

在 NCTUns 平台上模擬 IEEE 802.16e Mobile WiMAX 網路

Simulating IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks
Over the NCTUns Network Simulator

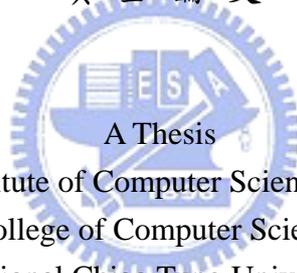
研究生：賴政凱

Student：Cheng-Kai Lai

指導教授：王協源

Advisor：Shie-Yuan Wang

國立交通大學
資訊科學與工程研究所
碩士論文



Submitted to Institute of Computer Science and Engineering
College of Computer Science
National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of
Master
in

Computer Science

June 2008

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十七年六月

在NCTUns平台上模擬IEEE 802.16e Mobile WiMAX網路

Simulating IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks over the NCTUns Network Simulator

研究生：賴政凱

指導教授：王協源

國立交通大學

資訊科學與工程研究所

摘要

IEEE 802.16 (WiMAX)是目前最被看好的無線寬頻網路存取技術之一，可解決傳統固接網路“最後一哩”的問題，並由 Intel、Nokia 等廠商主導推廣，預期將成為下一代的通訊技術主流。從 2001 年以來，為 WiMAX 網路所設計的標準，包括 802.16、802.16a、802.16d、802.16e...等。其中，2005 年所提出的 802.16e 標準裡，支援移動式的存取方式，並提供多種媒體存取控制層的換手機制，讓 MS (Mobile Station)可以在移動過程中維持網路通訊。另外，在實體層的調變部份，此標準採用 OFDMA 規範，提供更有彈性的頻寬配置方式。

在本篇論文中，我們在 NCTUns 網路模擬器裡開發 IEEE 802.16e 模組，且提供兩種新的節點，分別是 BS (Base Station)與 MS，供使用者方便建構 IEEE 802.16e 網路拓樸。另外，在媒體存取控制層，我們的模組支援硬式換手的機制與服務；而實體層的部份，則是採用 OFDMA 的規範來設計。根據我們的模組實作，研究者可以方便地使用模擬來進行他們的研究。

關鍵字：網路模擬器、IEEE 802.16e、無線寬頻存取，全球互通微波存取、硬式換手、正交分頻多重存取。

Simulating IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks over the NCTUns Network Simulator

Student : Cheng-Kai Lai

Advisor : Shie-Yuan Wang

Institute of Computer Science and Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

The IEEE 802.16 (WiMAX) standard, supported by several companies like Intel and Nokia, is one of the most popular technologies for broadband wireless accesses. It solves the last-mile problem with traditional wired networks and is expected to be the mainstream of the next-generation communication technology. The related specifications, such as 802.16, 802.16a, 802.16d, 802.16e, etc., are designed for WiMAX networks from 2001. Among these standards, the IEEE 802.16e provides mobility capabilities. It defines many kinds of MAC layer handover mechanisms so that the MSs (Mobile Stations) can retain connections when they perform roaming. Furthermore, at the physical layer, it uses the OFDMA technology to allow more flexible bandwidth allocation.

In this thesis, we develop the IEEE 802.16e protocol modules on NCTUns network simulator. In our design, we add BS (Base Station) and MS nodes, which can conveniently help users to construct IEEE 802.16e network topologies. In addition, our modules support hard handover services at the MAC layer and use the OFDMA technology at the physical layer. Based on our work, researchers can easily use simulations to perform their studies and save much experimental time.

Keywords: network simulator, IEEE 802.16e, BWA, WiMAX, hard handover, OFDMA.

誌謝辭

首先，我要感謝我的指導教授王協源老師這兩年來的指導，讓我在課業、生活或研究上都獲得許多寶貴的經驗。並且在研究所的學習生涯中，讓我接觸到許多新穎的技術與知識，對於我未來的就業或學習方面都有相當大的幫助。

感謝楊竹星教授、黃能富教授與周承復教授能撥冗前來交通大學，擔任本篇論文口試委員，你們珍貴的建議與意見將使本篇論文更加充實且完整。

感謝兩位博士班學長—周志良與林志哲，在學長的帶領之下，讓我獲得許多專案設計與開發的實務經驗。無論在學習或生活各方面，有你們的提攜與經驗傳承，讓我遇到困難時都能順利地迎刃而解。感謝同甘共苦的實驗室夥伴們，在我開發這套系統及撰寫論文等各方面，給予我最即時的建議與協助。也勉勵實驗室的學弟們能繼續努力，期望你們可以順利完成學業。

感謝小姑姑在我準備本篇論文這段時間裡的照顧，每次生活上的小叮嚀都讓我覺得很窩心。最後，我要感謝我的爸媽，有你們的全力支持，讓我在求學過程中能夠無後顧之憂地努力衝刺，希望碩士學位的榮耀可以與你們一同分享。

目 錄

摘 要	i
ABSTRACT	ii
誌謝辭	iii
目 錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	viii
Chapter 1. Introduction	1
Chapter 2. Background	3
2.1. 相關文獻	4
2.2. 媒體存取控制層	6
2.2.1. 特定服務收斂子層	6
2.2.2. 通用子層	7
2.2.2.1. MAC 訊框結構	8
2.2.2.2. 連線識別碼	10
2.2.2.3. MAC 管理訊息	11
2.2.2.4. 初始測距與加入網路	13
2.2.2.5. 定期測距	16
2.2.2.6. 換手程序與機制	16
2.2.3. 安全子層	18
2.3. 實體層	19
2.3.1. 正交分頻多重存取	19
2.3.2. 可適性調變與編碼	21
2.3.3. Slot 與訊框架構	22
Chapter 3. Design	25
3.1. NCTUns 網路模擬器平台設計與模組架構	25
3.2. 支援的節點與網路拓樸	28
3.3. 協定堆疊	30
3.3.1. 802.16e BS 節點	30
3.3.2. 802.16e MS 節點	31
3.4. IEEE 802.16e 模組設計	32
3.4.1. 媒體存取控制層的模組設計	32
3.4.1.1. BS 媒體存取控制層的模組設計	36
3.4.1.2. MS 媒體存取控制層的模組設計	41
3.4.2. 實體層的模組設計	42
3.4.2.1. BS 實體層的模組設計	43

3.4.2.2. MS 實體層的模組設計	43
Chapter 4. Implementation	44
4.1 媒體存取控制層模組	44
4.2 實體層模組	49
Chapter 5. Simulation Results	51
5.1. 模擬結果分析與驗證	51
5.1.1. UDP 效能量測	52
5.1.2. 延遲時間量測	55
5.1.3. 換手與 Mobile IP 機制	61
5.2. 通道效能評估	62
5.3. 模擬性能分析	68
Chapter 6. Future Work	71
Chapter 7. Conclusion	73
Reference	74



圖目錄

圖 2-1.	IEEE 802.16 的分層架構	5
圖 2-2.	收斂子層支援的封包類型	7
圖 2-3.	MAC PDU 結構	8
圖 2-4.	Generic MAC Header 欄位格式	9
圖 2-5.	管理訊息的欄位格式	11
圖 2-6.	Network Entry 流程圖	15
圖 2-7.	換手機制下的加入網路流程	18
圖 2-8.	OFDMA 實作概念示意圖	20
圖 2-9.	實體層傳送與接收的調變與編碼流程	21
圖 2-10.	OFDMA 訊框區間架構	23
圖 3-1.	NCTUns 裡的模組堆疊架構	26
圖 3-2.	Nsobject class 定義	27
圖 3-3.	模組間封包的傳遞架構	28
圖 3-4.	IEEE 802.16e 點對多點模式支援的節點	28
圖 3-5.	BS 與 MS 的網路拓樸	29
圖 3-6.	MAC PDU 與 IP 封包的轉換	30
圖 3-7.	BS 與 MS 的協定堆疊	32
圖 3-8.	BS 與 MS 物件間的資料傳遞	37
圖 3-9.	測距子通道的競爭區間分配情形	39
圖 3-10.	BS 以 Round-Robin 方式配置下行頻寬	40
圖 3-11.	BS 排程器配置訊框流程	41
圖 4-1.	各種 UL-MAP IE 與 DL-MAP IE 的資料結構	45
圖 4-2.	UL-MAP IE 與 DL-MAP IE class 定義	46
圖 4-3.	NbrBS 與 NeighborBSs class 定義	47
圖 4-4.	MS 掃描鄰近 BS 的過程	48
圖 4-5.	訊號雜訊比計算式	48
圖 4-6.	DLFP 資料結構與在下行子訊框的位置	49
圖 4-7.	上下行資料傳輸時間示意圖	50
圖 5-1.	進行效能量測時的網路拓樸	52
圖 5-2.	不同 FEC 下的 UDP 效能	54
圖 5-3.	進行延遲時間量測時的網路拓樸	55
圖 5-4.	ping 程式執行時間與參數設定	56
圖 5-5.	ping 程式模擬結果與統計 (Host→MS)	56
圖 5-6.	傳送 ICMP 封包時序圖 (Host→MS)	57
圖 5-7.	ping 程式的模擬結果 (MS→Host)	58

圖 5-8.	傳送 ICMP 封包時序圖 (MS→Host).....	59
圖 5-9.	ping 程式的模擬結果 (MS→MS).....	59
圖 5-10.	傳送 ICMP 封包時序圖 (MS→MS).....	60
圖 5-11.	測試換手機制時的網路拓樸	61
圖 5-12.	換手機制下的模擬結果	62
圖 5-13.	在不同距離下使用 QPSK 1/2 機制的 UDP 效能.....	63
圖 5-14.	在不同距離下使用 QPSK 3/4 機制的 UDP 效能.....	64
圖 5-15.	在不同距離下使用 16QAM 1/2 機制的 UDP 效能	64
圖 5-16.	在不同距離下使用 16QAM 3/4 機制的 UDP 效能	65
圖 5-17.	在不同距離下使用 64QAM 1/2 機制的 UDP 效能	65
圖 5-18.	在不同距離下使用 64QAM 2/3 機制的 UDP 效能	66
圖 5-19.	在不同距離下使用 64QAM 3/4 機制的 UDP 效能	66
圖 5-20.	在不同距離下使用各種 FEC 機制的 UDP 效能 (加入通道錯誤).....	67



表目錄

表 2-1.	Generic MAC Header 欄位說明	9
表 2-2.	Generic MAC Header 裡的 Type 欄位說明	10
表 2-3.	連線識別碼 (CID).....	11
表 2-4.	管理訊息類型與描述	12
表 2-5.	OFDM 實體層相關參數.....	20
表 2-6.	不同 FEC 下的單位 slot 傳輸量	22
表 3-1.	DL-PUSC 參數表	38
表 3-2.	UL-PUSC 參數表	38
表 5-1.	模擬時的系統參數	51
表 5-2.	不同 FEC 下的傳輸效能理論值	53
表 5-3.	不同 FEC 下的 UDP 流量使用率	53
表 5-4.	Mobile IP Agent 參數表	61
表 5-5.	一個 BS 與一個 MS 僅傳輸管理訊息並開啟頻道編碼功能的實驗結果 ...	68
表 5-6.	一個 BS 送 greedy UDP 封包給一個 MS 的實驗結果	69
表 5-7.	一個 BS 與兩個 MS 在不同組態下的實驗結果	70



Chapter 1. Introduction

隨著無線網路的普及化，越來越多的需求與應用都期盼無線網路能給予更有品質及便利性的服務。現今，WiMAX (Worldwide Interoperability of Microwave Access，全球互通微波存取)是最被廣為討論的無線通訊技術之一，主要用於都會型區域網路 (MAN)。其具有無線寬頻及遠距離傳輸的能力，並提供不同網路頻寬需求 (Quality of Service，簡稱：QoS)的服務，加上行動通訊的支援，未來將成為無線通訊網路應用上的一大變革。

WiMAX 技術以 IEEE 802.16 系列的規格標準為基礎，IEEE 802.16 最早是在 2001 年 12 月提出，定位於固接、點對多點的無線傳輸，並使用 10~66 GHz 頻段提供可視性 (Line of Sight，簡稱：LOS)傳輸服務。緊接著在 2003 年 1 月提出修訂版本 IEEE 802.16a，使用較低頻段的 2~11 GHz 並增加非可視性 (Non Line of Sight，簡稱：NLOS)傳輸服務的相關規範，以消除 IEEE 802.16 限制在可視範圍內直線傳輸的缺點。在 2004 年 6 月通過 IEEE 802.16-2004，這項標準是先前兩種規格 IEEE 802.16 及 IEEE 802.16a 的整合版本，定義在區域與都會網路中的寬頻無線存取介面，此標準將成為未來固接式通訊裝置所應遵循的規格。針對行動通訊方面，在 2005 年 12 月訂定 IEEE 802.16-2005 (俗稱 802.16e 或 Mobile WiMAX)，WiMAX 的移動式標準，是 IEEE 802.16-2004 固接式系統的修訂版，提供行動裝置在高速移動下的服務持續性及省電功能。

在 IEEE 802.16 標準中，定義了媒體存取控制層 (Medium Access Control Layer)及實體層 (Physical Layer)的各項規範。媒體存取控制層分為兩種模式，一是點對多點的 PMP 模式，一是多點對多點的 Mesh 模式；實體層則分成四種不同的機制，分別是 SC、SCa、OFDM、OFDMA。在本篇論文中的實作是依據 IEEE 802.16-2005 的移動式 WiMAX 標準，並著重在 PMP 模式搭配 OFDMA 的實體層設計。

目前大多數地區的寬頻網路連線方式，仍是以纜線數據機 (Cable Modem)及數位用戶迴路 (DSL)為主。傳統有線網路的優點在於傳輸速度快且穩定，較不容易受到環境因素的干擾，而影響網路傳輸品質；但佈建有線網路及線路的保養與維修所需的成本相當高昂。WiMAX

使用無線寬頻網路存取技術，不僅有效解決有線網路最後一哩 (Last Mile)的問題，也節省了架設寬頻網路所需的成本，將是未來取代有線網路的一項新技術。

關於 IEEE 802.16e 的相關研究已經相當普遍，近幾年，各家廠商的 WiMAX 相關設備已進入測試與驗證的階段，加上地區頻譜的授權開放，也在世界各國如火如荼地進行中。然而，目前在研究 IEEE 802.16e 網路的模擬工具，都是研究者所自行開發的小型模擬器，有些無法與其他網路結合，且無法使用真實世界的網路協定堆疊來進行模擬，其中多數的程式碼並不公開使用。於是，我們將在 NCTUns 網路模擬器上開發 Mobile WiMAX 網路協定，讓對 IEEE 802.16e 網路有興趣的研究者，可以方便地取得模擬器進行更深入的研究與探討。

NCTUns 網路模擬器具有以下幾項特點：首先，模擬器使用真實世界的網路協定堆疊，能夠真實地呈現模擬結果；在模擬的網路拓樸上，亦可執行真實世界的應用程式來產生真實的封包及流量。另外，NCTUns 提供圖形化介面 (GUI)的操作模式，整合模擬環境的設定功能及相關模組參數設定，使用上非常方便且順手。加上 NCTUns 是提供免費下載及開放程式碼架構，使用者可以很容易地在模擬器上增加新的網路模組，或是修改既有的模組功能，對於研究方面有相當大的幫助。基於這些特點，我們將在 NCTUns 網路模擬器上開發 Mobile WiMAX 模組，來模擬 IEEE 802.16e 網路協定，進而分析與量測效能。

本篇論文的架構如下：在第二章裡，將簡單描述 IEEE 802.16 系列標準的相關背景與 WiMAX 模擬平台的文獻調查。第三章中，我們將分成媒體存取控制層與實體層兩個部份，來介紹模組的設計架構。第四章將會說明關於實作此模組的方法及細節。接著，在第五章，我們將呈現模擬結果並調整相關參數來觀察通道效能及平台性能。最後，在第六、七章裡，我們將提出一些未來展望並總結本篇論文。

Chapter 2. Background

在都會型網路架構下，無論是在一般家庭用戶、商業用途或行動通訊方面，IEEE 802.16 都將是未來寬頻無線網路存取的市場主流。負責制定 IEEE 802.16 標準的工作團隊，從 2001 年以來已經通過了以下幾個重要的版本：802.16 (2001)、802.16c (2002)、802.16a (2003)、802.16d (2004)、802.16e (2005)。另外，一些相關的修訂版本從 802.16f 至 802.16k 也都陸續被提出，使 WiMAX 網路在任何層面的應用都有相關規格可以依據。目前固定式的 802.16d 點對多點模式及網狀模式在 NCTUns 網路模擬器中已經有支援，但移動式的 802.16e 搭配 OFDMA 實體層的設計卻尚未實作，所以本篇論文將著重在 802.16e 的設計實作上。

IEEE Std 802.16 是所有 IEEE 802.16 系列標準裡最早被提出來的規格，主要使用的頻帶是 10~66 GHz，訊號涵蓋範圍約 1~3 哩 (5 公里)。實體層是採用單一載波 (Single Carrier) 的設計，通道頻寬使用範圍為 20~28 MHz，傳輸速度可達到 134 Mbps (當通道頻寬為 28 MHz 時)。由於 IEEE Std 802.16 是使用較高的頻帶，於是 BS (Base Station, 基地台) 與 SS (Subscribe Station, 用戶端) 必須進行可視性的傳輸。因此，本規格較不適用於一般家庭與室內用戶。

IEEE Std 802.16a 是 802.16 的修訂版，主要使用的頻帶是 2~11 GHz，訊號涵蓋範圍約 4~6 哩 (10 公里)。實體層則是採用正交分頻多工 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)，以解決多重路徑的干擾問題，並支援非可視性傳輸。可使用的通道頻寬為 1.5~20 MHz，傳輸速度可達到 70 Mbps (在通道頻寬為 20 MHz 時)。IEEE Std 802.16a 主要在強化 802.16 在用戶固接連網設備間的最後一段，以增加室內或社區用戶使用 WiMAX 網路的可行性，進而取代 WiFi 無線上網。

IEEE Std 802.16d 合併 IEEE Std 802.16、IEEE Std 802.16a 及 IEEE Std 802.16c 三項規格，並明確定義在固定式寬頻無線網路存取裡，各層間的協定與介面標準，包括媒體存取控制層與多種不同的實體層規範。

IEEE Std 802.16e 加強了 IEEE Std 802.16d 的規範來支援 SS 的高速移動，並提出媒體

存取控制層的換手機制，整合固定式與移動式的寬頻無線網路存取，主要使用頻帶限制在低於 6 GHz 的執照頻帶。針對行動通訊的需求，IEEE 802.16e 提出了一系列的省電機制，以使用於行動裝置上；除了省電之外，也期望在時速 120 公里的速度下能順暢地保持通訊。實體層採用正交分頻多重存取技術 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)，將所有子載波分割成若干群組，稱為子通道 (Sub-channel)，分配給不同用戶使用，並根據傳輸環境決定各子通道的子載波數。藉由子載波配置與可適性調變和編碼技術，讓 OFDMA 實體層方便在通道變化較大的移動環境中傳輸資料。

2.1. 相關文獻

近年來，隨著 IEEE 802.16 標準漸漸成熟，有越來越多的模擬工具將 WiMAX 視為重要的開發模組。發源於美國加州柏克萊大學的 NS-2 是目前被廣為使用的模擬器之一，屬於開程式碼的公開軟體，並運作在 Unix 相關的系統上。[9] 曾在 NS-2 模擬器上，開發實體層與媒體存取控制層模組，並使用跨層的設計方式，來模擬 IEEE 802.16e OFDMA 系統並適用於韓國地區的 WiBro 網路。其所設計的模組架構相當完整，包括實體層採用在未來將成為主流趨勢的 OFDMA，並在收斂子層支援五種 QoS 服務的排程機制。但此模組並未對外公開。

WiMAX 模組在 NS-2 上的支援，是由台灣長庚大學資工系陳仁暉教授帶領的分散式系統實驗室所提供。其設計的模組功能包括 OFDMA 實體層與各項基本的媒體存取控制層機制，但所依據的是 IEEE 802.16d 所定義的規範來實作 [10]。在 IEEE 802.16e 規格中，已針對 OFDMA 實體層進行大規模的修訂，原有的規範將不再適用於目前的系統。加上 IEEE 802.16d 是固定式的網路協定，不支援頻道掃描與換手機制，以至於無法提供行動功能。欲使用 NS-2 進行 Mobile WiMAX 研究的使用者，必須先修改原有的架構與機制，才能執行他們的研究。

除了開程式碼的 NS-2 網路模擬器外，許多商業軟體也支援 WiMAX 模組，例如：QualNet [12]與 OPNET Modeler [13]。其中，OPNET Modeler 不支援 IEEE 802.16e [11]。不過，商業軟體不公開程式碼，且購買軟體所需的費用相當高昂，不是一般使用者或學術單

位所能負荷。

NCTUns 網路模擬器透過 tunnel 介面在同一台電腦上模擬多個網路設備，並使用真實網路子系統的協定堆疊來進行模擬。另外，模擬器允許執行真實世界的應用程式來產生封包，相對於前段所提的各種模擬器，NCTUns 提供更真實的網路封包與流量。在 2007 年 7 月所釋出的 NCTUns 4.0 版本中已經支援 IEEE 802.16d 協定，包括點對多點模式與網狀模式。但其實體層所採用的是 OFDM，並且無法支援行動功能，較不適用於目前的 WiMAX 網路應用。於是本篇論文將在 NCTUns 網路模擬器上支援 IEEE 802.16e Mobile WiMAX 網路並採用 OFDMA 實體層，配合原有的 Mobile IP 機制，我們將提供基本的頻道掃描與換手功能，讓研究者能方便地使用模擬來進行 Mobile WiMAX 相關的研究。

以下，我們將介紹 IEEE 802.16 在媒體存取控制層與實體層中的分層架構及細節。

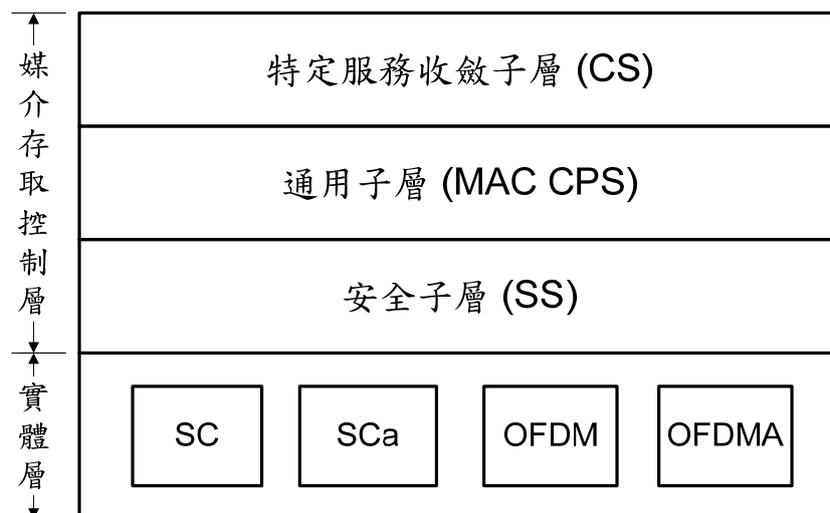


圖 2-1. IEEE 802.16 的分層架構

IEEE 802.16 定義了媒體存取控制層與實體層的兩個部份，分層架構如圖 2-1.所示。媒體存取控制層共分成三個子層，分別是：

- (1) 特定服務收斂子層 (Service-Specific Convergence Sub-layer)：定義與上層不同協定的資料傳送設定，並進行資料分類，針對資料類型與服務種類不同而給予對應的連線設定。

- (2) 通用子層 (MAC Common Part Sub-layer)：定義頻寬取得、連線建立、服務流管理的設定，並進行傳送資料前的各項溝通協調，將欲傳送的資料作分割或組合，及對所接收的資料作重組並往上層遞交。
- (3) 安全子層 (Security Sub-layer)：定義身份認證、金鑰交換、加密解密的設定，並確保底層傳輸資料的安全性。

實體層共有四種不同的規範，以適用於特定的頻段和應用，分別是：

- (1) WirelessMAN-SC：用於 10~66 GHz 頻段，適合 LOS 的應用，並使用單一載波傳輸資料。
- (2) WirelessMAN-SCa：用於 2~11 GHz 頻段，適合 NLOS 的應用，並使用單一載波傳輸資料。
- (3) WirelessMAN-OFDM：用於 2~11 GHz 頻段，適合 NLOS 的應用，並使用正交分頻多工技術。
- (4) WirelessMAN-OFDMA：用於 2~11 GHz 頻段，適合 NLOS 的應用，並使用正交分頻多重存取技術，Mobile WiMAX 以此實體層規範為主，我們的實作亦依循此項規範。

2.2. 媒體存取控制層

2.2.1. 特定服務收斂子層

特定服務收斂子層位於媒體存取控制層的最上方，透過收斂子層服務存取點 (Service Access Point, SAP) 與上層銜接，並提供服務。收斂子層具有以下幾項功能：

- (1) 負責接受上層協定所傳遞下來的 SDUs (Service Data Units)。
- (2) 將上層欲傳送的 SDUs 作特定的分類並包裝為 PDUs (Packet Data Units)。
- (3) 必要時，需根據不同的分類來對這些 PDUs 加以處理。
- (4) 將各類 PDUs 遞送至 MAC 的服務存取點，讓下層協定作進一步處理。
- (5) 負責接收並處理從底層收上來的 PDUs。

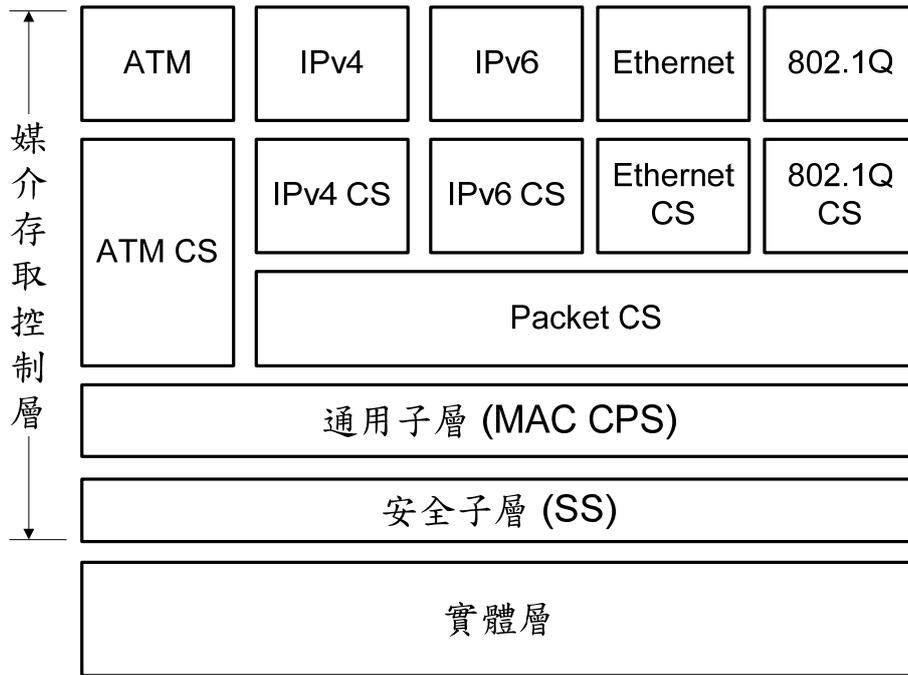


圖 2-2. 收斂子層支援的封包類型

在 IEEE 802.16 標準中定義了兩種收斂子層規範，分別是非同步傳輸模式 (Asynchronous Transfer Mode, ATM) 與封包傳輸模式 (Packet CS)，未來若有其他收斂子層，將可另行定義之。ATM 收斂子層可提供在既有的 ATM 網路架構下，使用 IEEE 802.16 媒體存取控制層進行資料傳輸。封包傳輸模式下的收斂子層，則可針對以下四種類型的封包作分類，分別是：IPv4、IPv6、IEEE Std 802.3/Ethernet 及 IEEE Std 802.1Q，並將資料封裝起來供通用子層傳輸時使用。因此，通用子層在傳輸資料時，無需知道上層所傳送的封包類型為何，皆可依照既定的方式處理上層封包。圖 2-2. 所呈現的是 IEEE 802.16 支援的收斂子層類型。

