

國立交通大學

資訊科學與工程研究所

碩士論文

在 NCTUns 平台上模擬 IEEE 802.16j

Transparent mode WiMAX 網路



Simulating IEEE 802.16j Transparent mode

WiMAX Networks over the NCTUns Network Simulator

研究 生：陳信瑀

指 導 教 授：王 協 源 教 授

中 華 民 國 九 十 八 年 六 月

在NCTUns平台上模擬IEEE 802.16j Transparent mode WiMAX網路

Simulating IEEE 802.16j Transparent mode WiMAX Networks
over the NCTUns Network Simulator

研究 生：陳信 瑪

Student : Hsin-Yu Chen

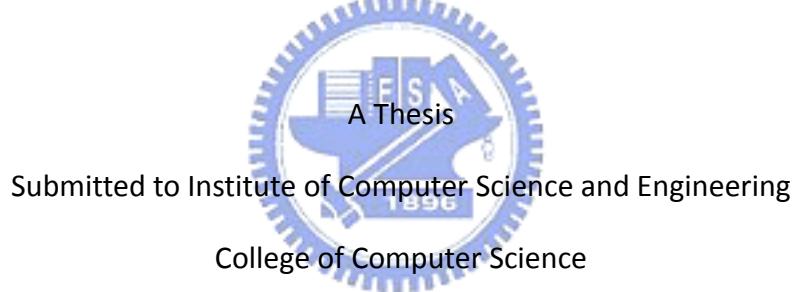
指 導 教 授：王 協 源

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 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 九 十 八 年 六 月

在NCTUns平台上模擬IEEE 802.16j Transparent Mode WiMAX網路

Simulating IEEE 802.16j Transparent Mode WiMAX Networks
over the NCTUns Network Simulator

研究 生：陳信 瑪

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

全球互通微波存取技術 (Worldwide Interoperability of Microwave Access , 簡稱 WiMAX)為近年來新興的無線寬頻存取技術，其目的為增加傳統固接網路中用戶端 (last-mile) 網路接取不足的頻寬。IEEE 802.16j (Mobile Multi-hop Relay WiMAX, 簡稱 MMR WiMAX) 為目前正在制訂的 WiMAX 新的標準草案，此標準草案是以移動式 IEEE 802.16e 為基礎所延伸的標準，提供在 WIMAX 網路下資料多段轉傳 (multi-hop relay)的能力與增進基地台涵蓋率 (coverage)，並且藉由中繼台 (Relay Station)的佈建降低建置基地台所需的昂貴成本與提高 WiMAX 系統傳輸效能。

在本篇論文中，我們在 NCTUns 網路模擬器裡開發 IEEE 802.16j 中控型排程機制的穿透式網路模組。我們所開發的模擬模組在此種網路拓樸下提供三種新的節點，分別是 MR-BS (Multi-hop Relay Base Station)、FRS (Fixed Relay Station)和 MS (Mobile Station)，供使用者方便建置網路拓樸。在媒體存取控制層，我們的模組支援簡單的用戶端路徑選擇演算法和動態調整設備台間使用的調變方式；而實體層的部份，則是採用 OFDMA TDD 模式並且搭配穿透式網路訊框架構來設計。根據我們的模組實作，可以提供對 IEEE 802.16j 穿透式網路研究有興趣的使用者一個方便的模擬平台。

關鍵字：網路模擬器、IEEE 802.16j 穿透式網路、全球互通微波存取、硬式換手、
正交分頻多重存取。

Simulating IEEE 802.16j Transparent Mode WiMAX Networks over the NCTUns Network Simulator

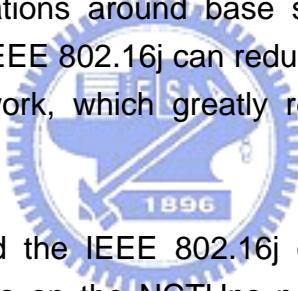
Student : Hsin-Yu Chen

Advisor : Shie-Yuan Wang

Institute of Computer Science and Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

WiMAX is a new broadband wireless access technology, which is designed to provide a last-mile solution for metropolitan area networks. The IEEE 802.16j (MMR WiMAX) draft standard is currently under development and based on the IEEE 802.16e (Mobile WiMAX) standard. It not only provides multi-hop relay capability but also extends base station coverage by deploying relay stations around base stations. In addition, by deploying cost-effective relay stations, the IEEE 802.16j can reduce the number of base stations that should be deployed in the network, which greatly reduces the deployment cost of a network.



In this thesis, we developed the IEEE 802.16j centralized scheduling transparent WiMAX network protocol modules on the NCTUns network simulator. We implemented three new types of nodes, MR-BS (Multi-hop Relay Base Station), FRS (Fixed Relay Station) and MS (Mobile Station). The developed MAC-layer modules support a simple subscriber path selection algorithm and an adaptive modulation scheme to boost network performance. At the physical layer, we use the OFDMA TDD mode collocating frame structure in transparent-mode WiMAX network. Our work provides a convenient simulation platform for researchers that are interested in IEEE 802.16j transparent mode WiMAX networks.

Keywords: network simulator, IEEE 802.16j Transparent mode Network , BWA, WiMAX, hard handover, OFDMA, .

誌謝辭

首先，感謝我的指導教授王協源老師這兩年來的指導，讓我在研究所的學習生涯中接觸了許多的新穎技術和知識，透過這兩年的學習讓我在專業領域上的能力獲益良多，對於我未來的就業或學習方面相信一定會有很大的幫助。另外，也要感謝周智良及林志哲兩位博班學長，透過學長們的帶領與指導讓我在進行碩論的研究時所遭遇到的問題都能夠順利的迎刃而解，而平時日常生活上的經驗傳承和諄諄教誨也讓我深深感受到學長們的用心。

再來，感謝藍崑展教授、張貴雲教授與陳伶志博士能夠撥冗蒞臨交通大學擔任本篇論文的口試委員，你們珍貴的建議以及指導將使此篇論文更加的充實與完善。

感謝在這兩年一起奮鬥的實驗室同學，因為有你們讓我這兩年的研究所生活過得很充實且快樂，也勉勵實驗室的學弟、妹們能夠繼續努力，並且期許你們都能夠順利的完成學業。



感謝在新竹的大學同學和朋友們、合勤的同事們以及在台北的薛小姐，謝謝你們的鼓勵與支持。最後，我要感謝我的家人，謝謝你們在我研究所求學路程上的支持，讓我也能夠無後顧之憂全心全意的完成我的碩士學程，希望這份榮耀能夠與你們分享。

目 錄

摘要	i
ABSTRACT	ii
誌謝辭	iii
目 錄	iv
圖目錄	vi
表目錄	viii
Chaper 1. Introduction	1
Chaper 2. Background	3
2.1 相關文獻	5
2.2 媒體存取控制層	8
2.2.1. 特定服務收斂子層	8
2.2.2. 通用子層	9
2.2.2.1. MAC PDU 遞送方式	10
2.2.2.2. MAC 最小傳送單位封包結構	11
2.2.2.3. 連線識別碼	14
2.2.2.4. MAC 管理訊息	15
2.2.2.5. 入網程序與初始測距	18
2.2.2.6. 定期測距	24
2.2.2.7. 換手機制與換手時機	25
2.2.3. 安全子層	28
2.3 實體層	29
2.3.1. 正交分頻多重存取	29
2.3.2. 可適性調變與通道編碼	30
2.3.3. 二段式穿透式中繼台網路訊框架構	32
Chaper 3. 設計與實作	36
3.1. NCTUns 網路模擬器平台設計與模組架構	36
3.2. 支援的節點與網路拓樸	39
3.3. 多段轉傳穿透式網路協定堆疊	41
3.3.1. 802.16j 穿透式網路 MR-BS 節點	41
3.3.2. 802.16j 穿透式中繼台節點	42
3.3.3. 802.16j 用戶端節點	42
3.4. IEEE 802.16j 中控型穿透式網路模組設計與實作	43
3.4.1. 媒體存取控制層模組的設計	45
3.4.1.1. MR-BS 媒體存取控制層的模組設計與實作	50
3.4.1.2. Transparent RS 媒體存取控制層的模組設計與實作	59
3.4.1.3. MS 媒體存取控制層的模組設計與實作	60

3.4.2. 實體層模組的設計	60
3.4.2.1. MR-BS 實體層的模組設計與實作	63
3.4.2.2. Transparent RS 實體層的模組設計與實作	63
3.4.2.3. MS 實體層的模組設計與實作	64
Chaper 4. Simulation Result	65
4.1. 模擬結果分析與驗證	65
4.1.1. 中控型排程穿透式網路 UDP 效能量測	66
4.1.2. 用戶端最佳傳輸路徑選擇	69
4.1.3. 動態調整調變方式與編碼技術	74
4.2. 模擬效能分析	77
Chaper 5. Future Work	80
Chaper 6. Conclusion	82
Reference	83



圖 目 錄

圖 2-1 IEEE 802.16 的分層架構	7
圖 2-2 收斂子層支援的封包類型	9
圖 2-3 MAC PDU 結構	11
圖 2-4 Generic MAC Header 欄位格式	12
圖 2-5 Relay MAC PDU 結構	13
圖 2-6 Relay MAC Header 欄位格式	14
圖 2-7 管理訊息的欄位格式	16
圖 2-8 用戶端 Network Entry 流程圖	20
圖 2-9 用戶端於穿透式網路下之初始測距流程	21
圖 2-10 中繼台 Network Entry 流程圖	23
圖 2-11 用戶端於穿透式網路下之定期測距流程	25
圖 2-12 用戶端換手機制下重新入網程序	28
圖 2-13 實體層傳送與接收的調變與編碼流程	31
圖 2-14 二段式穿透式網路下 MR-BS 訊框架構	33
圖 2-15 二段式穿透式網路下 RS 訊框架構	33
圖 3-1 NCTUns 裡的模組堆疊架構	37
圖 3-2 Nsobject class 定義	38
圖 3-3 模組間封包的傳遞架構	39
圖 3-4 IEEE 802.16j 中控型穿透式中繼台模式支援的節點	39
圖 3-5 IEEE 802.16j 二段式中控型穿透式穿透式中繼台網路拓樸	40
圖 3-6 穿透式網路下節點網路協定堆疊	43
圖 3-7 MR-BS、RS 與 MS 物件間傳遞關係	52
圖 3-8 中控型基地台訊框配置流程圖	54
圖 3-9 上行存取地帶競爭子通道測距碼的設計方式	56
圖 3-10 基地台以 Round-Robin 進行下行頻寬配置	56
圖 3-11 二段式穿透式網路訊框資料傳輸時間示意圖	62
圖 4-1 基地台與用戶端間下行存取地帶 UDP 效能量測拓樸	66
圖 4-2 中繼台與用戶端間下行穿透地帶 UDP 效能量測拓樸	68
圖 4-3 用戶端最佳傳輸路徑選擇網路拓樸-1	69
圖 4-4 用戶端調變方式與編碼技術權重圖-1	71
圖 4-5 用戶端下行 TCP 與 UDP 流量分布圖-1	72
圖 4-6 用戶端最佳傳輸路徑選擇網路拓樸-2	72
圖 4-7 用戶端調變方式與編碼技術權重圖-2	74
圖 4-8 用戶端下行 TCP 與 UDP 流量分布圖-2	74

圖 4-9 基地台與用戶端間動態調整調變方式與編碼技術的網路拓樸.....	74
圖 4-10 用戶端在不同距離下使用不同調變技術的 UDP 流量.....	76
圖 4-11 使用 Adaptive Modulation 後用戶端的 UDP 流量.....	76



表 目 錄

表 2-1 Generic MAC Header 欄位說明	12
表 2-2 Generic MAC Header 裡的 Type 欄位說明	13
表 2-3 Relay MAC Header 新訂定欄位說明	14
表 2-4 連線識別碼配置範圍 (CID).....	15
表 2-5 管理訊息類型與描述.....	17
表 2-6 OFDMA 實體層相關參數	30
表 2-7 不同 FEC 下的單位 slot 傳輸量.....	32
表 3-1 IEEE 802.16j 網路系統設計選擇	44
表 3-2 DL-PUSC 參數表	53
表 3-3 UL-PUSC 參數表	54
表 3-4 調變方式與編碼技術組合權重表.....	58
表 4-1 模擬時的系統參數.....	65
表 4-2 MR-BS 與 MS 間在不同調變方式與編碼技術下 UDP 效能	67
表 4-3 RS 與 MS 間在不同調變方式與編碼技術下 UDP 效能	68
表 4-4 MR-BS 與 MS 間僅傳輸管理訊息並開啟通道編碼功能的實驗結果	78
表 4-5 MR-BS、RS 與 MS 間僅傳輸管理訊息並開啟通道編碼功能的實驗結果 ..	78
表 4-6 MR-BS 與 MS 間傳輸 greedy UDP 封包並開啟通道編碼功能的實驗結果 ..	79
表 4-7 MR-BS、RS 與 MS 間傳輸 greedy UDP 封包並開啟通道編碼功能的實驗結果	79

Chaper 1. Introduction

WiMAX(Wireless Interoperability of Microwave Access，全球互通微波存取)為一種寬頻無線網路接取技術，其優點包含有信號傳輸範圍廣、資料傳輸速率快，並充分解決傳統網路架構上的最後一哩 (Last-mile)的不足。由於這種遠距離的傳輸特性，WiMAX 除了提供無線傳輸的技術，在某種程度上還能替代有線網路 (Cable、ADSL)，讓偏遠地區的網路連接更容易。

WiMAX 技術以 IEEE 802.16 系列的規格為基礎，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 限制僅可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。除了上述正式的規格之外，目前尚有針對支援更高傳輸速率的 802.16m 標準草案和為了降低設備價格、鋪設速度以及基地台收購的成本並且提供多段轉傳 (Multi-hop Relay) 功能的 802.16j 標準草案正在制定中。

WiMAX 多段轉傳的概念於 2005 年在 IEEE 大會中被提出討論，並於 2006 年 3 月正式定名為 IEEE 802.16j 並成立 802.16j Task Group，在緊鑼密鼓的會議討論之下第一份標準草案於 2008 年 8 月出爐，截至目前為止，此份標準草案已經發展到 D9 的版本，正式的規格預計將於 2009 年底訂。由於 IEEE 802.16j 是以 IEEE 802.16e 標準為基礎而制定延伸的規格，所以必須向下相容於舊有的 802.16d 規格，其主要目的在於延伸 WiMAX 系統的系統覆蓋率，加強 WiMAX 網路系統傳輸速率，解決基地台架設限制、骨幹網路 (Backhaul) 昂貴的

營運成本及新興地區有線寬頻網路不佳等環境限制問題。

IEEE 802.16j 規格主要是對於在 WiMAX 網路下資料中繼傳輸的能力進行規範，在此規範裡定義了媒體存取控制層 (Medium Access Control Layer) 及實體層 (Physical Layer) 所必須遵循的機制，其內容包括支援中繼台 (Relay Station) 之實體層訊框結構、用戶端與中繼台入網程序以及使中繼台與基地台同步並避免中繼台間相互干擾的機制；同時為了提升系統服務效能，IEEE 802.16j 標準亦規範支援各種資料傳輸之路由管理機制、混合式自動重送請求機制、中繼台群播機制及支援中繼台移動換手之機制等。

近年來，關於 WiMAX 的相關研究已經相當普遍，然目前在研究 WiMAX 的網路模擬工具，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。雖然目前 IEEE 802.16j 尚在草案階段，為了提供一個良好的研究網路模擬平台，我們在 NCTUns 網路模擬器上以現有的 IEEE 802.16e 為基礎開發 IEEE 802.16j 網路協定，讓對 IEEE 802.16j 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將模擬結果呈現出來，其次，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 網路模擬器提供人性化的圖形操作介面 (GUI) 並且整合模擬環境的設定功能及相關模組參數設定，增加了操作的便利性。再加上由於 NCTUns 網路模擬器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，我們在 NCTUns 網路模擬器上開發 IEEE 802.16j 中控型穿透式網路模組來提供使用者進行各方面的研究。

以下為本篇論文的架構：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，來介紹模組的設計與實作架構。第四章將進行模擬結果的驗證與效能評估。最後，在第五、六章裡，我們將提出一些未來展望並總結本篇論文。

Chaper 2. Background

WiMAX 為一種微波和毫米波頻段的無線都會型網路技術，因利用高效率無線訊號傳輸與處理技術，而具備傳輸距離最遠可達 50 公里長，傳輸速率最高可達 70 Mbps，能快速布建及低成本等特性，適合中距離的無線傳輸服務，可作為無線高速接取網路的媒介。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)。除了上述幾個已經正式通過的規格外，目前還有 802.16m 和 802.16j 兩個標準草案正在密集的訂定中，預計將在 2009 年出版正式的規格；前者主要是支援多重輸入多重輸出 (MIMO) 的技術並在高速移動網路下提供更高傳輸速率而且必須向下相容於舊有的 802.16e 網路架構；後者則是為了解決現行 WiMAX 網路系統面臨的問題，包含電信業者獲得的頻譜有限、建築物屏障限制形成覆蓋缺陷、資料流量不均、新興地區有線網路架構不足等因素。

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 Wi-Fi 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，以便用於行動裝置上；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。

IEEE Std 802.16j 為以 IEEE 802.16e 點對點模式網路為基礎而延伸的規格，其目的為在原本的移動式 WiMAX 架構下新增中繼台 (Relay Station) 用來提供多段轉傳 (Multi-hop Relay) 的功能，在此份規格之中，又將中繼台細分為穿透式 (Transparent mode) 和非穿透式 (Non-transparent mode) 兩種型態，此兩種中繼台最主要的差異在於穿透式中繼台不會轉送基地台所傳送的廣播管理訊息 (DLMAP、ULMAP、DCD 與 UCD 等) 到下位的 (subordinate) 中繼台或用戶端；非穿透式中繼台則是會根據排程方式的不同自己傳送廣播管理訊息或是將基地台所傳送的管理訊息轉送到下位設備台上。針對此種特性，在 IEEE 802.16j 規格中定義穿透式模式的中繼台主要是用來提升整體傳輸速率，避免因地形或建築物屏障限制導致無法接收無線訊號，或是接收無線訊號能品質不佳而導致傳輸速率下降的情形；而非穿透式的中繼台則是作為彌補原本基地台涵蓋範圍不足的缺陷，將此類型中繼台建置在基地台涵蓋範圍的邊緣可以延伸基地台的涵蓋區域並且達到多段轉傳的特性。針對網路建置的需求中繼台類型又被分為固定式中繼台 (Fixed Relay Station，簡稱 FRS)、游牧式中繼台 (Nomadic Relay Station，簡稱 NRS) 和移動式中繼台 (Mobile Relay Station，簡稱 MRS)。

