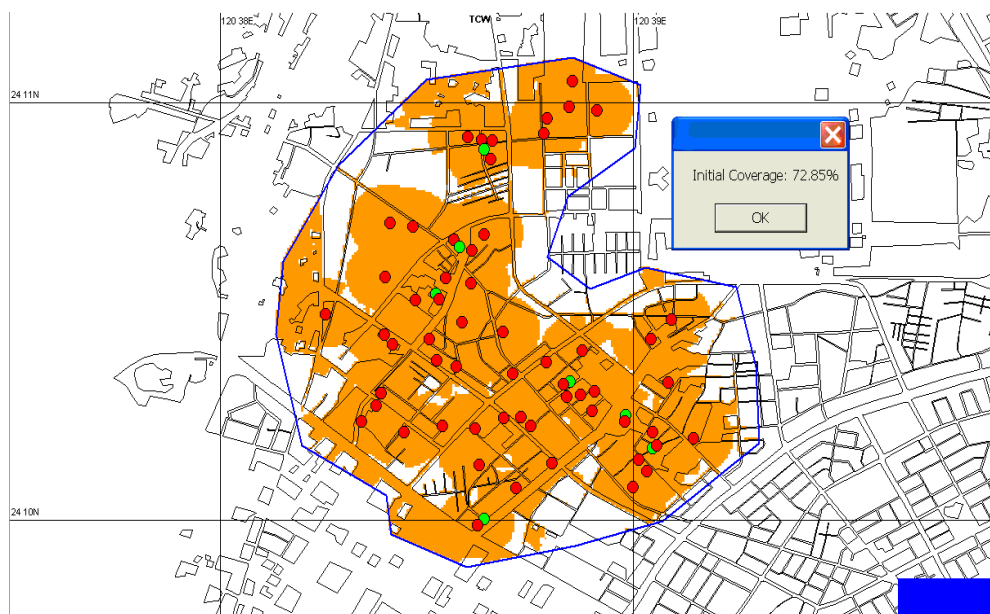


圖 4-9：移除掉 7 個綠色的點後涵蓋率剩 72.85%

步驟五：以模擬的結果進行實際的路測，再以模擬結果來評估並修改參數，最後我們選定欲移除的點，再計算移除後所剩的涵蓋率是否達到系統所要求，如(圖 4-8)~(圖 4-9)中所示，移除了 7 個 BS 但涵蓋率只減少了 0.25%，最後依照系統所要求的標準來減少 BS 的架設數量，來達到優化的目的。

4.4 實驗 2：室內涵蓋

由於涵蓋需考慮室內涵蓋及室外涵蓋，實驗目的得到不同的環境須考量不同的衰減係數[12]。本實驗架設 3 台 AP(Access Point)，選定

9 個點(1)~(9)來測量衰減係數，測試軟體使用 Network Stumbler，實驗環境平面圖(圖 4-10)，紅色部分表示 AP 所架設位置，高度約為 3.5m。