2.2.2. 通用子層

通用子層負責媒體存取控制層的主要核心功能，包括頻寬管理與配置、連線建立與管理、加入網路程序與換手機制等，並且將上層欲傳送的 SDUs，從已分類的特定連線 (Connection) 中取出後封裝為 PDUs，再送往下層。在 IEEE 802.16 點對多點模式 (PMP Mode) 下，下行

與上行頻寬的分配管理都是由一個 BS 來負責，所有在此 BS 管轄內的 SS 與 MS (在 802.16e 下，可移動的 SS 稱為 Mobile Station，MS) 都必須依據 BS 的分配來接收或傳送資料。使用分時雙工模式 (Time Division Duplexing，TDD) 的 802.16 網路，下行與上行的子訊框分配是以訊框持續時間為週期來切換，下行與上行頻寬佔總訊框時間的比例由 BS 決定並在下行子訊框中告知 MS。在下行方向 (資料從 BS 往 MS 方向傳送)，BS 會將資料的分配方式記錄在 DL-MAP 訊息中，MS 必須接收所有下行方向的資料後，依照 DL-MAP 訊息所描述的方式分析資料，再判斷收到的 PDUs 中的 CID (Connection ID) 資訊，保留廣播資料與給自己的 PDUs，而捨棄其他 PDUs。上行方向 (資料從 MS 往 BS 方向傳送) 的頻寬是所有 MS 共用的，除了 BS 所分配的競爭區間外，MS 傳送資料的時間與使用的頻率 (OFDMA 必須考慮使用的子通道為何) 都必須遵循 UL-MAP 訊息中所描述的方式來進行，避免造成資料碰撞而遺失。

2.2.2.1. MAC 訊框結構

MAC PDU 是由三個部份所構成，包括一個 48 位元固定長度的 MAC header，之後是可變長度的 payload，及錯誤偵測用的 CRC，其中 MAC header 是必備的欄位，payload 長度可為零、或包含管理訊息及上層資料，CRC 則是選擇性欄位，如圖 2-3. 所示。

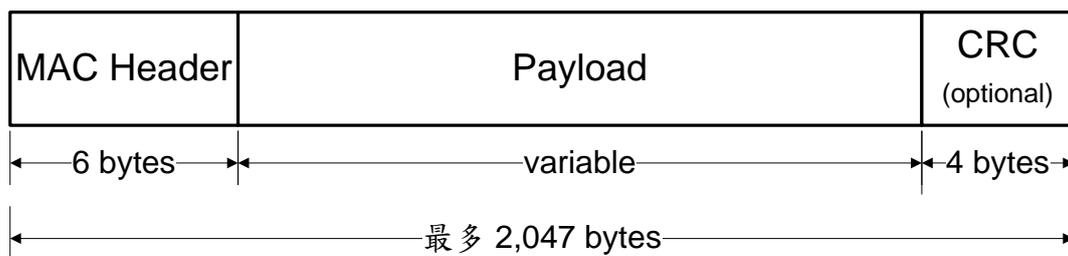


圖 2-3. MAC PDU 結構

在 IEEE 802.16e 中，MAC header 分為 Generic MAC header 及 MAC header without payload 兩種。Generic MAC header 用於傳送資料和管理訊息，上行與下行方向皆適用，各欄位的格式與說明，如圖 2-4. 及表 2-1. 所示。為了管理與傳輸各種訊息，payload 可包含零、或數個子標頭 (sub-header)，有關子標頭的內容為何則是根據 Type 欄位而定，Type 欄位的

說明，請參考表 2-2。MAC header without payload 則是上行方向專屬的訊框格式，長度僅 48 位元，因用途的不同而區分為 Type I 與 Type II 兩種，都不包含 payload 及 CRC 欄位。Type I 主要用途在於上行頻寬的請求，通道訊號強度的回報，及睡眠模式管理相關的訊框等；Type II 則是在 Feedback Polling 相關的機制下使用。

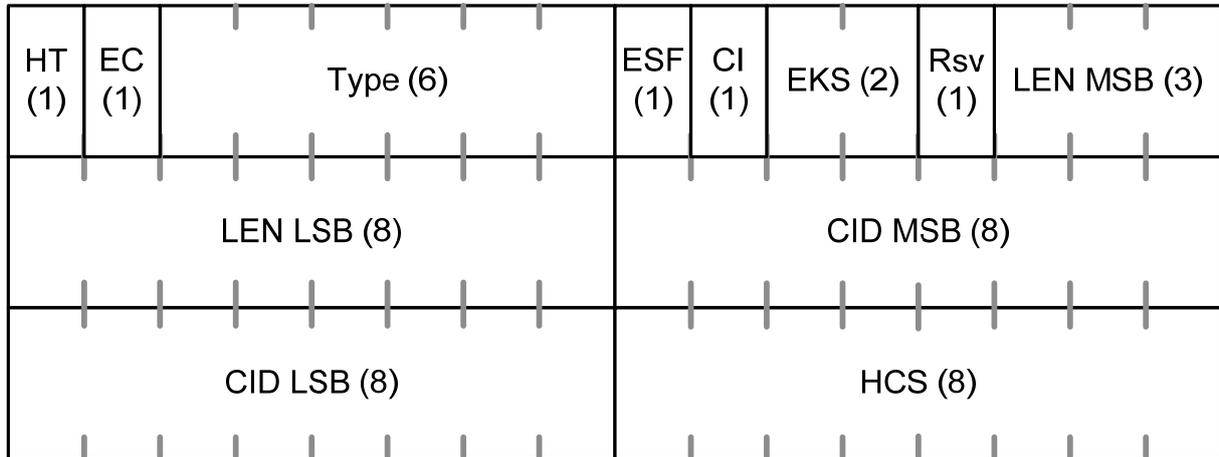


圖 2-4. Generic MAC Header 欄位格式

名稱	長度/bits	描述
CI	1	CRC指示器：1 = CRC包含在PDU中、0 = 不包含CRC功能
CID	16	連線識別碼
EC	1	加密控制：1 = 對Payload加密、0 = 不對Payload加密
EKS	2	加密密鑰串列：只有在EC = 1時才有效
HCS	8	標頭檢查串列：用於標頭的錯誤檢測。
HT	1	標頭類型，將被設為 0
LEN	11	長度，包含MAC標頭與CRC檢查碼(如果存在)的PDU長度
Type	6	指示子標頭和Payload的類型
ESF	1	延伸子標頭欄位：1 = 包含延伸子標頭、0 = 不包含延伸子標頭

表 2-1. Generic MAC Header 欄位說明

Type 位元	值
#5 (MSB)	Mesh子標頭：1 = 包含、0 = 不包含
#4	ARQ Feedback Payload：1 = 包含、0 = 不包含
#3	延伸Type，指出是否延伸Packing或Fragmentation子標頭 1 = 延伸、0 = 不延伸
#2	Fragmentation子標頭：1 = 包含、0 = 不包含
#1	Packing子標頭：1 = 包含、0 = 不包含
#0 (LSB)	下行：FAST-FEEDBACK 配置子標頭 上行：Grant Management子標頭 1 = 包含、0 = 不包含

表 2-2. Generic MAC Header 裡的 Type 欄位說明

2.2.2.2. 連線識別碼

在 IEEE 802.16 PMP 模式下的資料傳輸都是連線導向 (Connection-oriented) 的，每條連線由一組 16 位元的 CID 作為識別碼，用來辨別該連線的用途。當 MS 在加入 WiMAX 網路過程中，BS 將會配給該 MS 至少兩組管理連線用的 CIDs，分別是 Basic CID 及 Primary Management CID。Basic CID 主要是用來傳送長度較短且具有即時性的管理訊息；Primary Management CID 則用來傳送長度較長且能容忍時間延遲的管理訊息，第三組 Secondary Management CID 則是當 MS 為 Managed MS 時，BS 才會配給。

除了 MS 專屬的管理連線之外，有些管理訊息的傳輸是使用眾所皆知的 CID 作為識別，例如：BS 傳送廣播訊息時所使用的 Broadcast CID、MS 在初始加入網路時與 BS 溝通所使用的 Initial Ranging CID 等。另外，當上層有封包要送往對方時，必須先建立連線並取得傳輸資料所使用的 CID 之後，才能開始傳送上層的資料，這一類的 CID 稱為 Transport CID。在 IEEE 802.16e 規格中所定義的 CIDs 數值範圍及描述，如表 2.3.所示，我們僅列出重要及有支援的項目。

連線識別碼	值	描述
Initial Ranging	0x0000	MS與BS在初始測距時使用
Basic CID	0x0001 - m	下行連線與上行連線需使用相同的值
Primary Management	m+1 - 2m	下行連線與上行連線需使用相同的值
Transport CIDs, Secondary Management CIDs	2m+1 - 0xFE9F	供Secondary連線使用時，下行連線與上行連線需使用相同的值
Broadcast CID	0xFFFF	用在下行方向給所有MS的廣播訊息

表 2-3. 連線識別碼 (CID)

2.2.2.3. MAC管理訊息

MAC 管理訊息在 MAC PDU 的 payload 中傳送，用來交換 BS 與 MS 間連線的管理資訊，訊息格式以 8 個位元的類型欄位為開頭，如圖 2-5 所示。在 IEEE 802.16d 標準中，共定義了 47 種 MAC 管理訊息，而在 IEEE 802.16e 標準裡則另外增加了 17 種支援行動功能及省電功能所需的管理訊息，各種管理訊息的詳細欄位與用途將不在此做進一步說明，表 2-4 是我們在 IEEE 802.16e 模組中有實作的管理訊息列表。

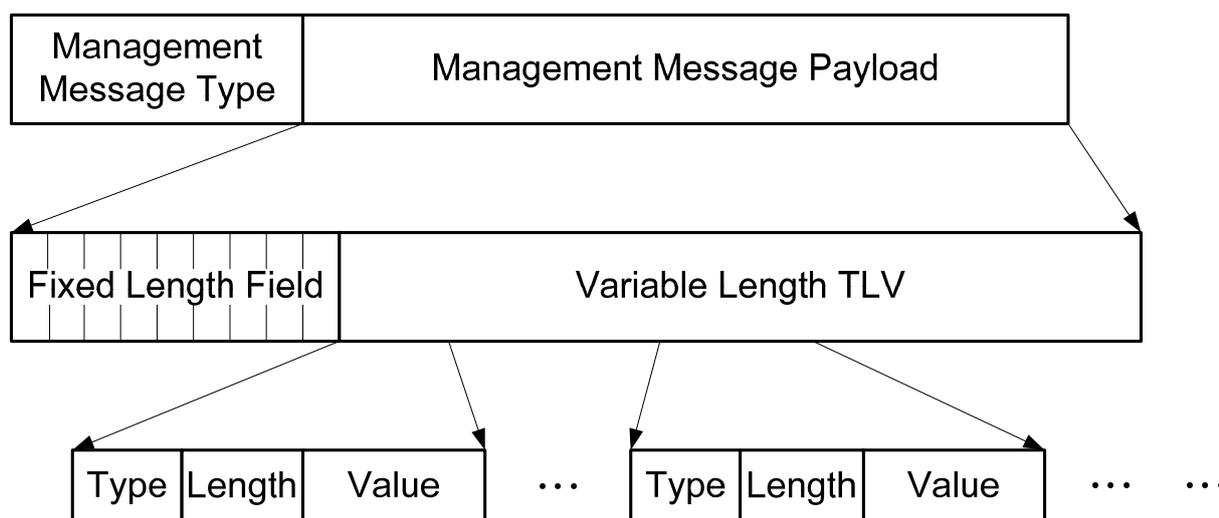


圖 2-5. 管理訊息的欄位格式

Type	Message name	Message description	Connection
0	UCD	Uplink Channel Descriptor	Broadcast
1	DCD	Downlink Channel Descriptor	Broadcast
2	DL-MAP	Downlink Access Definition	Broadcast
3	UL-MAP	Uplink Access Definition	Broadcast
4	RNG-REQ	Ranging Request	Initial Ranging or Basic
5	RNG-RSP	Ranging Response	Initial Ranging or Basic
6	REG-REQ	Registration Request	Primary Management
7	REG-RSP	Registration Response	Primary Management
11	DSA-REQ	Dynamic Service Addition Request	Primary Management
12	DSA-RSP	Dynamic Service Addition Response	Primary Management
13	DSA-ACK	Dynamic Service Addition Acknowledge	Primary Management
26	SBC-REQ	SS Basic Capability Request	Basic
27	SBC-RSP	SS Basic Capability Response	Basic
53	MOB_NBR-ADV	Neighbor Advertisement Message	Broadcast or Primary
54	MOB_SCN-REQ	Scanning Interval Allocation Request	Basic
55	MOB_SCN-RSP	Scanning Interval Allocation Response	Basic
57	MOB_MSHO-REQ	MS HO Request Message	Basic
58	MOB_BSHO-RSP	BS HO Response Message	Basic
59	MOB_HO-IND	HO Indication Message	Basic
60	MOB_SCN-REP	Scanning Result Report Message	Primary Management

表 2-4. 管理訊息類型與描述

2.2.2.4. 初始測距與加入網路

在 WiMAX 網路中，當有一個新的 MS 想要加入網路時，必須遵循 Network Entry 程序來與 BS 進行溝通。Network Entry 是加入網路前的一系列步驟，供 MS 從初始化參數到註冊成功並與 BS 建立連線的過程，圖 2-6.是 MS 進行 Network Entry 的所有流程，主要包括以下幾點：

- (1) 掃描下行頻道並與 BS 同步。
- (2) 取得上行參數。
- (3) 進行初始測距。
- (4) 協調基本能力。
- (5) 認證與金鑰交換。
- (6) 進行註冊。
- (7) 取得 IP 位址。
- (8) 取得目前時間。
- (9) 轉換操作參數。
- (10) 建立連線。



MS 在初始化或訊號遺失後，必須啟動對下行頻道掃描的動作，並嘗試與下行頻道進行同步，若是在當前頻道中無法取得下行通道參數，則需切換至其他可能的頻道進行掃描。而 MS 與下行頻道同步的依據在於至少收到一個 DL-MAP 訊息，並且可以根據 DL-MAP 訊息來解析下行資料；只要 MS 能持續地在當前的下行頻道裡取得 DL-MAP 訊息及 DCD 訊息，則表示 MS 與 BS 處於維持同步的狀態。與下行頻道同步之後，MS 必須藉由取得上行通道參數來了解如何使用上行通道，若是在當前頻道中無法取得上行通道參數，則需切換至其他可能的頻道重新取得下行通道參數並與之同步。是否取得上行通道參數關鍵在於是否能在當前的頻道中解析出 UCD 訊息，並分析 UL-MAP 訊息來進行下一步的測距。

初始測距是 MS 加入網路的過程中相當重要的一環，主要的功能在於時序校正及功率調整，讓接收端的 BS 能夠正確地接收 MS 所傳送的訊息，進而與 MS 溝通。首先，BS 將會定

期配置上行通道競爭區間的測距用傳送機會，欲進行測距的 MS 必須以二元指數倒退機制來決定傳送時間，避免造成不必要的碰撞。倒數完畢後，MS 從初始測距碼範圍內隨機選擇一組 CDMA 測距碼，在指定的測距區間中傳送給 BS。正確收到測距碼的 BS 必須回覆測距回應訊息 (RNG-RSP)，除了告知相關的參數供 MS 調整之外，還有一個測距狀態的參數，表示目前測距的結果為何；若是失敗 (abort)，則無法加入網路；若是繼續 (continue)，則 MS 可在調整參數之後，重新計算並取得傳送機會送出測距碼；若是成功 (success)，則 BS 將會分配一段屬於該 MS 所使用的免競爭區間，供 MS 傳送 RNG-REQ 訊息給 BS。當 BS 收到 RNG-REQ 訊息後，將會回應不同於先前的 RNG-RSP 訊息，並在訊息中告知往後該 MS 在傳送管理訊息時，可以使用的 Basic CID 與 Primary Management CID。取得指定的 CID 時，表示已經完成了初始測距的程序。

完成初始測距程序後，BS 與 MS 藉由 Basic CID 的連線來交換 SBC-REQ 訊息與 SBC-RSP 訊息，並協調基本能力及傳輸參數。在實作中，我們將忽略認證與金鑰交換的步驟，直接進行註冊的程序，註冊的過程是 BS 與 MS 以 REG-REQ 訊息與 REG-RSP 訊息進行溝通。取得 IP 位址、時間資訊及轉換操作參數是屬於選擇性的實作項目，只有當 MS 是 Managed MS 時才需執行，於是我們將略過此步驟。最後，除了已經建立好的管理訊息連線外，BS 或 MS 欲傳送資料給對方前，必須先建立資料連線，資料連線的建立是透過 DSA-REQ 訊息、DSA-RSP 訊息及 DSA-ACK 訊息來完成。MS 完成以上步驟後，Network Entry 程序才算完成。

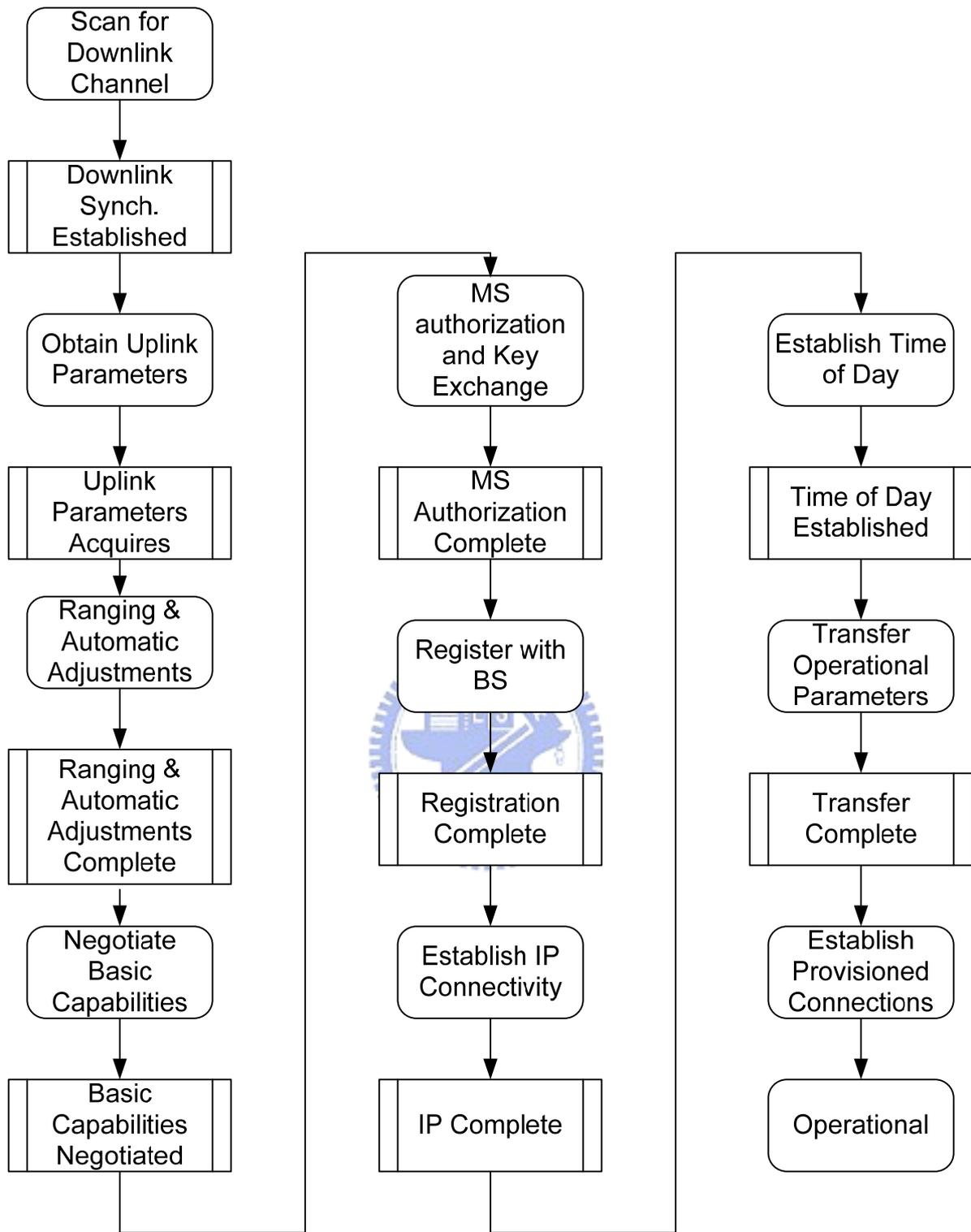


圖 2-6. Network Entry 流程圖

2.2.2.5. 定期測距

定期測距是讓 BS 與 MS 間能保持良好的 RF 通訊品質的程序。在 OFDMA 測距機制裡，定期測距計時器是由 MS 所管理的，也就是定期測距的程序將由 MS 主動發起。定期測距的過程與初始測距相似，BS 會配置定期測距的傳送機會供 MS 傳送測距碼，在此，隨機選取的 CDMA 測距碼是從定期測距碼範圍中取出；由於不同範圍的測距碼代表不同目的，BS 收到測距碼後才能根據其目的來回覆正確的訊息。收到定期測距碼的 BS 會回應 RNG-RSP 訊息，包括 MS 相關的參數調整及測距狀態；若狀態是 continue，則 MS 將在調整參數後重新執行測距步驟；若是 success，則完成此次的定期測距程序。

2.2.2.6. 換手程序與機制

支援行動裝置能夠高速移動的網路系統，換手機制 (Handover) 是必須提供的功能。在 IEEE 802.16e 標準裡定義了媒體存取控制層的換手程序，供 MS 在移動式網路中能夠保持通訊功能。而造成換手程序被觸發的可能原因如：MS 遠離了原本提供服務的 BS 進入另一個訊號較佳的 BS 範圍內，或 MS 得知另一個 BS 能給予較高的傳輸速率等。在標準裡只定義換手時應遵循的程序，而決定是否換手的方法並不在標準規範內。

介紹換手程序之前，必須先了解 BS 與 MS 是如何取得目前的網路拓樸。在 IEEE 802.16e 規格中定義了兩種取得網路拓樸的方法，分別是：

- (1) BS 廣播網路拓樸：BS 可透過骨幹網路與鄰近 BS 溝通，並利用 MOB_NBR-ADV 管理訊息來廣播所取得的鄰近 BS 的頻道資訊，包括 DCD/UCD 訊息等。當 MS 進行換手時，這些已經取得的 DCD/UCD 資訊將可加速 MS 同步的程序，以縮短換手所需的時間。
- (2) MS 掃描鄰近 BS：Serving BS (對 MS 來說，提供服務的 BS) 可分配一段時間供 MS 切換至不同頻道，藉此聆聽其他 BS 的資訊。MS 亦可送出 MOB_SCN-REQ 訊息來要求 Serving BS 配置一段時間供 MS 進行掃描，Serving BS 需回應 MOB_SCN-RSP 訊息來允許或拒絕 MS 的掃描請求。當 MS 開始進行掃描時，

Serving BS 必須暫存送給該 MS 的所有資料，直到掃描完畢後，才可繼續送資料給該 MS。在掃描過程中，MS 將會取得鄰近 BS 的相關資訊，並且在結束掃描後，MS 可透過 MOB_SCN-REP 訊息將掃描結果回報給 Serving BS，供 BS 廣播網路拓樸之用。

換手表示將 MS 的管理權，從現有的 BS (Serving BS) 轉換至目的端 BS (Target BS) 的程序，又可分為硬式換手與軟式換手兩種。硬式換手是先斷後連 (Break before Make)，在換手時，MS 會先將目前與 Serving BS 建立的連線中斷之後，再與 Target BS 建立新的連線。使用此類的換手機制，會有一段時間發生資料遺失的現象。軟式換手則是先連後斷 (Make before Break)，在切斷與 Serving BS 的連線之前，先與 Target BS 建立新的連線。使用此方法的好處是可以減少換手時的資料遺失率。在 IEEE 802.16e 標準中規定硬式換手是必須實作的項目，軟式換手則是選擇性實作項目。

圖 2-7. 是在換手機制下的加入網路流程，主要包括以下幾點：

- (1) 基地台重新選擇。
- (2) 換手決定與初始化。
- (3) 與 Target BS 同步。
- (4) 測距與網路重新加入。
- (5) 終止先前服務。



首先，MS 已透過 MOB_NBR-ADV 訊息或掃描鄰近 BS 的方式取得目前的網路拓樸及鄰近 BS 的相關資訊，而是否進行換手的決定權可為 MS 本身或 Serving BS，分別透過 MOB_MSHO-REQ 訊息或 MOB_BSHO-REQ 訊息來啟動換手機制。當 MS 開始進行換手時，必須先與 Target BS 的下行頻道同步，並取得下行與上行通道參數；若是在先前取得拓樸過程中，已得知這些參數訊息，則可忽略此步驟。與 Target BS 同步後，便可開始進行換手測距與網路重新加入的程序，這一部份的流程與初始加入網路的流程相似。當 MS 想要取消換手時，可以向原 Serving BS 送出 MOB_HO-IND 訊息來中止換手程序。最後，當 MS 與 Target BS 建立連線後，MS 的換手程序便已完成，而原 Serving BS 在經過 Resource_Retain_Time

之後，就會將已離開的 MS 相關紀錄及資料清除。

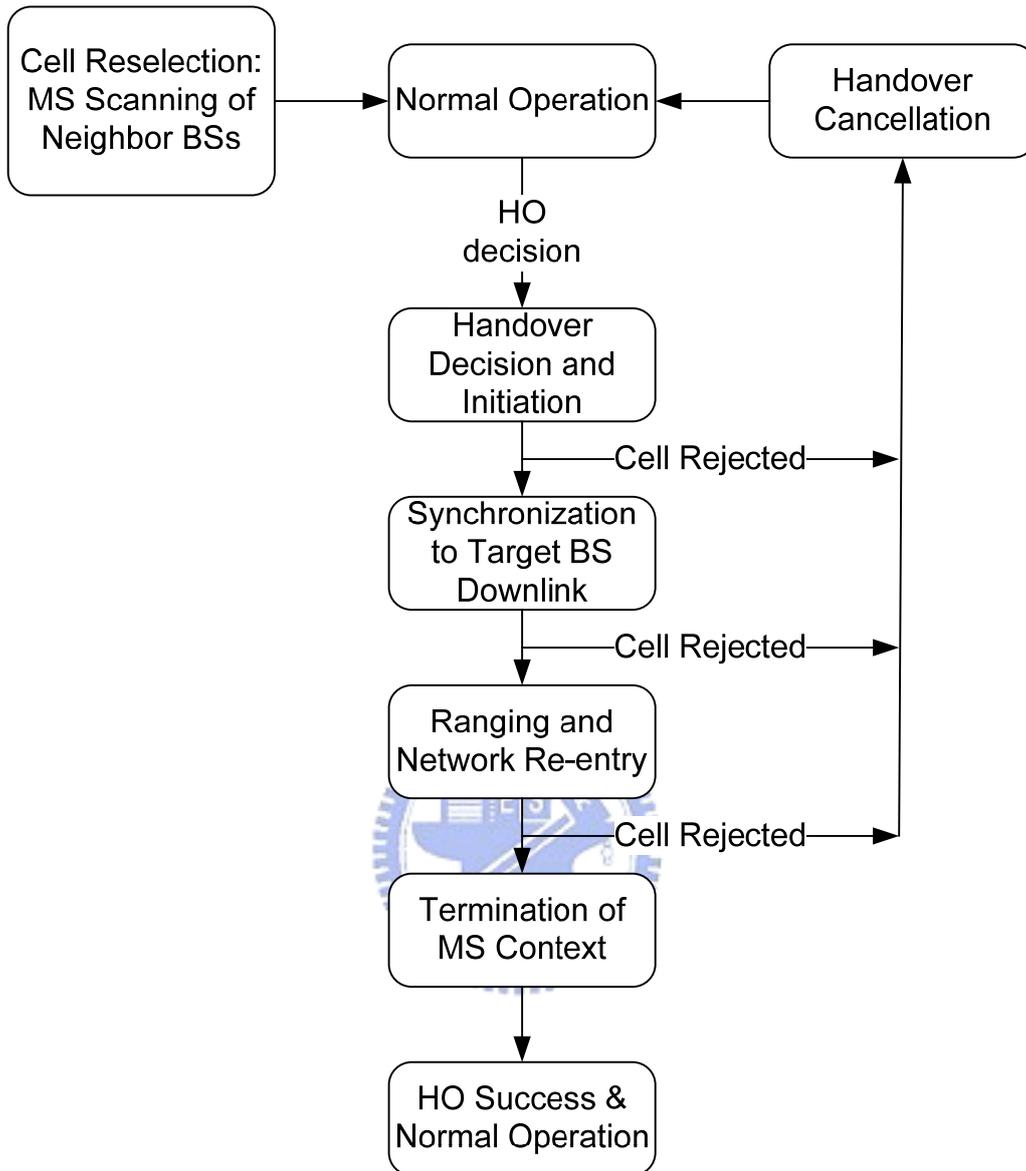


圖 2-7. 換手機制下的加入網路流程

2.2.3. 安全子層

安全子層負責 IEEE 802.16 網路傳輸封包的加密機制，包括用戶端加入網路時的認證機制，資料的加密與解密運作，及加密與解密時所需的金鑰交換功能等。由於安全子層的實作在規格中是非必要的，且此層的功能不會影響整體效能，於是，我們在 IEEE 802.16e 模組中的實作將不考慮此層的功能。