為了能夠相容於目前已經出版的 802.16e 標準，原本的在 802.16e 底下訂定的用戶端

(Mobile Station)的行為在此規格中並沒有過大的變動。但是，為了提供多段轉傳的功能，基地台 (Base Station)與中繼台 (Relay Station)之間必須建立新的溝通管理協定，所以在傳統的移動式 WiMAX 的基地台會被支援多段轉傳的基地台所取代，此種基地台在 IEEE 802.16j 規格中稱為多段轉傳基地台 (Multi-hop Relay Base Station，簡稱 MR-BS)，且基地台必須同時支援中繼台和用戶端的初始測距和入網程序；在此規格中，為了因應基地台設計複雜度會隨著多段轉傳網路拓樸的成長而變大，所以將基地台的資源配置排程方式分成中控型 (centralized)和分散型 (distributed)排程兩種模式，在中控型排程下，於基地台涵蓋範圍內的中繼台與用戶端統籌由基地台進行頻寬配置，而在分散型的排程下，則是透過基地台與中繼台進行協同合作管理各自網路拓樸下的資源分配狀況。目前在 802.16j 規格中，根據上述基地台和中繼台所支援的模式主要有兩種設計選擇方式：第一種為穿透式中繼台搭配中控型基地台，此種多段轉傳 WiMAX 網路可以提供基地台至用戶端間經由中繼台進行二段式轉傳的能力，主要的目地為提升基地台涵蓋範圍內整體的功效；另外一種設計則是由非穿透式中繼台建置而成的網路，此種多段轉傳 WiMAX 網路可以提供轉傳個數超過二以上的網路拓樸建置，並且可以支援中控型和分散型的基地台資源配置排程，用來延伸基地台的服務範圍並且降低偏遠地區建置基地台所必須耗費的昂貴成本。



目前在 NCTUns 網路模擬器中已經有支援固定式的 802.16d 點對多點模式及網狀模式與 802.16e 點對點模式移動式 WiMAX 網路，本篇論文主要是針對 IEEE 802.16j 規格中所定義的第一種方式多段轉傳 WiMAX 網路進行設計實作，所以我們將在 NCTUns 網路模擬器上開發中控型穿透式 (Centralized scheduling-Transparent mode) 中繼台網路的模組。

2.1 相關文獻

隨著越來越多國家與廠商積極投入 WiMAX 無線寬頻存取技術產業的研究與網路建置，許多知名的公開性與商業性模擬器軟體都陸續支援 WiMAX 網路模擬的功能，包含 NS-2、NCTUns、OPNET Modeler[16]與 QualNet[17]等。其中 NS-2 模擬器發源於美國加州柏克萊

大學，為運作在 Unix 作業系統下的公開模擬器軟體並且提供多種基本類型的網路模擬功能，由於 NS-2 為開放程式碼的模擬器軟體，研究者可以透過在模擬器上開發新的模組來模擬不同的網路協定，目前在 NS-2 模擬器上由使用者所自行開發的 WiMAX 網路模擬模組較著名的為由台灣長庚大學資工系陳仁暉教授所帶領的分散式系統實驗室與資策會所進行研發的 CGU-III[11] 802.16d WiMAX 模組與美國國家標準局 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 在 NS-2 下所開發支援 802.16d 與 802.16e 的 NIST WiMAX 模組，目前此模組已經被包含進 NS-2 網路模擬器中。除此之外，還有韓國科技技術學院 (Korea Advance Institute of Science and Technology, KAIST) 的電腦網路實驗室在 NS-2 模擬器上開發實體層與媒體存取控制層模組，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[12]。但是上述的模組，目前都還沒有支援多段轉傳 WiMAX 網路的功能。[15]為台灣科技大學由賴源正教授所指導的高速與無線網路實驗室中陳彥宏同學在 NS-2 模擬器上所開發支援 IEEE 802.16j 的媒體控制層模組，此模組只支援簡單的路徑規畫與基本的中繼台資料轉送的功能，並沒有根據 IEEE 802.16j 規格中所訂定的基地台排程方式與中繼台的型式進行實作。



除了上述在 NS-2 模擬器上由使用者自行開發支援 WiMAX 網路模擬的模組外，在支援 WiMAX 網路模擬的 OPNET Modeler 與 QualNet 商業性模擬器軟體中，目前都尚未加入模擬 IEEE 802.16j 多段轉傳 WiMAX 網路模擬的功能，其中，OPNET Tech. 預計於 2009 年將在 OPNET Modeler 模擬器中增加支援 802.16j WiMAX 網路模擬的功能。但是由於商用等級軟體並不會開放原始程式碼，而且使用者必須支付龐大的授權費與維護費用，動輒幾十萬甚至百萬的費用並不是一般研究單位所能負擔。

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。目前在 NCTUns 5.0 版本中已經支援 IEEE 802.16d 點對點模式與網狀模式與 IEEE 802.16e 點對點模式移動式 WiMAX 網路協定。我們將以 NCTUns 模擬器目前的移動式 WiMAX 網路為基礎開發支援

IEEE 802.16j 穿透式中繼台網路的網路模擬環境。

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)：透過 MAC 存取點 (SAP) 接收上層所傳遞的下來 SDUs，並將接收的資料進行分類，按照資料的類型與服務種類地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、服務流程管理的設定，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。

在實體層上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 LOS 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。

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) 透過 SAP 接收上層協定所接收到的 SDUs (Service Data Units)。
- (2) 將接收到的 SDUs 進行分類並封裝成 MAC 層封裝單元 PDUs (Packet Data Units)。
- (3) 必要時針對 QoS 分類對 PDUs 執行進一步的處理。
- (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) 負責接收並處理從下層接收上來的 PDUs，並且還原成 SDUs 往上層協定傳送。

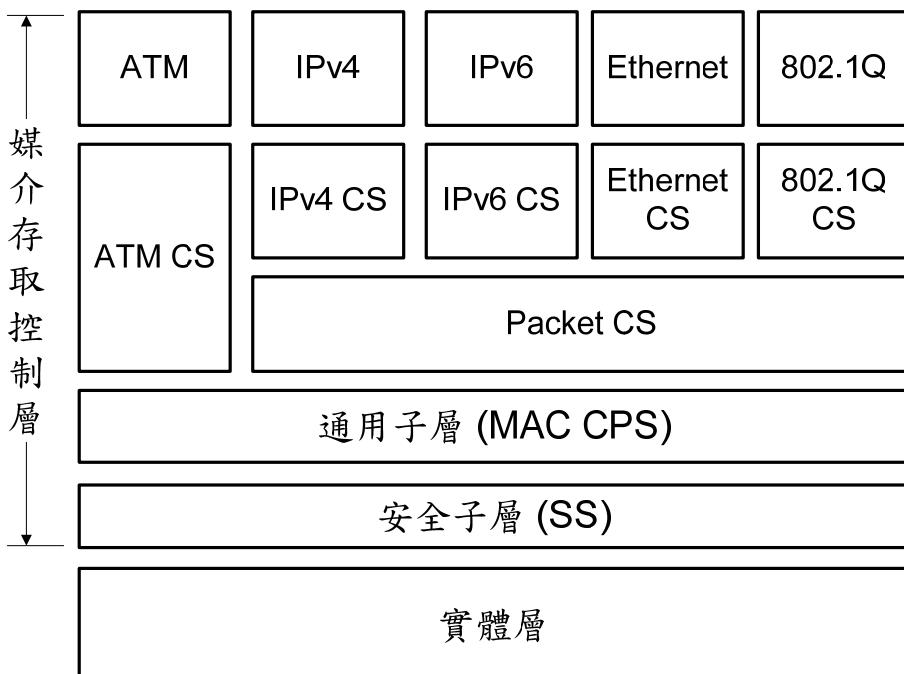


圖 2-2 收斂子層支援的封包類型

目前在 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)。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。通用子層僅須依照封裝起來的 PDUs 進行排程與傳送。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、入網程序與換手機制等，並且將上層欲傳送的 SDUs，按照已分類的特定連線 (Connection) 中取出後封裝為 PDUs，再往下層遞送。在 IEEE 802.16j 點對點模式中，所有的資源統籌由基地台進行配置管理，所有在此基地台涵蓋範圍的接收端均必須依據基地台的分配來進行資料的傳送與接收。基地台分配頻寬資源是依據分時雙工 (Time Division Duplexing, TDD) 的

模式以每一個訊框 (frame)為單位進行週期性的切換，分成下行子訊框和上行子訊框，前者為基地台傳送資料給其下位接收端時間，後者則是提供給中繼台和用戶端傳送上行資料到基地台的週期。在 IEEE 802.16j 規格中，新增了中繼台此項設備來支援多段轉傳的功能，並且於媒體存取控制層中增訂基地台與中繼台之間和中繼台與用戶端之間溝通控制的管理訊息。此外，為了能在 TDD 模式下進行基地台至中繼台和中繼台至用戶端之間的封包遞送必須將訊框再進行切割，根據傳送端和接收端的不同又再被細分存取地帶 (access zone)和中繼傳輸地帶 (relay zone)，存取地帶代表用戶端和網入接取點 (network entry point)的傳輸區段，中繼傳輸地帶則為中繼台與中繼台之間的資料傳輸區段。在下行資料傳送上，基地台會將欲傳送的下行資料的分配記錄儲存在 DL-MAP 訊息中，下位的中繼台或用戶端會根據 DL-MAP 的管理訊息對下行子訊框中的資料進行分析，並且根據連線識別碼 (Connection ID)來接收資料。而在上行資料傳送上，除了基地台所預留給所有下位中繼台和用戶端進行入網程序和頻道測距使用的競爭頻道外，所有的中繼台和用戶端都必須遵循 UL-MAP 的管理訊息來進行傳送，避免造成資料的遺失和碰撞。在 IEEE 802.16j 規格中，DL-MAP 訊息中記錄著下行存取地帶和下行中繼地帶的資料分配狀態，而 UL-MAP 中則是記錄著上行存取地帶和上行中繼地帶頻寬配置狀態。



2.2.2.1. MAC PDU 遞送方式

在 IEEE 802.16j 的媒體控制層中，根據基地台所使用的排程方式 (centralized 或 distributed)、中繼台的型態 (transparent 或 non-transparent)和網路拓樸所支援的多段轉傳個數定義了兩種 PDU 的遞送方式 (forwarding scheme)，分別為通道模式 (tunnel-base mode)和連線識別碼模式 (CID-base mode)遞送方式。連線識別碼模式遞送方式適用於中控型排程基地台搭配穿透式中繼台或非穿透式中繼台的多段轉傳網路拓樸；當在多段轉傳個數超過二以上由分散型排程基地台搭配非穿透式中繼台的網路拓樸中，使用遞送方式則為通道模式，以下為此兩種遞送方式的定義：

通道模式 (tunnel-base mode)遞送方式為在基地台與存取中繼台之間建立一條或多條

通道連線，在此模式傳送的 PDUs 必須以 relay MAC Header 進行封裝，每一個連線包含一個通道識別碼 (Tunnel CID, 簡稱 T-CID) 或管理通道識別碼 (Management Tunnel CID, 簡稱 MT-CID)。前者用來遞送使用通道模式傳送的上層資料，後者用來傳輸媒體控制層的之間溝通的管理訊息。在通道傳送的起點的設備台必須以 relay MAC Header 對於 PDU 進行封裝和分割，而在通道出口的設備台則負責移除 relay MAC Header 並根據 PDU 的連線識別碼將資料傳送至對應的接收端。

連線識別碼 (CID-base) 模式遞送方式，使用此種模式進行 PDU 遞送的中繼台必須透過基地台傳送特定的管理訊息給中繼台上並且於中繼台上維護一個轉送識別碼列表，當中繼台接收到下行存取地帶或上行轉送地帶的封包時，再藉由比對轉送識別碼列表與接收到的 PDU 標頭中的連線識別碼來決定是否進行轉送。

2.2.2.2. MAC 最小傳送單位封包結構

MAC PDU 由三個部分所組成，如圖 2-3，包括一個固定長度 48 位元的 MAC 標頭，接續一個可變長度的 payload 和用來偵測錯誤的 CRC。其中 MAC 標頭是必備的欄位，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。

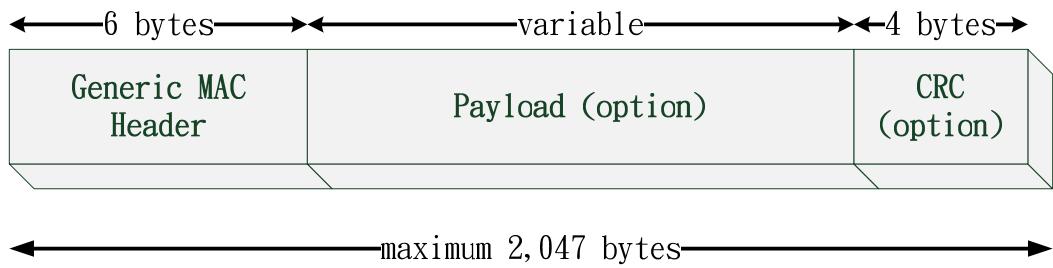


圖 2-3 MAC PDU 結構

MAC 標頭分成 Generic MAC Header 和 MAC Header without payload 兩種型式。

Generic MAC Header 用來傳送資料和媒體控制層的管理訊息，適用於上行和下行方向傳輸，其標頭欄位與內容，如圖 2-4 和表 2-1，根據需求此種 MAC 標頭型式可以包含多個子標頭 (sub-header)；子標頭存在於 MAC Header 和 payload 之間且型式根據 MAC 標頭裡的 Type 欄位代表不同的意義，如表 2-2。MAC Header without payload 分成 TYPE1 和 TYPE2 兩種

型式，為提供中繼台和用戶端與基地台進行特殊的請求和管理，此種 PDU 不包含 payload 和 CRC 欄位，其中型別 TYPE1 主要是用來提供下位中繼台和用戶端實施頻寬請求、頻道品質偵測以及睡眠模式管理。型別 TYPE2 則是用在 Feedback Polling 相關的機制下使用。

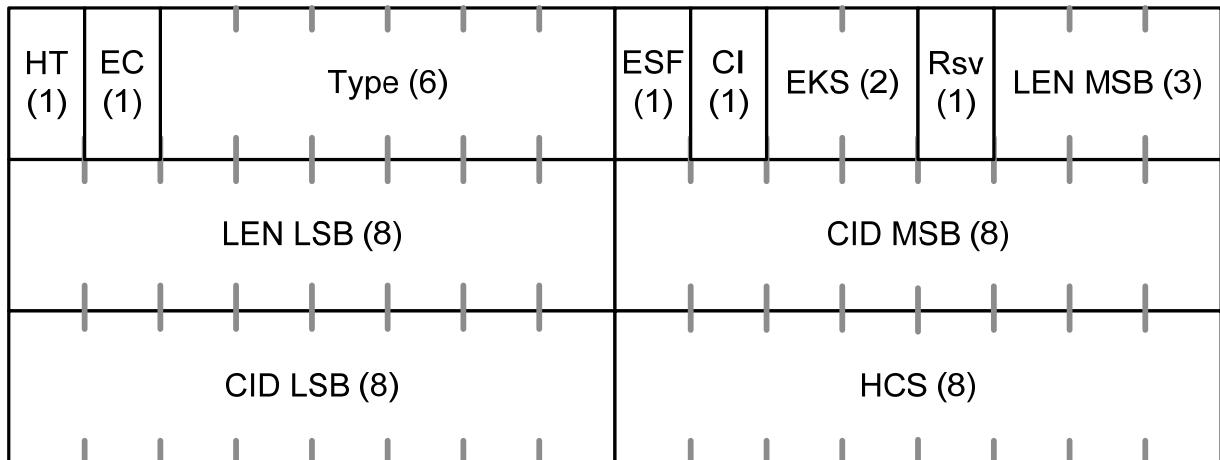


圖 2-4 Generic MAC Header 欄位格式

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

在 IEEE 802.16j 網路拓樸中，當使用通道模式遞送方式傳送基地台和存取中繼台之間的資料時，必須使用 relay MAC Header 進行封裝，如圖 2-5，relay MAC Header 與原本的 Generic MAC Header 相似，由 relay MAC header、payload 和偵測錯誤的 CRC 欄位，其中 payload 部分是由多個 MAC PDU 所組成，必須注意的是若在 relay MAC header 中包含 CRC 欄位，則包含在 payload 中原本 MAC PDU 的 CRC 欄位必須被省略。圖 2-6 與表 2-3 為 relay MAC Header 所新增欄位所代表的意義。如同一般性 MAC PDU 結構，在 relay MAC header 與 payload 亦可以存在一個或多個子標頭用來提供基地台和中繼台特殊需求的應用，其型別如表 2-3 中所示。