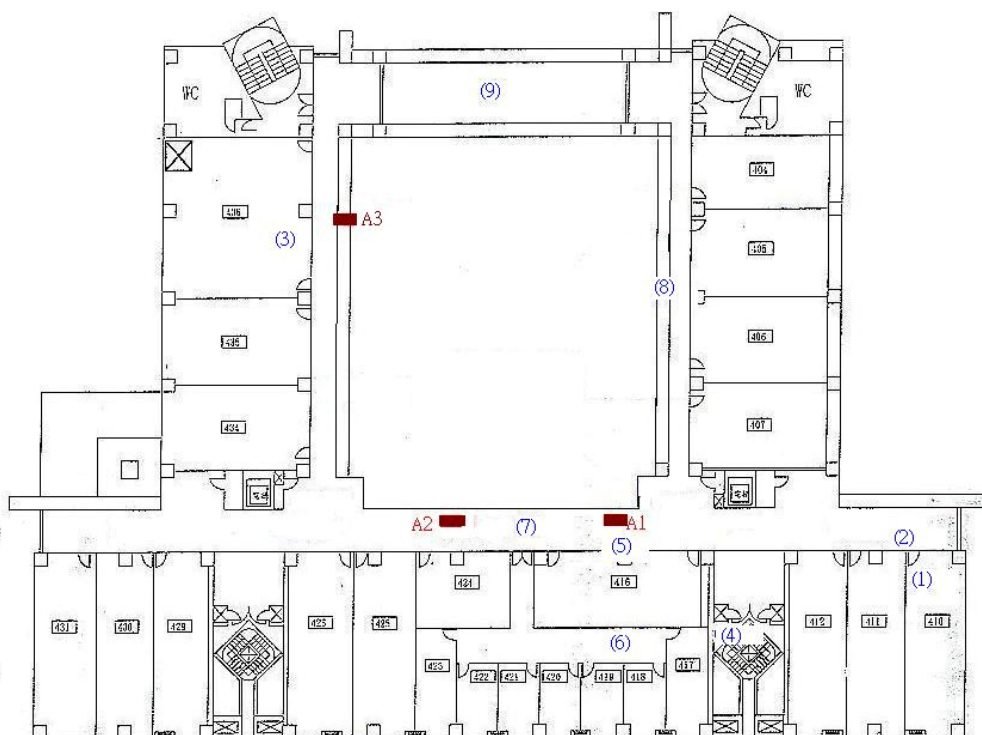


圖 4-10：紅色表示 AP 位置，藍色數字表示測量點

解釋測試環境如下：

1. 測試點(1)為水泥隔間內，並隔玻璃門、窗。
2. 測試點(2)為與 A1 為直線距離 20m，與 A2 距離 25m。
3. 測試點(3)與 A3 相隔木板。
4. 測試點(4)為位於鐵門後，鐵門厚達約 10 公分及水泥轉角處。
5. 測試點(5)為 A1 正下方。

6. 測試點(6)為與 A1 僅隔兩扇玻璃。
7. 測試點(7)為 A1、A2 中間。
8. 測試點(8)為與 A2、A3 約 15m，與 A1 約 10m。
9. 測試點(9)與 A1、A2 距離 20m，與 A3 距離 6m。

測量各點所得之平均 Signal 值如下(表 4-1)，單位為(dBm)，圖 4-11 為測量訊號的數值，X 記號表示訊號值低於 -100dBm。

MAC	SSID	Name	Chan	Speed	Vendor	Type	Enc...	SNR	Signal
0014678349A2	nymesh		1	54 Mbps	(Fake)	AP		160	160
0221914339E5	PSP_AUJIM05500_L_MHP2Q001		1	11 Mbps	(User-d...	Peer		6	-94
00304F38DA37	thu		8	54 Mbps	FLANE...	AP		13	-82
001195D0F445	setc demo		1	54 Mbps	(Fake)	AP	WEP		160
0212F0000322	Wireless UDLA		11	54 Mbps	(User-d...	Peer		160	160
0018F35820DD	setc		1	54 Mbps	(Fake)	AP	WEP		160
S28C23FEFB06	PSP_AUJIM05500_L_MHP2Q000		1	11 Mbps	(User-d...	Peer			160
001195E85E4B	thu		1	54 Mbps	(Fake)	AP			160
00507F3562E0	DBLAB		9	54 Mbps		AP		0	
001E584AE817	thu		6	54 Mbps	(Fake)	AP			-95
0004E2E586A8	IVPL_2		6	54 Mbps	SMC	AP		16	
001884159BDA	MyPlace		3	54 Mbps	(Fake)	AP	WEP	12	160
001CF0074598	thu		2	54 Mbps	(Fake)	AP		7	-86
00904B088296	thu		1	11 Mbps	Gemtek	AP		16	-68
001195E85E29	thu		6	54 Mbps	(Fake)	AP			-82
001E584AE81E	thu		6	54 Mbps	(Fake)	AP			160
001195E85D53	thu		4	54 Mbps	(Fake)	AP			
001346FDA622	thu		1	54 Mbps	(Fake)	AP			-82
001601848B68	001601848B6A		6	54 Mbps	(Fake)	AP	WEP	7	160
001E584AE81C	thu		6	54 Mbps	(Fake)	AP			-81
001E584AE7FB	thu		11	54 Mbps	(Fake)	AP			160
001F1F0C8D3F	HPC		11	54 Mbps	(Fake)	AP		18	160
00904B088299	thu		11	11 Mbps	Gemtek	AP		8	-85
001E14CC03A	SSLAB		11*	54 Mbps	(Fake)	AP		22	-54
00304F38B1FB	thu		4	54 Mbps	FLANE...	AP		23	-77
001195E85E28	thu		8	54 Mbps	(Fake)	AP		15	-79
000D0B12006A	ISLAB AP		11	54 Mbps		AP		34	-45
00904B08822E	default		6	11 Mbps	Gemtek	AP			-83
00304F38B1EB	thu		6	54 Mbps	PLANE...	AP		36	-63

圖 4-11：使用 Network Stumbler 測量情形

表 4-1：AP 到各點所測得之 Signal 值(dBm)