2.3. 實體層

實體層是網路系統架構中的最底層，如圖 2-1.所示，藉由實體層服務存取點與媒體存取控制層溝通。在 IEEE 802.16 中，針對不同環境的需求而列舉了四種實體層的規範，分別是 SC、SCa、OFDM、OFDMA 四種模式。其中 SC 適用於 10~66 GHz 頻帶的 LOS 傳輸，另外三種則適用於 2~11 GHz 頻帶的 NLOS 傳輸。在固定式 WiMAX 網路裡，實體層主要是使用 OFDM 為基礎實作；而在移動式 WiMAX 網路下，OFDMA 實體層搭配分時雙工 (TDD) 是主要的操作模式。在本篇論文中，我們也將著重在 OFDMA 實體層的設計與實作部份。

2.3.1. 正交分頻多重存取

OFDMA 技術是 OFDM 的多重存取設計，因此，OFDMA 繼承了 OFDM 原有的優點，包括提供較高的資料傳輸率及頻道使用率，並可藉由增加保護時間 (Guard Time)與循環字首 (Cyclic Prefix Extension)有效地解決傳輸符號間的干擾 (Inter-Symbol Interference, ISI)及子載波間的相互干擾 (Inter-Carrier Interference, ICI)等問題。OFDMA 結合了 TDMA 與 FDMA 的多工存取概念，同時在時間軸與頻率軸上進行分配，以增加多重存取技術使用上的彈性；然而，有彈性的頻道配置也增加了上層分配頻道時的複雜度，OFDMA 實作概念示意圖如圖 2-8.所示。在 OFDMA 裡，所有子載波 (subcarrier)分成數個集合，每個集合代表一個子通道 (sub-channel)，允許不同使用者同時使用多個子通道進行傳輸。IEEE 802.16e 規格在 OFDMA 實體層裡，支援四種 FFT-size，分別是 128、512、1,024、2,048，而 Scalable OFDMA 則是當使用的頻寬增加時，同時調整 FFT-size，使得每個子載波的間距維持在 10.94 kHz，藉此減少因為實體層的變動而影響上層的設計，表 2-5.是在 WiMAX 裡所使用的 OFDM 參數[4]。

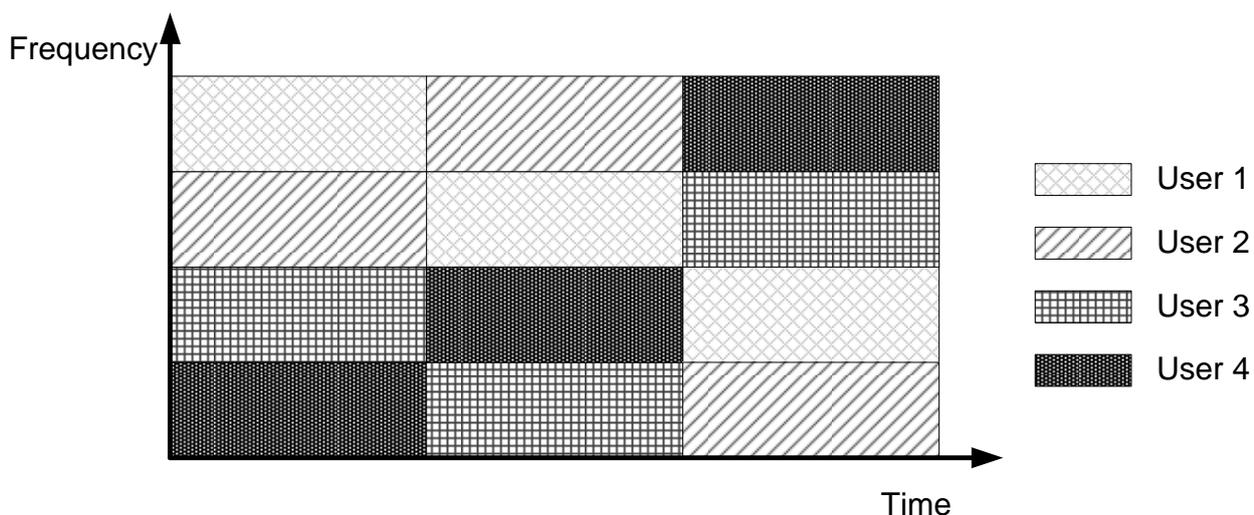


圖 2-8. OFDMA 實作概念示意圖

Parameter	Fixed	Mobile WiMAX Scalable			
	WiMAX OFDM-PHY	OFDMA-PHY			
FFT size	256	128	512	1,024	2,048
Number of used data subcarriers	192	72	360	720	1,440
Number of pilot subcarriers	8	12	60	120	240
Number of null/guard band subcarriers	56	44	92	184	368
Cyclic prefix or guard time (T_g/T_b)		1/32, 1/16, 1/8 , 1/4			
Oversampling rate (F_s/BW)		Depends on bandwidth: 7/6 for 256 OFDM, 8/7 for multiples of 1.75 MHz, and 28/25 for multiples of 1.25 MHz, 1.5MHz, 2 MHz, or 2.75 MHz			
Channel bandwidth (MHz)	3.5	1.25	5	10	20
Subcarrier frequency spacing (kHz)	15.625			10.94	
Useful symbol time (μs)	64			91.4	
Guard symbol duration (μs)	8			11.4	
OFDM symbol duration (μs)	72			102.9	
Number of OFDM symbols in 5 ms frame	69			48.0	

表 2-5. OFDM 實體層相關參數

2.3.2. 可適性調變與編碼

近年來，大多數的通訊系統，包括 WiMAX 在內，都加入了數位調變技術，將編碼過後的數位資料轉為類比訊號傳送，接收端再經由解調變技術，得到傳送時的數位編碼。在 OFDMA 實體層中，使用了三種調變機制，分別是 QPSK、16-QAM、64-QAM，當訊號品質良好時，可使用較有效率的 64-QAM 來增加傳輸量；若是在訊號品質不佳的情況下，則可選擇較不易受干擾的 QPSK，來抵抗雜訊。

為了提高傳輸資料的正確性，通常會對原始傳輸資料進行一連串的信道編碼，IEEE 802.16e OFDMA 的信道編碼步驟分為以下四項：

- (1) Randomization。
- (2) FEC Encoding。
- (3) Bit Interleaving。
- (4) Repetition。

此順序是針對傳送端而言，如圖 2-9.所示；在接收端，則是將收到的資料進行反方向的解碼動作。Randomization 是透過 PRBS (pseudo-random binary sequence)的亂數產生器來將資料攪亂。FEC Encoding 則是使用迴旋碼 (Tail-biting convolution code)對資料進行編碼，而藉由編碼的特性，接收端可以有效地糾正在傳輸過程中發生錯誤的位元，其編碼率依照不同需求有 1/2、2/3、3/4 三種。完成 FEC 編碼的資料，必須再經過交錯器及重複編碼後，才能將數位資料透過調變送出，其中重複編碼是選擇性實作項目。表 2-6.是使用不同調變機制搭配不同的 FEC 編碼率下，每個 slot 可以傳送的資料量。

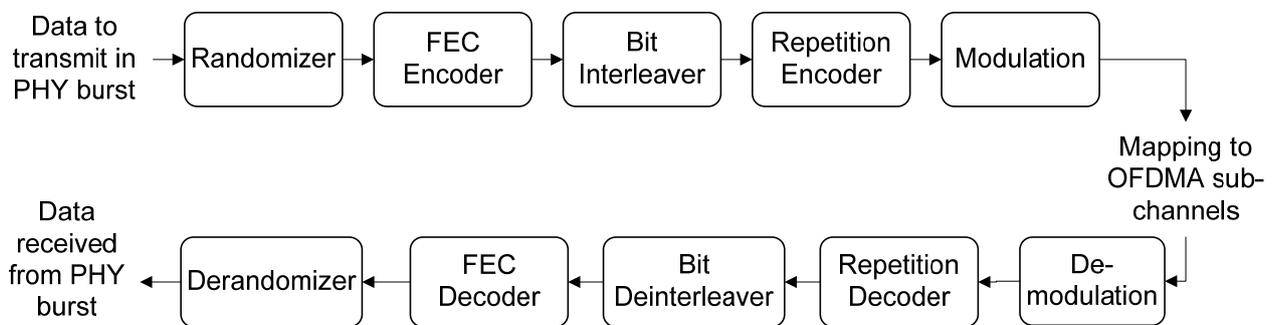


圖 2-9. 實體層傳送與接收的調變與編碼流程

Modulation	FEC coding Rate	Uncoded payload (bytes)	Coded Payload (bytes)
QPSK	1/2	6	12
	3/4	9	12
16-QAM	1/2	12	24
	3/4	18	24
64-QAM	1/2	18	36
	2/3	24	36
	3/4	27	36

表 2-6. 不同 FEC 下的單位 slot 傳輸量

2.3.3. Slot與訊框架構

在 OFDMA 實體層裡，slot 是頻寬資源分配時所使用的最小單位，根據上行與下行的不同或所使用的排列區帶 (Permutation Zone) 的不同，而有各自的定義。例如：在下行方向使用 PUSC (Partial Usage of Sub-channels)，一個 slot 代表使用一個 sub-channel 佔用兩個 OFDMA symbols 時間；若是上行方向使用 PUSC，則是代表使用一個 sub-channel 佔用三個 OFDMA symbols 時間。

IEEE 802.16e OFDMA 的訊框區間是採用分時多工的分配方式，每個訊框由上行子訊框與下行子訊框兩部份，搭配發送/接收轉換間隙 (TTG) 與接收/發送轉換間隙 (RTG) 組成。下行子訊框是 BS 傳送資料給所有 MS 的時間，包括廣播訊息與給特定 MS 的資料等；上行子訊框則是 BS 分配給 MS 的傳輸時間，包括測距子通道與上行 Burst 分配區塊。OFDMA 訊框架構如圖 2-10. 所示[2]，以下將介紹每個區塊的用途。

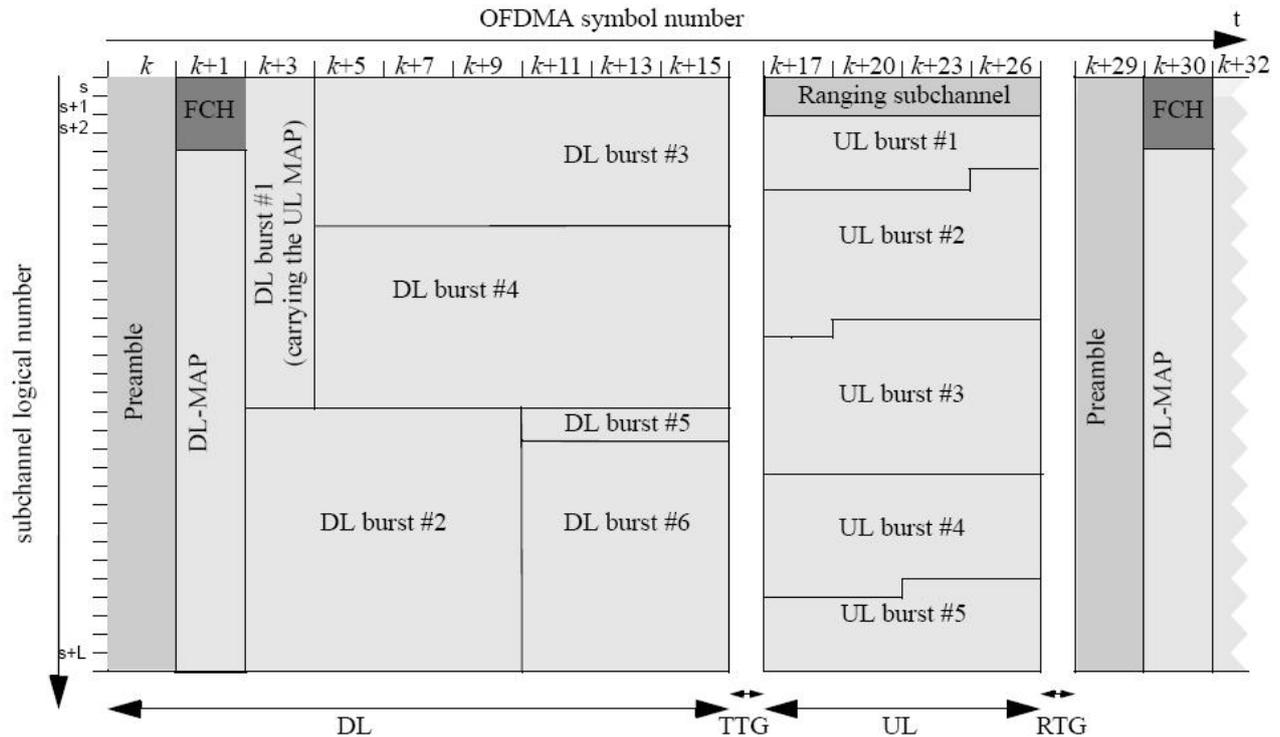


圖 2-10. OFDMA 訊框區間架構

下行子訊框是由一個同步用的前置符號 (Preamble Symbol) 開始；接著，前四個 slot 是訊框控制標頭 (Frame Control Header, FCH)，用來傳輸 DL frame prefix，所使用的調變與編碼是編碼率 1/2 的 QPSK，用途在描述實體層傳輸 DL-MAP 訊息時，使用何種通道編碼參數及訊息總長度。在相同時間裡的其他 slots 則是傳輸 DL-MAP 訊息，MS 可根據 DL frame prefix 裡描述的通道編碼方式及長度來進行解析，以取得 DL-MAP 訊息。DL-MAP 訊息是描述在此下行子訊框裡，每個 burst 的分配情形，包括所佔用的 sub-channel 範圍、symbol 區間及調變與編碼方式等。最後，有了這些資訊以後，MS 便可將後續所接收到的所有資料進行解析，以取得 BS 的廣播訊息及資料。由於，在下行訊框中的第一個 burst 將會用來傳輸如：UL-MAP、DCD、UCD 等廣播訊息，於是必須選擇抵抗雜訊干擾較好的調變與編碼方式來進行傳輸，以避免重要的訊息遺失，造成通訊中斷的情形。而在下行子訊框中，不同的 DL burst 區塊表示使用不同的調變與編碼方式進行傳輸。

上行子訊框的配置主要分成兩個部份，一是測距子通道區間，另一部份則是用來傳輸 UL burst 區間。測距子通道是所有訊框配置中，唯一會發生訊息碰撞的區塊；主要用途是進行初

始測距、定期測距、頻寬請求及換手測距等項目。MS 可經由在測距子通道裡送出 CDMA 測距碼，收到測距碼的 BS 根據測距碼的使用範圍，判斷 MS 的需求為何，再回覆對應的訊息。而 UL burst 區間則是 BS 分配給特定 MS 的上行 slots，供 MS 傳輸上行資料。由於 BS 在每個下行訊框中都會夾帶 UL-MAP 訊息，用來描述每個 UL burst 使用權是給哪一個 MS；在 BS 管轄下的所有 MS，都必須依循 UL-MAP 訊息描述的配置方式來使用 UL burst，避免不同 MS 在傳輸資料時發生碰撞。



Chapter 3. Design

本章一開始先介紹 NCTUns 網路模擬器平台的設計與模組架構，並以一簡單範例作為說明；接著，我們將介紹模擬 IEEE 802.16e 網路協定在點對多點模式時，系統所支援的網路拓樸與節點。最後，將詳細說明各協定模組的設計方法，包括媒體存取控制層與實體層的設計概念。

3.1. NCTUns網路模擬器平台設計與模組架構

我們的模組設計建構在 NCTUns 網路模擬器平台之上，NCTUns 網路模擬器主要包括三個部份，分別是經過修改的系統核心、模擬引擎及圖形化介面。系統核心部份，NCTUns 修改了網路子系統裡相關的程式碼，讓模擬過程中所產生的封包能夠導向正確的目的地。在我們的模組設計中，是不需要修改核心程式碼的，於是在此不做詳細說明。模擬引擎是整個模擬器的精髓所在，除了模擬事件的建立、排程與執行外，還包括各式各樣不同的模組，分別代表著不同的網路協定。網路研究者可以很方便地在 NCTUns 網路模擬器上增加新的網路模組，或修改目前模擬器中既有的模組，並搭配其他網路模組來進行相關的模擬及研究。第三部份，NCTUns 網路模擬器提供了圖形化的操作介面，供使用者能夠很方便地產生想要模擬的網路拓樸與設定相關參數，包括模擬環境及各模組細部的參數等，以減少規劃網路拓樸與設定時所需的時間。以下我們將介紹 NCTUns 網路模擬器在模組架構方面的設計。

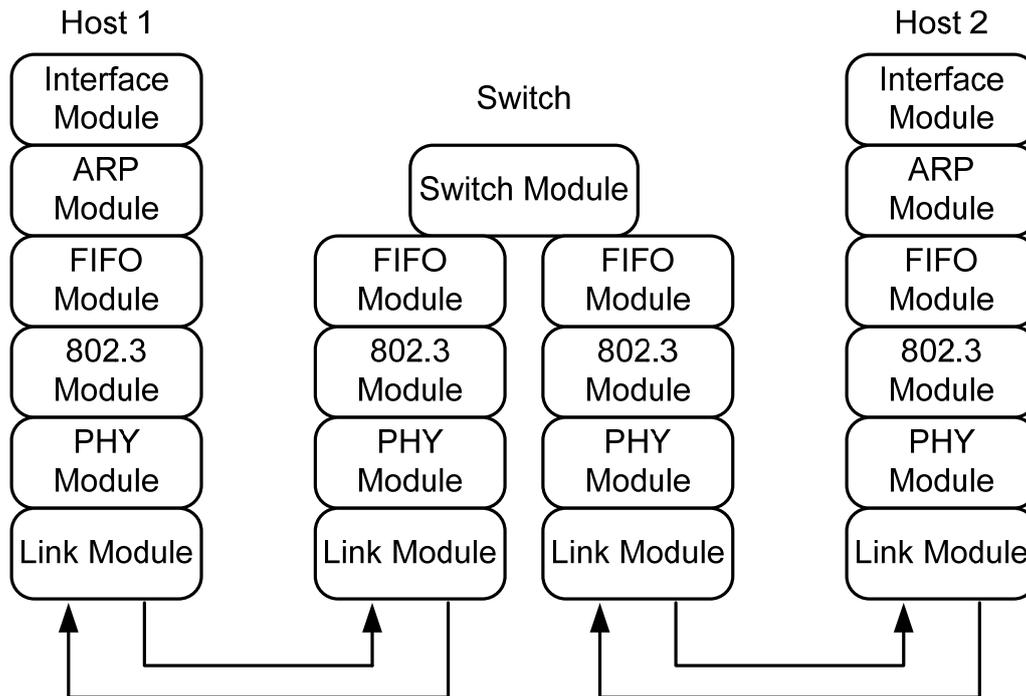


圖 3-1. NCTUns 裡的模組堆疊架構

圖 3-1.是在 NCTUns 網路模擬器裡，兩個 Host 節點透過一個 Switch 節點相連時的模組堆疊架構。模擬器裡的 Host 具有一個有線網路的介面，其模組堆疊由上到下分別是 Interface 模組、ARP 模組、FIFO 模組、802.3 模組、PHY 模組及 Link 模組等。從發送封包的角度來看，Host 上執行的應用程式所送出的封包從應用層往下層遞送，經過作業系統的網路層後送往 interface，這段過程都是由真實系統的流程來處理。封包進入 interface 後如圖 3-1.所看到的，經過幾個模組的處理之後才從 Link 送出，這是以封包送出的角度來看。若是以接收封包的角度來看，則是對方藉由 Link 所送過來的封包，會先到達 PHY 模組，再經由 802.3 模組往上層遞交，直到該封包被接收完畢。對 Host 而言，封包最後會經由 tunnel interface 進入 kernel space，由 kernel 來決定封包的去向；若接收端為 Switch，因為 Switch 是第二層的網路設備，所以是由 Switch 模組來決定該封包的去向，並不會進入 tunnel interface。

NsIObject
- char *name_ - u_int32_t nodeId_ - u_int32_t portid_ - u_int32_t nodeType_
+ NsIObject(U_int32_t, u_int32_t, struct plist*, char *) + NsIObject() + ~NsIObject() + int init() + int recv(ePacket_ *) + int send(ePacket_ *) + int get(ePacket_ *, MBinder *) + int put(ePacket_ *, MBinder *) + int put1(ePacket_ *, Mbinder *) + int command(int argc, char *argv[]) + void set_port(u_int32_t portid) + u_int32_t get_port() + char * get_name() + u_int32_t get_nid() + u_int32_t get_type()

圖 3-2. NsIObject class 定義

NCTUns 網路模擬器提供了一個最基本的 prototype 模組 NsIObject，所有模擬器裡的模組都必須繼承 NsIObject 這個類別，並依據每個模組的功能與需求來實作其中的幾個函式。圖 3-2.是 NsIObject 的定義，其中最重要的函式是 send()與 recv()，所有在模組間遞送的封包都會經過這兩個函式的處理。例如：當某個節點接收來自其他節點的封包時，最底層的 Link 模組中所實作的 recv()函式會最先被呼叫，接著，Link 模組會透過 put()與上層的 get()來間接呼叫上一層的 recv()，讓上層收到並處理這個封包。相反地，send()函式是處理往外送出的封包，封包可能是在模組中自行產生，或是從 kernel space 經過 tunnel interface 送下來的封包；若是從 kernel space 遞交下來的封包，則最上層的 interface 模組裡的 send()函式將最早被呼叫，再一層一層往下呼叫各模組的 send()函式將封包送往底層。除非在底層因暫存空間不足或其他因素造成捨棄 (Drop)之外，封包最終都會被傳送出去。圖 3-3.所呈現的是在 NCTUns 網路模擬器裡，同一個節點中的各模組間傳送與接收封包的示意圖。

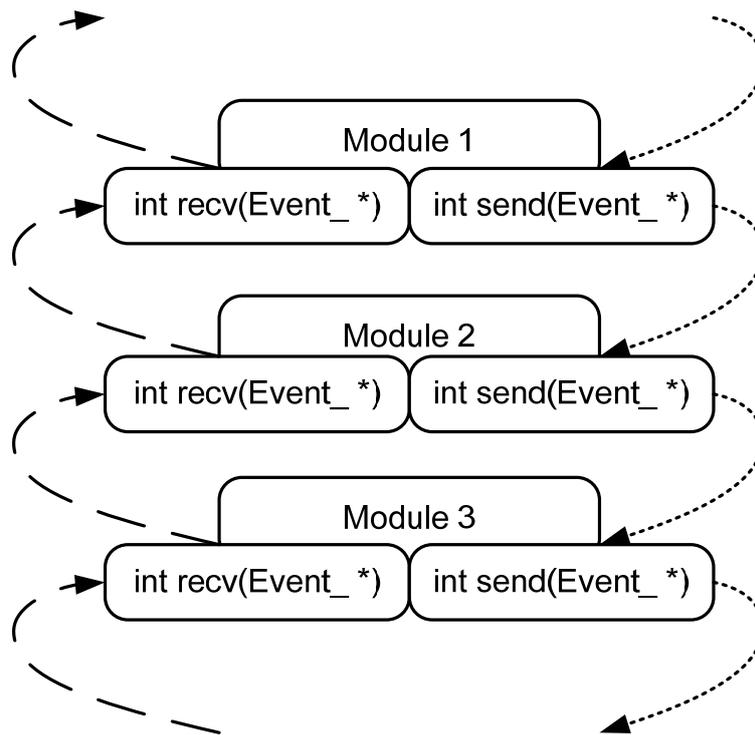


圖 3-3. 模組間封包的傳遞架構

3.2. 支援的節點與網路拓樸

為了在NCTUns網路模擬器上支援IEEE 802.16e點對多點模式的移動式WiMAX網路，我們增加了兩種新的節點，分別是802.16e BS (Base Station)與802.16e MS (Mobile Station)，如圖3-4所示。



Base Station



Mobile Station

圖 3-4. IEEE 802.16e 點對多點模式支援的節點

802.16e BS 節點允許存在有線與無線介面，有線介面可與骨幹網路相連，以提供網際網路服務；無線介面則是以 802.16e 網路協定來運作，藉由無線通道與訊號範圍內的 MS 溝通。另外，BS 負責排程所有 MS 傳輸資料的頻道使用權，以達到 QoS 的需求。

802.16e MS 節點僅有一無線介面，以 802.16e 網路協定來運作，藉由無線通道來掃描所有可用的頻道，並與 BS 進行註冊來取得資料傳輸權，BS 與 MS 的網路拓樸如圖 3-5.所示。

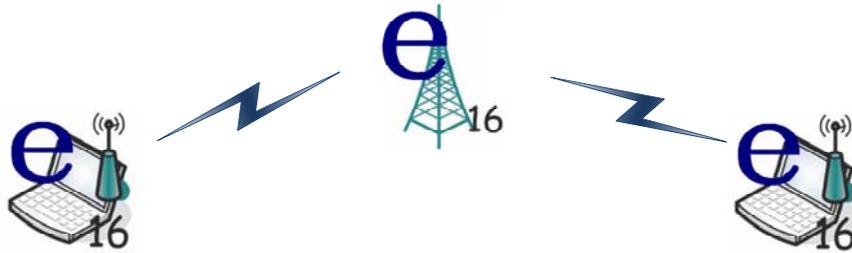


圖 3-5. BS 與 MS 的網路拓樸

IEEE 802.16e 點對多點模式的網路架構僅定義了媒體存取控制層與實體層的傳輸協定，對於上層所使用的是 IP 網路或 ATM 網路等則由收斂子層來處理並分類。在 NCTUns 網路模擬器裡使用的是 IPv4 網路，於是我們在收斂子層的部份僅支援 IPv4 封包的處理，對於其他協定的封包則無定義。IPv4 封包在經過傳送端收斂子層的處理後，會分割或結合成 802.16e 網路中的最小封包資料單元 (PDU)，透過底層的傳輸協定將這些 PDU 送往目的端；接收端的收斂子層會將被分散的資料重組回原始的 IPv4 封包，並遞送至上層協定處理，藉此與骨幹網路及其他網路溝通。圖 3-6.呈現 IP 封包在通過 802.16e 網路時的封裝示意圖。