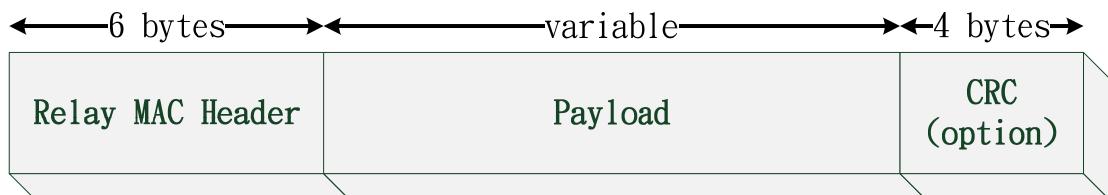


圖 2-5 Relay MAC PDU 結構

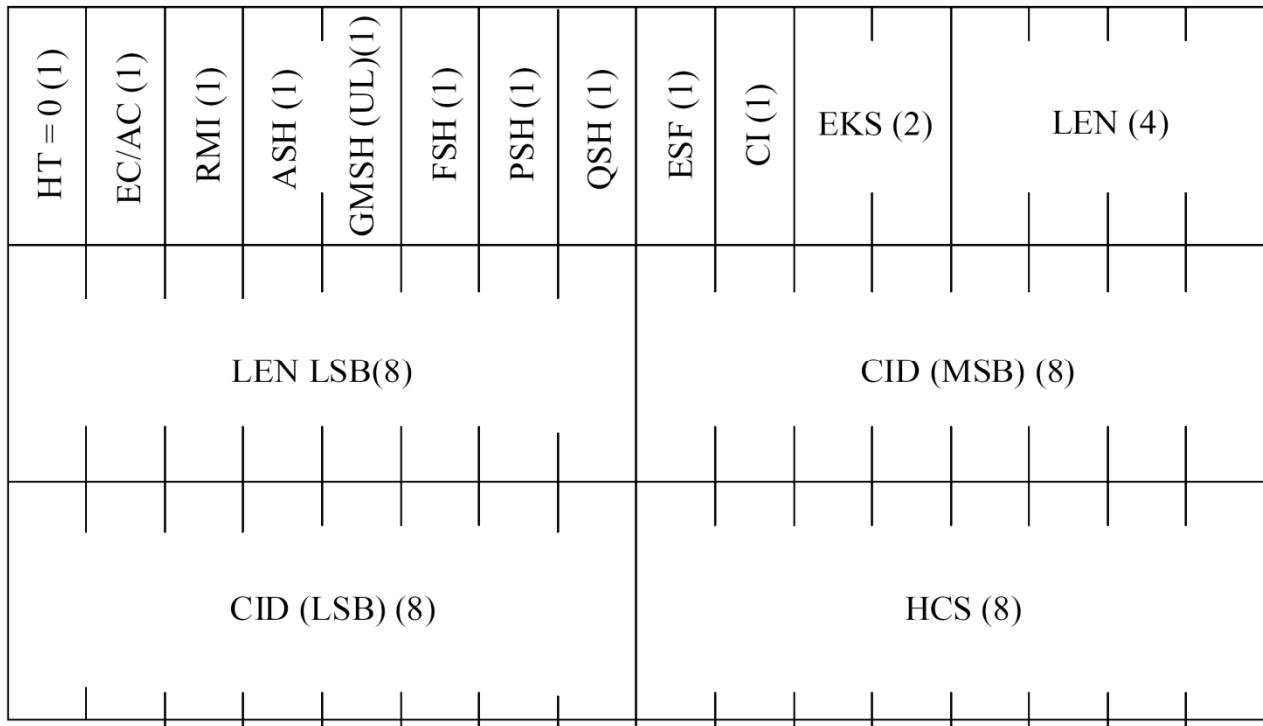


圖 2-6 Relay MAC Header 欄位格式

名稱	長度/bit	描述
EC/AC	1	對T-CID連線加密控制：1 = 加密，0 = 不加密 對MT-CID連線加密控制：1 = 加密，0 = 不加密
RMI	1	Relay mode indicator = 1
ASH	1	Allocation subheader : 1 = 包含, 0 = 不包含
GMSH	1	上行 : Grant management subheader : 1 = 包含, 0 = 不包含 下行 : 0 = reserved
FSH	1	Fragmentation subheader : 1 = 包含, 0 = 不包含
PSH	1	Packing subheader : 1 = 包含, 0 = 不包含
QSH	1	QoS subheader : 1 = 包含, 0 = 不包含

表 2-3 Relay MAC Header 新訂定欄位說明

2.2.2.3. 連線識別碼

在 WiMAX 網路中，資料的傳輸是透過傳送端與接收端之間建立連線導向 (Connection

-Oriented)的連線來達成，每條連線由 16 位元的連線識別碼 (Connection identifier, 簡稱 CID)作為基地台辨識設備台身分的連線識別。在規格中，除了為傳輸特定管理訊息保留的連線識別碼之外，如：基地台傳播廣播訊息所使用的 Broadcast CID、中繼台與用戶端進行初始測距所使用的 Initial Ranging CID 外，一般的中繼台與用戶端會在順利完成入網程序後會與基地台建立兩組基本的連線，分別為 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 則是用來傳送長度較長且能容忍時間延遲的管理訊息。此外，為了提供特殊需求所使用尚有第三組 Secondary Management CID 連線，此組連線會在中繼台或用戶端為 managed RS 或 managed MS 時被建立。

除此之外，當上層有資料必須透過基地台與用戶端之間傳輸時，必須另外建立一組連線識別碼用來負責接收與傳送上層的資料，此類型連線識別碼稱為 Transport CID。表 2-4 僅列出重要且目前有支援的連線識別碼範圍，其中在表中的 m 值所代表為基地台可以支持的中繼台與用戶端個數，此值在規格中並沒有明確定義，是由開發基地台的廠商自行訂定。

連線識別碼	值	描述
Initial Ranging	0x0000	RS、MS進行初始測距時使用
MS or RS Basic CID	0x0001 - m	下行與上行連線需使用相同的值
MS or RS Primary CID	$m+1 - 2m$	下行與上行連線需使用相同的值
Transport CIDs, Secondary Management CIDs,	$2m+1 - 0xFE9F$	Secondary連線使用下行與上行連線需使用相同的值
Broadcast CID	0xFFFF	供下行時BS傳送廣播訊息給MS與RS

表 2-4 連線識別碼配置範圍 (CID)

2.2.2.4. MAC 管理訊息

IEEE 802.16 中，基地台、中繼台與用戶端之間的溝通必須透過規格中所訂定的 MAC 管理訊息來進行，此訊息會被媒體控制層封裝成 PDU 儲存在 payload 中。在規格中訂定的管理訊框主要由三部分所構成，分別為管理型別 (Type)、管理訊息內容 (payload)和 TLV。其中管理訊息內容與 TLV 根據型別的不同其訊息大小也會有所改變。圖 2-7 為目前我們在模

擬器上實作的管理訊息格式的架構。

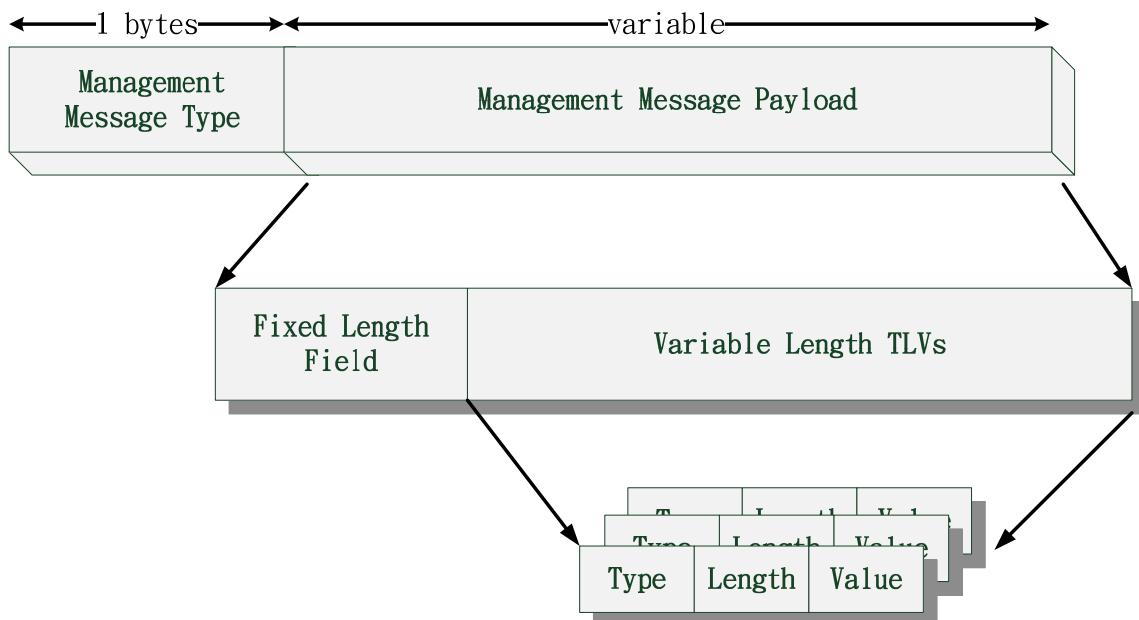


圖 2-7 管理訊息的欄位格式

當基地台與中繼台和用戶端之間必須進行管理訊息交換時，由媒體控制層負責封裝管理訊息並加上 Generic MAC Header 和 CRC 封裝成 MAC PDU，然後再分配至對應的接收端的連線佇列等待傳送。在 IEEE 802.16j 媒體控制層規格中，為了支援多段轉傳的功能，新增了 29 個新的管理訊息型別作為 MR-BS/RS 與 RS/MS 間進行溝通使用，表 2-5 為目前為了支援 WiMAX 中控型排程穿透式中繼台網路而在模擬器上有實作的管理訊息

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
36	REP-REQ	Channel measurement Report Request	Basic
37	REP-RSP	Channel measurement Report 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 Request Report Message	Broadcast or Primary
72	MR_RNG-REP	MR Ranging report	RS Basic
74	RS_Config-CMD	RS configuration command	RS Primary Management
80	MS_INFO-DEL	MS context information delete	RS Basic
90	RS_Member_List_Update	RS group member list update	RS Basic
92	MR_Generic-ACk	Generic ACK of received message	RS Basic

表 2-5 管理訊息類型與描述

2.2.2.5. 入網程序與初始測距

在多段轉傳 WiMAX 網路中，中繼台與用戶端在初始化時均必須透過入網程序 (Network Entry) 向基地台請求提供服務，基地台再根據入網程序的流程與之建立必要的連線，以下我們將針對用戶端與中繼台執行入網程序的流程進行介紹。

首先，我們將先說用戶端入網程序的流程。當一個用戶端欲加入由基地台涵蓋範圍所提供的服務時，必須先進行入網程序與基地台先行取得同步資訊之後，再跟基地台請求提供連線服務。入網程序由一連串基地台與用戶端之間管理訊息的交換所達成，基地台會與用戶端建立連線並且提供用戶端所需的服務，圖 2-8 為用戶端與基地台執行入網程序所進行的流程，主要包含以下幾個步驟：

- (1) 掃描基地台下行頻道並與之進行同步
- (2) 獲得上行參數
- (3) 進行初始測距
- (4) 與基地台協調基本能力
- (5) 認證與金鑰交換
- (6) 進行註冊
- (7) 取得 IP 連線位址
- (8) 與基地台進行時間同步，取得目前時間
- (9) 傳送操作參數
- (10) 建立連線



當用戶端進行入網程序時，首先必須掃描鄰近基地台所使用的頻道，並且接收由基地台所廣播的 DL-MAP 訊息並與之進行同步取得基地台所提供的連線相關管理訊息，如 DCD、UCD 與 UL-MAP。當用戶端可以持續接收到基地台所發送的 DL-MAP 訊息，表示用戶端已經與基地台達成同步，透過 UL-MAP 上的基地台所提供的資訊，用戶端於基地台所提供的上行競爭頻道進行初始測距 (Initial Ranging) 與基地台請求連線服務。

初始測距為用戶端用來與基地台校調時序和調整電源功率的重要步驟，當用戶端開始進

行初始測距時會從基地台所提供的初始測距碼中選定一組 CDMA 測距碼與基地台進行連線請求，基地台根據接收到的測距碼進行分析並且將連線請求所需的校調參數和結果以媒體控制層管理訊息 RNG-RSP 回覆給傳送端，用戶端再根據基地台所回覆的訊息執行相對應的動作。在多段轉傳的網路架構下，用戶端執行初始測距的存取台可能為基地台或是經由中繼台與基地台進行入網程序。

根據基地台的排程方式與中繼台的型式的不同，基地台和中繼台之間傳遞的用戶端管理訊息方式亦有所不同。由於本篇論文主要是針對二段式中控型穿透式中繼台網路進行實作模擬，在此我們主要介紹在此種網路架構下，基地台與中繼台的管理訊息溝通方式。在中控型穿透式中繼台網路下，於基地台服務範圍下的中繼台必須監聽用戶端在競爭頻道上發送的 CDMA 測距碼，當中繼台收到用戶端發送的 CDMA 測距碼時再進行對應的傳輸功率和時間作校調並且將所校調的 CDMA 測距碼封裝成 MR_RNG-REP 管理訊息傳送至基地台。在多段轉傳 WiMAX 網路下，當基地台接收到由用戶端直接傳送的 CDMA 測距碼或經由中繼台轉發的 MR_RNG-REP 管理訊息時，必須等待 6 個訊框的傳送間隔來收集經由中繼台所轉發的 MR_RNG-REP，基地台再根據所收集到的初始測距碼決定此用戶端最適合的傳送路徑，然在 IEEE 802.16j 規格中並沒有定義決定用戶端最佳路徑的演算法，此部分是由開發的廠商自行訂定。若基地台決定選擇以中繼台作為用戶端的存取台，則中繼台必須接收由基地台與用戶端後續的 Network Entry 管理訊息，並進行轉發至用戶端與基地台。當基地台決定選擇中繼台作為用戶端的存取端，基地台必須傳送 RS_Member_Update_List 管理訊息給中繼台，更新中繼台上的連線識別碼列表，建立基地台與用戶端的連線。圖 2-8 為用戶端在中控型穿透式中繼台網路拓樸下進行初始測距的流程圖。

當初始測距順利完成後，基地台會配置兩組連線識別碼 (Basic CID 與 Primary Management CID) 純予用戶端，作為入網程序後段傳送管理訊息的連線識別。用戶端會分別使用此兩組連線識別碼與基地台進行協調基本功能 (SBC-REQ、SBC-RSP) 和金鑰交換與認證註冊 (REG-REQ、REG-RSP)，在實作中我們將忽略金鑰交換與認證的步驟直接於基地台進行註冊。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。當用戶端成功與基地台完成註冊程序後，再透過 DSA-REQ、DSA-RSP 管理訊息建立資料傳輸連線整個用戶端的入網程序才算完成。