測量點 \ AP	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
A1	-79	-50	-78	X	-30	-42	-31	-47	-31
A2	-88	-75	-51	X	-60	-52	-33	-30	-30
A3	X	-82	-37	X	-64	-63	-55	-54	-27

由(表 4-1)可得知，不同的材質如玻璃、水泥牆、鐵門等，都會造成對 AP 訊號不一樣的衰減，對於鐵製的材質，可以由測試點(4)得知，完全阻擋了訊號的強度，由測試點(7)可觀察到 A1 與 A2 的訊號值較高，但測得的 SNR 值大約都在 55~60(dBm)之間，由此可得知兩訊號重疊部分會造成干擾，再由測試點(9)與(1)(3)(4)(6)比較得知距離的衰減訊號則小於建築物的阻擋，但衰減的因素非常的多，如訊號的干擾、繞射等問題，都必須考慮在內，還有天線的高度及增益都是必須考量的，本次僅以簡單的測試來驗證不同的環境須考慮用不同的衰減係數來計算涵蓋，由測驗得知不同的環境會有不同的衰減係數，以下圖 4-12 為美國 FCC 所制定的環境衰減係數，由實驗方向來思考，若將相同的實驗放大到室外的環境，也必須以相同的概念來測量環境的衰減係數，如此才可以提高系統規劃的準確率。

Loss(dB)	Code	Description
0	1	Water
24	2	Open
0	3	Forest
0	4	Low density buildings
0	5	Medium density buildings
0	6	High density buildings
0	7	Transportation
0	8	Airports
12	11	Residential
24	12	Commercial and Services
24	13	Industrial
12	14	Transportation, Communications and Utilities
24	15	Industrial and Commercial Complexes
24	16	Mixed Urban or Built-up Land
12	17	Other Urban or Built-up Land
12	21	Cropland and Pasture
12	22	Orchards, Groves, Vineyards, Nurseries and Ornamental Horticultural Area
12	23	Confined Feeding Operations
12	24	Other Agricultural
6	31	Herbaceous Rangeland
6	32	Shrub and Brush Rangeland
6	33	Mixed Rangeland
6	41	Deciduous Forest Land
17	42	Evergreen Forest Land
15	43	Mixed Forest Land
6	61	Forested Wetland