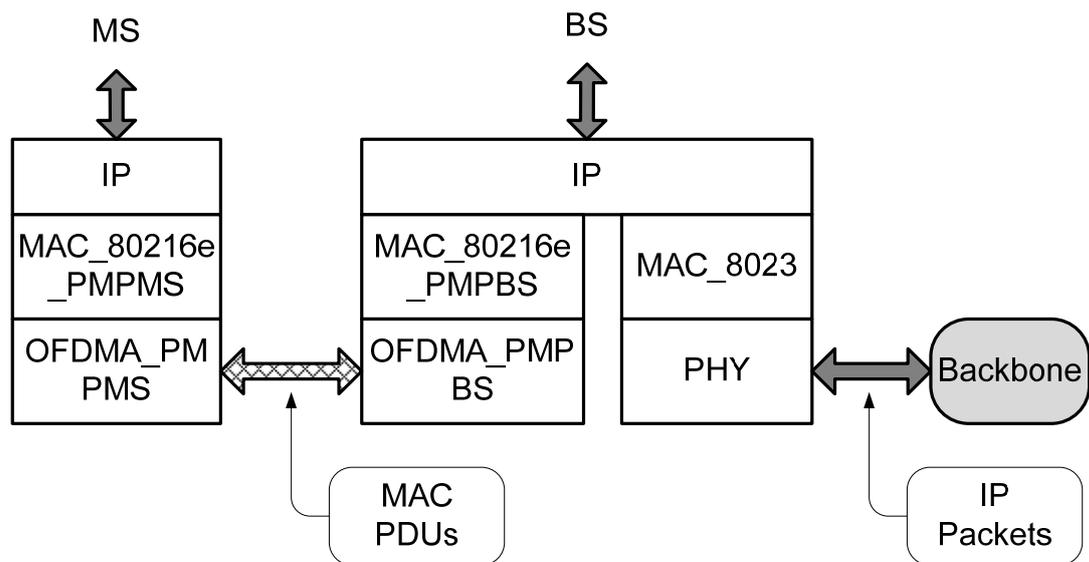


圖 3-6. MAC PDU 與 IP 封包的轉換

3.3. 協定堆疊

3.3.1. 802.16e BS 節點

在 NCTUns 網路模擬器裡，802.16e BS 節點的角色類似 Router，允許擁有多個介面，包括 802.3 的有線介面及一個 802.16e 的無線介面。有線介面的協定堆疊包括 Interface 模組、ARP 模組、FIFO 模組、802.3 模組、Phy 模組、Link 模組串接起來，用來銜接後端的骨幹網路，使得 802.16e 網路裡的 MS 能夠與外界網路進行溝通。在目前的 NCTUns 網路模擬器裡，已經完全支援 802.3 的有線介面模組，於是在設計 802.16e BS 節點時，無須再新增或修改 802.3 的有線介面模組。至於無線介面的協定堆疊部份，則是包括 Interface 模組、MAC_80216e_PMPBS 模組、OFDMA_PMPBS 模組、CM 模組、Link 模組，用來與 MS 溝通。其中依循 IEEE 802.16e 規格來實作的 MAC_80216e_PMPBS 與 OFDMA_PMPBS 兩個模組是我們所著重的部份。

在 802.16e BS 節點的協定堆疊裡，MAC_80216e_PMPBS 模組包含 BS 所有媒體存取控制層的功能，OFDMA_PMPBS 模組則是負責實體層的運作。在我們的設計中，媒體存取控制層所處理的都是 IP 封包，而非 Ethernet 封包，於是不需要加入 ARP 模組來填入 Ethernet

標頭。另外，在有線介面端有一 FIFO 模組，用來暫存與佇列上層協定所送出的封包，避免因下層協定處理不及而造成資料遺失；但在我們的設計中，已經將此佇列的機制包含在 MAC_80216e_PMPBS 模組裡，上層所送出的封包在進入 MAC_80216e_PMPBS 模組後，會依據不同連線識別碼而被暫存在各自的連線佇列裡，直到 BS 進行下行排程時，才有機會從佇列中被取出來加以封裝並傳送出去。因此，相較於有線介面的協定堆疊設計，在 802.16e 協定堆疊裡，ARP 模組與 FIFO 模組是不需要加入的。

OFDMA_PMPBS 模組負責協助上層進行資料的傳送，同時針對欲傳送的資料進行編碼與調變、或將已接收的資料進行解碼再遞交至上層。在無線通訊裡，訊號強弱與環境干擾導致能量的衰減是影響通訊品質最重要的一環，在 NCTUns 網路模擬器裡，提供了 CM 模組 (Channel Model Module) 供無線通訊相關的模組得以方便地使用與切換各式各樣的通道模型。802.16e BS 節點雖在 OFDMA_PMPBS 模組的下層也加入了 CM 模組，用來模擬無線通道的能量衰減計算，但此為模擬無線網路之用，在真實網路設備裡，並不會有此 CM 模組。



3.3.2. 802.16e MS節點

在 NCTUns 網路模擬器裡，802.16e MS 節點的角色類似筆記型電腦或其他手持式行動裝置，擁有一個 802.16e 的無線介面，藉由無線通道與附近的 BS 進行溝通。此無線介面的協定堆疊與 802.16e BS 類似，包括 Interface 模組、MAC_80216e_PMPMS 模組、OFDMA_PMPMS 模組、CM 模組、Link 模組等。我們將著重在依循 IEEE 802.16e 規格下實作的 MAC_80216e_PMPMS 與 OFDMA_PMPMS 模組。

在 802.16e MS 節點的協定堆疊裡，MAC_80216e_PMPMS 模組負責 MS 的媒體存取控制層，OFDMA_PMPMS 模組負責實體層的運作。與 802.16e BS 節點相同的，ARP 模組與 FIFO 模組都不需要加入模組串列中。MS 要送往 BS 的資料都會暫存在 MAC_80216e_PMPMS 模組裡的連線佇列裡，依照不同的連線識別碼而放置於不同的連線佇列中。而在 OFDMA_PMPMS 模組之下，同樣加入了 CM 模組來模擬無線通道，讓使用者能夠方便地切換不同的通道模型。圖 3-7. 呈現詳細的 BS 與 MS 的協定堆疊。

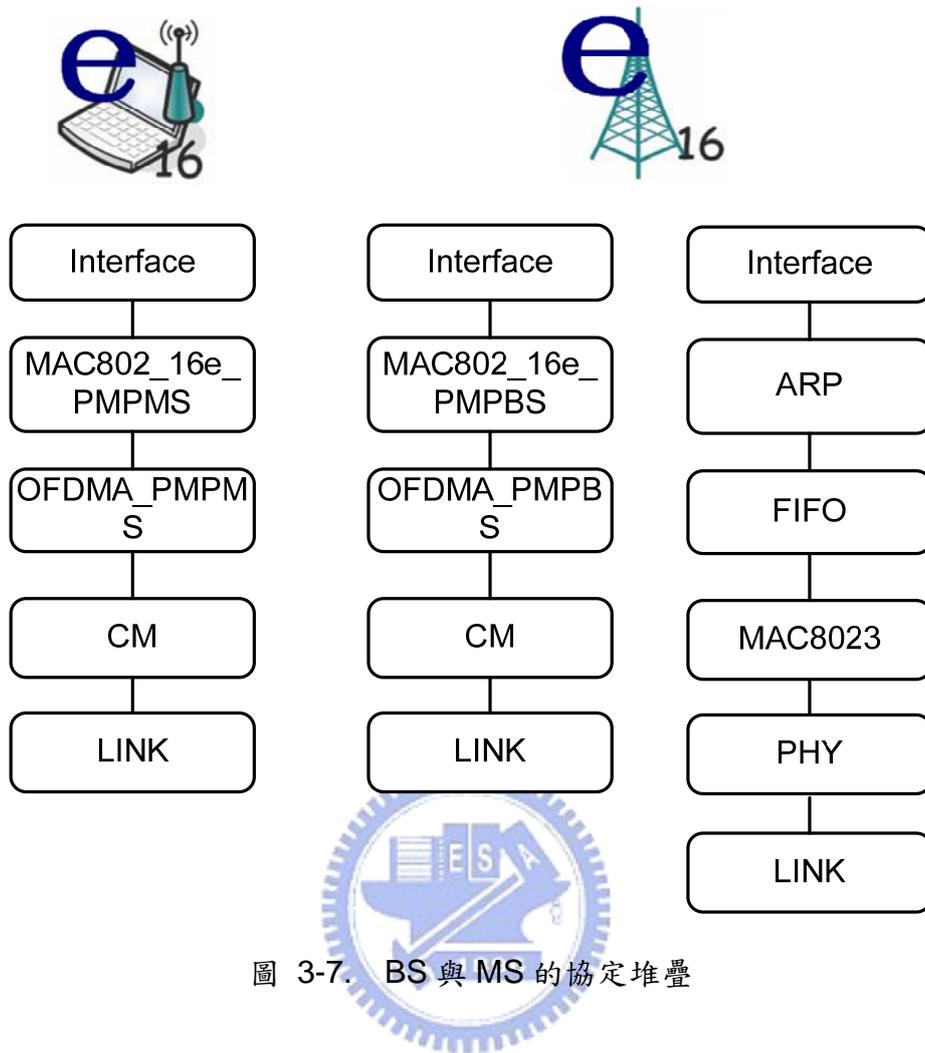


圖 3-7. BS 與 MS 的協定堆疊

3.4. IEEE 802.16e 模組設計

3.4.1. 媒體存取控制層的模組設計

在 IEEE 802.16e 規格裡，幾乎所有的機制都定義在媒體存取控制層，包括加入網路程序、管理訊息的交換、頻寬分配與取得、連線建立與管理、傳輸排程機制、換手機制等。在我們的設計中，各種基本的功能與機制都將會支援，而額外的功能則保留可擴充的彈性，供使用者自行實作。以下將介紹在媒體存取控制層所支援的重要機制與流程。

BS 節點在 WiMAX 網路裡是服務提供者的角色，在 BS 運作過程中，除了 DL-MAP 與 UL-MAP 是每個訊框都會送出的廣播訊息外，也會定期廣播 DCD 與 UCD 訊息來告知 BS 的上下行網路服務參數。當 MS 節點試圖加入 WiMAX 網路時，必須先聆聽附近 BS 的廣播訊

息，並與 BS 進行同步，等待 DCD 與 UCD 訊息來取得連線參數。取得連線參數的 MS 必須透過加入網路的基本程序來與 BS 溝通，進而取得更多連線資訊與頻寬；BS 在得知有新的 MS 要加入網路時，也必須依循加入網路的流程來服務該 MS，並協助 MS 建立管理連線與資料連線。在加入網路的過程中，有些程序在我們的模擬平台設計中是不實作的，包括：IP 位址的分配與取得、金鑰交換與加解密、取得目前時間等；由於 IP 位址在模擬平台裡已事先給定，而加解密機制與時間資訊則是在網路運作時，不會影響基本功能與效能，於是將不實作這些項目。

在我們的設計裡，加入網路的程序結束之後，BS 與 MS 之間會建立兩條管理連線與一條資料連線。管理連線分別是 Basic 與 Primary，用來交換管理訊息；資料連線則是在傳輸上層資料時使用。IEEE 802.16e 裡的所有連線都是以連線識別碼為辨別依據，除了 BS 分配給 MS 作為管理或傳輸資料使用的三種連線有各自的識別碼使用範圍之外，尚有 Broadcast 與 Initial Ranging 兩種眾所皆知的連線。Broadcast 連線用在 BS 傳輸廣播訊息時使用，所有使用 Broadcast 連線傳輸的資料，MS 都必須加以解析來取得廣播資訊；Initial Ranging 連線則是在 MS 加入網路過程裡，交換管理訊息使用。由於 BS 尚未分配給欲加入網路的 MS 獨立的連線識別碼，於是在這段時間內，MS 的管理訊息都是以 Initial Ranging 連線識別碼來進行溝通。

在 WiMAX 網路裡，BS 除了在下行子訊框區間傳輸資料給 MS 之外，也必須負責分配上行子訊框區間的頻寬使用權，避免多個 MS 同時傳輸資料造成碰撞。在我們的設計中，上行通道的分配是採用固定配給的方式，在 BS 管轄下的 MS 都擁有一組事先設定好的 QoS 參數集，當 BS 分配上行頻寬時，會考慮每個 MS 的 QoS 需求，來計算所需配給的 slot 個數為何，也就是在每個訊框區間裡都會分配相同的頻寬給同一個 MS。雖在 IEEE 802.16e 規格中共定義了五種 QoS 層級 (UGS、rtPS、ertPS、nrtPS、BE)，但在我們的實作中，僅支援類似 UGS (Unsolicited Grant Service) 的作法，MS 無須經由頻寬請求的方式來取得傳輸機會，而是由 BS 主動給予頻寬。雖然此機制的實作方式較簡單，但卻會造成可用頻寬的浪費。由於在我們目前的平台設計裡暫不考慮 QoS 的需求，未來若需要此機制的支援，可再另外擴充。

上行子訊框除了 BS 分配給不同 MS 的使用區間外，還必須分配一段測距子通道，作為初始測距、定期測距等機制使用。此測距子通道屬於競爭區間，也就是會造成資料碰撞的部份，分成數個傳送機會，分別用來傳輸不同目的的測距碼。測距碼是具有分碼多工特性的特殊編碼，以 PRBS 產生器來產生，讓不同 MS 在相同頻率下同時傳送資料給 BS 時，仍可被 BS 區別出來。不過，在模擬平台上，並無法真實呈現分碼多工的效果；於是，在我們的實作中，將直接傳輸所使用的測距碼，BS 再針對同一時間同頻率下收到的所有測距碼進行比對，若有相同的測距碼，則可認為資料因發生碰撞，無法區別而捨棄。

媒體存取控制層分為收斂子層、通用子層與安全子層，但在我們的實作中，因為不支援金鑰與加解密機制，於是安全子層的部份將會忽略，僅支援收斂子層與通用子層兩部份。從 kernel 送出來的封包會先進入 Interface 模組，再送至媒體存取控制層的 send() 函式，而收斂子層負責將欲送出的 IP 封包進行分類，並放到對應的連線佇列裡，目前的設計是以封包目的地 IP 位址做為分類依據。

WiMAX 網路裡傳輸資料的最小單位是 PDU，包括 Generic MAC Header 與 Payload，無論是管理訊息還是資料封包，送出前都會封裝成 PDU 的訊框格式。另外，我們在 PDU 裡也加入了 Cyclic Redundancy Check (CRC) 機制，來進一步確保接收資料的正確性。雖然資料從實體層被送出前，會先經過通道編碼來保護資料，接收端解碼時也能糾正一些傳輸時發生的位元錯誤，但仍然無法保證所收到的資料可以完全正確無誤。於是，藉由 CRC 欄位的檢查可以再次確認資料的正確性，若是 CRC 檢查是錯誤的資料，則會捨棄而不加以處理或遞交至上層。

IEEE 802.16e 支援 MS 具有行動的功能，於是換手機制在此網路中將是必須面對的問題。在執行換手程序之前，必須先取得附近 BS 的連線參數，才能決定 MS 將要換手的目標是哪一個 BS。而這些鄰近 BS 的資訊在 IEEE 802.16e 標準裡，定義了許多種取得方式，例如：鄰近 BS 間透過骨幹網路來交換連線參數訊息，或 MS 暫時切換至其他 BS 的頻道，來聆聽附近 BS 所廣播的相關服務參數，再向提供服務的 BS 回報等。在我們的平台設計裡，我們先將所有 BS 的相關資訊紀錄在檔案中，讓所有 BS 在一開始就得知所有鄰近 BS 的服務參

數。因為在模擬過程中，我們假設 BS 的服務參數將不會有更動，也就是一開始 BS 間透過骨幹網路所取得的鄰近 BS 資料會是固定的；於是，我們將原本要透過骨幹網路取得的資訊紀錄在檔案中，讓 BS 啟動時就從檔案中取得這些資訊，以達成從骨幹網路取得資訊的相同目的。

提供連線服務的 BS 有義務要廣播鄰近 BS 的連線資訊，供 MS 判斷是否要進行換手程序，來取得更好的訊號品質或服務需求。而換手的決定權可以是 BS 主動要求，也可以是由 MS 來提出請求，並藉由換手相關的管理訊息溝通之後，MS 即可開始換手程序。在我們的設計裡，BS 會定期廣播 MOB_NBR-ADV 訊息來告知鄰近 BS 的資訊；而換手的決策則是由 MS 主動提出，當 MS 判斷鄰近 BS 可提供較佳的訊號品質時，即可向正提供服務的 BS 送出換手請求訊息來進行換手。另外，IEEE 802.16e 標準裡提出了兩種換手機制，分別是硬式換手與軟式換手，其中支援行動功能的系統必須提供硬式換手功能，而軟式換手則是選擇性功能。我們目前只提供了最基本的硬式換手功能，軟式換手的部份則供使用者做進一步的擴充。

在本節一開始說明加入網路程序時的 IP 位址分配與取得是由模擬平台事先給定，也就是 MS 的 IP 位址一開始就已經固定了。但具有行動通訊功能的 WiMAX 網路系統裡，MS 會在不同 BS 間漫遊。於是，為了維持 IP 網路的正常運作，避免既有連線的重新建立，我們在所設計的 WiMAX 網路裡引入了 Mobile IP 的機制，來維持 MS 的通訊功能。Mobile IP 是目前 NCTUns 網路模擬器已經支援的功能之一，我們只要在有提供換手功能的 BS 上執行 Mobile IP Agent Daemon，並在 MS 上執行 Mobile Node Daemon，這些應用程式即可透過 WiMAX 網路進行溝通。其中，Agent Daemon 負責監控目前 BS 下所服務的 MS 有哪些，Mobile Node Daemon 則是隨時回報目前位置，供 Agent Daemon 了解目前 MS 的狀態。當 MS 進行換手程序並加入其他 BS 的網路時，原本服務該 MS 的 BS 上的 Agent Daemon 將會與此 MS 失去聯繫，而換手後的 BS 上的 Agent Daemon 則會偵測到有一新的 MS 加入網路；此時，兩 Agent Daemon 會透過骨幹網路來交換 MS 已換手訊息，而未來送給該 MS 的資料都必須從原 BS 轉向新 BS。如此一來，MS 即使已經在不同的 BS (子網路不同)管轄下，也不必更換 IP 位址，即可保持通訊。

以上所描述的是 IEEE 802.16e 模組在媒體存取控制層所支援的幾項重要機制，主要都是 BS 與 MS 間的互動行為與流程；在以下兩個小節，我們將分別針對 BS 本身與 MS 本身的媒體存取控制層設計進行說明。

3.4.1.1. BS 媒體存取控制層的模組設計

在 IEEE 802.16e 點對多點模式下，BS 具有管理整個網路的主控權，並透過連線識別碼來與所有 MS 進行溝通。這些連線識別碼除了眾所皆知的兩種識別碼外，其他的識別碼也都是交由 BS 來管理，並且在加入網路的程序中分配給 MS 使用。

對於 BS 來說，管理所有尚未完成或已經完成連線的 MS 資訊，是相當複雜且必要的一件工作。在尚未完成連線的過程中，BS 必須紀錄所有正準備加入網路的 MS 進度為何，並給予正確的回應，以協助 MS 能快速加入網路。而已經完成加入網路程序的 MS，在 BS 端也將會儲存所有 MS 的相關設定及配給的資源，例如：管理及資料連線識別碼、暫存資料所使用的佇列等。在設計此管理機制時，我們建立了一個不同於 BS 與 MS 物件的 C++ 類別，稱為 MS Object；在 BS 物件裡，每一個 MS Object 物件代表一個遠端的 MS 節點資訊，所有關於每個獨立 MS 的資訊都以一個 MS Object 來管理，以減少 BS 物件的複雜度。

由於在加入網路過程中，BS 都會配給 MS 兩組管理連線識別碼以及多組資料連線識別碼，換句話說，這些識別碼都是專屬於特定 MS 所有。因此，BS 即可透過這些識別碼來分辨收到的管理訊息該由哪個 MS Object 來負責處理並回應。若是使用 Initial Ranging 連線識別碼來傳輸的管理訊息，則不屬於任何一個 MS Object，BS 必須特別處理這類的管理訊息。另外，除了管理訊息之外的其他資料，也就是使用資料連線識別碼來傳輸的 PDU，BS 收到之後都會將原始資料遞交至上層協定。在 NCTUns 網路模擬器裡，上層協定即是 kernel space，媒體存取控制層將收上來的封包交由 kernel 進行處理，可能是由 BS 應用層收下這個封包，或是經過路由將封包送往後端骨幹網路等。

圖 3-8. 呈現在不同物件之間的資料傳遞關係。BS 的媒體存取控制層會從兩個部份收到資料封包，一個是上層協定送下來的封包，透過 send() 函式進入，並且經由收斂子層的分類

之後暫存在相對應的連線佇列裡；另一個則是由 MS 所送過來的封包，會透過 `recv()` 函式到達，並直接遞交至上層協定處理。要從 BS 送出的資料除了從資料連線佇列取出外，尚有管理連線的資料，而這些資料都將交給 BS 排程器負責規劃。以下將介紹 BS 排程器將如何進行配置。

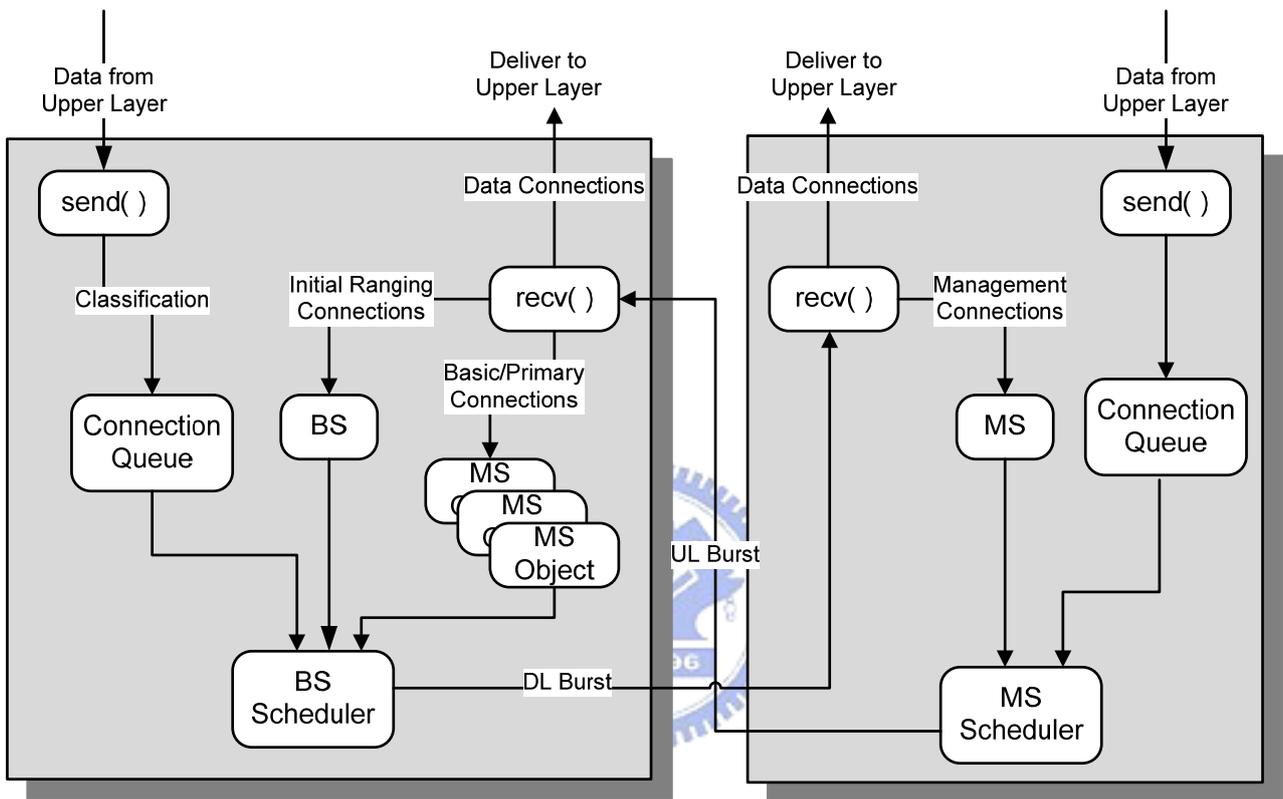


圖 3-8. BS 與 MS 物件間的資料傳遞

BS 排程器根據使用的實體層不同而有其分配頻寬的方式，在這樣的條件之下，排程器必須先了解實體層的配置頻寬特性才能進行。我們所支援的實體層是分時多工的 OFDMA，在分配頻寬時是以 slot 為單位來配置，並將每個訊框區間分為上行與下行兩個子訊框，上行子訊框使用 DL-PUSC 的載波排列方式，下行子訊框則是選擇 UL-PUSC 來實作，表 3-1.與表 3-2.是 DL-PUSC 與 UL-PUSC 在 IEEE 802.16e 標準中的相關參數表。

Parameter	Value	Comments
Number of DC Subcarriers	1	Index 512
Number of Guard Subcarriers, Left	92	
Number of Guard Subcarriers, Right	91	
Number of Used Subcarriers (Nused) including all possible allocated pilots and the DC subcarrier	841	Number of all subcarriers used within a symbol
Number of carriers per cluster	14	
Number of carriers per cluster	60	
Number of data subcarriers in each symbol per sub-channel	24	
Number of sub-channels	30	

表 3-1. DL-PUSC 參數表

Parameter	Value	Comments
Number of DC Subcarriers	1	Index 512
Nused	841	Number of all subcarriers used within a symbol
Guard Subcarriers: Left, Right	92, 91	
Nsubchannels	35	

表 3-2. UL-PUSC 參數表

在配置上行子訊框時，BS 排程器將會先分配一塊競爭頻道，稱為測距子通道，作為初始測距與定期測距等使用，並且規範這段子通道裡的分配情形。測距子通道的用途包括初始測距、定期測距、頻寬請求與換手測距四種，各種機制所使用的測距碼與傳送時機都不同。於是，BS 排程器將子通道的詳細分配情形紀錄在 UL-MAP 的 IE (Information Element)裡，

收到 UL-MAP 訊息的 MS，藉由分析 IE 可以得知這段子通道的使用時機。圖 3-9.是在我們的設計中，每個上行子訊框分配給競爭區間使用的情形。接著，BS 排程器將會分配免競爭區間供特定 MS 使用，這塊區間的分配方式是根據使用者設定的供應 MS 傳輸速度來決定，藉由傳輸位元速率搭配所使用的調變方式來計算每個上行子訊框區間所應分配的 slot 個數是多少，藉此達成 QoS 的需求。而這些配置的結果也將紀錄在 UL-MAP 的 IE 裡，MS 透過分析 UL-MAP 的 IE 可以得知 BS 分配給該 MS 的傳送時機與相關參數。完成上行子訊框的競爭區間與免競爭區間配置之後，BS 排程器必須將這些分配的結果，也就是 UL-MAP 的 IE 集合起來，並以 UL-MAP 的訊息格式封裝，經由下行子訊框送出。