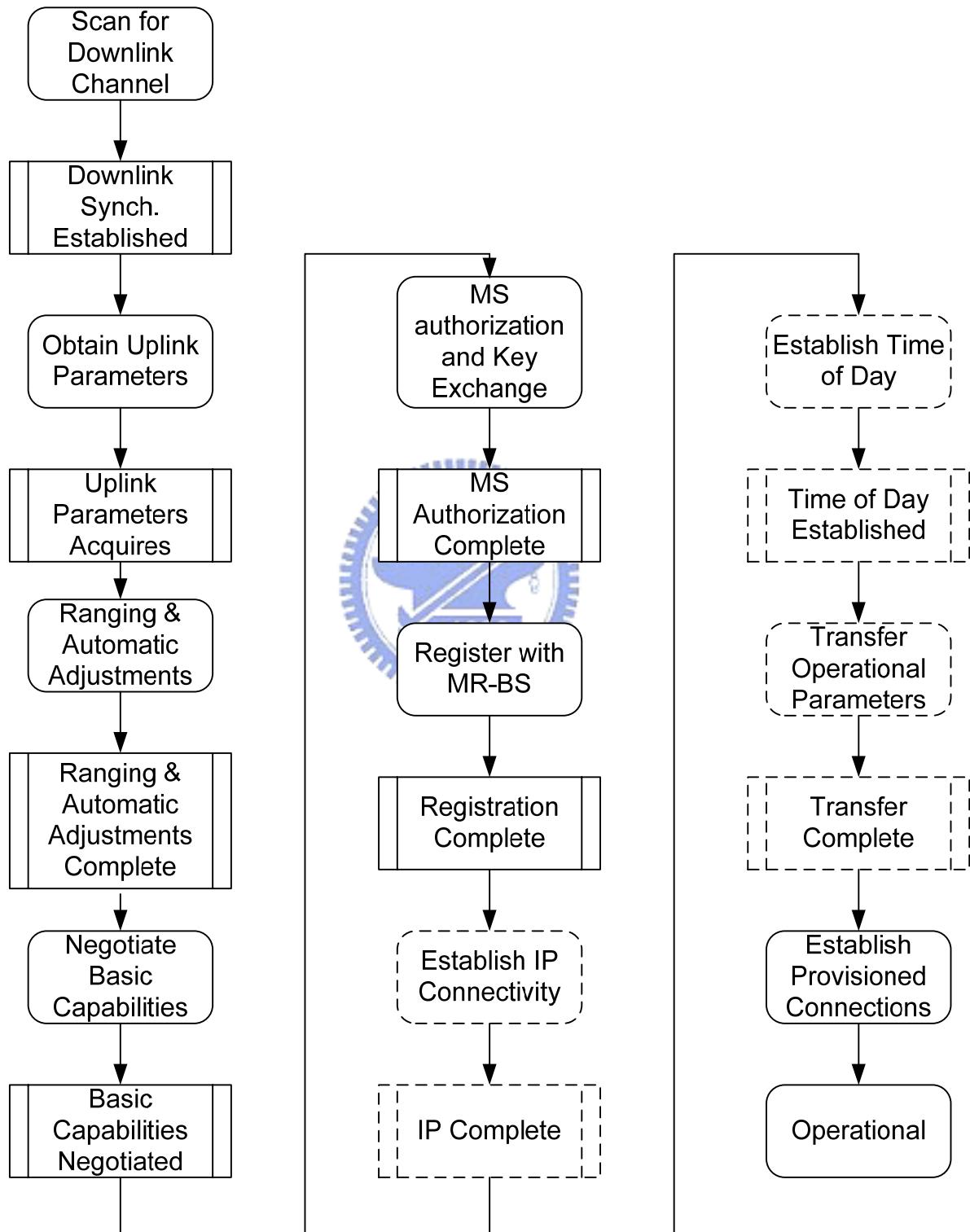


圖 2-8 用 戶 端 Network Entry 流程圖

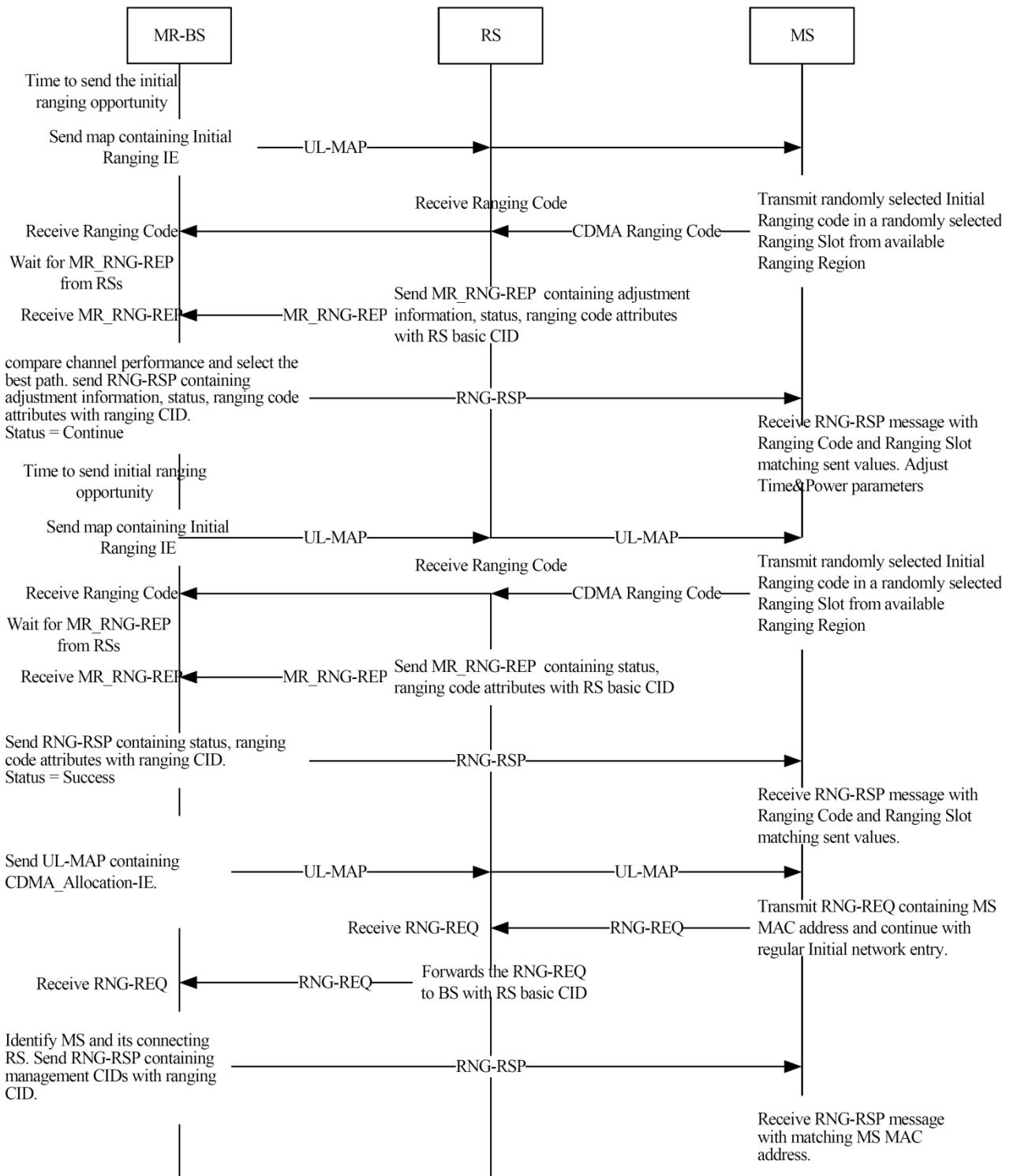


圖 2-9 用戶端於穿透式網路下之初始測距流程

如同用戶端一樣，中繼台亦須透過中繼台所需的入網程序與基地台來與進行連線。如圖

2-10，以下為中繼台在進行入網程序的主要程序步驟：

- (1) 掃描基地台下行頻道並與之進行同步
- (2) 執行第一階段存取台 (access station)的選取
- (3) 獲得上行參數
- (4) 進行初始測距
- (5) 與基地台協調基本能力
- (6) 認證與金鑰交換
- (7) 進行註冊
- (8) 取得鄰近設備台的訊號量測
- (9) 執行第二階段存取台的選取
- (10) 路徑與通道的建立
- (11) 取得 IP 連線位址
- (12) 與基地台進行時間同步，取得目前時間
- (13) 傳送操作參數
- (14) 設定中繼台的操作參數



除了上述 (2)、(8)、(9)、(10)、(14)步驟，中繼台進行 Network Entry 的程序大部分與用戶端相同，其中 (8)、(9)、(10) 在規格中為選擇性支援項目，基地台可以透過回覆 RNG-RSP 時，設定中繼台 Network Entry Optimization 通知中繼台在進行 Network Entry 決定是否省略此部分步驟。

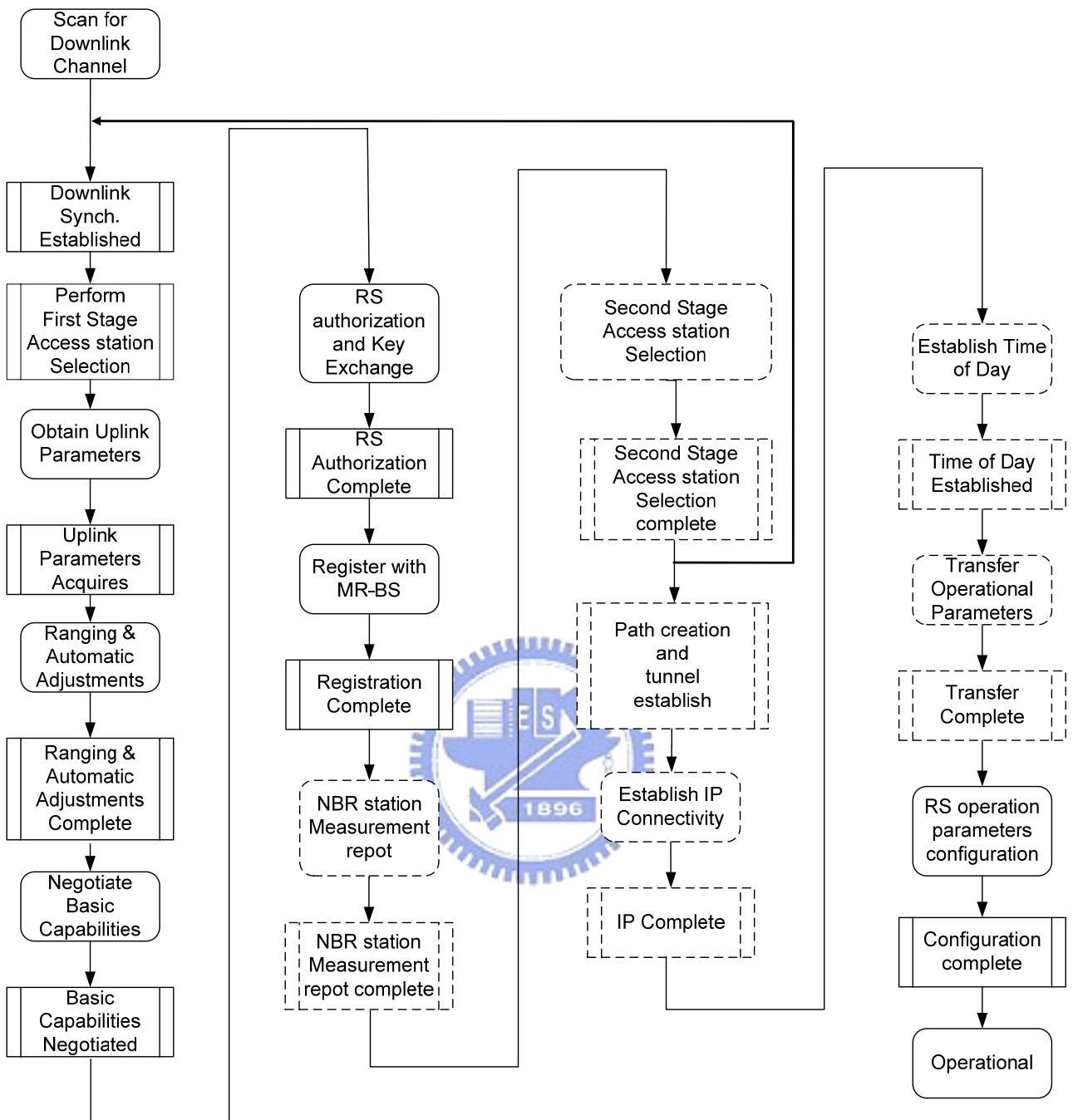


圖 2-10 中繼台 Network Entry 流程圖

步驟 (8)、(9)、(10)為支援中繼台在多段轉傳的網路拓樸下，新加入的中繼台能夠根據頻道訊號的強弱選擇最佳的非穿透式中繼台作為存取台，並建立中繼台到基地台間的傳輸路徑，由於本篇論文主要在實作二段式穿透式中繼台的 WiMAX 網路，且在此種網路拓樸下，中繼台並不會傳送廣播管理訊息，所以當中繼台執行入網程序時，存取台的選取必定為基地

台，我們將省略第二階段存取台選擇的實作。當中繼台完成初始化後，必須掃描鄰近基地台所服務的頻道，並且取得基地台所廣播的管理控制訊息與基地台進行同步，透過基地台和鄰近非穿透式中繼台所傳送的 DCD 管理訊息中的 End-To-End Metric 進行第一階段存取台選取，決定經由哪個存取台執行入網程序。當完成第一階段存取台選取後再於競爭頻道傳送中繼台用來進行初始測距的 CDMA 測距碼與基地台進行初始測距，並且進行與用戶端入網程序一樣的流程直到完成與基地台進行註冊的入網步驟，當中繼台順利取得基地台相關的連線服務並進行註冊後，基地台會根據中繼台的操作參數對中繼台支援的模式進行連線參數設定，並且傳送 RCD 和 RS_Config-CMD 管理訊息至執行入網程序的中繼台進行中繼台相關參數的設定，當中繼台成功接收到基地台的連線參數設定後再回覆 MR_Generic-ACK 管理訊息來完成中繼台的入網程序流程。由於中繼台在多段轉傳 WiMAX 網路中的角色為中繼轉送的設備台，在進行入網程序時只會與基地台建立用來管控此中繼台的管理控制連線 (Basic 、 Primary Management 與 Secondary Management 連線)，並不會建立用來傳送上層資料的資料連線。



2.2.2.6. 定期測距

定期測距為中繼台和用戶端用來與基地台進行定期的溝通以維持傳輸品質的一種測距流程。定期測距主要由中繼台或用戶端發起，根據基地台所配置的定期測距傳輸機會由定期測碼範圍中選定一組 CDMA 測距碼，並且在基地台所配置的測距頻道上進行傳送，當基地台接收到定期測距碼後，再將須校調的功率與時距封裝成 RNG-RSP 進行回覆。中繼台與用戶端在接收到 RNG-RSP 訊息會依據狀態結果執行相對應的時序校調與功率調整。

如同用戶端執行初始測距流程，中繼台必須監聽由用戶端所發送的定期測距碼，當中繼台收到定期測距碼時亦必須將其封裝 MR_RNG-REP 訊息傳送至基地台，讓基地台可以根據所收集的中繼台的管理訊息定期變換用戶端的傳送路徑，以維持最好的傳送速率，圖 2-11 為 WiMAX 多段轉傳網路下用戶端進行定期測距碼傳送所需遵循的流程。

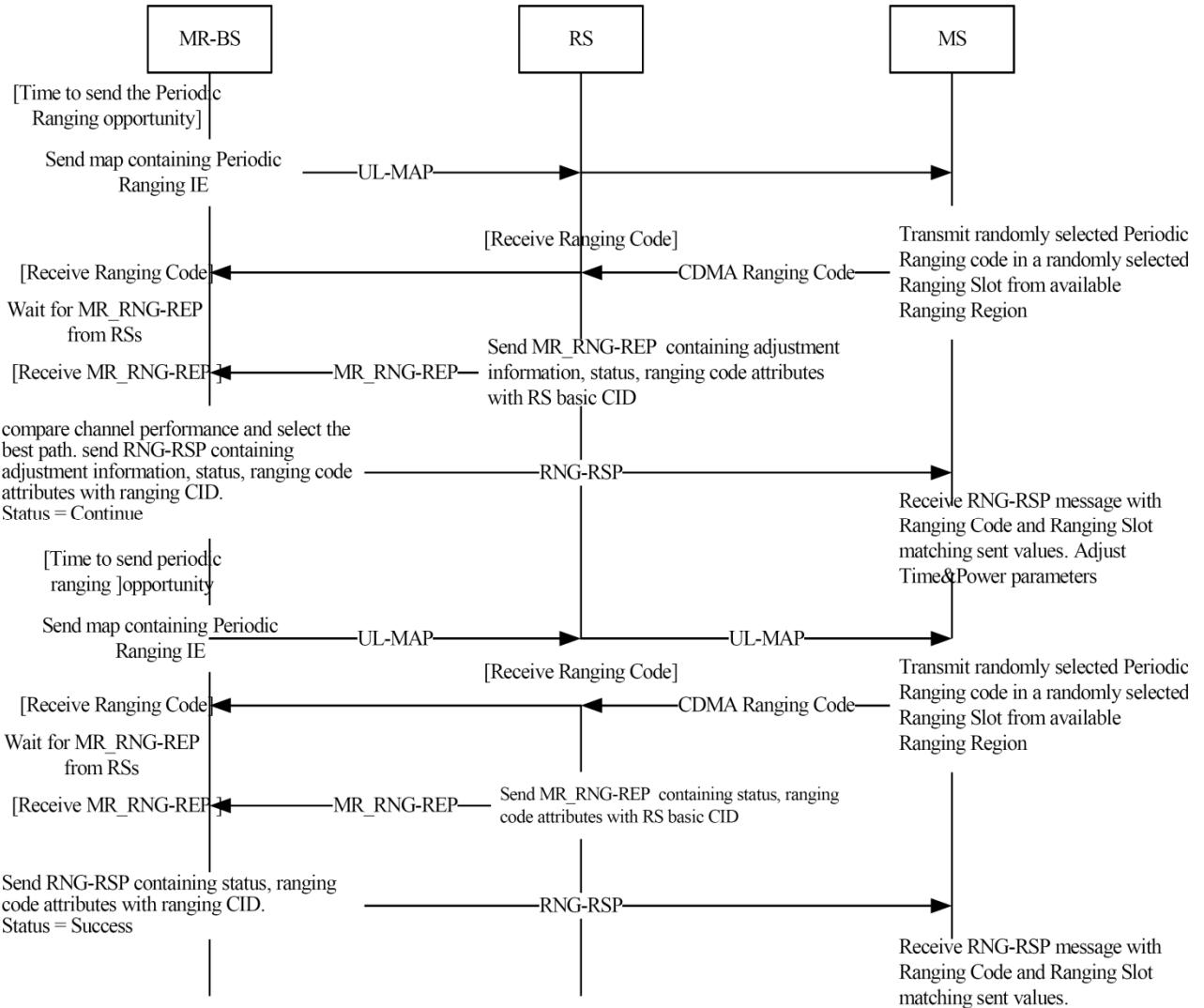


圖 2-11 用戶端於穿透式網路下之定期測距流程

2.2.2.7. 換手機制與換手時機

在移動式 WiMAX 網路下，為了提供行動式用戶端進行換手 (Handover)的機制，在 IEEE 802.16e 媒體控制層中定義了基地台管理網路拓樸的機制與用戶端執行換手所需的程序。由於 IEEE 802.16j 規格為移動式 WiMAX 的延伸，所以在此種網路中必須支援用戶端可移動性的能力，且為了提供中繼台可移動性的能力，在規格中還訂定了中繼台的換手機制與時機，但是在目前第五版的草案中對於中繼台的換手機制尚未有明確的程序，且中繼台於多段轉傳網路中進行換手的機制還存在很多議題，目前的實作上我們將僅支援固定式的穿透式中繼台和可移動式的用戶端，於是在此小節我們將只針對移動式用戶端的換手程序與時機進行介

紹。

為了能獲得移動式網路下網路的拓樸，基地台可以藉由骨幹網路或廣播 MOB_NBR_ADV 管理訊息來取得鄰近基地台的資訊，以方便用戶端進行換手機制時使用；用戶端則是經由傳送 MOB_SCN_REQ 請求基地台配置其掃描鄰近基地台的訊號品質，基地台於收到用戶端的頻道掃描請求後再回覆 MOB_SCN_RSP 分配用戶端進行鄰近基地台頻道掃描，用戶端會在掃描完成之後將所收集到的資訊以 MOB_SCN REP 傳送回基地台，提供基地台取得用戶端鄰近的網路拓樸作為執行換手決策使用。在多段轉傳 WiMAX 網路下，若用戶端的存取台為中繼台時，則中繼台必須幫忙轉送換手機制的管理訊息。

換手程序表示用戶端由服務中的基地台 (Serving BS) 切換到目標基地台 (Target BS)，又分為先斷後連 (Break before Make) 的硬式換手 (Hard Handover) 和先連後斷 (Make before Break) 的軟式換手 (Soft Handover)；前者在換手時會先與服務中的基地台中斷連線，再與目標基地台進行連線，所以可能會造成資料遺失。後者則是會先與目標基地台建立連線之後，再中斷服務中基地台的連線。硬式換手為必須項目而軟式換手為選擇項目。但規格中並未明確的指定用戶端進行換手決策演算法，只列舉了兩種用戶端執行換手程序的時機：

- i. 當用戶端遠離所提供的服務的基地台而進入另外一個訊號強度較好的基地台時
- ii. 當用戶端發現目標基地台能夠提供其更好的傳輸品質與效能時

圖 2-12 為用戶端進行換手時的程序，主要包含以下幾個步驟：

- (1) 基地台重新選擇。
- (2) 換手決定與初始化。
- (3) 與目標基地台進行同步。
- (4) 測距與網路重新加入。
- (5) 終止先前服務。

用戶端換手的決定權可以是由基地台或是用戶端，分別經由 MOB_BSHO_REQ 或 MOB_MSHO_REQ 觸發換手程序。當用戶端滿足換手決策的條件，並且選定目標基地台之後，用戶端必須與目標基地台進行 Network Re-entry，請求目標基地台提供服務，服務中的

基地台會保留用戶端的資訊於 Resource Retain Time 期滿之後才將相關的連線資訊清除，避免用戶端請求目標基地台服務失敗時，必須對原本提供服務的基地台進行入網程序。在多段轉傳 WiMAX 下，基地台必須對於中繼台上所儲存的用戶端連線資訊進行管理，所以若用戶端的存取台為中繼台時，當用戶端滿足換手決策的條件或 Resource Retain Time 期滿後，基地台必須傳送 MR_INFO_DEL 管理訊息來清除中繼台上用戶端的連線資訊。