圖 4-12：FCC 制定環境衰減係數

第五章 制定無線電系統規劃與建置之 SOP

依照環境與系統的要求不同，所以計算出的涵蓋也會不同，透過計算涵蓋的過程我們訂定以下 SOP，目的為：

1. 規劃並做有系統的建置流程。
2. 降低建置的成本與工時。
3. 確保通訊的品質，並有利於提供建置無線電系統之參考。

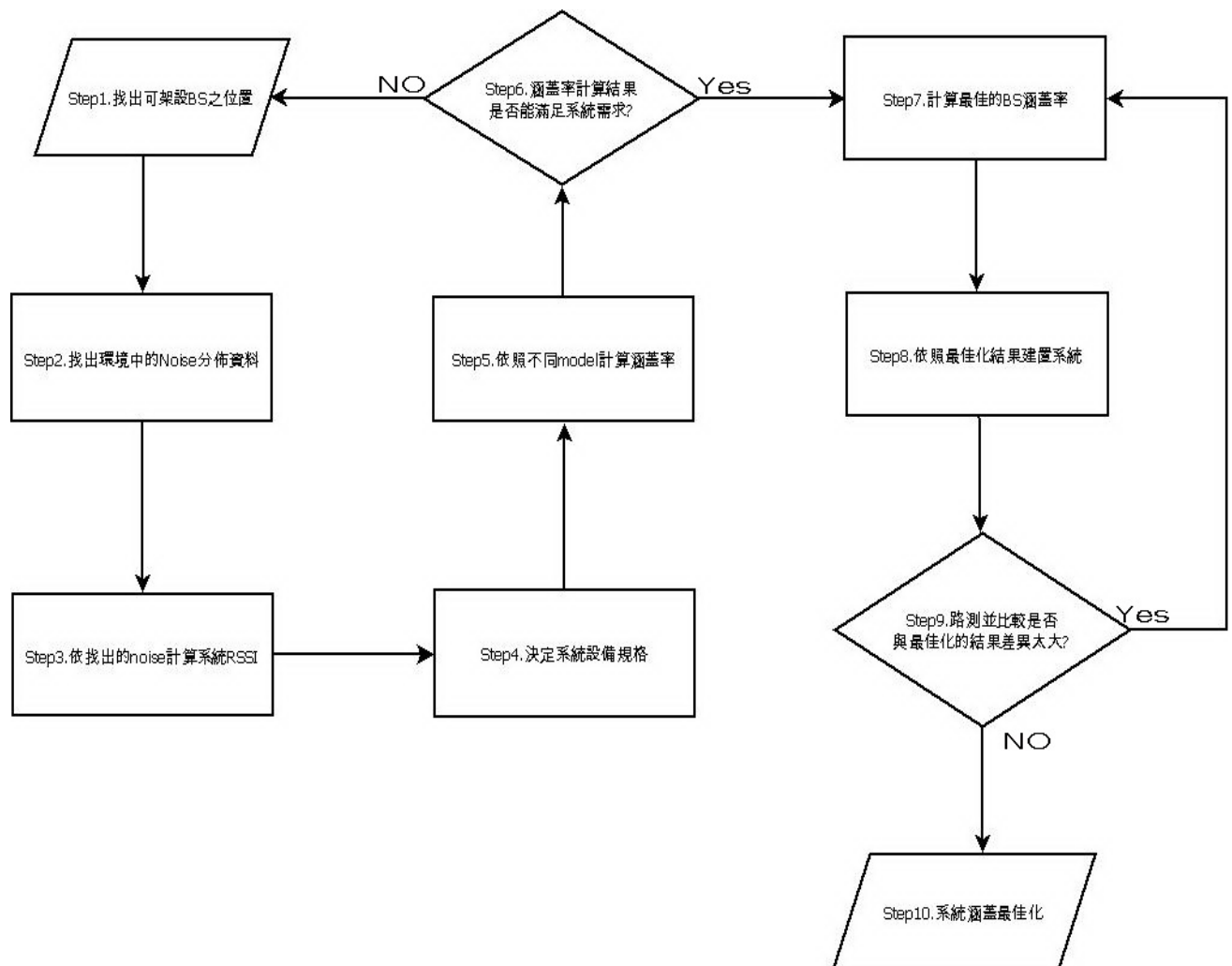


圖 5-1：系統建置 SOP 流程圖

Step 1： 標出可架設 BS 的位置

首先進行資料的收集，依照系統欲規劃之區域，如大樓樓頂或是高處，至現場勘查後確定出可架設 BS 的位置，標出 BS 的經緯度與具地面的海拔高度，針對預期架設之 BS 位置進行分析，其分析之目的在於避免 BS 間產生頻道干擾與阻塞的問題，並於模擬平台中標示出這些位置出來。

Step 2： 路測找出干擾與雜訊(Noise)的分佈

找出 Noise 的分佈資料，以便於下步驟中計算 RSSI。因環境中佈滿著許多的干擾，找出 SNR 值 $> 4\text{dBm}$ ，即為干擾來源。針對 BS 建置的區域進行量測，使用 Network Stumbler 找出干擾的訊號來源並於 Platform 中進行模擬，有利於排除未來可能產生的同頻與鄰頻干擾的問題。若產生同頻及鄰頻的干擾，則必須進行頻道的分配(Channel Assignment)，針對同頻干擾的問題，我們必須同時考慮 Up-Link 與 Down-Link 同頻干擾的問題，同時正確地計算出 SNIR(Signal-to-Noise/Interference ratio)的值，它們必須高於上、下行雙方面的需求。

Step 3： 計算出系統最低 RSSI

因為接收裝置的不同，傳送的訊號也不相同，其包含有資料(Data)與語音(Voice)等不同形態，再者因系統、設備與用途不同，

所以會有不一樣的 RSSI，找出系統可接受的最低 RSSI 後再扣掉干擾的訊號值(SNR)，即為可接受之訊號值，依系統建置的最低標準需求再扣掉干擾的訊號值後決定出最低 RSSI。

Step 4： 購買與決定系統設備規格

依照找出的 RSSI 來決定設備的規格後再依此決定設備的最低需求，購置可移動或不需移動，天線角度與功率是否可調整的設備，以免購置不同規格的配備而造成浪費。

Step 5： 找出適合的 Propagation Model，並計算涵蓋率。

依照所收集到的參數並選用適合的 Propagation Model，計算所有 BS 架設完後的涵蓋率為多少，而計算的依據必須考慮以土地面積或人口密度為標的的計算方式，此目的是為了計算出理論值，而 Model 須再參考環境衰減係數表，計算出 Free Space 與地面環境不一樣的理論值，依計算出的涵蓋範圍，才可得知路測的區域。

Step 6： 涵蓋率是否已達系統需求

依照計算結果查看是否符合系統建置的最低要求，若所選定的 BS 涵蓋率已經超過系統的需求，則進到 Step 7 進行 BS 優化的步驟，若不是的話則表示所選定的 BS 並無法滿足系統的最低需求，則回到 Step 1 重新選擇新的 BS 位置。