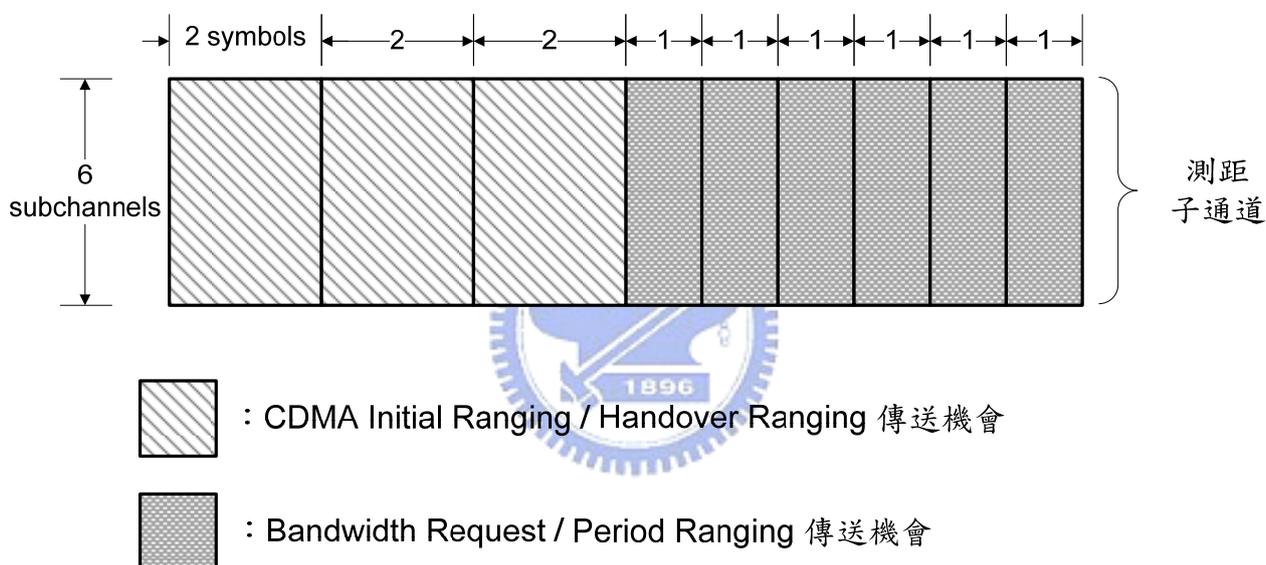


圖 3-9. 測距子通道的競爭區間分配情形

在配置下行子訊框時，需事先保留一個 symbol 的區間供實體層傳遞前置符號，以及數個 slots 供實體層填入訊框控制標頭。接著，BS 排程器會先分配下行 burst，決定下行 burst 以後才能產生 DL-MAP 訊息，並填入傳輸 DL-MAP 訊息所使用的 slot 區間。由於下行方向所使用的調變與編碼方式是由 MS 在加入網路時所決定的，為了公平配置下行頻寬，BS 排程器是使用 Round-Robin 的方式來選取不同調變與編碼方式的下行資料，如圖 3-10.所示。此作法是根據林士盈學長在 NCTUns 網路模擬器上實作 IEEE 802.16d 模組時，分配下行通道所使用的方法來延伸。下行 burst 配置完畢以後，便可將詳細配置方式紀錄在 DL-MAP 的

IE 裡，並且產生 DL-MAP 訊息來封裝這些 IE。當 MS 收到 DL-MAP 時，可藉由分析 IE 來取得必須接收的下行資料，並捨棄不屬於自己的資料。

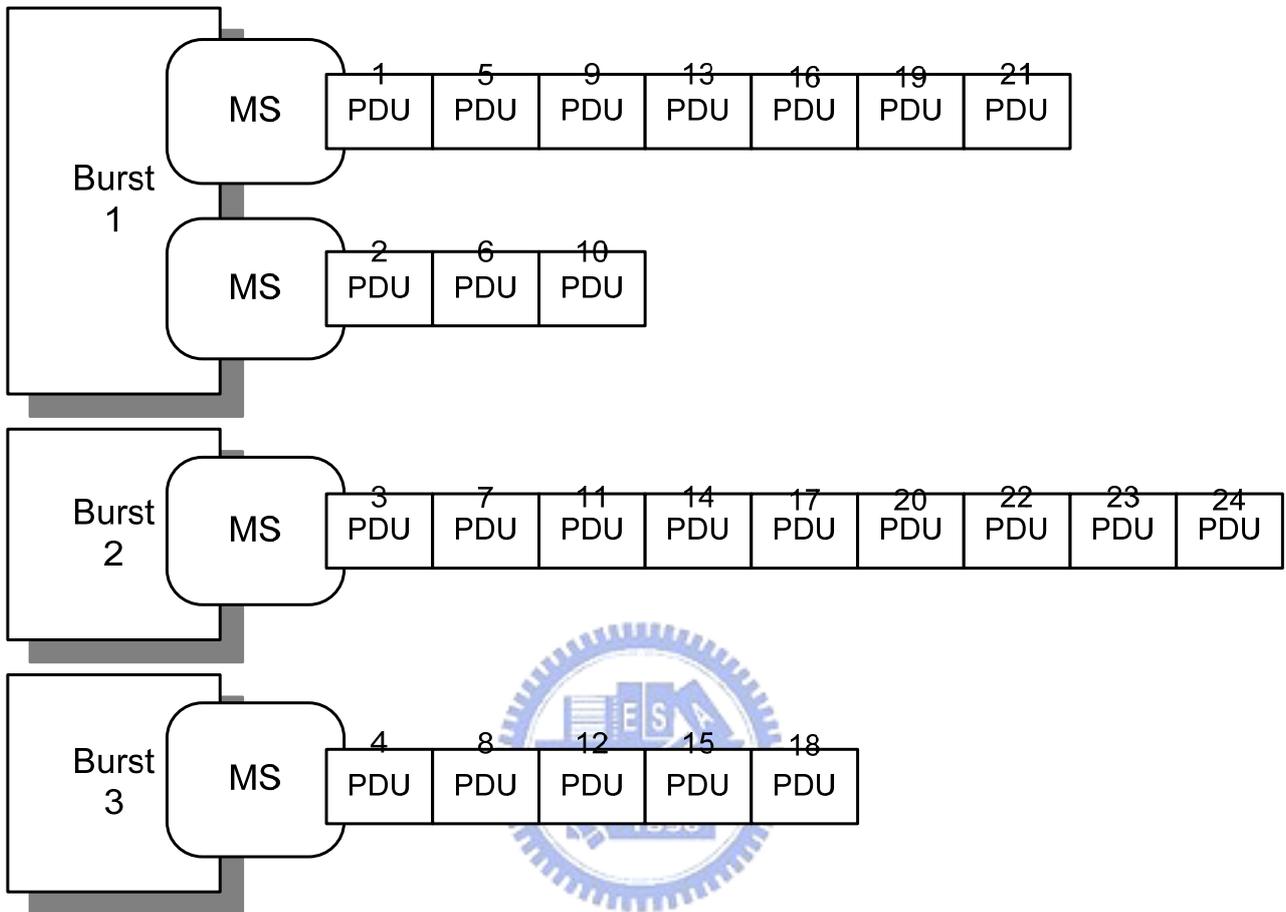


圖 3-10. BS 以 Round-Robin 方式配置下行頻寬

BS 排程器配置訊框區間的流程，如圖 3-11.所示。其中必須注意的是在配置上行子訊框時，上行可用的 symbol 數不得超過訊框區間總 symbol 數的一半。但在配置競爭區間時，我們尚無法得知上行子訊框將會佔去多少 symbol 數，以至於無法決定競爭子通道的傳送機會配置方式。於是，在我們的實作裡，將先配置上行免競爭區間來取得需佔用的 symbol 數有多少，接著再來分配競爭區間的部份，避免造成上行子訊框的浪費或不足。

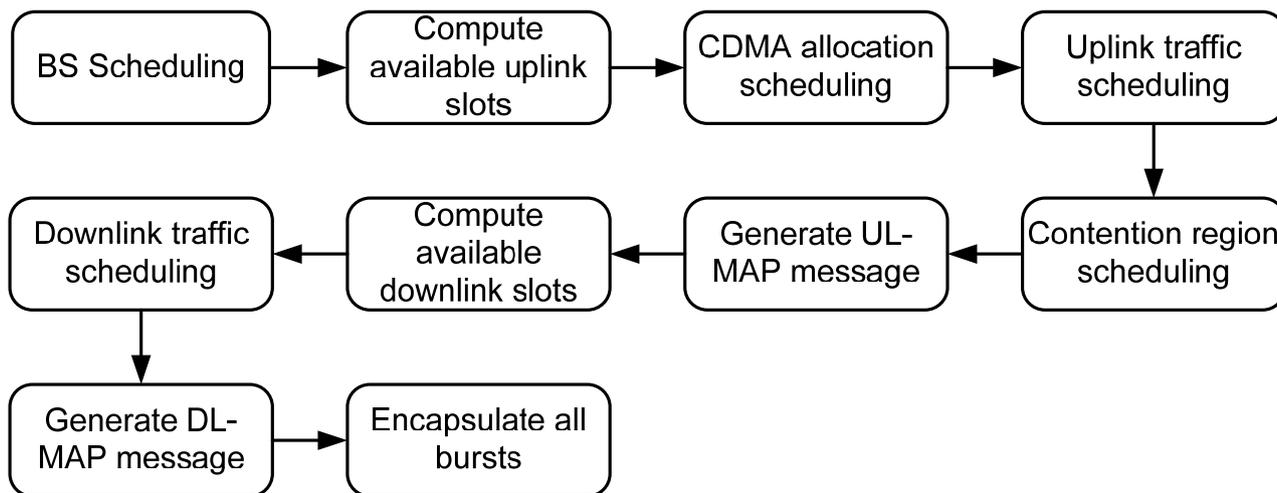


圖 3-11. BS 排程器配置訊框流程

3.4.1.2. MS 媒體存取控制層的模組設計

在 IEEE 802.16d 固定式點對多點模式下，SS 多半屬於被動的角色，隨著 BS 對於訊框區間的分配來進行運作。但在移動式網路下的 MS，除了配合 BS 保有原先的機制外，也增加了一些主動要求的功能。在我們的設計中，定期測距與鄰近 BS 頻道掃描是在移動式環境下的兩個重要機制。

在移動式環境下，MS 與 BS 的距離將隨著時間變化而改變。在加入網路的過程中所校正的時序參數，可能在 MS 移動之後變得不再準確，而定期測距的用途就在於保持 MS 與 BS 間的時序同步。定期測距是 MS 藉由在測距子通道中主動傳送定期測距碼，供 BS 來判斷是否需要進行時序校正；收到定期測距碼的 BS 必須回應 RNG-RSP 訊息來告訴 MS 測距結果，以完成本次的定期測距。

為了支援移動式 MS 具有換手功能，掃描可用頻道的鄰近 BS 是不可或缺的功能之一。在我們的設計中，鄰近 BS 的連線參數取得方式將不會透過 MS 掃描來取得，而是在一開始就已經給定。但 MS 與各 BS 間的訊號品質，則必須由 MS 透過頻道掃描的方式來取得，且所得到的訊號品質將是 MS 決定是否進行換手的重要參數。於是，我們將此機制實作在 MS 中，由 MS 主動要求進行鄰近 BS 的頻道掃描。必須注意的是，在 BS 回應 MS 的請求並分

配一段時間給 MS 進行掃描時，該時間內要送給該 MS 的所有訊息，BS 都必須暫存起來，等到 MS 掃描結束後才恢復傳送，以避免管理訊息或資料的遺失。

3.4.2. 實體層的模組設計

實體層是依據 IEEE 802.16e OFDMA 實體層規範來設計，主要功能包括了訊框控制標頭的處理、調變技術的模擬、通道編碼與解碼的實作及通道模型的模擬等。

訊框控制標頭所放置的是 DLFP (Downlink Frame Prefix)，紀錄 DL-MAP 相關訊息，由 BS 實體層產生，MS 實體層根據所紀錄的資訊來處理 DL-MAP 訊息，細部的處理流程在介紹 BS 與 MS 實體層時，將會詳細介紹。

在模擬中，並無法真實呈現調變技術的細節與行為，於是我們僅模擬使用調變技術所產生的功能。調變是實體層將數位訊號轉換為類比訊號的過程，一個子載波傳輸類比資料所使用的最小單位是一個 symbol，而一個 symbol 所代表的位元個數，將會影響頻道的傳輸速率。在 IEEE 802.16e OFDMA 實體層規範裡所使用的調變方式分別有 QPSK、16QAM、64QAM 三種，並且搭配不同的通道編碼率而有多種組合，以適用於不同的環境。

在通道編碼的部份，我們支援的是最基本的 Convolution Code，其編碼率分別有 1/2、2/3、3/4 三種。由於 OFDMA 實體層所支援的 Convolution Code 是 Tail-Biting，針對原始資料進行區塊編碼時，不會增加額外的填充位元 (padding)。於是所得到的編碼率會與實際取得的資料量相同，但此類的編碼方式與過程將會較為複雜。解碼方式是採用 Viterbi 演算法來達成，並針對 Tail-Biting 的特性，我們將參考[4]的想法來實作解碼的流程。另外，在完成 Convolution 編碼後，OFDMA 實體層提供了重複編碼的功能，用來增加傳輸資料的正確性。主要的想法是在連續的 slot 區間傳遞相同的資料，供接收端來比對並取出最適當的資料序列。但除了 DLFP 訊息必須使用重複編碼之外，對於其他的資料都是選擇性實作的。於是，在我們的模組設計裡，傳輸 DLFP 以外的資料都不提供重複編碼，以降低複雜度。

通道模型是採用 NCTUns 網路模擬器所提供的 CM 模組，方便使用者切換不同的通道模型。

3.4.2.1. BS實體層的模組設計

在下行子訊框一開始將會有數個 slots 作為訊框控制標頭，用來儲存 DLFP，這是由 BS 的實體層來產生的。當 BS 排程器在配置完下行子訊框時，會產生一個 DL-MAP 廣播訊息。BS 實體層根據 DL-MAP 訊息的長度資訊，以 slot 為單位，紀錄在 DLFP 裡，再傳遞給所有 MS。另外，在我們的設計中，我們假設同一個拓樸上的所有 BS 會運作在不同的頻帶上，而為了區別各自的頻帶，我們將以模擬時的節點識別碼作為頻帶識別之用，此部份的作法在 IEEE 802.16e 中並無定義。

3.4.2.2. MS實體層的模組設計

MS 實體層所收到的資料是經過 BS 一層一層封裝起來的，於是 MS 必須依照一定的程序才能分析整個資料的內容為何。首先，MS 必須先取得 DLFP 的資訊，來得知 DL-MAP 佔用多少個 slot；接著，MS 實體層將 DL-MAP 訊息解碼之後傳至上層，由上層來決定之後的資料該如何分析。在我們的設計中，MS 媒體存取控制層會在分析完 DL-MAP 訊息後將 DL-MAP IE 資訊遞交給實體層，供實體層來依序解開其他的下行 burst。另外，當 MS 的狀態是正在掃描頻道時，則此 DL-MAP 訊息將不會被解開，而是直接捨棄所有下行資料，只記錄當時接收到 BS 下行資料的訊號雜訊比。

Chapter 4. Implementation

在本章中，我們將說明 NCTUns 網路模擬器裡支援 IEEE 802.16e 模組，在實作時的相關概念與架構。由於 IEEE 802.16e 模組是在 802.16d 模組的設計架構下來進行修改與擴充，整體架構方面與 802.16d 模組極為類似，關於 802.16d 模組的實作說明可參考[4]。以下分成媒體存取控制層與實體層兩個部份，但我們僅針對幾個為了適用於 IEEE 802.16e 協定與機制所新增的類別、或既有類別的修改來加以說明。

4.1 媒體存取控制層模組

首先，在 IEEE 802.16e 規格中所定義的 DL-MAP 訊息與 UL-MAP 訊息，除了幾個固定欄位之外，還會夾帶額外的 DL-MAP IE 與 UL-MAP IE 資訊，用來描述下行與上行的訊框配置方式。由於 802.16e 所定義的 IE 資訊較 802.16d 複雜許多，於是我們將不同類型的 IE 資料結構獨立出來，如圖 4-1.所示。另外，我們使用 union 將下行的 IE 歸類在 DLMAP_IE_union，上行的 IE 歸在 ULMAP_IE_union，供接收端可以方便地處理 IE 訊息。接著，我們將運用 OFDMA_DLMAP_IE 與 OFDMA_ULMAP_IE 兩個類別來封裝或解析 IE 資訊，類別的成員如圖 4-2.所示。其中最重要的兩個函式為 appendBitField()與 extractField()，appendBitField()需要兩個參數，分別是要加入的資料及資料的位元個數，extractField()則是要取出來的資料位元個數與資料要暫存的空間。由於 802.16e 所定義的欄位是以位元為最小單位，於是在此類別裡所使用的函式，都是以位元計算的方式來進行存取。

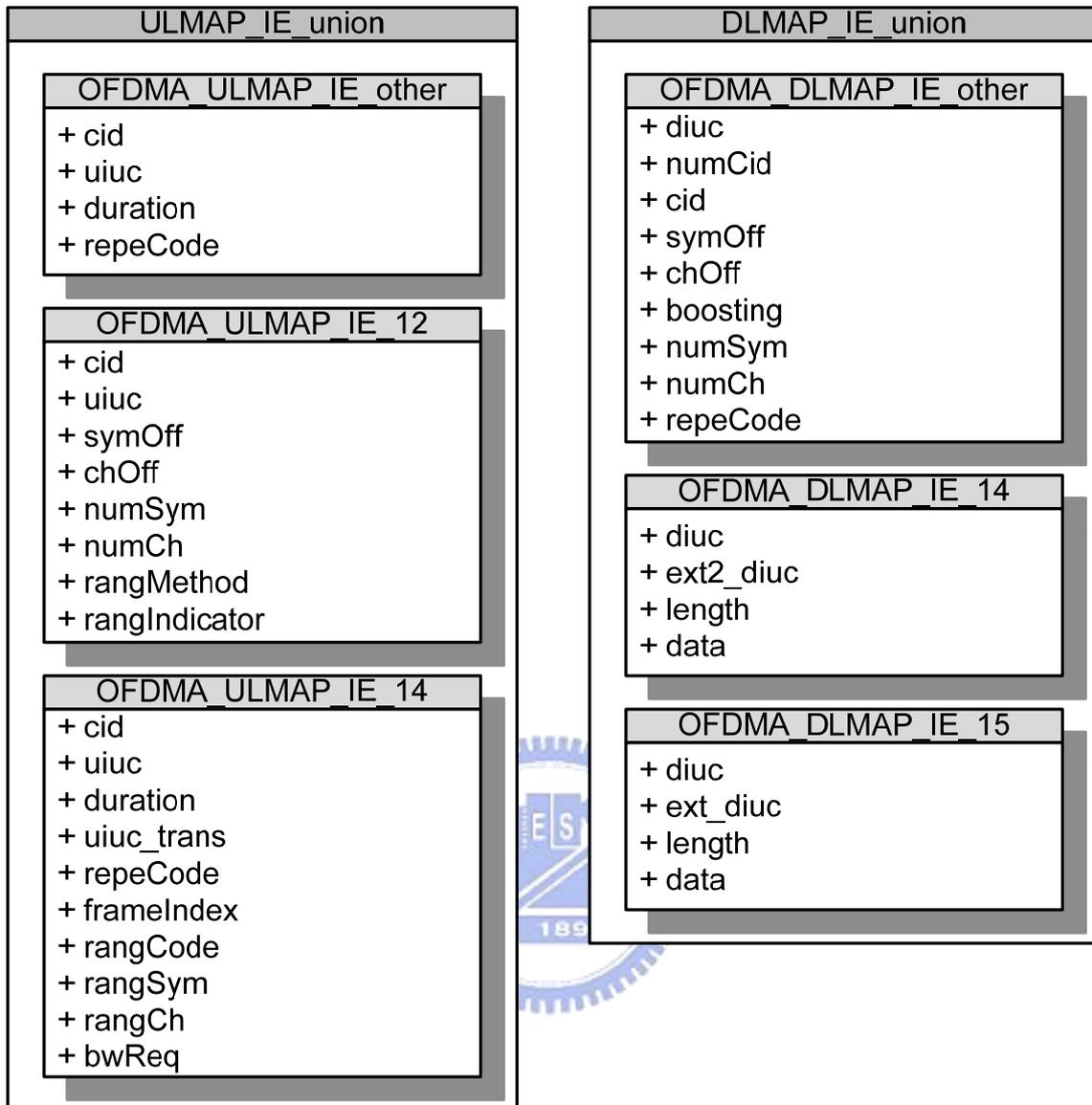


圖 4-1. 各種 UL-MAP IE 與 DL-MAP IE 的資料結構

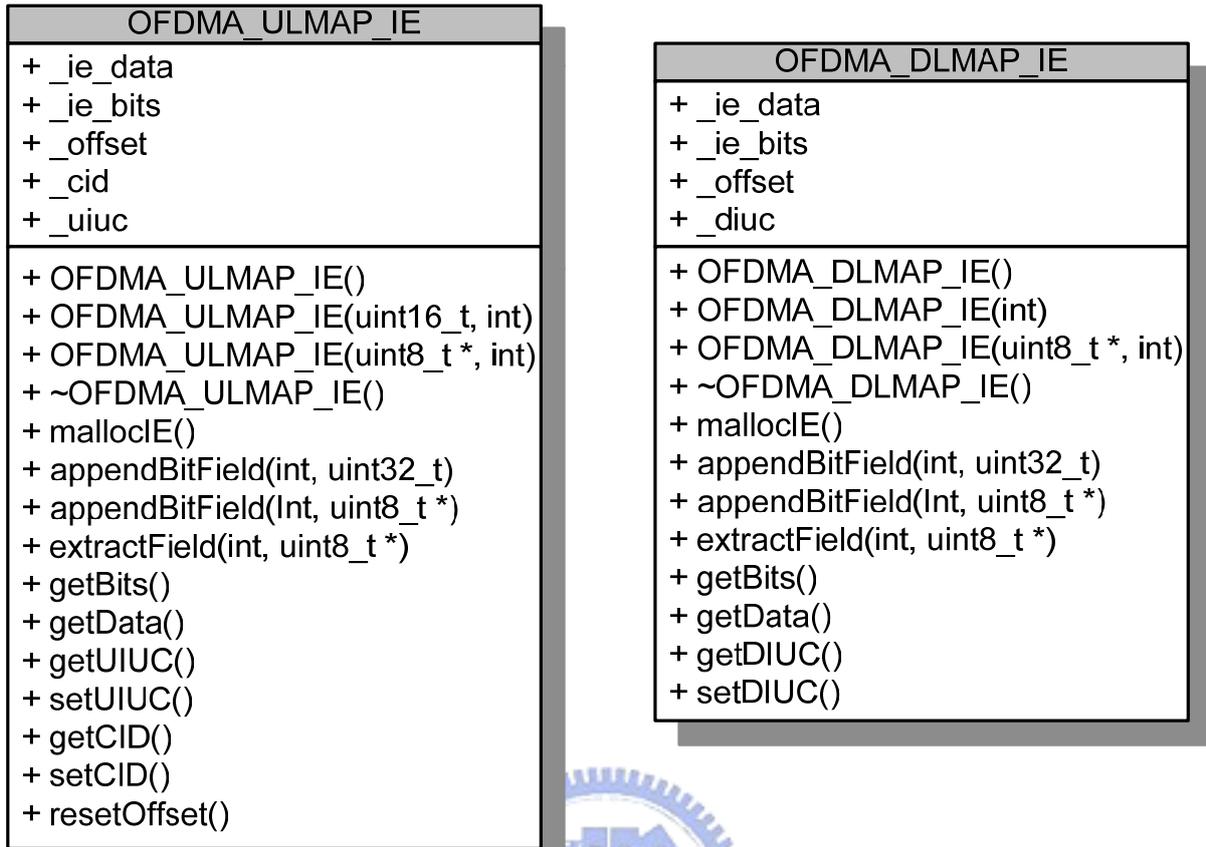


圖 4-2. UL-MAP IE 與 DL-MAP IE class 定義

由於 802.16e 支援 MS 具有行動功能，故以下三個功能是針對行動功能所增加的機制，分別是：

(1) 管理鄰近 BS 的類別：

在我們的實作裡，BS 與 MS 用來暫存鄰近 BS 所使用的類別如圖 4-3 所示。其中，NbrBS 類別存放單一 BS 的相關資料，NeighborBSs 類別則是儲存所有鄰近 BS 的列表。因為 BS 與 MS 都是使用 NeighborBSs 類別來儲存資訊，於是有些類別成員的定義是共用的，有些則是由 MS 或 BS 獨立使用。在 NbrBS 類別裡，PreambleIndex 成員將用來儲存頻道識別碼 (Channel ID)，CINR 成員是儲存實體層所偵測到的訊號與雜訊比，其餘成員則是管理訊息需要所定義的，在目前的設計架構下並無功能。NeighborBSs 類別成員裡是以 vector 來紀錄鄰近 BS 列表。

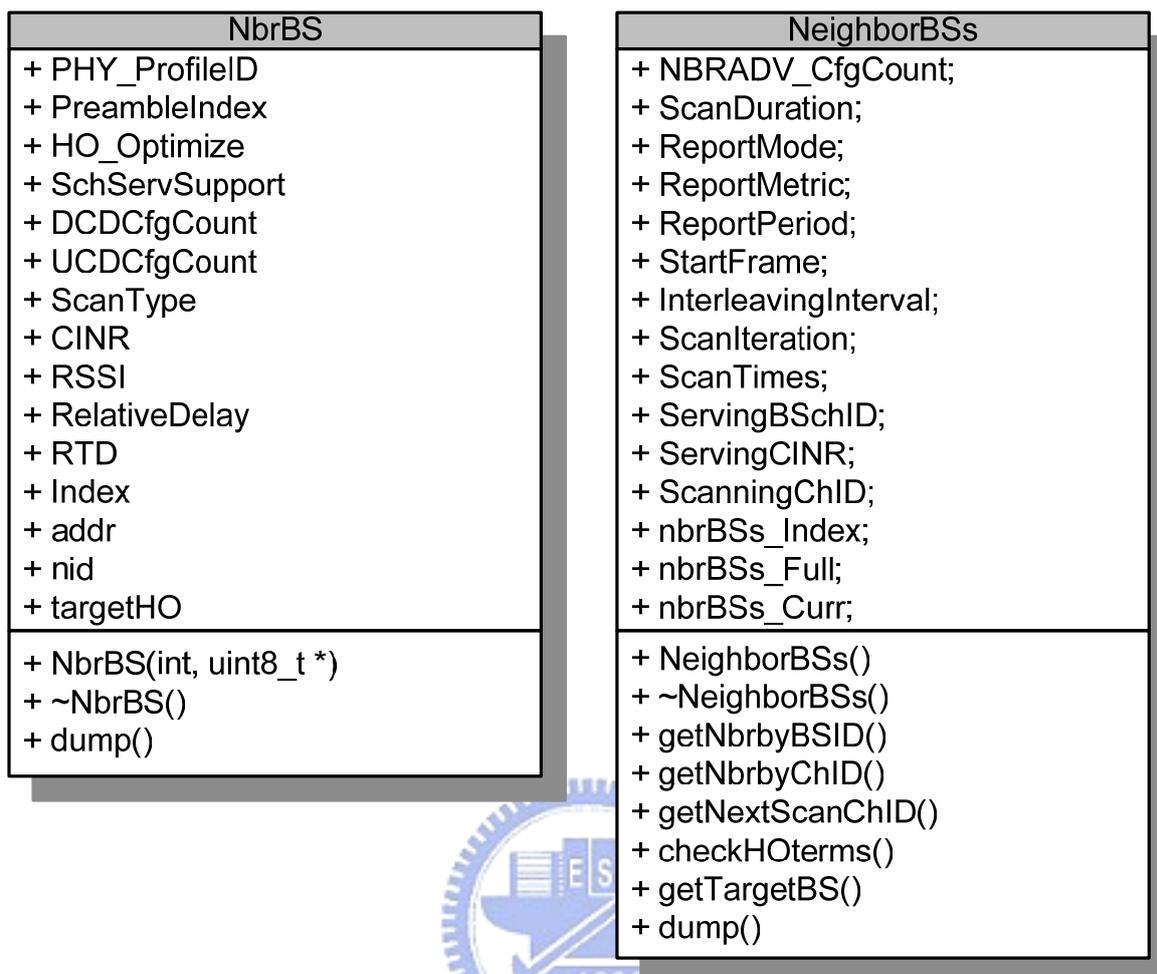


圖 4-3. NbrBS 與 NeighborBSs class 定義

(2) 提供 MS 要求掃描鄰近 BS 的功能：

MS 要求掃描鄰近 BS 所造成的影響是 BS 必須與 MS 協調掃描的時間及次數，圖 4-4. 是呈現當 MS 開始要求掃描，直到掃描完畢回到正常運作的過程。在此範例中，MS 送出 MOB_SCN_REQ 訊息要求三次的掃描循環，每次掃描時間為兩個訊框區間，每次回到一般運作時間為一個訊框區間。BS 回應 MOB_SCN_RSP 訊息告訴 MS 開始進行掃描是從第 0 個訊框區間後開始，也就是下一個訊框立即開始進行掃描，參數與請求訊息相同。於是，MS 會在下一個訊框開始依據協調的方式進行切換，並且 BS 只能在 Interleaving Interval 訊框區間傳送該 MS 的資料，否則將會造成資料遺失。