在 IEEE 802.16j 規格中，新增對於中繼台相關的換手機制，在非穿透式中繼台網路拓樸下，用戶端有可能在基地台的涵蓋範圍之外，所以非穿透式中繼台必須廣播 MOB_NBR_ADV 管理訊息，通知在非穿透式中繼台管理下的用戶端網路拓樸的資訊。而在穿透式中繼台網路拓樸下，用戶端必須在基地台的涵蓋範圍，所以穿透式中繼台僅需轉送由基地台發送至用戶端的換手機制相關的管理訊息。在 IEEE 802.16j 規格中，根據應用需求中繼台又分為固定式、游牧式和移動式中繼台，其中為了提供中繼台支援可移動性，在規格中對於此類型中繼台亦訂定了相關的換手時所必須遵守的流程，包括對入網重新加入、路徑重新規劃以及用戶端連線識別碼重新配置等，由於本篇論文中目前所實作的中繼台為固定式穿透式中繼台，關於移動式中繼台的換手機制將留至未來在進行加強，在此將不多加贅述。



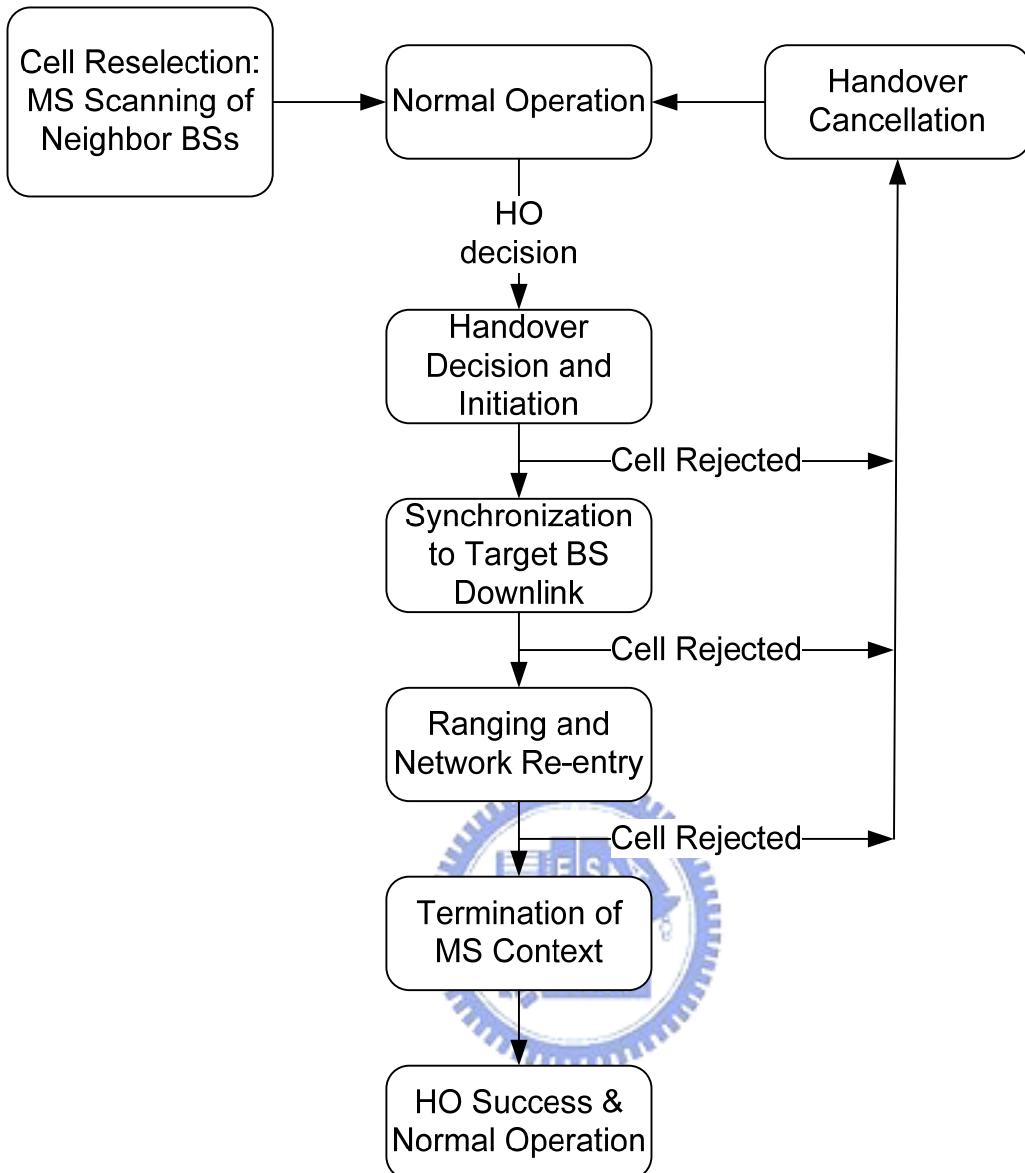


圖 2-12 用戶端換手機制下重新入網程序

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，主要由兩個元件協定所構成，分別為資料加密協定與金鑰管理協定。資料加密協定提供在無線網路上傳輸封包資料之安全性，包含了一系列的加密和認證演算法。金鑰管理協定提供用戶端、中繼台與基地台之間金鑰分發之安全性。在 IEEE 802.16j 中，資料傳輸是經過多段轉傳的方式進行傳送，根據排程的方式不同和資料傳輸安全性的考量又區分成基地台與中繼台、中繼台與中繼台、中繼台與用戶端的封包加解密與金鑰認證。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，我們在模組中的實作將不考慮實作此層的功能。

2.3 實體層

實體層為 WiMAX 網路系統架構下的最底層，實體層經由服務存取點接收由媒體控制層所傳遞下來的資料，並經由無線介面傳送到空氣介質中。在 IEEE 802.16 中，針對不同環境訂定了兩種使用頻段：10~66 GHz 和 2~11 GHz 及四種不同的實體層介面規範，分別是 WirelessMAN-SC、WirelessMAN-SCa、WirelessMAN-OFDM、WirelessMAN-OFDMA 四種模式。其中 SC 適用於 10~66 GHz 頻帶，而其餘三種則適用於 2~11 GHz 頻帶。傳輸方面 SC、SCa 適用於 LOS 傳輸，OFDM 與 OFDMA 則是用於 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。由於 IEEE 802.16j 規格是根據 IEEE 802.16e 點對點模式網路的延伸，其實體層主要亦是以 OFDMA 為基礎並且搭配分頻雙工 (FDD) 或分時雙工 (TDD) 兩種模式進行操作。本篇論文所使用的實體層為 OFDMA 搭配 TDD 方式進行實體層網路實作模擬。



2.3.1. 正交分頻多重存取

正交分頻多重存取 (OFDMA) 主要的訴求在於原本的正交分頻存取技術上提供移動式應用，其特點包含藉由 OFDM 有效對抗通道多重路徑效應與提高資料傳輸效率，並且支援與 OFDM 相同的調變方式。OFDMA 採用的是分頻的 FDMA 技術，並且支援可變的 (scalable) 頻寬機制，其功能為根據通道狀況改變系統頻寬與次載波數，運作原理是將所有子載波 (subcarrier) 分割成若干群組，稱為子通道 (sub-channel)，分配給不同用戶使用，每個用戶允許使用多個子通道進行傳輸，並根據傳輸環境狀況決定各個次通道的子載波數，使得不同的用戶可以在同一時間進行傳輸；另外藉由子載波配置 (subcarrier allocation) 與適應性調變和編碼 (Adaptive Modulation and Coding, AMC) 技術，可以讓 OFDMA 之實體層方便在通道

變化較大的移動環境中傳送資料。在 IEEE 802.16 規格中支援四種 FFT-size，分別是 128、512、1,024、2,048，表 2-6 是在 WiMAX 裡所使用的 OFDM 參數[5]。

Parameter	Fixed	Mobile Multi-hop Relay			
	WiMAX	WiMAX Scalable			
	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)	172.96	102.9			
Number of OFDM symbols in 5 ms frame	69	48.0			

表 2-6 OFDMA 實體層相關參數

2.3.2. 可適性調變與通道編碼

相較於傳統的無線網路所使用的固定式調變技術，WiMAX 支援可適性 (scalable) 調變技術，基地台與用戶端之間會依據距離的遠近來變換調變技術以維持最佳的傳輸品質，目前在 IEEE 802.16 中支援三種調變機制分別為：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。

通道編碼為對原始資料進行一連串的編碼技術，提高資料傳輸的正確性。在 WiMAX 規格中通道編碼主要分成四個步驟：

- (1) Randomization。

(2) FEC Encoding。

(3) Bit Interleaving。

(4) Repetition。

資料於傳送端實體層會按照此步驟依序對資料進行編碼，接收端實體層則反序將編碼過後的資料重組回原始資料再經由服務存取點往媒體控制層遞送，如圖 2-13 所示。Randomization 是透過PRBS (pseudo-random binary sequence)的亂數產生器來將資料攪亂，可以使輸出的信號零與一的個數幾乎相同讓信號具有隨機性。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 2-7 為 $1,024$ FFT-size下，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，為目前OFDMA實體層所使用的參數。

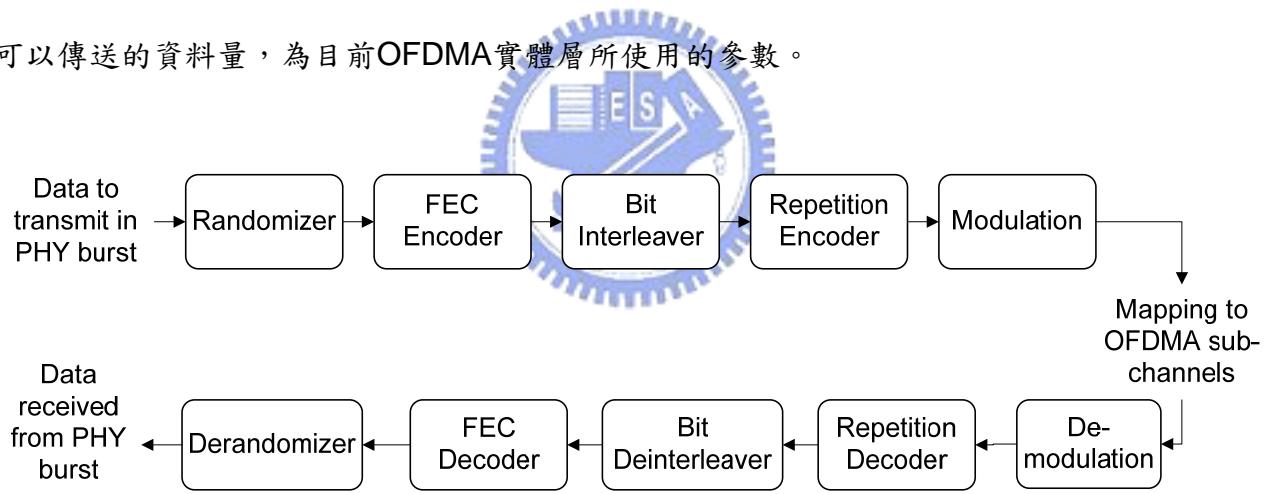


圖 2-13 實體層傳送與接收的調變與編碼流程

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 2-7 不同 FEC 下的單位 slot 傳輸量

2.3.3. 二段式穿透式中繼台網路訊框架構

Slot 為 OFDMA 實體層配置資料單元的最小單位，由時間軸上的 OFDMA symbol 個數與頻率軸上的子通道 (sub-channel) 所組成，且根據所使用的排列區帶 (Permutation zone) 的不同，每一個 slot 於上行和下行所佔用的 symbol 個數亦不一樣。例如，在 PUSC 排列區帶下，下行訊框單位 slot 由兩個 symbols 與一個子通道所構成，而上行訊框單位 slot 由三個 symbols 與一個子通道所構成。

為了支援多段轉傳的功能，在 IEEE 802.16j 規格中重新訂定了基地台的訊框架構，並且新增對於中繼台的訊框架構，用戶端方面的訊框架構則根據基地台的排程僅能在規定的區段進行傳送和接收資料。在規格中根據中繼台型式與所支援的多段轉傳 hop count 個數的不同訊框設計的架構也會不同，我們在此僅針對二段式穿透式中繼台網路的訊框設計架構進行說明。如同原本 Mobile WiMAX 的訊框架構，訊框的分配是採用分時多工方式進行，每個訊框由下行子訊框和上行子訊框所構成，根據傳送端與接收端的不同，訊框區間又被區分成多個不同的地帶 (zone)。在二段式穿透式中繼台網路拓樸中，下行子訊框包含兩個地帶，分別為下行存取地帶 (DL access zone) 與下行穿透地帶 (DL transparent zone)；上行子訊框亦被分割成兩個地帶，由上行存取地帶 (UL access zone) 與上行轉送地帶 (UL

relay zone)組成。圖 2-14、2-15，分別代表在二段式穿透式中繼台網路拓樸下，基地台與中繼台於 TDD 模式下的訊框架構。其中下行存取地帶為基地台分配用來傳送下行資料至用戶端或透過中繼台轉傳的資料至中繼台的時間區段，下行穿透地帶為中繼台傳送須轉傳資料至用戶端的時間區段；上行存取地帶是配置給用戶端傳送上行資料至基地台或中繼台的時間區段，上行轉送地帶則為中繼台將需轉送的用戶端資料傳送到基地台的時間區段。

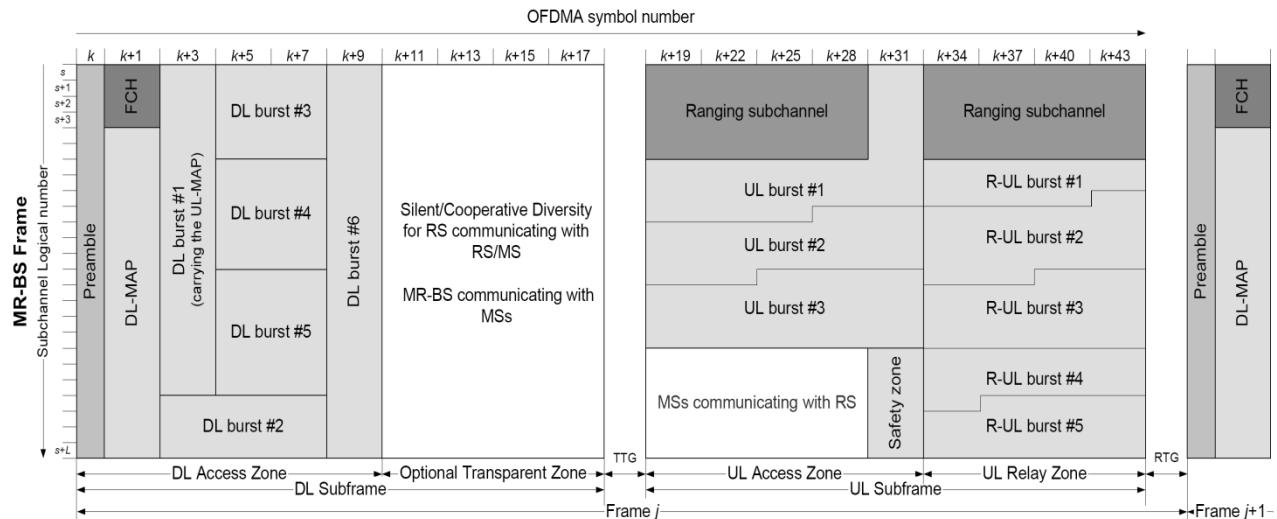


圖 2-14 二段式穿透式網路下 MR-BS 訊框架構

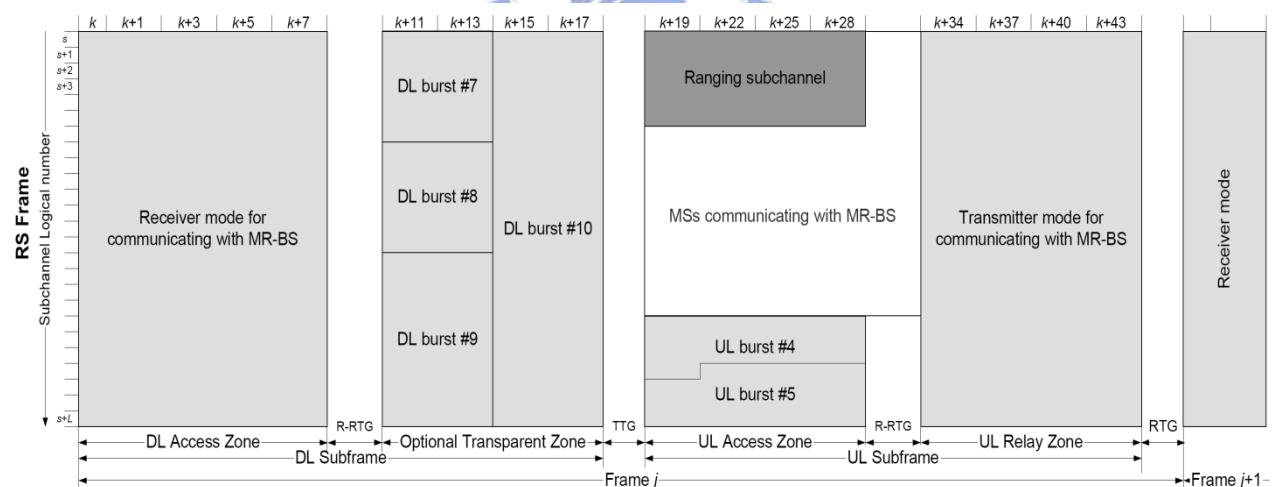


圖 2-15 二段式穿透式網路下 RS 訊框架構

在基地台的下行存取地帶包含一個前置符號 (Preamble)用來進行基地台、中繼台與用戶端間的時序同步；緊接著由訊框控制標頭 (FCH)和 DL-MAP 所組成，FCH 使用 QPSK1/2 通道編碼調變方式並儲存 DLFP 訊息，記錄其後的 DL-MAP 所使用的調變技術和訊息長度，提供中繼台與用戶端對 DL-MAP 進行通道解碼取得下行子訊框中存取地帶和穿透地帶的

burst 配置方式。DL-MAP 訊息裡儲存的是下行存取地帶中 burst 的配置狀況，包含其佔用的子通道個數、symbol 持續時間及其所使用的調變編碼技術，在中控型穿透式網路拓樸下，當下行子訊框中存在下行穿透地帶時，在 DL-MAP 訊息中會儲存中繼台於下行穿透地帶轉送資料的 burst 所使用的編碼和調變方式，提供用戶端對下行穿透地帶所傳送的資料進行解碼分析。下行存取地帶的最後區段為免競爭區段包含由不同調變和編碼技術所組成的 burst，每一個 burst 中由媒體控制層所封裝 PDUs 所組成，包含傳送至用戶端和必須經由中繼台所轉送的管理訊息和上層所傳輸的封包，其中由基地台所傳輸的重要廣播 (UL-MAP、DCD、UCD 等) 訊息會使用抗雜訊最好的調變技術和編碼方式在第一個 burst 進行傳輸，避免中繼台和用戶端因為資料錯誤或遺失而造成通訊中斷。下行穿透地帶主要是配置予中繼台進行下行傳送資料轉送的傳輸區段，當基地台沒有任何資料須透過中繼台進行轉傳的時候，此區段有可能不存在，此時基地台可以使用整個下行子訊框進行資料傳輸。當基地台必須透過中繼台傳送資料至用戶端時，基地台必須在 DL-MAP 的 STC_DL_ZONE_IE() 管理訊息中指示此訊框中包含下行穿透地帶的配置，當用戶端接收到後中繼台所轉送下來的 burst 後，根據 DL-MAP 訊息中的下行穿透地帶的 burst 配置方式對中繼台傳送的資料進行分析，且在單一全向性天線機制下的基地台於此地帶不能進行資料傳輸，避免造成用戶端的資料受到干擾或遺失。