Step 7： 系統涵蓋最佳化，增加或移除 BS

系統的涵蓋已超過系統建置的要求，則找出可移除的 BS 並計算出最佳涵蓋率，以最少的 BS 達到最佳的涵蓋，但涵蓋率還在最佳範圍內，這為最佳化的其中一項而已，此時還要考慮通話量的分佈，再依照分佈的情形做調整，而環境的不同如距離、高度，可算出衰減係數，最佳化過程中還須考慮頻道干擾與阻塞問題。

Step 8： 依照最佳化的結果建置系統

此步驟依照最佳化的結果建置系統，建置完後進行下一步驟的路測。

Step 9： 路測並與最佳化的計算結果比較

系統建置完後將於此步驟進行實際的路測，並與計算最佳化後的結果做比較，若差異太大則重新檢討環境中的 noise 參數，並回到 Step 7 調整最佳化的結果。若與計算結果差異不大，則得最佳化結果 Step 10 此步驟僅做微調工作，修正參數、EIRP 與天線角度。

Step 10： 系統最佳化

以上步驟為 Down-link 的計算部分，依據 Down-link 的訊號分佈資料來計算 Up-link 的訊號範圍，因手持裝置會移動的關係，故無法計算其 Up-link 的涵蓋，所以依照 Down-link 的設定參數來計算 Up-link 的涵蓋，再取兩相交集部分後才為得到系統的最佳涵蓋率結果。

第六章 結論

在這篇文章中，我們提出了使用統計的 OR 計量管理概念為基礎來規劃我們的系統，並使用 SA 的概念來計算系統中各種規劃的問題，因為對於不同的系統我們必須以不一樣的方式來計算涵蓋，在規劃系統前除了必須得知環境中的許多參數，如土地面積或人口密度，都是系統規劃所必須考量的，而由簡單的路測實驗可以知道，訊號會因各種環境的因素而造成衰減，除了須測量因距離造成的訊號衰減，還需加上因環境所造成的衰減(Propagation Delay)，若應用到室外的大環境上，遇到森林或湖泊則是該加上多少的環境衰減係數，這在系統建置前都必須加以計算的，但台灣並無相關的研究數據，所以建構一個統一的衰減數據資料庫，對於系統的建置將會有相當大的幫助。而對於系統的建置方面，也尚無人提出標準流程(SOP)，在此並依實際的建置案例與經驗來提供此 SOP，以利系統建置商參考。最後本篇只探討涵蓋的問題，但系統的建置還須考量系統干擾及阻塞兩方面，系統干擾問題也須考量上下行的規劃及頻道的有效分配方法[9][11]，而阻塞問題須將系統建置完成後再加以調整，這些議題將是我們未來的研究目標及方向。

參考文獻

- [1] 行政院國家資訊通信發展推動小組 M-Taiwan 計畫
“<http://www.nici.nat.gov.tw/content/application/nici/n1002006100710000/guest-cntgrp-browse.php?ordinal=100200610071>”
- [2] 國家通訊傳播委員會 (NCC) ， HDTV 試播案
“http://www.ncc.gov.tw/chinese/news_detail.aspx?sn_f=731”.
- [3] 聯強電子城市
“http://www.synnex.com.tw/asp/fae_qaDetail.asp?topic=FAE&group=&parent=&classifyid=01534&seqno=17730&vendor” .
- [4] 顧喬祺(民 95)。避免風車對電磁波造成干擾,Global Wind Technologies Inc.
- [5] CM. Chang, “WIFI RF SYSTEM DESIGN”, 2005.
- [6] CMC Consulting Inc.,
“<http://www.commercemicro.com/index.html>”.
- [7] Griff L. Bilbro and Wesely E. Snyder, “Optimization of Functions with many Minima”, IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, vol. 21, No. 4, July/August 1991.
- [8] Matthew Loy and Iboun Sylla (民 97), ISM 頻帶與短距裝置天線基本原理，電子工程專輯。
- [9] M. Duque-Anton, D. Kunz, and B. Ruber, “Channel assignment for cellular radio using simulated annealing,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 40, no. 1, pp. 14-21, Feb. 1991.
- [10] T.C. Sheives, C.M. Chang, C.T. Hsu, “A comparison of point-to-point computer aided radio propagation models with field test data”, Vehicular Technology Conference, 1988.
- [11] Wei Wang and Craig K. Rushforth, “An Adaptive Local-Search Algorithm for the Channel-Assignment Problem (CAP) ” , Senior Member, IEEE, 1996.

[12] William C.Y. Lee, "Mobile Communications Engineering",
McGraw-Hill, 1982