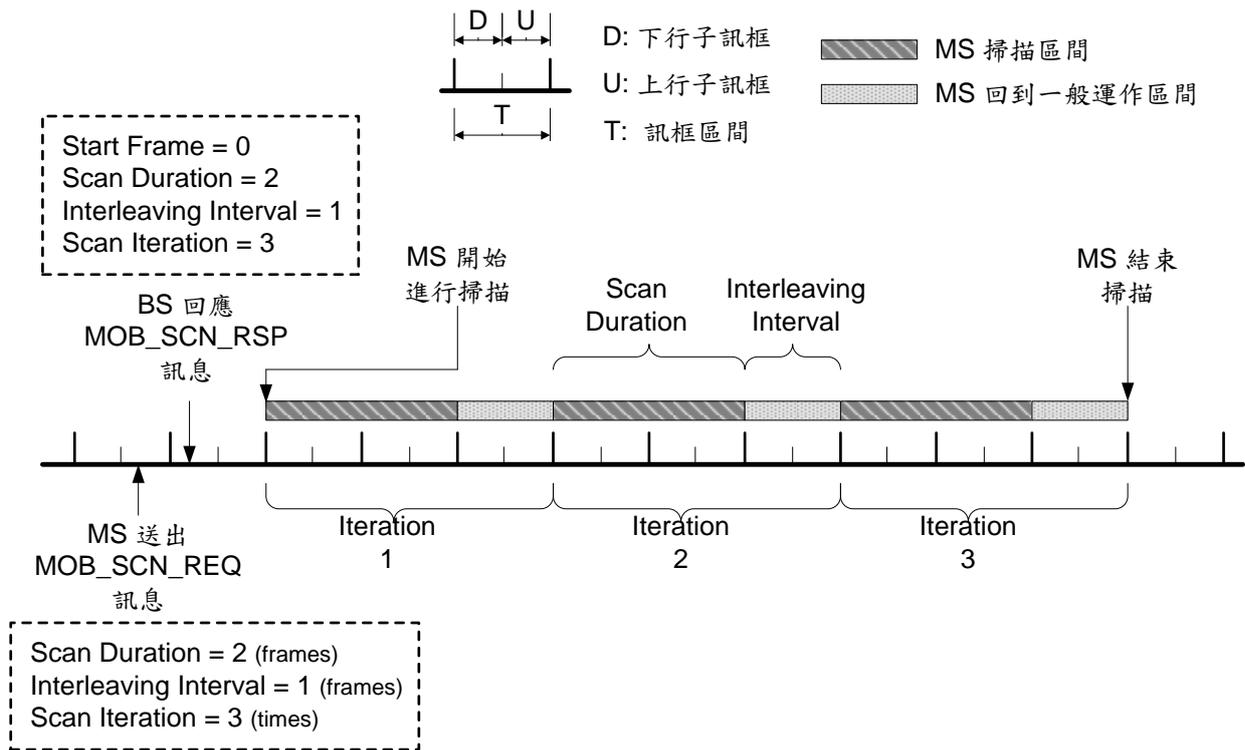


圖 4-4. MS 掃描鄰近 BS 的過程

(3) 決定換手的時機：

目前換手的時機是在 MS 結束掃描時進行，而決定是否進行換手的方式是由 MS 計算當時所掃描到的鄰近 BS 訊號雜訊比，是否比目前提供服務的 BS 還要好。但為了避免在進行鄰近 BS 掃描過程中，發生瞬間訊號震盪的現象，在記錄訊號雜訊比時，我們不會直接記錄當下的數據，而是將先前的數據與目前偵測到的作比例分配，以減少取得較震盪的數值，計算方式如圖 4-5.所示。

$$SNR_{record} = SNR_{original} \times 0.8 + SNR_{current} \times 0.2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} SNR_{record} : \text{最終紀錄的SNR數值} \\ SNR_{original} : \text{先前紀錄的SNR數值} \\ SNR_{current} : \text{本次偵測的SNR數值} \end{array} \right.$$

圖 4-5. 訊號雜訊比計算式

4.2 實體層模組

對 BS 而言，每個週期性的訊框區間要傳送下行資料前，必須先得知 DL-MAP 訊息總長度，並轉成 slot 單位，記錄在 DLFP 訊息裡。除了長度資訊外，也將傳輸 DL-MAP 訊息使用的重複編碼次數及頻道編碼方式記錄在 DLFP 訊息裡，供 MS 可以解開 DL-MAP 訊息，取得更多下行通道資訊。DLFP 訊息是由實體層產生，詳細結構如圖 4-6 所示。由於 IEEE 802.16e 標準規定傳送 DLFP 必須使用重複四次的編碼，搭配調變方式 QPSK、編碼率 1/2 的 Convolution Code，於是實際傳輸 DLFP 訊息時將會佔去四個 slots。

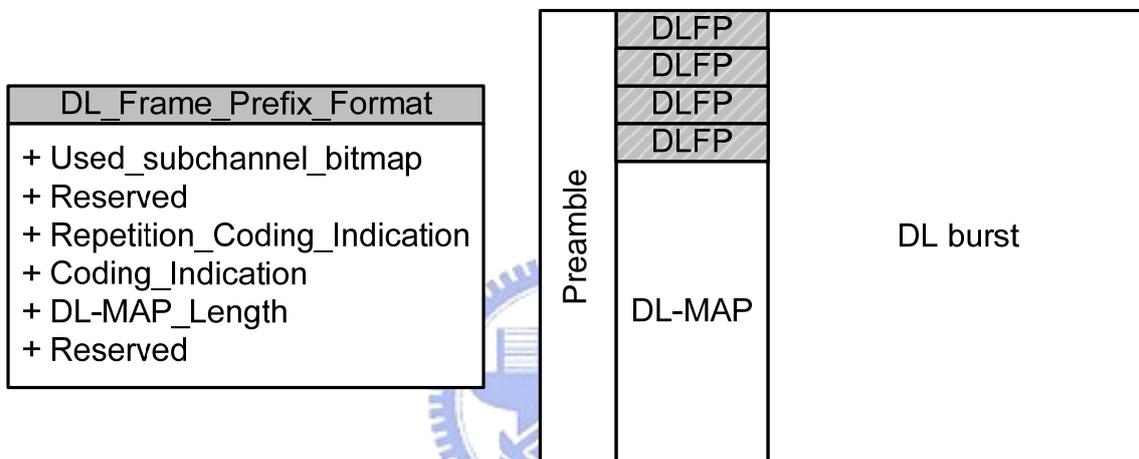


圖 4-6. DLFP 資料結構與在下行子訊框的位置

在 MS 實體層收到 BS 的下行資料時，必須模擬傳輸的時間。為了降低實作複雜度，我們將傳輸時間的計算分為兩個部份，第一個是接收 DLFP 與 DL-MAP 訊息所需的傳輸時間，依 OFDMA 實體層的訊框設計，此段是傳輸一個 slot 加上前置符號的時間，也就是三個 symbols。第二部份是接收 DL-burst 所需的時間，我們設定為整段下行訊框的時間減去接收 DLFP 與 DL-MAP 訊息的時間，再減去前置符號的時間，作為接收所有 burst 的傳輸時間。

而 BS 實體層接收 MS 的上行資料時，分為兩種資料傳輸時間。第一種是在競爭區間傳輸 CDMA 碼時，此類的資料傳輸時間計算將以不同 CDMA 碼而定；若是初始測距碼或換手測距碼，則是以兩個 symbols 當作傳輸時間；若是定期測距碼或頻寬請求碼，則是以一個

symbol 當作傳輸時間。第二種是屬於免競爭區間所傳輸的資料，此類資料都是以整段上行子訊框時間作為傳輸時間，與傳輸資料量無關。圖 4-7.是下行與上行傳輸時間的示意圖。

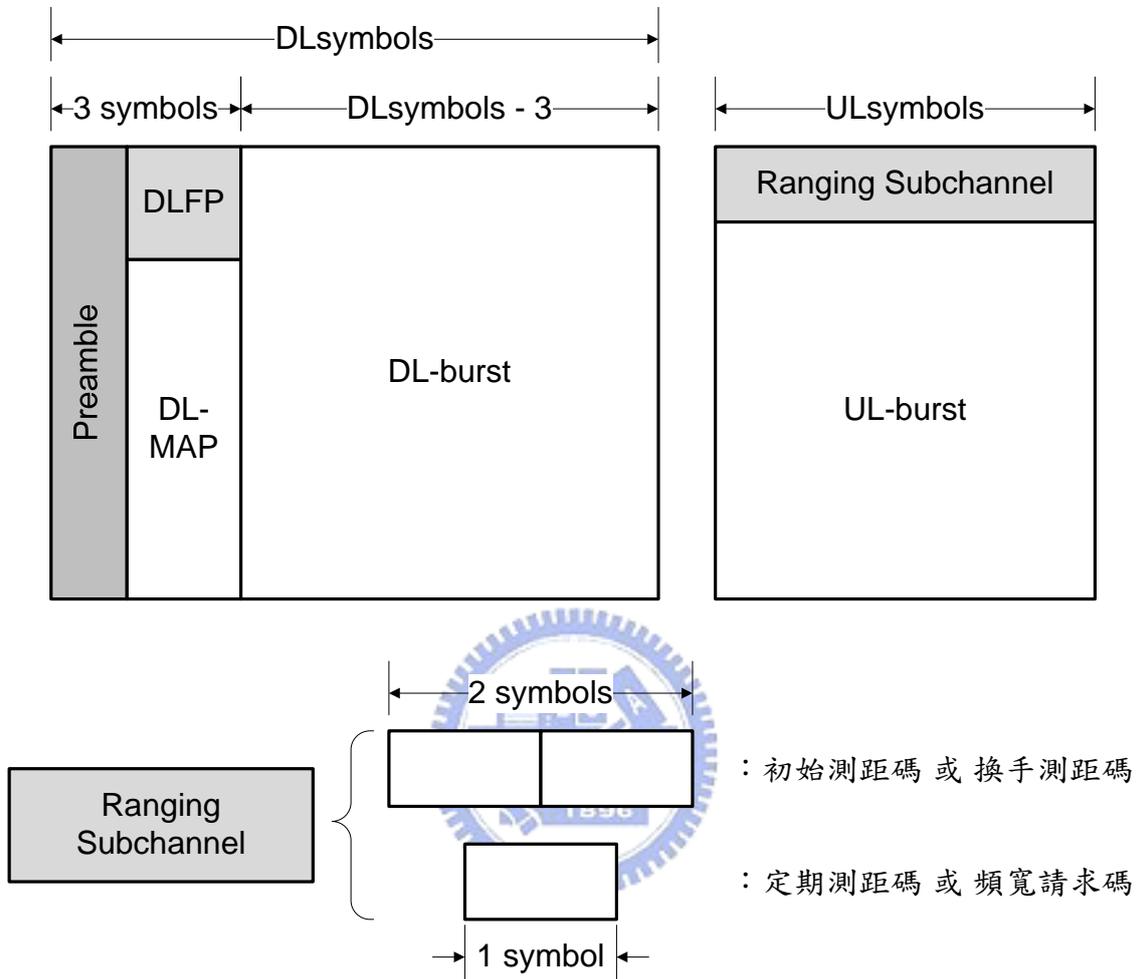


圖 4-7. 上下行資料傳輸時間示意圖

Chapter 5. Simulation Results

本章中，我們將藉由量測效能與延遲時間來驗證 IEEE 802.16e 模組實作的正確性，並加入 Mobile IP 機制使 MS 完成換手後仍能保持連線。接著，我們將調整幾項參數來觀察整體效能的變化。最後，我們將分析使用 IEEE 802.16e 模組的模擬平台在性能上的表現，包括記憶體用量與模擬執行速度等。表 5-1.是我們在模擬時所設定的各項參數。

OFDMA parameters	Definition	Value
FFT-size (Nfft)	128, 512, 1024, 2048	1024
Used subcarriers (Nused)		840
DL subcarrier allocation	DL-PUSC	30
UL subcarrier allocation	UL-PUSC	35
Bandwidth (BW)		10 MHz
Sampling factor (n)	28/25, 8/7	28/25
Sampling frequency (Fs)	$\text{floor}(n \cdot \text{BW} / 8000) \cdot 8000$	11.2 MHz
CP ratio	1/32, 1/16, 1/8, 1/4	1/8
CP time (Tg)	$\text{CPratio} \cdot \text{Tb}$	11.425 us
Symbol time (Ts)	$\text{Tb} + \text{Tg}$	102.825 us
Frame duration	2, 2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5, 20	5 ms
Physical slot (PS)	$4.0 / (\text{Fs} / 1000000)$	0.357143 us
TTG		90 PS
RTG		90 PS

表 5-1. 模擬時的系統參數

5.1. 模擬結果分析與驗證

在模擬平台中，各模組的實作成果是否符合設計需求，是設計者必須關心的問題。而在實作完成之後，驗證模組實作的正確性更是不可或缺的部份。以下我們分為三個部份來進行

模擬結果的分析與相關驗證，分別是 UDP 效能的量測、延遲時間量測、換手與 Mobile IP 機制。為了減少在模擬過程中可能發生的變因，進行以下三個部份的模擬時，我們將會忽略通道出錯的情形，並且關閉頻道編碼與解碼功能。

5.1.1. UDP 效能量測



圖 5-1. 進行效能量測時的網路拓樸

圖 5-1. 是我們進行傳輸效能量測時所使用的拓樸，共有三個節點，除了 MS 與 BS 外，另有一個 Host 透過有線與 BS 相連。模擬所使用的測試封包是 1400 bytes 的 greedy UDP，由 Host 往 MS 送。我們藉由調整不同的調變與編碼方式來進行模擬，表 5-2. 是使用各種調變與編碼方式下，下行通道的效能理論值與下行可傳輸資料的效能理論值。由於下行子訊框必須保留一些 slots 來傳輸廣播訊息及管理訊息，於是可傳輸資料的 slots 將會比整個下行通道要少一些。

另外，由於廣播訊息強制使用 QPSK 1/2 來進行傳輸，使用相同調變與編碼方式的資料將會與廣播訊息共用 burst；在此拓樸下，廣播訊息大約佔用 7 個 slot，於是多餘的 3 個 slot 可用來傳輸 UDP 資料，故 QPSK 1/2 的下行排程 slot 個數將會比其他方式多出 3 個 slot。由 slot 個數轉換為效能數據可用下列公式計算得到：

$$\text{Throughput} = \frac{\text{Bytes}_{\text{slot}} * \text{Slots}_{\text{DL}}}{\text{Frame Duration}}$$

FEC	Mode	Slot size (Bytes)	Theoretical DL slots	Theoretical DL throughput (Mbps)	Scheduled DL slots	Available throughput (Mbps)
0	QPSK 1/2	6	660	6.336	623	5.841
1	QPSK 3/4	9	660	9.504	620	8.719
2	16QAM 1/2	12	660	12.672	620	11.625
3	16QAM 3/4	18	660	19.008	620	17.838
4	64QAM 1/2	18	660	19.008	620	17.838
5	64QAM 2/3	24	660	25.344	620	23.250
6	64QAM 3/4	27	660	28.512	620	26.156

※ Frame Duration: 5ms

表 5-2. 不同 FEC 下的傳輸效能理論值

以 QPSK 1/2 為例，當 BS 訊框區間為 5ms 時，傳輸速度為 5.841 Mbps，計算式如下：

$$\text{Throughput} = \frac{6 (\text{Bytes}) * 623}{5 \text{ ms}} = 747.6 \text{ KBytes/ms} = 5.841 \text{ Mbit/s}$$

FEC	Mode	Theoretical throughput (Mbps)	Logged UDP throughput (Mbps)	Utilization (%)
0	QPSK 1/2	5.841	5.688	97.4
1	QPSK 3/4	8.719	8.481	97.3
2	16QAM 1/2	11.625	11.309	97.3
3	16QAM 3/4	17.838	16.964	97.3
4	64QAM 1/2	17.838	16.964	97.3
5	64QAM 2/3	23.250	22.619	97.3
6	64QAM 3/4	26.156	25.452	97.3

※ Frame Duration: 5ms

表 5-3. 不同 FEC 下的 UDP 流量使用率

表 5-3. 是從模擬結果與理論值來計算頻寬的使用率，我們可以看到在不同調變與編碼方式下，使用率都約在 97.3% 到 97.4% 之間無法到達 100% 的原因，在於應用層送出的資料在經過各層協定之後，將會增加額外的標頭負擔。我們將各層的標頭長度加入使用率的計算，包括網路層、傳輸層、媒體存取控制層等，計算公式如下：

$$Utilization = \frac{payload}{ipheader + udphheader + (mac_header + mac_subheader + crc) + payload}$$

以上列公式，我們可以算出在此系統下的 UDP 流量使用率為：

$$0.973 = \frac{1400}{20 + 8 + (6 + 1 + 4) + 1400} \leq Utilization \leq \frac{1400}{20 + 8 + (6 + 0 + 4) + 1400} = 0.974$$

在計算公式裡，mac_header 是 IEEE 802.16e 的標頭，mac_subheader 則是由於封包可能在最後一個區塊被分割，分割相關的資訊將存在 mac_subheader 中，於是此欄位可能會存在。考慮以上因素後，我們可以得到使用率的理論值約為 0.973 至 0.974 間，此數據與我們的模擬結果相近。圖 5-2. 所呈現的是進行上述實驗所得到的數據，因為我們忽略頻道發生錯誤的情形，於是在模擬過程中的 UDP 流量是相當穩定的。另外，由於 16QAM 3/4 與 64QAM 1/2 在頻寬計算上是相同的，所得到的流量數據也是幾乎相同。

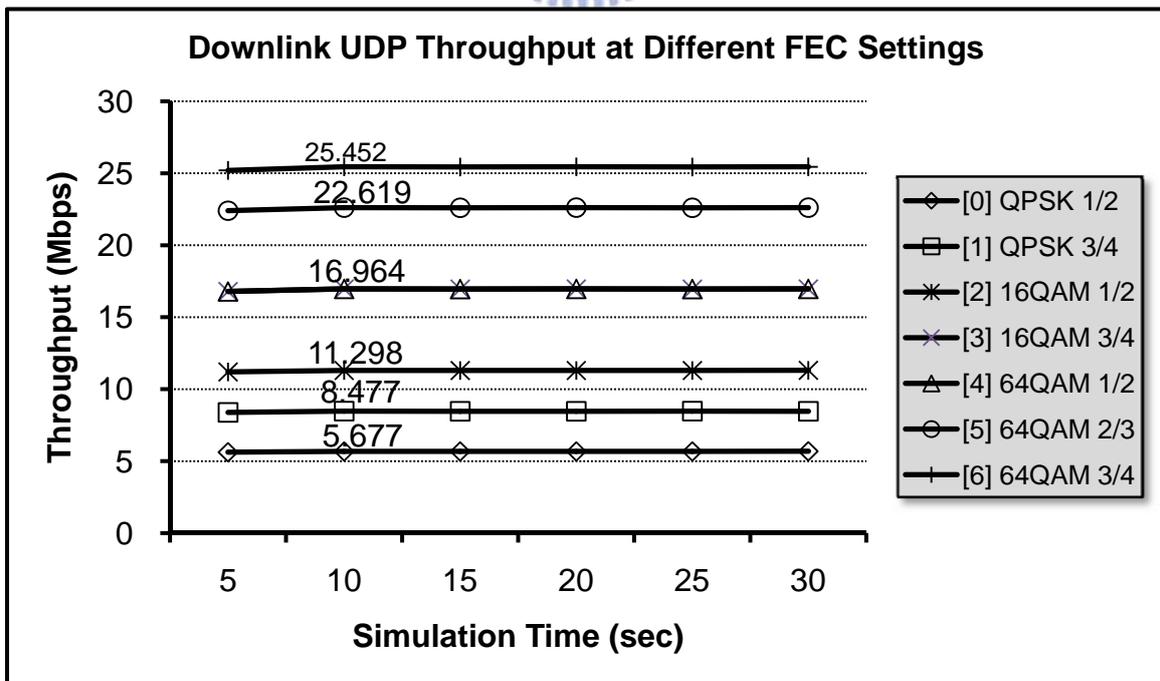


圖 5-2. 不同 FEC 下的 UDP 效能

5.1.2. 延遲時間量測

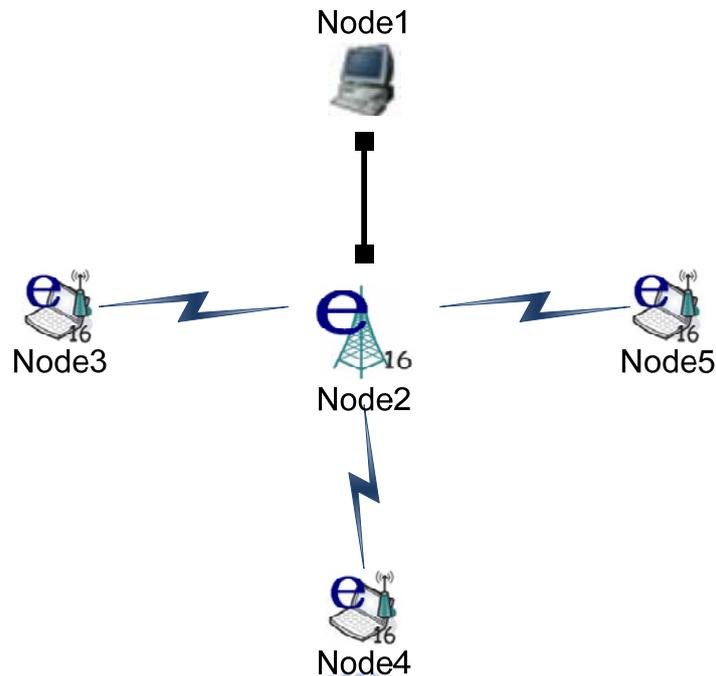


圖 5-3. 進行延遲時間量測時的網路拓樸

圖 5-3.是我們進行延遲時間量測時所使用的拓樸，共有五個節點，分別是一個 BS、三個 MS 及一個 Host 透過有線與 BS 相連。模擬所使用的測試封包是以 ping 程式送出的 ICMP 封包，我們共設計了三種情況進行量測，分別是 Host→MS、MS→Host、MS→MS。在模擬過程中，我們將忽略頻道發生錯誤的情形，讓資料可以順利送達。以下針對每一種情況進行分析：

(1) Host→MS：

圖 5-4.所列的是在 Host 上執行 ping 程式的執行時間與參數。在模擬時間第 10.000 秒時，Host 會開始送 ICMP-REQUEST 封包給 MS，每隔一秒鐘送出一個，共送出九個封包。當 Host 收到 ICMP-REPLY 封包時，將會顯示 TTL (Time-To-Live) 數值及經過了多久的延遲時間。而在往後的 ping 程式執行時間，我們都將延遲 1ms 送出，於是下一次 ping 程式將在 20.001 秒時開始送出封包，以此類推。

```
#nctuns traffic generator file
$node_(1) 10.000000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 20.001000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 30.002000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 40.003000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 50.004000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 60.005000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 70.006000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 80.007000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 90.008000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 100.009000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
$node_(1) 110.010000 400.00000 ping -c 9 1.0.2.3
```

圖 5-4. ping 程式執行時間與參數設定

```
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=1 ttl=63 time=5.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=2 ttl=63 time=5.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=3 ttl=63 time=5.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=4 ttl=63 time=5.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=5 ttl=63 time=5.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=6 ttl=63 time=5.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=7 ttl=63 time=5.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=8 ttl=63 time=5.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=9 ttl=63 time=5.98 ms
--- 1.0.2.3 ping statistics ---
9 packets transmitted, 9 received, 0% packet loss, time 8000ms
Rtt min/avg/max/mdev = 5.985/5.985/5.986/0.072 ms

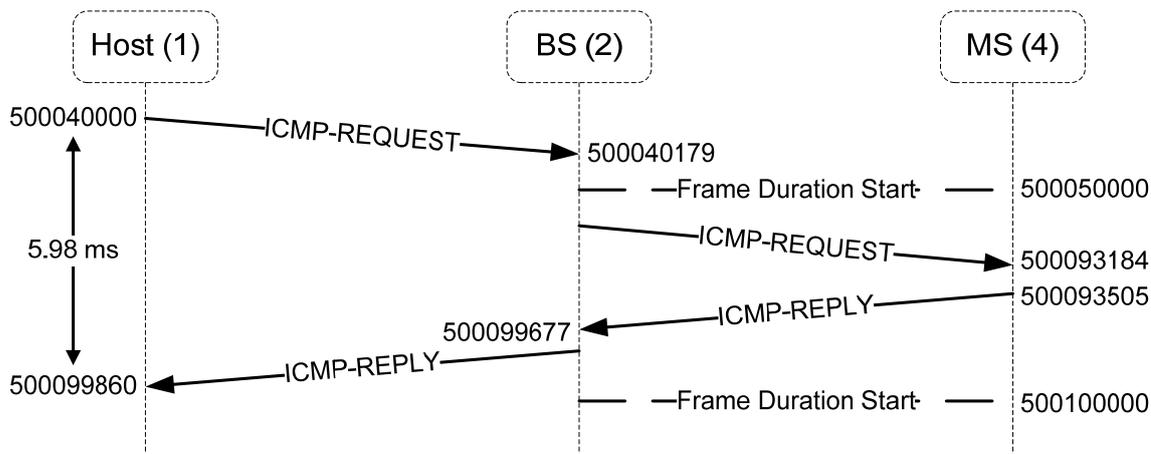
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=1 ttl=63 time=9.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=2 ttl=63 time=9.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=3 ttl=63 time=9.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=4 ttl=63 time=9.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=5 ttl=63 time=9.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=6 ttl=63 time=9.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=7 ttl=63 time=9.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=8 ttl=63 time=9.98 ms
64 bytes from 1.0.2.3: icmp_seq=9 ttl=63 time=9.98 ms
--- 1.0.2.3 ping statistics ---
9 packets transmitted, 9 received, 0% packet loss, time 8000ms
rtt min/avg/max/mdev = 9.985/9.985/9.986/0.081 ms
```

} Ping program starts at 50.004 sec

} Ping program starts at 60.005 sec

圖 5-5. ping 程式模擬結果與統計 (Host→MS)

Case 1: Ping program starts at 50.004 sec



Case 2: Ping program starts at 60.005 sec

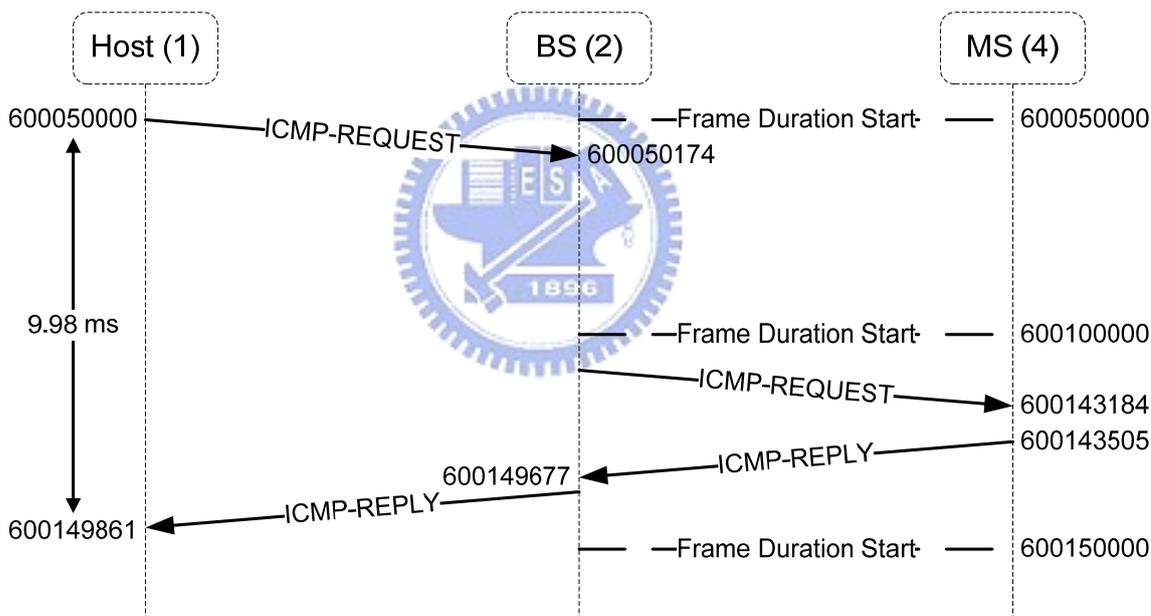


圖 5-6. 傳送 ICMP 封包時序圖 (Host→MS)