上行存取地帶為用戶端傳送上行資料至基地台或中繼台，在此區段中包含一段特定的競爭子通道，用來提供給用戶端進行初始測距、定期測距、頻寬請求及換手測距等項目與中繼台進行初始測距，中繼台和用戶端在此競爭頻道上進行測距有可能發生碰撞，當發生碰撞時，必須以二元倒退法在接下來的訊框中等待傳送的機會。基地台會在 UL-MAP 中夾帶用戶端於上行存取地帶傳送資料的時機和中繼台於上行轉送地帶進行資料轉送的區段，當用戶端於下行訊框中收到 UL-MAP 之後，再於基地台所配置的子通道上進行傳輸。中繼台於上行存取地帶不能進行資料傳輸。最後一個地帶為上行轉送地帶，此地帶為基地台配置予中繼台進行用戶端上行資料的轉送的區段，當中繼台於 UL-MAP 中收到基地台所配置的時間區段時，將會在上行轉送地帶傳送用戶端的資料至基地台，除此之外，於此地帶中

亦包含一段測距子通道，為基地台分配提供中繼台進行定期測距、頻寬請求及換手測距的競爭頻道。



Chaper 3. 設計與實作

在本章一開始我們會先介紹 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 802.16j 中控型穿透式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，我們將詳細說明各協定模組的設計與實作方法，包括媒體存取控制層與實體層的設計實作概念。

3.1. NCTUns 網路模擬器平台設計與模組架構

NCTUns 網路模擬器主要由模擬引擎、協定模組化設計架構與圖形化介面三個部分所構成。模擬引擎為 NCTUns 網路模擬器的主要核心部分，其功能為進行網路模擬中模擬事件的建立、排程與執行、計時器的管理與網路封包的組成等，除了上述基本功能外，在模擬引擎中還支援特定的 API，作為在模擬器上實作網路協定模組的使用者與 UNIX 系統核心進行溝通的介面。在 NCTUns 模擬器上提供協定模組化設計，不同的網路協定可以經由連結多個模組所構成，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，為了方便使用者在模擬器上規劃網路拓樸，在 NCTUns 網路模擬器上支援圖形化的操作介面，使用者透過此介面可以很容易設定網路拓樸上的網路節點，包括模擬環境及各模組細部的參數等，並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。

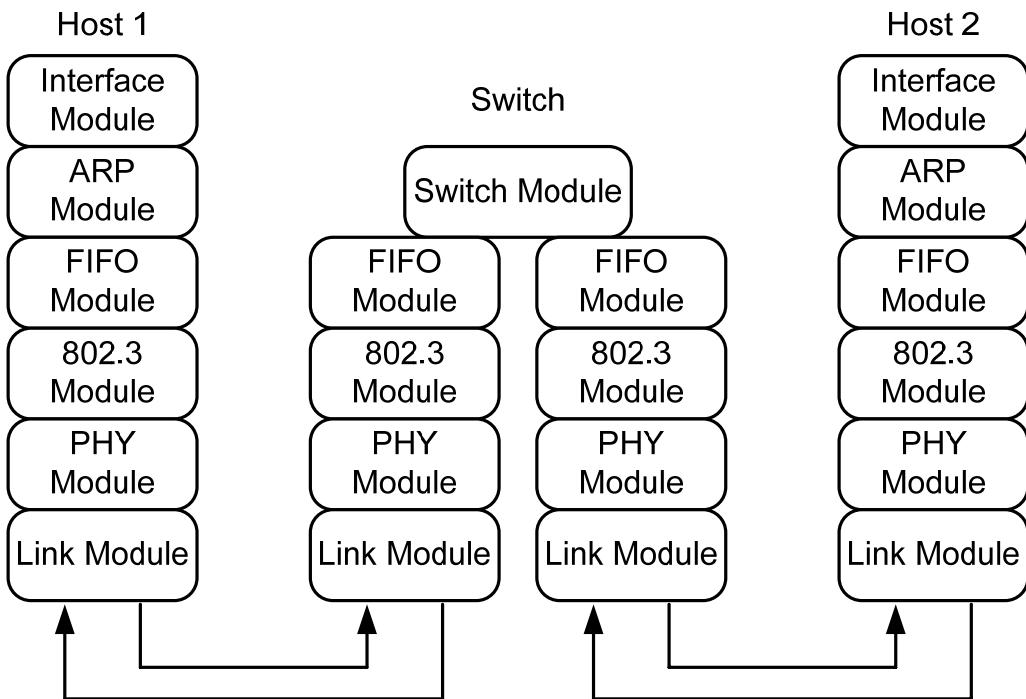


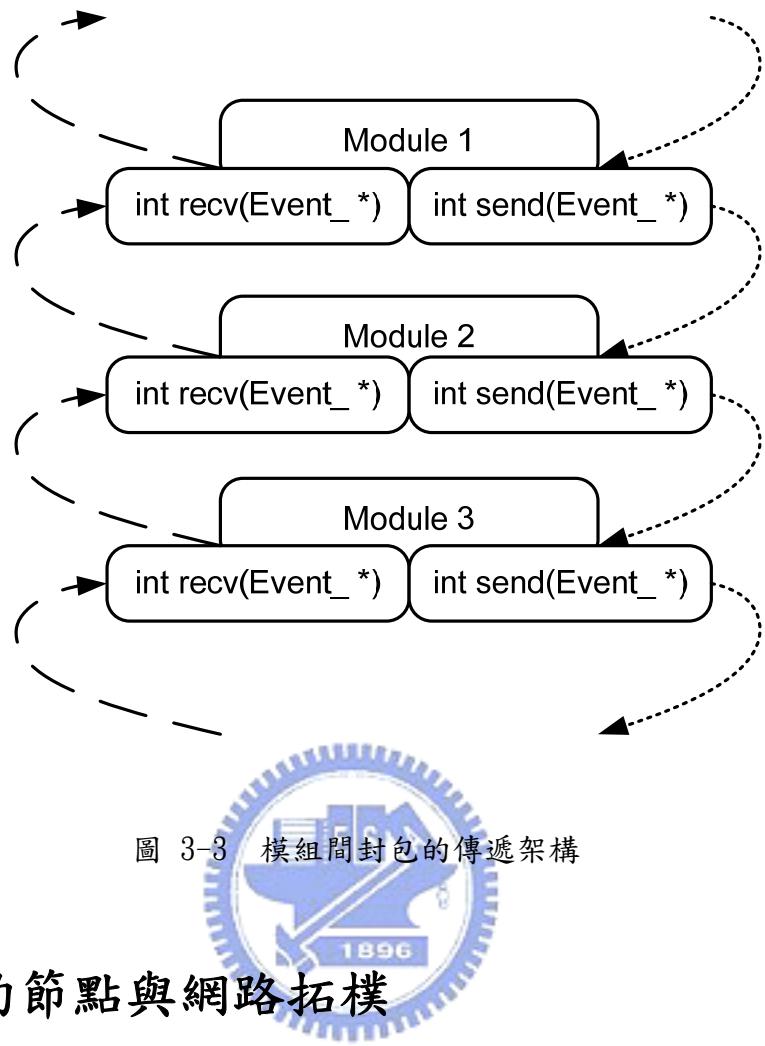
圖 3-1 NCTUns 裡的模組堆疊架構

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

圖 3-2 為 NCTUns 網路模擬器中所提供之一個最基本的 NsIObject 類別，在模擬中的所實作的模組都必須繼承這個類別，在此類別最重要的兩個函式為 send() 與 recv()，所有在模組間傳送的封包都會被封裝的事件封包經由此兩個函式在模組間進行遞送。在 NCTUns 網路模擬器中，一個節點是由一連串的模組所組成，當一個節點接收到從其他節點所傳送過來的封包時，在協定堆疊最下層模組會呼叫 recv() 函式來處理所接收到的封包，並且根據封包的特性呼叫模組中的函式處理或往上層模組遞送，當封包必須往上層模組傳送時，類別中的成員函式 put() 會被呼叫並且將指定的封包交由上層模組的 recv() 進行處理。在類別中的成員函式 send() 則是與 recv() 函式的作用相反，當一個節點有封包需要往其他節點遞送時，此時，send() 函式會被呼叫，並且由下層模組呼叫 send() 來接收由上層所遞送的封包，依序直到封包由最下層模組傳送至其他節點。圖 3-3 所呈現的是在 NCTUns 網路模擬器裡，同一節點中的各模組間傳送與接收封包的示意圖。



3.2. 支援的節點與網路拓樸

本篇論文主要模擬實作的網路為中控型穿透式中繼台 WiMAX 網路，我們在 NCTUns 模擬器平台上新增了三種新的節點，分別為 802.16j 穿透式基地台 (MR-BS, Multi-hop Relay-Base Station in Transparent Mode)、802.16j 固定式穿透式中繼台 (FRS, Fixed Relay Station in Transparent mode) 和 802.16j 的用戶端 (MS, Mobile Station)。如圖 3-4 所示。



圖 3-4 IEEE 802.16j 中控型穿透式中繼台模式支援的節點

在中控型穿透式中繼台網路拓樸下，允許基地台透過有線網路連接骨幹網路提供服務，所以在基地台節點上包含有線介面的協定堆疊與由 802.16j 規格所提供的無線介面協定堆疊，其中無線介面是用來與中繼台和用戶端進行溝通的介面。

中繼台與用戶端節點上，目前僅提供一個無線介面，分別使用 802.16j 中繼台與用戶端的堆疊協定，作為與基地台連線的無線介面。除此之外，當用戶端必須經由中繼台進行資料轉送，也是透過此無線介面進行溝通。在 802.16j 規格中，定義中控型穿透式中繼台網路主要是建置在二段式多段轉傳的樹狀結構網路拓樸下，如圖 3-5，主要是希望藉由中繼台的轉送達成更多的 LOS 的傳輸機會以提升基地台傳輸效能，並且能夠降低建置基地台的所耗費的昂貴成本。

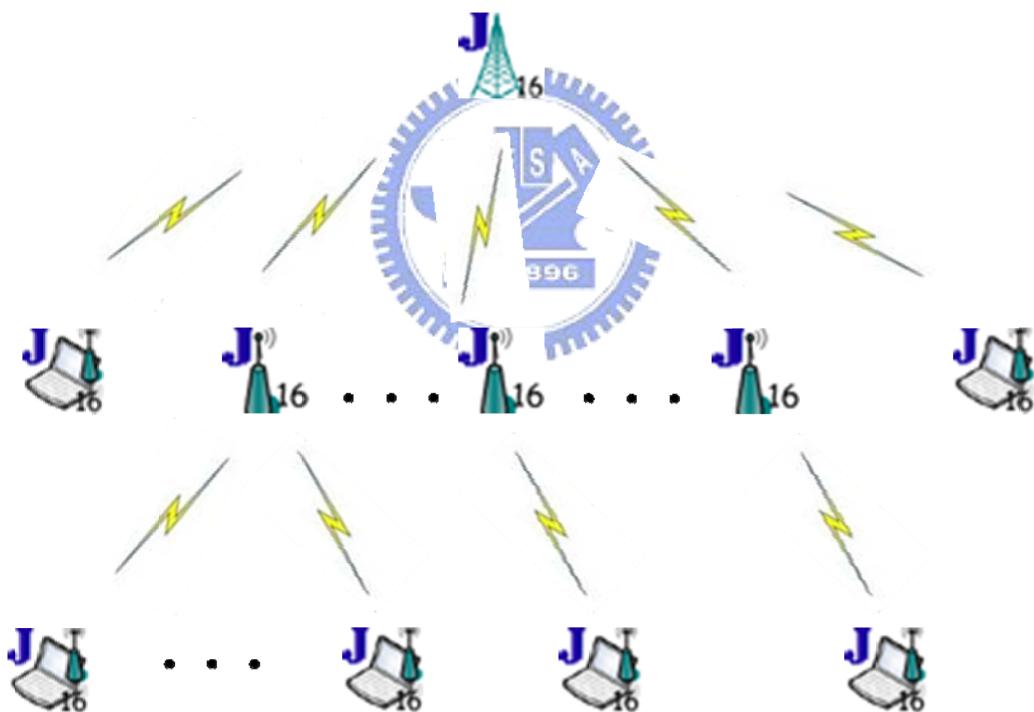


圖 3-5 IEEE 802.16j 二段式中控型穿透式中繼台網路拓樸

目前在 NCTUns 網路模擬器使用的為 IPv4 網路，所以在媒體控制層的收斂子層部分我們僅處理由 IPv4 的網路封包，其他的網路協定封包將由使用者視需求自行開發。IPv4 封包會由媒體控制層收斂子層進行分配，並於通用子層將 PDUs 封裝成 burst 然後再經由實體層的無線介面傳送至空氣介質上。在 802.16j 二段式中控型穿透式網路下，當中繼台接收到基

地台或用戶端傳送的資料時，於媒體控制層的通用子層中分析 PDU 的連線識別碼，決定是否將其儲存至對應的連線識別碼佇列中進行轉送。基地台和用戶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。

3.3. 多段轉傳穿透式網路協定堆疊

IEEE 802.16j 為以 IEEE 802.16e 規格為基礎的點對點模式網路標準協定，為了提供資料傳輸多段轉傳的功能並降低建置基地台之龐大成本，在此規格中，新增了中繼台此項新的設備台。目前在模擬器中，已經支援移動式 WiMAX 網路基地台和用戶端的網路協定，我們將以此為基礎進行 IEEE 802.16j 中控型穿透式中繼台網路協定的實作。圖 3-6 為支援 802.16j 中控型穿透式中繼台網路節點的協定堆疊架構圖。

3.3.1. 802.16j 穿透式網路 MR-BS 節點

在 NCTUns 模擬器中，IEEE 802.16j 基地台所扮演的角色為連接用戶端與骨幹網路的節點用來模擬經由骨幹網路提供網路服務至用戶端的行為。在基地台上包含連接骨幹網路的有線介面協定堆疊與支援 802.16j 中控型基地台的無線介面的網路協定堆疊。目前在模擬器中已經完全支援 802.3 的有線介面模組，所以我們將沿用此有線介面連接骨幹網路，並且實作 802.16j 的無線介面模組。802.3 有線介面協定堆疊由 Interface 模組、ARP 模組、FIFO 模組、802.3 模組、Phy 模組、Link 模組串接組成，用來連接骨幹網路；無線介面協定堆疊則由 Interface 模組、MAC802_16J_PMPBS 模組、OFDMA_PMPBS_MR 模組、CM 模組與 Link 模組所構成，為基地台與中繼台和用戶端之間進行溝通的無線介面。

在 MR-BS 無線介面協定堆疊中，主要實作的模組為 MAC802_16J_PMPBS 與 OFDMA_PMPBS_MR 兩個模組。MAC802_16J_PMPBS 為穿透式網路下中控型基地台的媒體控制層模組，而 OFDMA_PMPBS_MR 則是 MR-BS 實體控制層的模組。另外，為了能夠模擬無線訊號在不同網路環境中衰減的情境，我們在堆疊中加入了 CM (Channel Model) 模組，此模組上包含多種環境參數設定和頻道模式提供使用者進行變換，使用者可以藉由不同

的設定來模擬不同環境下訊號衰減所造成影響。

3.3.2. 802.16j 穿透式中繼台節點

在 IEEE 802.16j 定義兩種型式的中繼台，分別為穿透式中繼台與非穿透式中繼台。此兩種中繼台的協定堆疊均與 IEEE 802.16e 中定義的用戶端的網路協定堆疊類似。本篇論文所實作的中繼台模組為固定式穿透式中繼台。

在 NCTUns 模擬器中，穿透式中繼台節點包含一個無線介面，為中繼台用來與基地台和用戶端進行溝通的介面。中繼台的無線介面與基地台的無線介面的堆疊類似，由 Interface 模組、MAC802_16J_PMPRS 模組、OFDMA_PMPRS_MR 模組、CM 模組與 Link 模組所構成。其中 MAC802_16J_PMPRS 為穿透式中繼台媒體控制層的實作模組，此模組主要實作的功能包含基地台與中繼台之間新訂定的管理訊息交換機制以及經由中繼台進行資料轉送的方式。OFDMA_PMPRS_MR 模組為中繼台實體層的模組，主要的功能為對經由中繼台轉發至基地台或用戶端的資料進行編碼和解碼，再將資料經由無線介面傳送出去。同樣的，中繼台無線介面上亦包含 CM 模組，提供使用者模擬無線訊號衰減和干擾對網路所造成的影响。