圖 5-5. 是第 50.004 秒啟動與第 60.005 秒啟動的 ping 程式的模擬結果。首先，我們可以看到 TTL 值從預設的 64 減為 63，表示此 ICMP 封包經過一個節點就到達，此一節點就是在中間轉傳的 BS。而 RTT 的部份，在第 50.004 秒啟動的是 5.98 ms，在第 60.005 秒啟動的則是 9.98 ms。兩者會有這麼大的差別，原因在於我們模擬所使用的 BS 訊框區間是以 5 ms 為一週期，使得在第 50.004 秒啟動的 ping 程式所送

出的 ICMP-REQUEST 封包來得及在 BS 進行排程前到達。依我們的設計，BS 排程開始的時間將會是第 50.005 秒，於是第 50.004 秒送出的 ICMP 封包滯留在 BS 的時間相當短暫。第 60.005 秒啟動的 ping 程式從 Host 送出 ICMP-REQUEST 封包，封包到達 BS 的時間已經超過 BS 此次排程的時間，也就是第 60.005 秒；於是封包必須暫存一段時間，等待下一次 BS 進行排程，也就是第 60.010 秒。詳細的時序圖與時間資訊在圖 5-6. 中呈現。

(2) MS→Host :

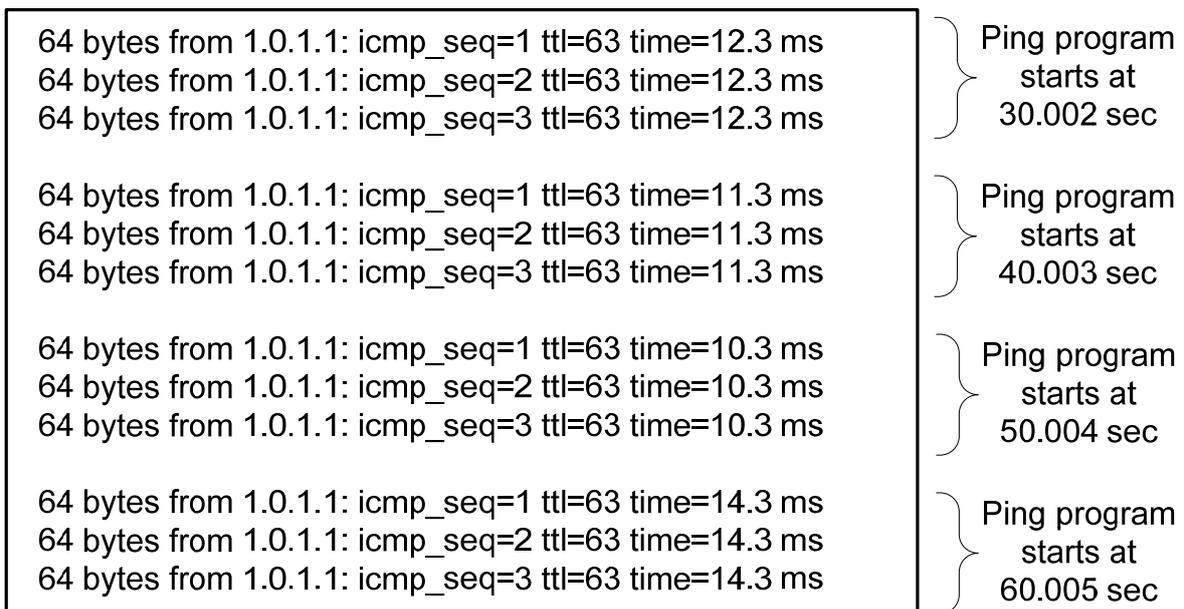


圖 5-7. ping 程式的模擬結果 (MS→Host)

MS→Host 的量測結果如圖 5-7. 所示，我們僅節錄部份數據進行討論。從圖中的數據裡，我們可以觀察到，由於每個 BS 訊框區間會先分配下行子訊框，之後才是上行子訊框，於是越接近 MS 進行排程的時間，此 ICMP 封包暫存在 MS 的時間將會越短。封包在上行子訊框送出後，由 BS 轉送至 Host 端，Host 將會傳回 ICMP-REPLY 封包至 BS，但此時已經超過 BS 進行資料排程的時間，於是封包會暫存在 BS 端，等待下一次的排程時間。詳細的時序圖與時間資訊在圖 5-8. 中呈現。

※ Ping program starts at 50.004 sec

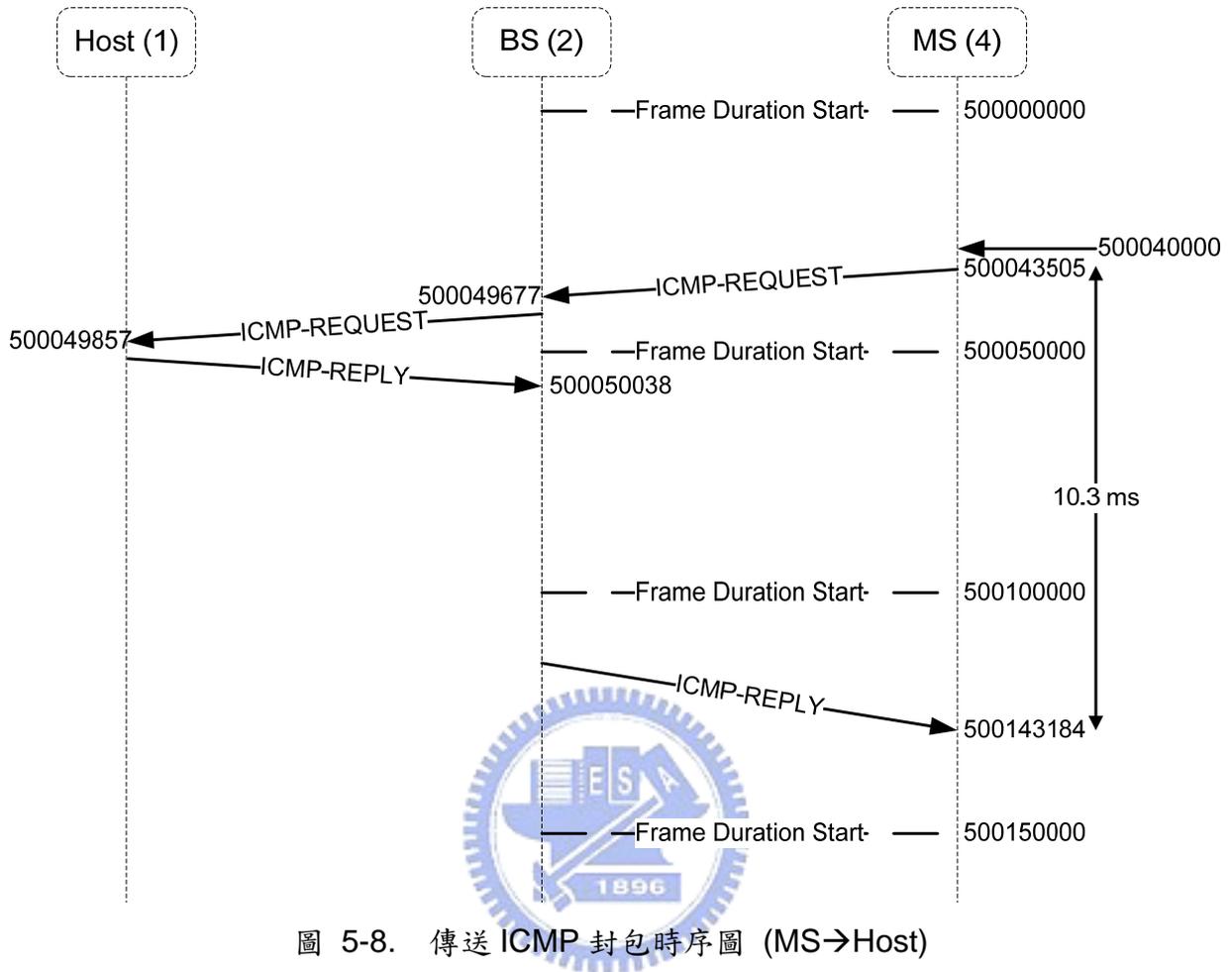


圖 5-8. 傳送 ICMP 封包時序圖 (MS→Host)

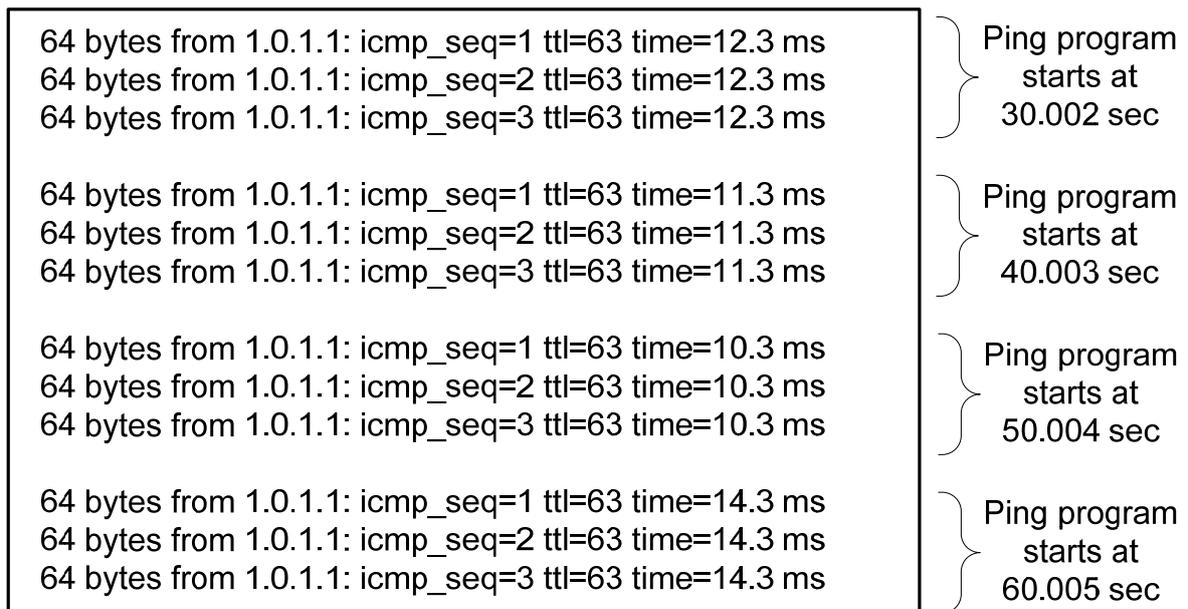


圖 5-9. ping 程式的模擬結果 (MS→MS)

(3) MS→MS :

MS→MS 的量測結果如圖 5-9 所示。不同時間點啟動的 ping 程式會得到不同的結果，此原因與(2)中的描述相同。詳細的時序圖與時間資訊在圖 5-10 中呈現。

※ Ping program starts at 50.004 sec

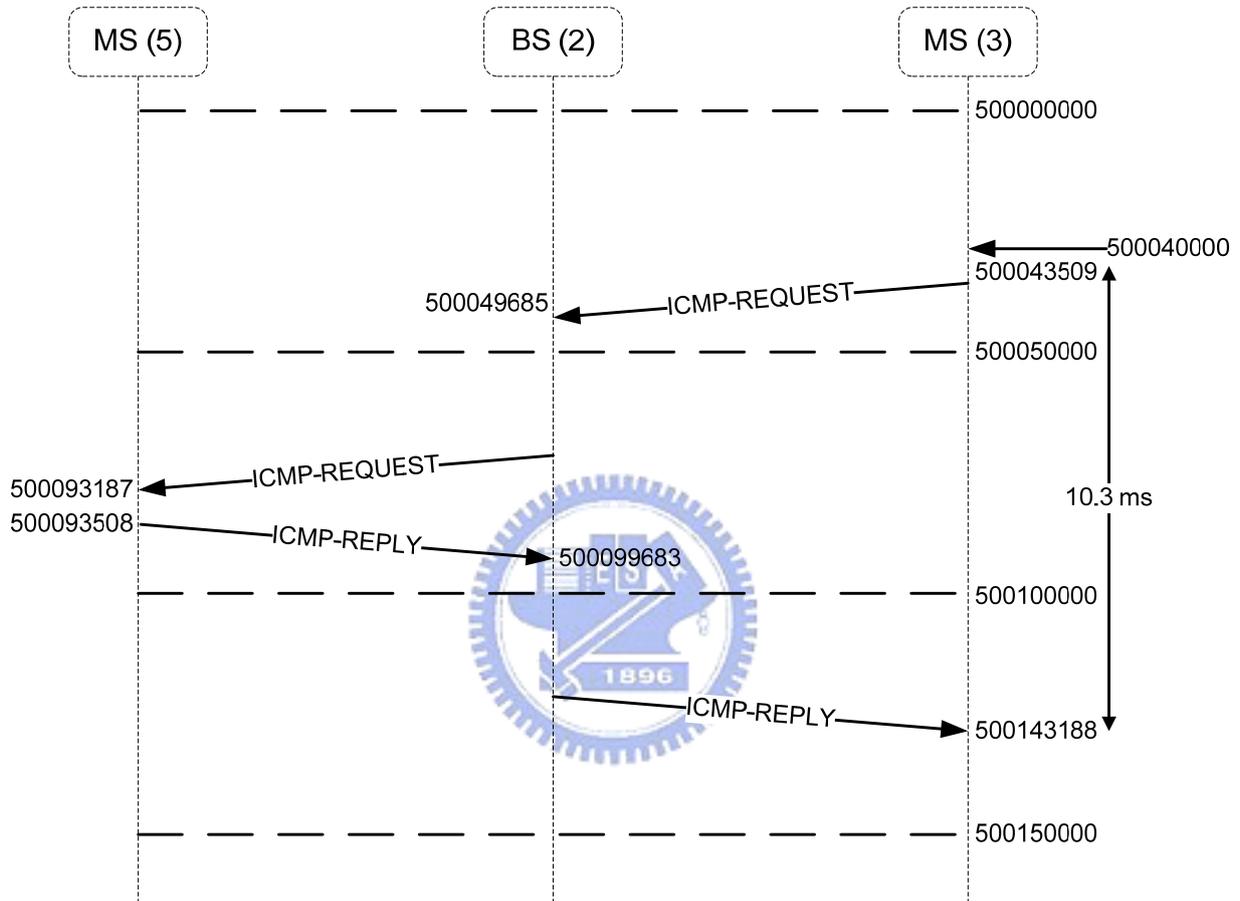


圖 5-10. 傳送 ICMP 封包時序圖 (MS→MS)

5.1.3. 換手與Mobile IP機制

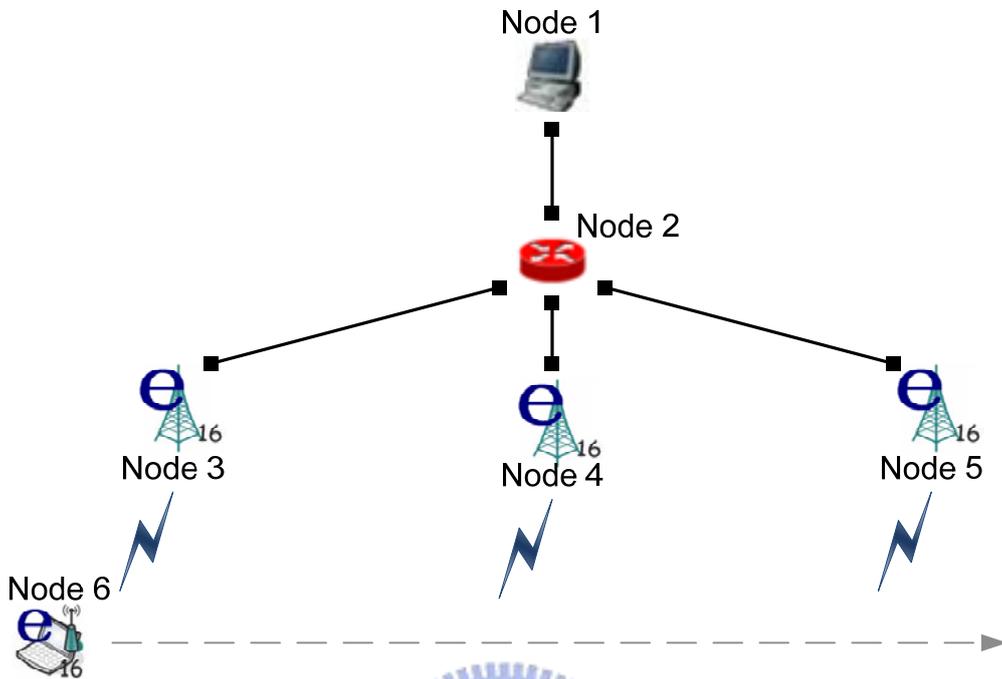


圖 5-11. 測試換手機制時的網路拓樸

圖 5-11.是測試換手機制所使用的拓樸，有一個 Router 與三個 BS 和一個 Host 相連，MS 從 BS (3)往 BS (5)方向移動。在模擬一開始，MS 會與 BS (3)註冊並且取得 BS (4)與 BS (5)的所在頻道，供 MS 在移動過程中，可以掃描鄰近 BS 以取得訊號品質。表 5-4.是在三個 BS 上執行的 Mobile IP 相關參數，用來監控目前 MS 的位置，並維持 MS 與後端網路的溝通。

BS NID	Administered MS IP	Wireless Interface IP	Care-of-address	Role
3	1.0.5.2	1.0.5.1	1.0.2.2	Home Agent
4	X	1.0.6.1	1.0.3.2	Foreign Agent
5	X	1.0.7.1	1.0.4.2	Foreign Agent

表 5-4. Mobile IP Agent 參數表

我們使用兩種類型的封包，來觀察當 MS 進行換手步驟時以及完成換手之後的流量變化。

分別是在 Host 上執行 stg 應用程式，送出 greedy UDP 封包給 MS；以及在 Host 上執行 stcp 應用程式，來送 TCP 封包給 MS。

圖 5-12.是使用兩種不同封包類型的模擬結果，Host 端的 stg 與 stcp 的執行時間都是從第 20 秒開始，第 80 秒結束。我們可以很明顯地看到在第 33 秒時發生了第一次的換手，而在第 65 秒時發生了第二次換手。第一次換手是 MS 由 BS (3)移至 BS (4)管轄之下，而第二次換手則是從 BS (4)到 BS (5)。無論是 TCP 或 UDP 流量，在進行換手過程中的速率都會降到 0，原因在於 MS 使用硬式換手機制，換手過程中將無法繼續傳輸資料；而且要加入另一個 BS 的網路時，必須遵循一連串的建立網路流程，並建立資料連線，才能恢復通訊。

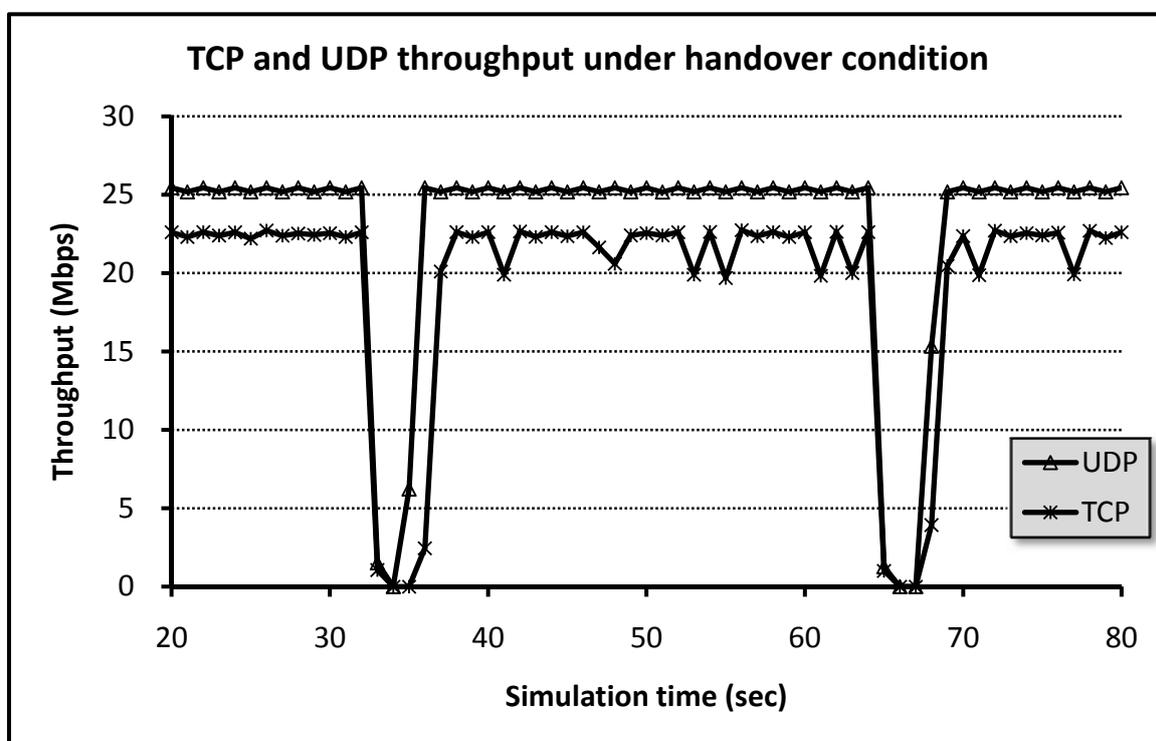


圖 5-12. 換手機制下的模擬結果

5.2. 通道效能評估

在本節中，我們將考慮通道錯誤的情形，並啟用通道編碼來量測效能。以下是我們模擬時所設定的網路環境：

- Channel Model : Empirical model → COST_231_Hata
- Transmit Power : BS → 43 dBm ; MS → 35 dBm

➤ Antenna Height : BS → 30 m ; MS → 1.5 m

圖 5-13.~5-19.是各種 FEC 設定下調整 BS 與 MS 之間的距離所得到的模擬結果，圖中 X 軸為模擬時間，Y 軸為 Throughput。而圖右邊的表格所呈現的是在該 FEC 設定下，不同的距離所得到的位元錯誤率對照表、Convolution Code 的解碼糾正能力、及執行模擬所得到的流量正確率。

我們可以看出，當距離增加造成位元錯誤率上升時，Convolution Code 的解碼糾正能力將會降低，而模擬所得到的效能也會下降。以圖 5-16.的 16QAM 3/4 為例，當距離為 1100 公尺時，位元錯誤率為 3.57×10^{-3} ，而 Convolution Code 的解碼糾正能力約為 94.3%，在模擬結果的部份，我們可以得到 93.7%的流量正確率。當距離為 1400 公尺時，位元錯誤率為 8.21×10^{-3} ，Convolution Code 的解碼糾正能力約為 47.7%，此時，可以得到的流量正確率為 46.5%。由此數據可得知，模擬所得到的流量正確率與解碼器的糾正能力相當接近。但解碼器的糾正能力會較高一些，原因在於 WiMAX 的每個 burst 是由多個 PDU 所組成，在接收端分析收到的 burst 時，若偵測出某個 PDU 的標頭有錯誤位元，則將無法順利解開這個 PDU 資料，以至於 burst 裡其他尚未被解開的 PDU 都會全部捨棄，包括可能沒有位元錯誤的 PDU。於是，模擬所得到的流量正確率與將解碼器的糾正能力數據相近，但前者的結果將會再低一些。

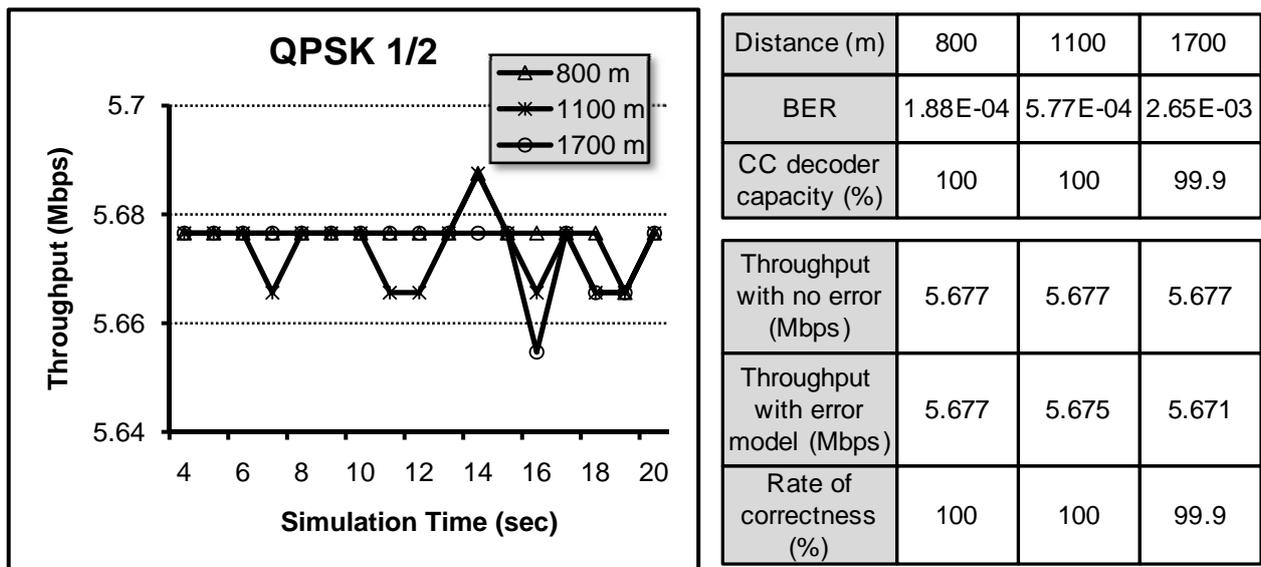
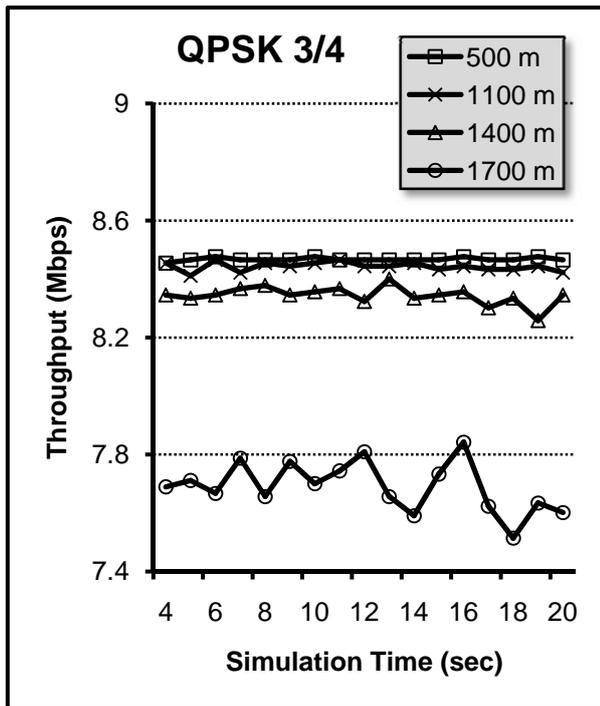


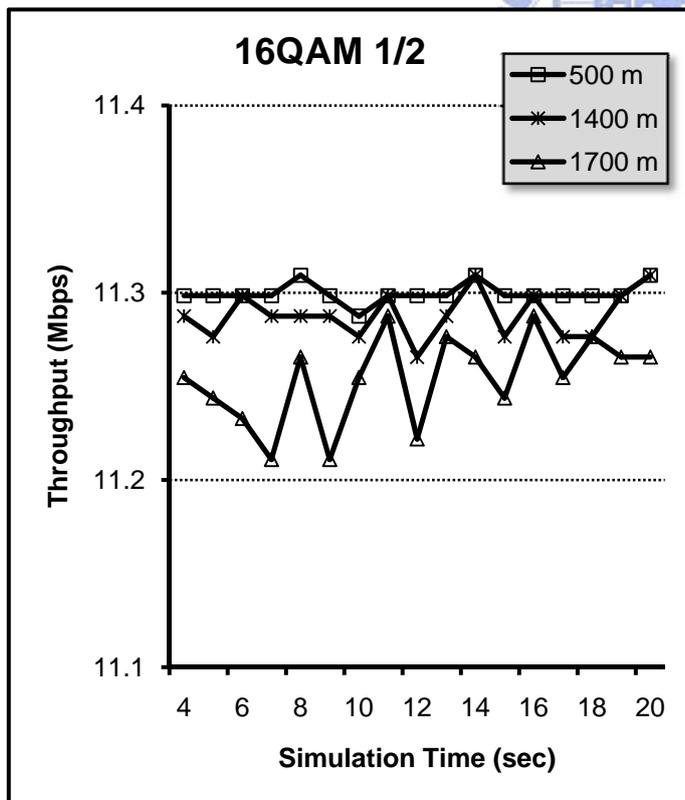
圖 5-13. 在不同距離下使用 QPSK 1/2 機制的 UDP 效能



Distance (m)	500	1100	1400	1700
BER	5.40E-05	8.64E-04	2.01E-03	3.96E-03
CC decoder capacity (%)	100	100	98.6	91.8

Throughput with no error (Mbps)	8.468	8.468	8.468	8.468
Throughput with error model (Mbps)	8.468	8.446	8.342	7.740
Rate of correctness (%)	100	99.7	98.5	91.4

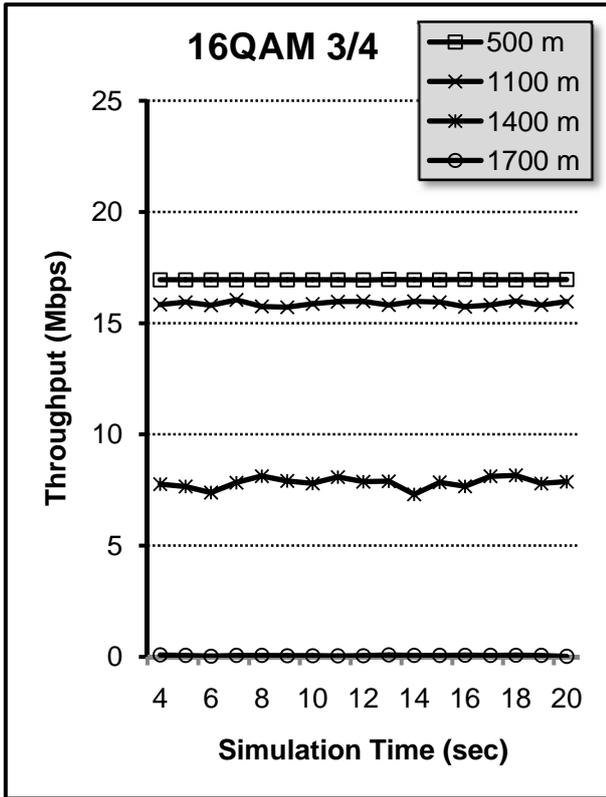
圖 5-14. 在不同距離下使用 QPSK 3/4 機制的 UDP 效能



Distance (m)	500	1400	1700
BER	1.50E-04	5.52E-03	1.08E-02
CC decoder capacity (%)	100	99.9	99.7

Throughput with no error (Mbps)	11.300	11.300	11.300
Throughput with error model (Mbps)	11.300	11.287	11.252
Rate of correctness (%)	100	99.9	99.6

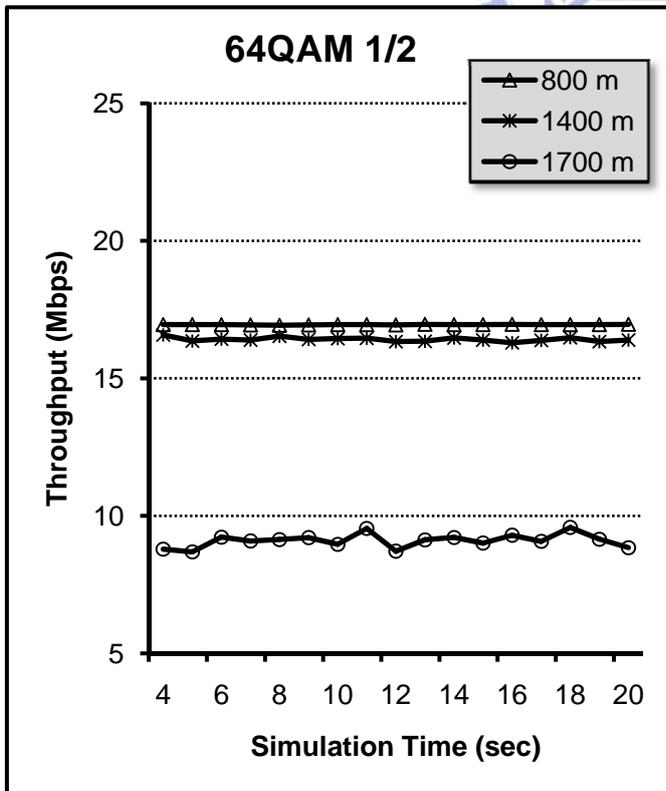
圖 5-15. 在不同距離下使用 16QAM 1/2 機制的 UDP 效能



Distance (m)	500	1100	1400	1700
BER	2.25E-04	3.57E-03	8.21E-03	1.59E-02
CC decoder capacity (%)	100	94.3	47.7	0.6

Throughput with no error (Mbps)	16.954	16.954	16.954	16.954
Throughput with error model (Mbps)	16.954	15.877	7.881	0.058
Rate of correctness (%)	100	93.7	46.5	0.3

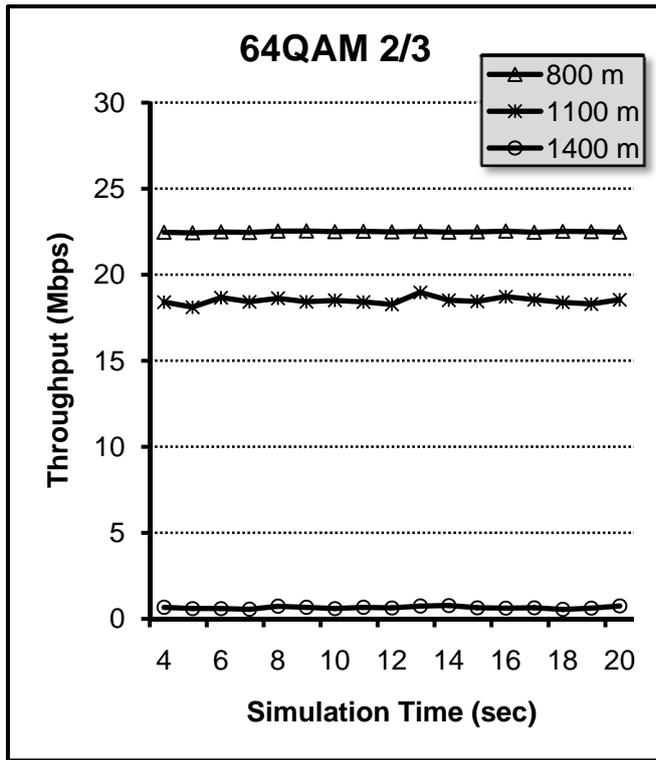
圖 5-16. 在不同距離下使用 16QAM 3/4 機制的 UDP 效能



Distance (m)	800	1400	1700
BER	2.68E-03	1.81E-02	3.36E-02
CC decoder capacity (%)	100	96.8	55.9

Throughput with no error (Mbps)	16.947	16.947	16.947
Throughput with error model (Mbps)	16.947	16.411	9.174
Rate of correctness (%)	100	96.8	54.1

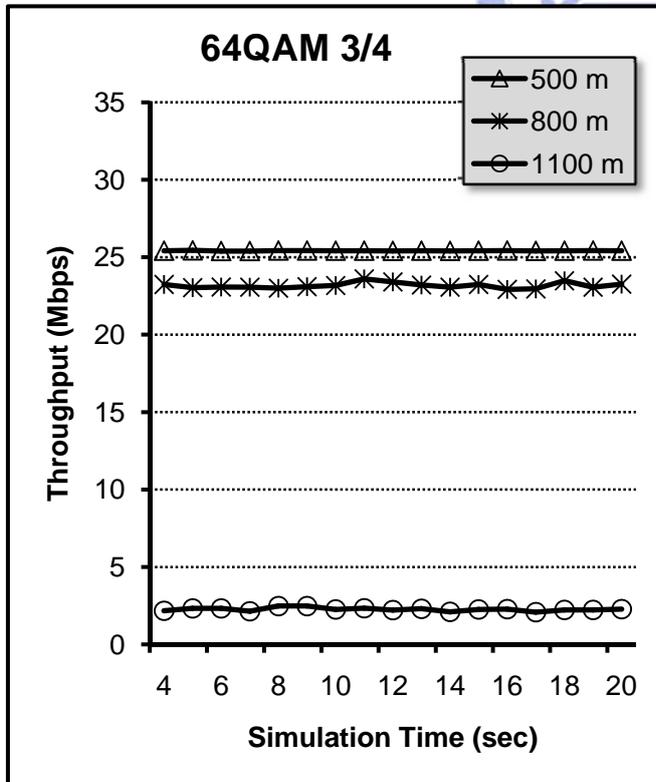
圖 5-17. 在不同距離下使用 64QAM 1/2 機制的 UDP 效能



Distance (m)	800	1100	1400
BER	3.56E-03	1.06E-02	2.36E-02
CC decoder capacity (%)	100	82.9	4.1

Throughput with no error (Mbps)	22.488	22.488	22.488
Throughput with error model (Mbps)	22.488	18.539	0.653
Rate of correctness (%)	100	82.4	2.9

圖 5-18. 在不同距離下使用 64QAM 2/3 機制的 UDP 效能



Distance (m)	500	800	1100
BER	7.75E-04	3.99E-03	1.19E-02
CC decoder capacity (%)	100	91.7	11.2

Throughput with no error (Mbps)	25.420	25.420	25.420
Throughput with error model (Mbps)	25.420	23.253	2.267
Rate of correctness (%)	100	91.5	8.9

圖 5-19. 在不同距離下使用 64QAM 3/4 機制的 UDP 效能

接著，我們觀察在不同的距離下使用各種 FEC 設定對效能的影響，模擬結果如圖 5-20 所示。首先，我們可以看到，BS 與 MS 的距離在 600 公尺內，不管使用哪一種 FEC 設定，都可以達到其傳輸效能的最大值，不包含通道錯誤的模擬結果可參考圖 5.2。而當距離逐漸增加時，使用傳輸率較高的 FEC 設定，其效能將會下降許多；而使用傳輸率較低的 FEC 組態，則是保持穩定的速度。由於使用調變與編碼較佳的方式來傳輸資料，雖然可以提供較高的傳輸速度，但卻不易抵抗干擾，於是當距離增加時，訊號雜訊比將會快速下降。依我們的模擬結果所觀察到的，使用 64QAM 3/4 的組態下，距離大約在 1100 公尺的通訊品質就已經很差了。

在距離為 1900 公尺的情況下，所有 FEC 組態的效能都將降為 0，原因在於我們使用的 COST_231_Hata 通道模型所計算出的訊號衰減量，已經低於接收端的敏感度，於是 BS 與 MS 之間無法進行管理訊息與資料的交換。所以 MS 在加入網路的過程就已經失敗，並無法建立任何連線。

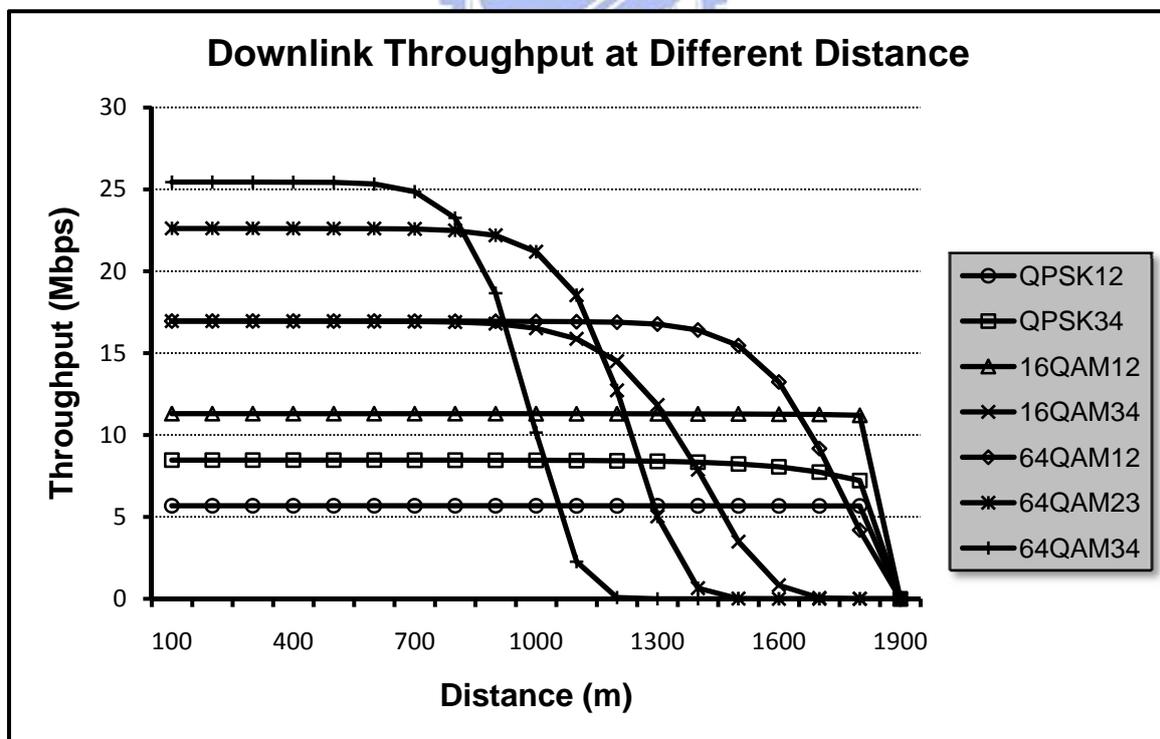


圖 5-20. 在不同距離下使用各種 FEC 機制的 UDP 效能 (加入通道錯誤)

5.3. 模擬性能分析

以下是模擬測試平台所使用的環境：

CPU：Intel Core 2 Quad 2.4GHz (使用單核心)。

Memory：1GB RAM

OS：Linux Fedora 8 with kernel 2.6.24.2-nctuns-20080219

我們進行第一項性能測試，在網路拓樸裡，存在兩個節點，分別是 802.16e BS 與 802.16e MS。在模擬過程中，我們不加入任何額外的資料傳輸，於是 MS 僅需處理 BS 的廣播訊息及交換必要的管理訊息，並且開啟頻道編碼的功能來進行實驗。表 5-5. 是根據不同的 FEC 組態，搭配模擬時間的增加，得到模擬所需的執行時間與記憶體使用量。執行時間的部份，因為我們開啟頻道編碼的功能，它是真正地將資料中每個位元進行編碼與解碼的動作，將會耗費相當多的執行時間。於是，在只有一個 BS 與一個 MS 的組態下，模擬所需的時間大約是真實世界的 1.9 倍慢。而管理訊息是使用 QPSK 1/2 的 FEC 設定進行傳輸，所以在不傳輸額外資料時，各種 FEC 下的執行時間是相近的。另外，在記憶體使用量的部份，根據模擬時間的進展，所需記憶體用量是穩定的，大約在 21912 ~ 22168 KB 之間。

Simulation Time		40 sec		80 sec		120 sec		160 sec	
FEC	Mode	Time (sec)	Mem (KB)						
0	QPSK 1/2	76	21,664	153	21,664	229	21,644	304	21,644
1	QPSK 3/4	77	21,912	153	21,912	229	22,168	306	22,168
2	16QAM 1/2	77	21,912	153	21,912	230	22,168	306	22,168
3	16QAM 3/4	77	21,912	153	21,912	230	22,168	306	22,168
4	64QAM 1/2	77	21,912	153	21,912	229	22,168	306	22,168
5	64QAM 2/3	77	21,912	153	21,912	229	22,168	307	22,168
6	64QAM 3/4	77	21,912	153	21,912	230	22,168	306	22,168

表 5-5. 一個 BS 與一個 MS 僅傳輸管理訊息並開啟頻道編碼功能的實驗結果

第二項性能測試中，我們在相同的網路拓樸上加入了 UDP 封包的傳輸，並且比較關閉與開啟頻道編碼所需的執行時間與記憶體使用量，實驗結果如表 5-6.所示。首先，在記憶體使用量的部份，因為編碼本身只會影響傳輸資料的正確性與資料處理時間，所以開啟頻道編碼與否，對記憶體用量來說並沒有太大的差別。但在執行時間的部份，我們可以算出使用 QPSK 1/2 的 FEC 設定下，加入 UDP 封包傳輸後，開啟頻道編碼所需的執行時間為 511 秒，大約是模擬時間的 13 倍慢。而使用傳輸速率更高的 FEC 設定，其執行時間也將更長。例如使用 64QAM 3/4 的 FEC 設定下，執行所需時間大約是模擬時間的 50 倍慢，

Simulation Time		40 seconds with coding		40 seconds without coding	
FEC	Mode	Time (sec)	Mem (KB)	Time (sec)	Mem (KB)
0	QPSK 1/2	511	43,264	17	43,224
1	QPSK 3/4	726	43,460	18	43,444
2	16QAM 1/2	936	43,468	18	43,184
3	16QAM 3/4	1,364	43,472	18	43,464
4	64QAM 1/2	1,362	43,584	18	43,576
5	64QAM 2/3	1,796	43,584	19	43,580
6	64QAM 3/4	2,009	43,176	19	43,572

表 5-6. 一個 BS 送 greedy UDP 封包給一個 MS 的實驗結果

第三種性能測試裡，我們在拓樸中加入另一個 MS，並針對不同的 UDP 連線數來觀察執行時間與記憶體使用量變化，實驗結果如表 5-7.所示。首先，在沒有 UDP 連線時，執行時間大約是只有一個 MS 組態下的 2 倍長，因為由 BS 所送出的廣播訊息，到達兩個 MS 都必須執行通道解碼，所以隨著 MS 個數的增加，執行時間也將變長；但不同 FEC 設定下則是相近的，此原因已在前段中描述。另外，我們也可以觀察到使用一個 MS 的拓樸下，QPSK 1/2 的 FEC 設定僅需 511 秒，但在兩個 MS 下，則需要 999 秒，原因與前述相同。

接著，我們觀察加入一條與兩條 UDP 連線組態下，模擬所需時間的差別。在 QPSK 1/2 的 FEC 設定下，一條 UDP 所需的時間約為 999 秒，而兩條 UDP 則是 1011 秒，差距並不

明顯。因為我們所加入的是 greedy UDP 封包，在只有一條 UDP 連線時，總頻寬皆可供應給該 UDP 連線。當連線數增加時，每條連線所分配到的頻寬變少，但總頻寬是固定的。於是，不管 greedy UDP 連線數的多寡，對於執行時間來說，影響是不大的。但在記憶體用量的部份則有顯著的差異，因為 BS 對每一個已經完成註冊的 MS 都會保留一塊暫存資料的空間，所有要送給 MS 的資料都會存在這空間裡。當連線數增加時，將會有更多的 UDP 封包資料被暫存起來，造成記憶體使用量的上升，這是合理的現象。

Simulation Time		40 seconds with coding					
Simulation Configuration		Without traffic		With one greedy UDP traffic		With two greedy UDP traffic	
FEC	Mode	Time (sec)	Mem (KB)	Time (sec)	Mem (KB)	Time (sec)	Mem (KB)
0	QPSK 1/2	151	21,660	999	43,288	1,011	64,788
1	QPSK 3/4	151	21,944	1,438	43,500	1,442	64,752
2	16QAM 1/2	151	21,940	1,842	43,236	1,855	65,012
3	16QAM 3/4	151	21,812	2,695	43,236	2,707	65,004
4	64QAM 1/2	151	21,944	2,690	43,624	2,694	64,996
5	64QAM 2/3	151	21,944	3,553	43,612	3,562	65,124
6	64QAM 3/4	151	21,940	3,974	43,620	3,987	65,124

表 5-7. 一個 BS 與兩個 MS 在不同組態下的實驗結果

最後，我們針對每個 BS 可以同時服務幾個 MS 進行分析。從 NCTUns 模擬平台的角度來看，由於 BS 與 MS 必須處於相同的子網域裡，所以每個 BS 應可支援 254 個 MS。但我們仔細分析上行頻寬分配的設計方法後發現，一個使用 FEC 為 64QAM 3/4 的 MS 要能加入網路，至少要提供 44 Kbps 的上行頻寬，才能順利送出註冊管理訊息。而在我們設計的組態下，上行可提供的總頻寬約為 9789 Kbps。若 BS 分配給所有 MS 都是加入網路所需的 44 Kbps，則可以同時支援 222 個 MS 加入網路，而非 NCTUns 模擬平台所提供的 254 個 MS，這是我們模組實作方法下所造成的限制。

Chapter 6. Future Work

上述章節中，我們說明了在 NCTUns 網路模擬器上新增 IEEE 802.16e 模組所設計與實作的流程及架構，並藉由傳輸速率理論值的計算來驗證模組實作的正確性。然而，在 IEEE 802.16e 規格中仍定義了許多額外的功能，可適用於不同的系統參數與環境；但我們無法將所有功能完全實作在我們的模組當中。於是，在本章中，我們列出幾項尚未實作的功能是目前可以加強的部份。

➤ 自動重送請求機制

在 IEEE 802.16e 中明確定義了自動重送請求 (Automatic Repeat Request, ARQ) 的機制，此功能是在媒介取控制層進行錯誤或遺失資料的自動重送，增加傳輸資料的可靠性。加入 ARQ 機制可以減少 TCP 封包重送的可能，避免 TCP 啟動降速機制；但支援 ARQ 機制必須傳送額外的訊息，並暫存先前傳送的資料。對於整體系統效能的影響是提昇或下降，是可以進一步探討的問題。

➤ 服務品質與頻寬請求功能

規格中定義了五種服務品質的支援，但在我們的模組中，提供了一種較單純的排程方法來分配頻寬，且在模擬進行中，尚不處理 MS 進行頻寬請求的功能。若是需要針對不同服務品質來提供頻寬，頻寬請求的功能是需要實作的。

➤ 群播功能

除了單一傳播與廣播訊息外，規格中也定義了群播的訊息格式，所使用的是群播連線識別碼。群播功能可用於提供常態性服務的基地台或網路服務提供者，免去對需要服務的 MS 都建立一條獨立的連線。

➤ 軟式換手的支援

IEEE 802.16e 提供 MS 具有行動通訊的功能，而在不同的 BS 間進行漫遊是需要換手機制的支援才能達成。我們在模組中實作了硬式換手的功能，並支援頻道掃描的機制供 MS 來選擇是否進行換手。然而，硬式換手的缺點在於原有的連線將會被迫中斷，並與 BS 建立新的連線才能恢復通訊。若能在模組中實作軟式換手的功能，將會對通訊品質有更好的提昇。



Chapter 7. Conclusion

模擬是兼具便利性與真實性的研究方法，使用模擬來進行研究，不僅可以省去購買大量設備的金錢耗費，並且所得到的結果將會比數學模型的理論推導更加真實且可靠，是眾多研究者所使用的方法。我們在 NCTUns 網路模擬器上開發了 IEEE 802.16e 模組，支援 OFDMA 實體層規範及行動功能，並且加入了 BS 與 MS 兩種節點，方便使用者進行 Mobile WiMAX 網路拓樸的規劃。

在前幾章中，我們說明了 IEEE 802.16e 標準所規範的一些基本項目，並且針對模組的實作細節，提出了我們的設計方案與機制。這包括：BS 與 MS 協定堆疊的規劃、媒體存取控制層與實體層的設計、以及頻道掃描與換手機制的實作等。在媒體存取控制層的部份，我們提供最基本的加入網路應遵循的流程，以及管理訊息的交換。另外，為了支援移動性，我們增加了定期測距機制，以保持 MS 與 BS 的時序同步。在多個 BS 的網路拓樸裡，我們搭配 Mobile IP 的機制，來提供媒體存取控制層的硬式換手功能，讓 MS 可以順利地在各 BS 網路下取得服務。在實體層的部份，我們採用 OFDMA 規範，來提供更有彈性的通道配置方式；並加入了通道模型配合通道編碼的功能，以提高模擬的真實性。

模組的設計與實作完成以後，我們透過 UDP 封包流量的模擬結果以及延遲時間的量測數據，來與數學理論值進行比對，並完成了驗證的步驟。另外，針對調整不同通道參數下的模擬結果及模擬平台的性能，我們也進行了深入的分析與探討，以提昇模組的正確性與實用性。

總結上述的說明，我們在 NCTUns 網路模擬器裡，提供了基本的點對多點模式下的 IEEE 802.16e 網路模擬平台。希望未來對 802.16e 網路感興趣的研究者，可以很方便且快速地使用此模組來進行相關的研究，並且藉由此平台來開發與實現更多的功能。

Reference

- =====
- [1] *IEEE Std 802.16-2004*, “**IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**”, Oct. 2004.
- [2] *IEEE Std 802.16e*, “**IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems**”, Feb. 2006.
- [3] *Slawomir and Pietrzyk*, “**OFDMA for Broadband Wireless Access**”, Artech House, May 2006.
- [4] *Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh and Rias Muhamed*, “**Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking**”, Prentice Hall, Feb. 2007.
- [5] *Loufi Nuaymi*, “**WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access**”, John Wiley, Mar. 2007.
- [6] *Se-Ying Lin*, “**Simulating WiMAX PMP Networks over the NCTUns Network Simulator**”, Thesis of Master, June 2006.
- [7] *S.Y. Wang, C.L. Chou, C.H. Huang, C.C. Hwang, Z.M. Yang, C.C. Chiou, and C.C. Lin*, “**The Design and Implementation of the NCTUns 1.0 Network Simulator**”, *Computer Networks*, Vol. 42, Issue 2, June 2003, pp.175-197.
- [8] *Bill Wilkie and Beth Cowie*, “**Viterbi Decoder Block Decoding - Trellis Termination and Tail Biting**”, XILINX, Feb. 2005.
- [9] *Taesoo Kwon, Howon Lee, Sik Choi, Juyeop Kim, and Dong-Ho Cho*, “**Design and Implementation of a Simulator Based on a Cross-Layer Protocol between MAC and PHY Layers in a WiBro Compatible IEEE 802.16e OFDMA System**”, *IEEE Communications Magazine*, 43 (12):136-146, Dec. 2005.
- [10] *S.M. Huang, Y.C. Sung, S.Y. Wang, and Y.B. Lin*, “**NCTUns Simulation Tool for**

WiMAX Modeling”, *Third Annual International Wireless Internet Conference*, Oct. 2007.

[11] *J. Chen, et al. “The Design and Implementation of WiMAX Module for ns-2 Simulator”*, *WNS2 '06*, Oct. 2006.

[12] The QualNet software. available at <http://www.scalable-networks.com/> .

[13] The OPNET modeler. available at <http://www.opnet.com/> .