3.3.3. 802.16j 用戶端節點

為了相容於 IEEE 802.16e 的用戶端，在 IEEE 802.16j 規格中，對於用戶端於媒體控制層和實體層上僅作最小幅度的增訂。所增訂功能包括中繼台與用戶端媒體控制層之間的管理訊息溝通的機制和實體層模組上多段轉傳的訊框架構。

用戶端節點包含一個無線介面，用來與基地台、中繼台的無線介面進行溝通，由 Interface 模組、MAC802_16J_PMPMS 模組、OFDMA_PMPMS_MR 模組、CM 模組與 Link 模所構成。為了提供多段轉傳的功能，在 IEEE 802.16j 規格中，新增中繼台與用戶端之間媒體控制層管理訊息的訂定，MAC802_16J_PMPMS 模組為在穿透式網路下對於用戶端的媒體控制層的實作模組。OFDMA_PMPMS_MR 則為穿透式網路下用戶端實體層模組的實作。用戶端無線介面上亦包含 CM 模組，提供使用者模擬無線訊號衰減和干擾所造成的影响。

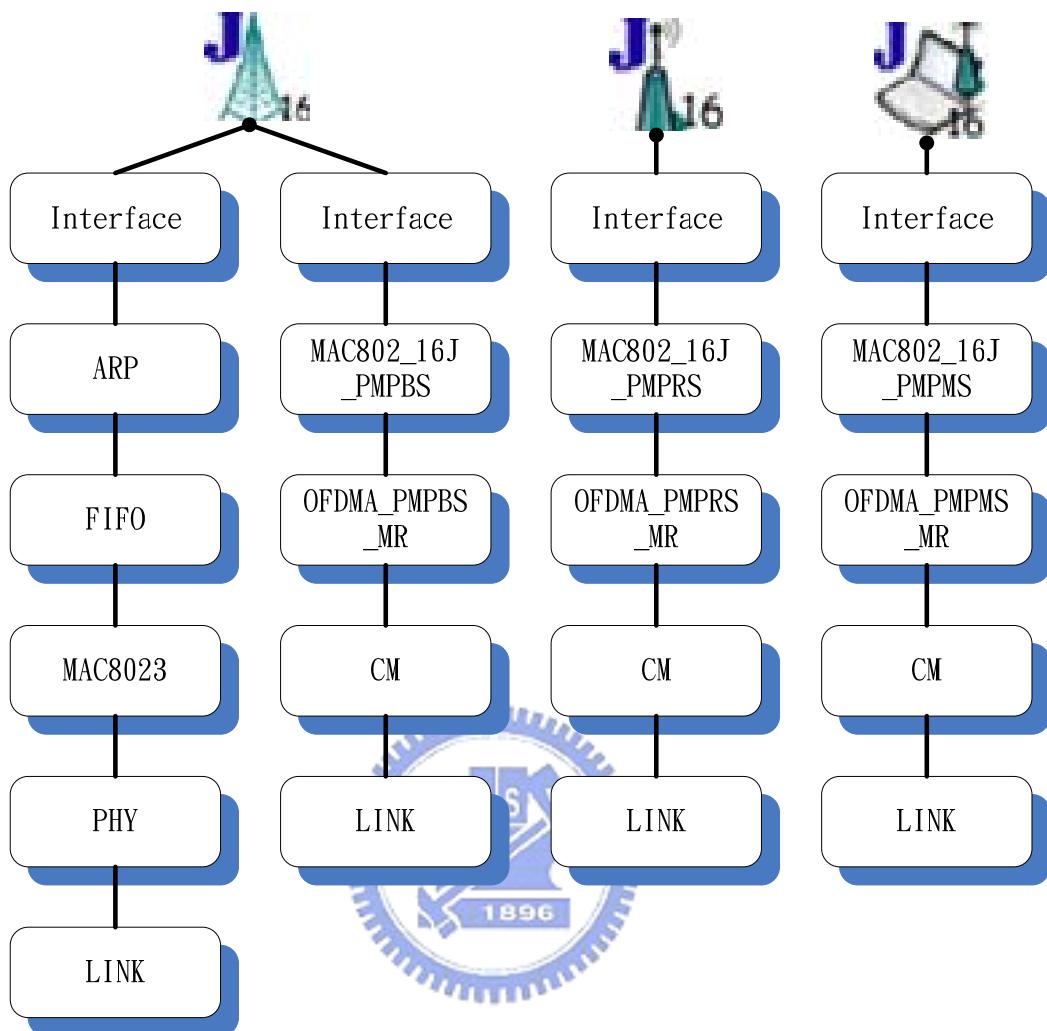


圖 3-6 穿透式網路下節點網路協定堆疊

3.4. IEEE 802.16j 中控型穿透式網路模組設計與實作

IEEE 802.16j 為以 IEEE 802.16e PMP 模式移動式 WiMAX 為基礎增訂多段轉傳功能的規格，為了增進基地台傳輸效能並且延伸訊號涵蓋範圍與減少建置基地台所需要的昂貴成本，在此規格中制定中繼台此一新的設備。在規格之中，根據網路建置的目的將中繼台的種類分為兩種模式，分別為穿透式中繼台與非穿透式中繼台；前者主要是建置在二段式 (two -hops) 多段轉傳 WiMAX 網路拓樸下，透過中繼台增進 LOS 的傳輸機會以提升基地台傳輸效能，此種類型中繼台不會轉送由基地台所廣播的訊框控制訊息至用戶端，建置在此種穿透式中繼台網路拓樸下的用戶端必須在基地台訊號傳送涵蓋範圍之下，所以並無法延伸基地台訊號傳輸

距離僅能藉由中繼台的轉送提升訊號的品質使得整體的效能獲得提升。非穿透式中繼台則是建構在多段轉傳 hop count 個數為二以上的網路拓樸，由於非穿透式中繼台能夠自行廣播或轉送由基地台所發送的廣播訊息至其下位的中繼台與用戶端，在非穿透式中繼台網路拓樸下的用戶端可能在基地台的涵蓋範圍之外，建置在此種中繼台下的基地台可以藉由非穿透式中繼台的佈建達到提升基地台多段轉傳資料的能力並且提升基地台所能提供服務的涵蓋範圍。

除了中繼台被區分成兩種模式之外，在 IEEE 802.16j 中，為了降低基地台設計的複雜度，又將基地台資源配置排程的方法分為中控型和分散型排程兩種。在中控型基地台排程網路中，所有的資源調配統一由基地台進行管理，在此種排程方式下，隨著基地台所服務的中繼台與用戶端個數增加會造成基地台設計的複雜度變大。為了降低基地台設計的複雜度，在規格中又另外訂定了分散型排程，在此種排程下的基地台會將資源管控的權力賦予網路拓樸中的中繼台，中繼台根據基地台配置的頻寬對於所管理的中繼台與用戶端再進行分散式的頻寬配置，由於此種中繼台必須具有廣播管理訊息的能力，所以在分散式排程中的進行資源分派的中繼台必須是非穿透式中繼台。

基於上述基地台的排程方式與中繼台的類型，在 802.16j 規格中定義了兩種多段轉傳網路設計方式，如表 3-1。其中，中控型排程基地台搭配穿透式中繼台主要是建置二段式網路拓樸下，目的為提升基地台的傳輸效能；非穿透式中繼台則可以搭配中控式或分散式的基地台排程方式，並且提供轉傳個數大於二以上的網路拓樸，目的為延伸基地台訊號的涵蓋範圍，降低偏遠地區建置基地台所需的昂貴成本。本篇論文所實作的 WiMAX 多段轉傳網路主要是針對中控式排程的基地台搭配穿透式中繼台進行設計。

中繼台類型	穿透式中繼台	非穿透式中繼台
MR-BS 排程方式	中控式排程	中控式/分散式排程
Hop count 個數	2	2 或 2 以上
PDU 遞送方式	CID-based	CID-based/Tunnel-based

表 3-1 IEEE 802.16j 網路系統設計選擇

3.4.1. 媒體存取控制層模組的設計

媒體控制層為 WiMAX 網路系統的核心，包含入網程序、頻寬配置、訊框排程、連線識別碼管理與控制、換手機制等重要機制，為了支援多段轉傳的功能，在 IEEE 802.16j 中，增訂了中繼台的入網程序、中繼台的換手機制、MAC PDU 的遞送方式、路徑選擇與路由管理等中繼台於媒體控制層所必需遵循的機制。由於本篇論文主要是著重中控型基地台下穿透式中繼台網路的設計與實作，所以在此我們只針對規格中此種網路型態的所增訂的基本功能且必須設計與實作的項目進行介紹。

在 WiMAX 網路下，基地台扮演著網路頻寬資源配置的重要角色，所有欲加入網路的中繼台或用戶端都必須藉由入網程序向基地台請求提供服務。基地台透過廣播的管理訊息(DL-MAP、UL-MAP、DCD、UCD...等)告知中繼台與用戶端由基地台所提供的上、下行資源配置情形與網路服務參數，當中繼台或用戶端與基地台完成同步並且能夠正確的收到基地台所廣播的管理控制訊息後，再於基地台所指定的競爭測距頻道上進行入網的程序。在規格中包含幾個選擇性實作項目的入網程序步驟，包括：IP 位址的分配與取得、金鑰交換與加密、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，所以在我們的模組設計中將不實作這些項目。除了上述有共通性的選擇程序外，中繼台進行入網程序中的取得鄰近設備台的訊號量測、執行第二階段存取台的選取、路徑與通道的建立也是選擇性實作的項目，此三個步驟主要是為了提供在非穿透式中繼台網路拓樸下進行入網程序的中繼台能夠選擇更適合的中繼台作為存取台並且建立多段轉傳的路徑拓樸所進行的步驟，在我們所將實作的二段式穿透式中繼台網路拓樸裡，中繼台進行入網程序時所選擇的存取台必定為基地台，所以在目前穿透式中繼台進行入網程序流程中我們將不會進行實作。以下，我們將分別根據中繼台與用戶端的入網程序的不同以及如何在我們的模組中實作進行說明。

首先，我們先說明用戶端的入網程序設計方式。當用戶端正確取得基地台所廣播的管理訊息完成同步後，經由分析基地台所封裝的 UL-MAP 管理訊息，可以取得基地台所分配的測距子通道使用區段，此時，用戶端會選定一組 CDMA 測距碼並且於此競爭頻道上進行傳送，

除了基地台必須處理用戶端進行入網程序所發送的初始測距碼外，在基地台服務下的中繼台也必須監聽在測距子通道上用戶端發送的初始測距碼，當中繼台接收到用戶端所發送的測距碼後，在根據經由中繼台所需調整的時序以及傳送功率等資訊封裝成 MR_RNG-REP 管理訊息傳送給基地台，在目前的設計中，基地台會於接收到中繼台所傳送的 MR_RNG-REP 訊息中取得 MS/RS 與 RS/MR-BS 間所使用的調變編碼方式，用來在基地台上進行用戶端最佳傳送路徑的決策。在多段轉傳 WiMAX 網路中，基地台必須在用戶端進行入網程序時，選擇用戶端的存取台並且決定用戶端傳送資料所使用的路徑，所以當基地台收到由用戶端所發送的測距碼或是中繼台所傳送的 MR_RNG-REP 時，基地台會啟動一個 T60 timer 來等待一段時間，收集所有經由中繼台傳送過來的 MR_RNG-REP 管理訊息，當 T60 timer 期滿後，基地台再經由收集的 MR_RNG-REP 與用戶端直接傳送的 CDMA 初始測距碼來決定用戶端的最佳傳輸路徑。若基地台選擇以中繼台作為用戶端的存取台，基地台必須傳送 RS_Member_List_Update 管理訊息至中繼台，在中繼台上建立此用戶端所使用的管理與資料連線的佇列，且用戶端入網程序的管理訊息傳送都必須透過中繼台進行轉發，直到整個入網程序結束。除此之外，當用戶端進行定期測距流程時，基地台和中繼台也必須執行一樣的程序來使得用戶端在移動式 WiMAX 網路下能夠維持最佳的傳輸入徑與效能。當用戶端順利完成入網程序後會與基地台之間建立兩組基本的管理控制連線，分別為 Basic CID 和 Primary CID 連線，此兩組連線是用來進行管理訊息的交換；除了用來管理連線外，基地台與用戶端之間還會建立一條用來傳輸上層資料的資料連線。

在目前穿透式中繼台的入網程序設計方面，基本上中繼台所進行的入網程序所執行的步驟與用戶端相去不遠，最主要的差異為在中繼台的入網程序步驟中所包含的兩個階段存取台選取的階段，其中第二階段的存取台選取，在穿透式網路下，我們將不會進行實作，原因如先前所敘述過。在目前的穿透式二段式網路拓樸設計下，中繼台只會進行入網程序中的第一階段存取台選取的步驟，基地台會在定期廣播的 DCD 管理訊息中包含 End-to-End Metric，此值會記錄以基地台為根節點的樹狀網路拓樸至目前廣播 DCD 管理訊息的節點所需的 hop count 個數，中繼台會以最小 hop count 個數來決定第一階段的存取台選取，由於穿透式中

繼台網路僅支援二段式轉傳，且穿透式中繼台並不會傳送廣播管理訊息，所以中繼台所選取的存取台必定為 MR-BS。當中繼台順利與所選取的存取台完成入網程序後，與基地台之間也會建立 Basic CID 和 Primary CID 兩組管理控制連線，用來進行基地台與中繼台間的管理訊息交換，由於中繼台只負責轉送基地台與用戶端的資料，所以在中繼台上並不會建立上層的資料連線。

除了上述用戶端與中繼台所建立用來傳送管理訊息與上層資料的連線外，在設計中還包括兩組特別的連線識別碼，分別為 Broadcast CID 和 Initial Ranging CID；Broadcast CID 連線為基地台用來廣播重要的管理訊息提供中繼台和用戶端進行入網程序與分析基地台所傳輸的 burst 資料，Initial Ranging CID 連線則是提供中繼台與用戶端在尚未與基地台建立連線前進行初始測距時傳送 CDMA 測距碼給基地所使用的連線。

IEEE 802.16 的媒體控制層由收斂子層、通用子層與安全子層三個子層組成，在目前實作設計上，由於我們暫時不考慮金鑰加密、解密的功能，所以我們只針對收斂子層與通用子層進行設計。收斂子層最主要的功能為將上層所傳送下來的資料封包進行分類，並且放進到對應的連線佇列中等待基地台排程器進行排程，在目前的設計中，當收斂子層接收到由上層所傳送的封包時，會呼叫 DownlinkClassifier() 函式，以封包目的地 IP 位址作為分類的依據，將封包分配至對應的連線佇列中。通用子層再將各連線佇列的封包加上 Generic MAC Header 封裝成 IEEE 802.16 規格中媒體控制層傳輸的最小傳送單位 (PDU)，我們在媒體控制層所封裝的 PDU 上加入了在規格中選擇性實作的 CRC 封包錯誤檢查機制，此機制是根據一雜湊函數計算出數據封包在傳送端與接收端的固定值來比對封包的正確性，雖然在目前 OFDMA 實體層的設計有包含 FEC (Forwarding Error Correction) 機制，但是封包還是有可能在傳送的過程中發生錯誤，所以在媒體控制層上加入 CRC 機制可以進一步的來檢查封包的正確性。

在 WiMAX 網路中，基地台必須對所有的下位中繼台和用戶端傳輸下行和上行的資料進行排程管理，有別於在 IEEE 802.16e 中，基地台將資料訊框切割成下行子訊框區間和上行子訊框區間，在二段式中控型穿透式網路中，為了支援多段轉傳的功能，子訊框又被各別切

割成兩個不同的地帶，其中下行子訊框由下行存取地帶與下行穿透地帶組成分別為基地台傳送下行資料給用戶端的區間與中繼台進行下行資料轉送的區間；而上行子訊框由上行存取地帶與上行轉送地帶所構成，前者為用戶端傳送上行資料的區間，後者則是中繼台進行上行資料轉送的區間。雖然在 IEEE 802.16 規格中共定義了五種 QoS 層級 (UGS、rtPS、ertPS、nrtPS、BE)，但在我們目前的實作中，僅支援類似 UGS (Unsolicited Grant Service) 的作法，用戶端與中繼台無須經由頻寬請求的方式來取得傳輸機會，而是經由基地台讀取用戶端預先設定好的 QoS 參數表來主動計算所必須給予頻寬。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。以下為目前在設計中對於訊框資源配置的方式，下行子訊框方面的排程是在每個訊框一開始時，由基地台進行下行區間資料傳送地帶的進行安排，此部分排程是透過排程器來進行安排，基地台與中繼台會按照排程器所配置的時間在各自的下行地帶傳輸給用戶端的資料，我們將會在下一小節中對於排程器的設計有詳細的介紹。在上行資料傳送設計方面，分成上行存取地帶與上行轉送地帶兩個區間；在上行存取地帶排程設計方面，為了避免資料碰撞，並且使得基地台能夠在訊框排程時計算出用戶端可以獲取多少上行頻寬的使用資源，用戶端上行區間的分配是採用固定配給的方式，在基地台管轄下的用戶端都擁有一組事先設定好的 QoS 參數集，當基地台在分配上行存取地帶頻寬配置時，會考慮每一個用戶端上行 QoS 的需求，根據用戶端所使用的調變編碼方式將用戶端所需的上行頻寬換算成所需 slots 個數，在這邊用戶端所使用來計算上行頻寬所佔用的 slot 個數的調變編碼方式必須取決於用戶端是直接傳送資料至基地台或者是經由中繼台來轉送上行資料，基地台根據所計算的 slot 個數於上行存取地帶中配置足夠的資源給用戶端，也就是在基地台在進行訊框排程時會在每個訊框區間裡都會分配固定的頻寬給同一個用戶端。在上行轉送地帶排程設計方面，如同上行存取地帶的頻寬配置方法，基地台會根據中繼台上所管控的用戶端個數並且依據用戶端所預先設定好的 QoS 參數集搭配中繼台所使用的調變編碼技術來計算出中繼台在上行轉送地帶所必須佔用的 slot 個數，所以基地台會在每一個訊框中配給固定的頻寬給中繼台轉送用戶端的資料。

除了上述用來傳送資料的免競爭區段外，在上行存取地帶與上行轉送地帶中還會各自包含一段競爭子通道，其中上行存取地帶上的競爭子通道為基地台提供給用戶端進行所有測距和中繼台進行初始測距使用，上行轉送地帶的競爭子通道則是提供給中繼台進行定期測距、頻寬請求測距和換手測距時使用，此測距子通道屬於競爭區間，主要是做為中繼台與用戶端傳送測距碼給基地台所使用的區段，測距碼是使用分碼多工特性的特殊編碼，以 PRBS 產生器來產生，基地台可以根據 CDMA 的特性區分出此段測距碼是由用戶端或中繼台所發送，在此區段上傳送的資料有可能會發生碰撞。由於在模擬平台下，並無法真實呈現分碼多工的效果，我們將沿用目前在 IEEE 802.16e 網路下，賴政凱學長對於競爭頻道區間所設計的方式，中繼台與用戶端所用來進行初始測距的 CDMA 測距碼分別屬於兩個不同的區段，基地台會比對在同時間同頻率下所收集到的中繼台與用戶端的 CDMA 測距碼，若存在相同的測距碼時，表示發生資料碰撞，此時基地台將會捨棄此兩組測距碼。

在換手機制設計上，由於在目前的 IEEE 802.16j 標準草案中對於中繼台的換手機制並沒有很詳盡的介紹，而且中繼台的換手機制上還存在很多議題，關於中繼台方面的換手機制我們將留在未來規格正式出版後在進行補足，目前我們僅支援規格中必須支援用戶端的硬式換手機制。用戶端在進行換手程序前，必須透過骨幹網路或進行鄰近頻道掃描來取得鄰近基地台的資訊，藉由收集到的資訊來進行換手決策，在目前平台設計上，我們將網路拓樸中基地台的資訊記錄在檔案裡，各基地台在模擬一開始就會經由讀取檔案來獲取鄰近基地台的資訊，藉此來達成模擬基地台從骨幹網路取得鄰近基地台的資訊。提供連線服務的基地台必須將鄰近基地台的資訊，藉由 MOB_NBR_ADV 廣播訊息傳送給在其服務範圍下的中繼台和用戶端，提供其判斷是否滿足換手決策並進行換手來獲得更好的訊號品質與傳輸效能。進行換手決策的主動權可以是基地台或是用戶端，在目前設計下，換手決策的進行是由用戶端所提出，當用戶端發現鄰近的基地台可以提供較好的訊號品質時，用戶端會向基地台提出換手請求，開始執行換手程序，在 IEEE 802.16j 規格中，由於在多段轉傳樹狀網路拓樸下，用戶端的存取台可能為基地台或中繼台，在規格中規定用戶端換手的程序必須由基地台控制，包括路徑重新規劃和 QoS 重新分配等，所以當用戶端向基地台提出換手請求後，基地台必須對指定的中

繼台發送 RS_Member_List_Update 來重新規劃用戶端的傳輸路徑，若基地台發現提出換手請求的用戶端為以中繼台作為存取台時，基地台必須在用戶端進行換手程序或 Resource retain time 期滿後，對指定的中繼台傳送 MOB_INFO_DEL 清除中繼台上用戶端的連線資訊。由於在 NCTUns 模擬器上網路節點的 IP 配置是在規劃網路拓樸時就已經由模擬器鎖自動產生所給定，為了支援行動用戶端在不同的 IP domain 下於基地間換手機制能夠正常運作，在先前的移動式 WiMAX 網路設計中引入了 Mobile IP 的機制，我們將在穿透式網路沿用此種設計機制。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基地台上執行 Mobile IP Agent Daemon，並在用戶端上執行 Mobile Node Daemon，這些應用程式即可透過 WiMAX 網路進行溝通。其中，Agent Daemon 負責監控目前基地台下所服務的用戶端有哪些，Mobile Node Daemon 則是隨時回報目前位置，供 Agent Daemon 了解目前用戶端的狀態。當用戶端進行換手程序並加入其他基地台所服務的網路時，原本服務該用戶端的基地台上的 Agent Daemon 將會與此用戶端失去聯繫，而換手後的基地台上的 Agent Daemon 則會偵測到有一新的用戶端重新進行入網程序；此時，兩個基地台之間的 Agent Daemon 會透過骨幹網路來交換用戶端已換手訊息，而未來送給該用戶端的資料都必須從原基地台轉向新的基地台。如此一來，用戶端即使已經在不同的基地台（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 802.16j 模組在媒體存取控制層為了在支援在穿透式網路下提供多段轉傳功能所支援的重要機制；在以下三個小節，我們將分別針對基地台、中繼台和用戶端個別的媒體存取控制層設計進行說明。

3.4.1.1. MR-BS 媒體存取控制層的模組設計與實作

在 WiMAX 網路中，當中繼台與用戶端完成入網程序之後，基地台會依據連線識別碼與中繼台與用戶端建立專屬的連線，所以連線識別碼為基地台用來識別中繼台與用戶端的依據，因此對於管理服務下中繼台與用戶端所建立的連線成為基地台相當重要的工作。

為了提供基地台進行中繼台與用戶端的連線識別碼管理，在設計中我們在基地台的物件類別中建立了兩個物件類別 RS object 與 MS object，分別用來儲存基地台所服務的穿透式中繼台與用戶端的連線相關資訊。當中繼台或用戶端順利完成入網程序後，在基地台上會建立一個 RS object 或 MS object 物件，用來儲存基地台所分配給中繼台或用戶端的連線識別碼和管理控制訊息所必須呼叫的函式，當基地台接收到上行資料時，就可以透過比對此物件裡的連線識別碼來執行相對應的動作；除此之外，在 MS object 中必須儲存用戶端所連接的存取台資訊和存取台與用戶端之間所使用調變方式與編碼技術，提供排程器在進行資料傳送時配置用戶端頻寬計算使用。

在目前 WiMAX 網路的設計中，基地台、中繼台與用戶端進行傳送的封包主要分成三種，分別為媒體控制層中使用一般管理連線進行溝通的管理訊息、使用特殊連線進行管理的管理訊息和用來傳送上層資料所建立資料連線。一般管理連線的管理訊息即是各中繼台與用戶端在完成入網程序後與基地台所建立的基本連線，基地台會根據上述儲存在基地台類別中的 RS Object 與 MS Object 來處理此類管理訊息；特殊的管理連線則是指用來傳送廣播訊息的 Broadcast CID 連線與在中繼台與用戶端尚未建立管理連線時用來提供初始測距使用的 Initial CID 連線。最後一種則是經由上層應用層所傳送下來的 IPv4 資料封包，透過基地台封裝成 PDU 透過資料連線在基地台、中繼台與用戶端間進行傳送，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，可能是由基地台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 3-7 呈現在穿透式網路下各物件的傳遞關係。

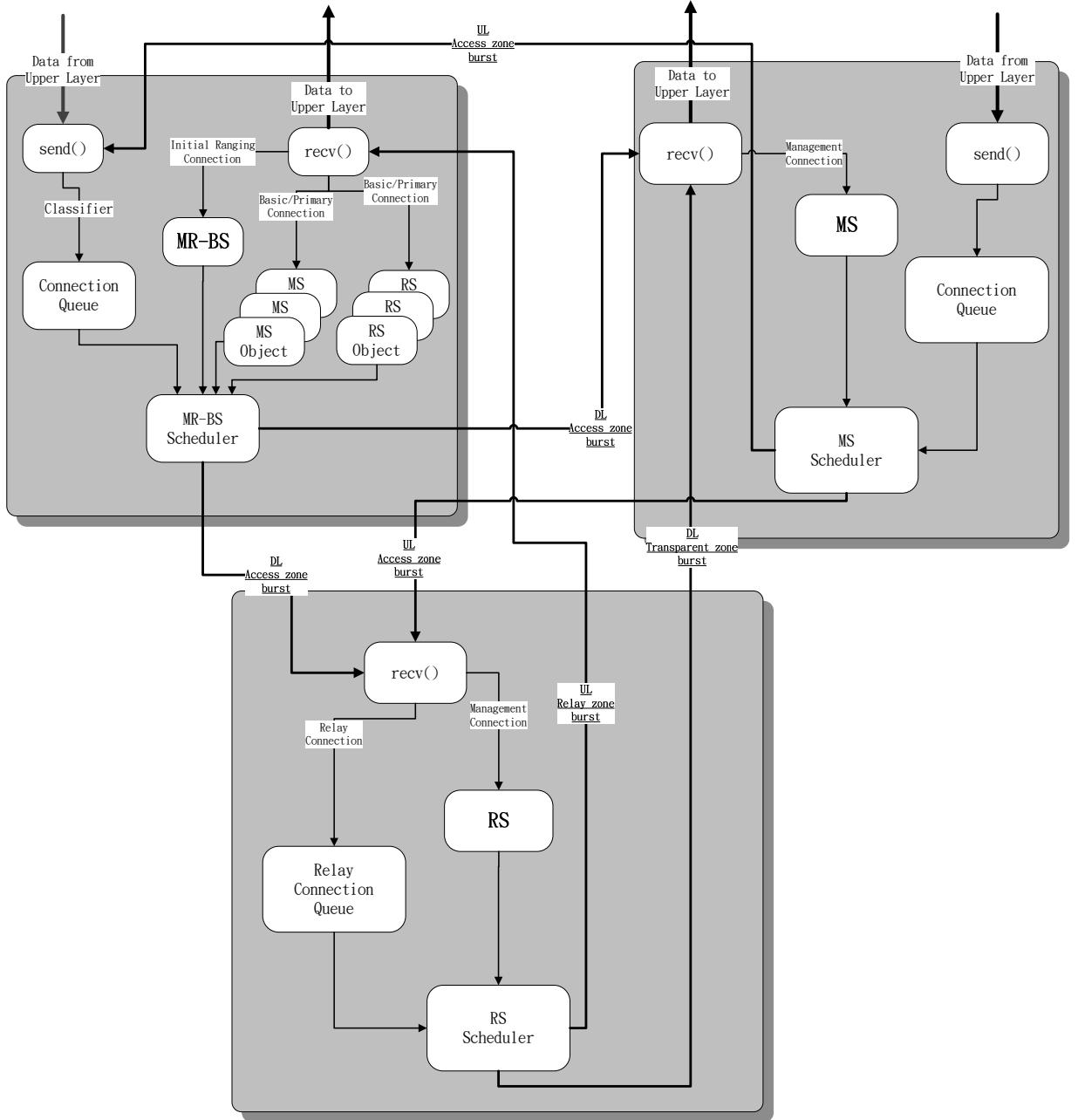


圖 3-7 MR-BS、RS 與 MS 物件間傳遞關係

在穿透式 WiMAX 網路中，資料傳送是統籌由基地台的排程器負責進行管理與排程，為了提供中繼台轉送的功能，原本在 IEEE 802.16e 實體層的單位訊框架構根據傳送地帶被細分成四個區塊，分別為下行存取地帶、下行穿透地帶、上行存取地帶和上行轉送地帶，為了支援此種類型的訊框排程，我們必須對於在基地台於每個訊框進行傳送時，根據下行和上行

資料來對訊框中存取地帶與轉送地帶的大小動態進行調整，以下為我們所設計二段式穿透式中繼台網路下基地台進行資料傳送的排程器設計作法。

在 WiMAX 網路中頻寬配置的方式會根據所使用實體層的不同而不同，因此設計排程器時必須先了解實體層的配置頻寬特性才能進行。IEEE 802.16j 所使用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，基地台在進行資料排程時，必須根據 OFDMA 實體層所使用的 permutation zone 排列方式與頻帶的各項參數特性來進行資料排程，我們將沿用在 NCTUns 模擬器上 IEEE 802.16e OFDMA 實體層所使用的參數設定方式來進行 IEEE 802.16j 穿透式中繼台網路排程器的設計；在 OFDMA 實體層下，頻寬分配是以單位 slot 進行配置，slot 大小是由時間軸的 symbol 個數與空間軸的子通道來組成，根據 permutation zone 不同，單位 slot 的大小也會不同，目前下行子訊框是以 DL-PUSC 的載波排列方式，每個下行單位 slot 由一個子通道和兩個 symbols 所組成，上行子訊框使用 UL-PUSC 載波排列方式，每個上行 slot 由一個子通道與三個 symbols 所組成。表 3-2. 與表 3-3. 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 3-2 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 3-3 UL-PUSC 參數表

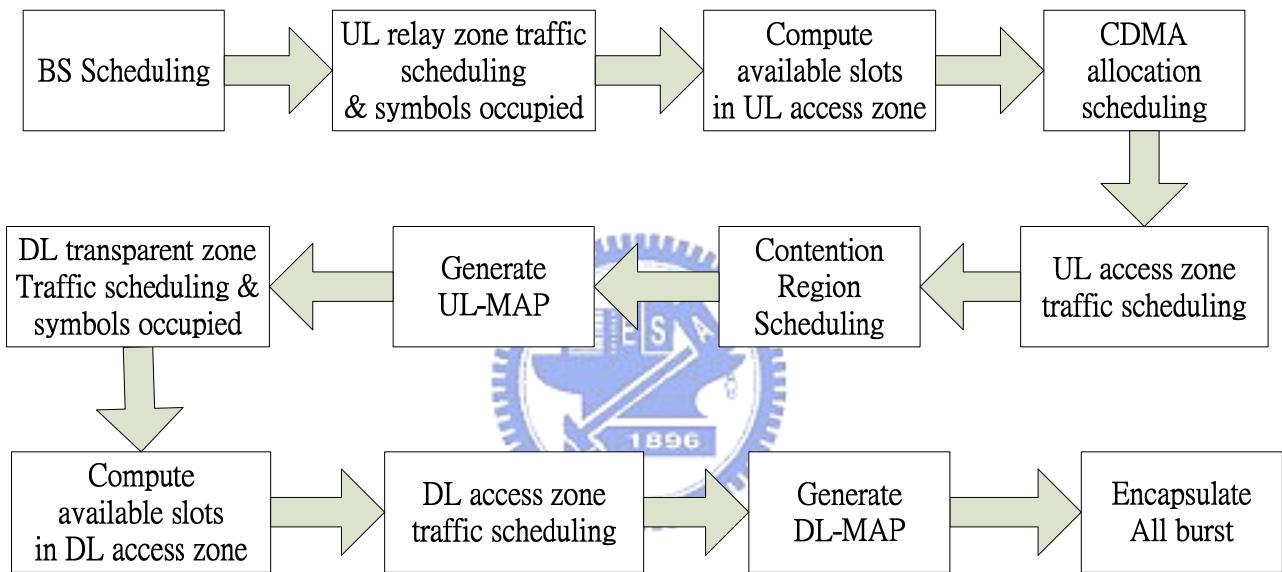
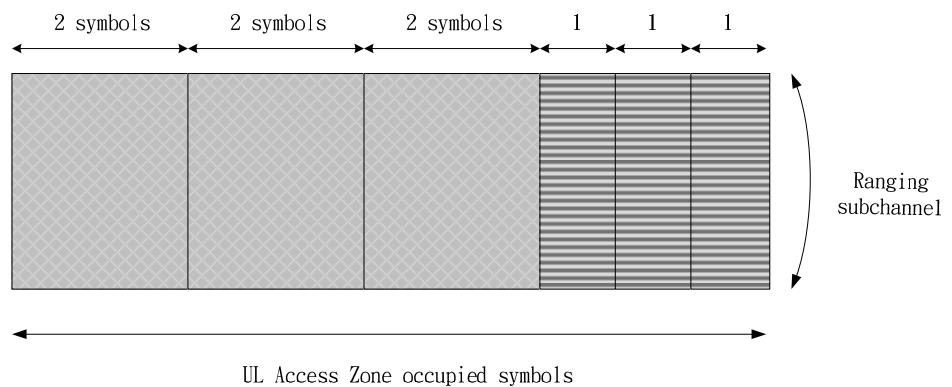


圖 3-8 中控型基地台訊框配置流程圖

圖 3-8 為我們所設計實作的中控型穿透式網路基地台排程器流程圖，在基地台的配置排程器中，在每一訊框傳送開始時會進行資源配置排程。首先，我們會先進行上行轉送地帶的頻寬配置計算，此區段為在基地台服務範圍下的中繼台進行轉送用戶端的上行資料所使用，基地台會檢查所有以中繼台為存取台的用戶端所需要的上行頻寬並且根據中繼台的上行方向所使用的調變方式與編碼方法計算出基地台所需配置給中繼台的 slot 個數，並且計算出上行轉送地帶所佔用的 symbol 個數。根據上行轉送地帶所使用的 symbol 個數，可以計算出上行存取地帶尚有多少 available slots 可以用來進行用戶端上行資料的傳送，在此區域上由競爭

區間和一塊免競爭區間組成，基地台於競爭區間安排一段測距子通道，提供給中繼台進行初始測距和用戶端進行所有種類的測距，圖 3-9 為目前競爭子通道的各測距碼安排方式；免競爭區間則是提供給基地台進行用戶端上行資料傳送的排程，用戶端可以於此區間傳送資料到基地台或是中繼台，基地台經由用戶端所提供的上行 QoS 參數經由其所使用的調變方式與編碼技術來計算出每個用戶端所需佔用的 slot 個數來配給足夠的頻寬，若用戶端是經由中繼台進行資料轉送，在計算此用戶端上行頻寬的需求量則必須使用用戶端至中繼台間的調變方式來取得對應的 slot 個數。當基地台順利完成上行子訊框的安排之後，必須將關於上行轉送地帶與上行存取地帶的 burst 配置資訊封裝至 UL-MAP 中，經由基地台下行存取地帶訊框傳送至中繼台與用戶端，中繼台與用戶端藉由分析 UL-MAP 可以得知上行資料的傳送時機和相關參數。在下行子訊框的排程方面，若存在用戶端必須透過中繼台轉送資料時，此時基地台必須配置下行存取地帶給中繼台進行資料轉送的頻寬配置，基地台會先進行配置下行穿透地帶所必須的頻寬並且計算其佔用的 symbol 個數，此區段為基地台配置予中繼台進行下行資料轉送的區間，基地台在進行此地帶排程時會透過儲存於中繼台上的用戶端管理連線和資料連線進行排程，並且使用中繼台的下行調變方式和編碼技術對所需轉送的連線資料進行配置，為了公平配置下行頻寬，基地台會使用 Round-Robin 方式對中繼台上所有的連線資料進行配置，如圖 3-10，。



: RS Initial Ranging , MS Initial Ranging/Handover Ranging TXOP



: MS Bandwidth Request/Period Ranging TXOP

圖 3-9 上行存取地帶競爭子通道測距碼的設計方式

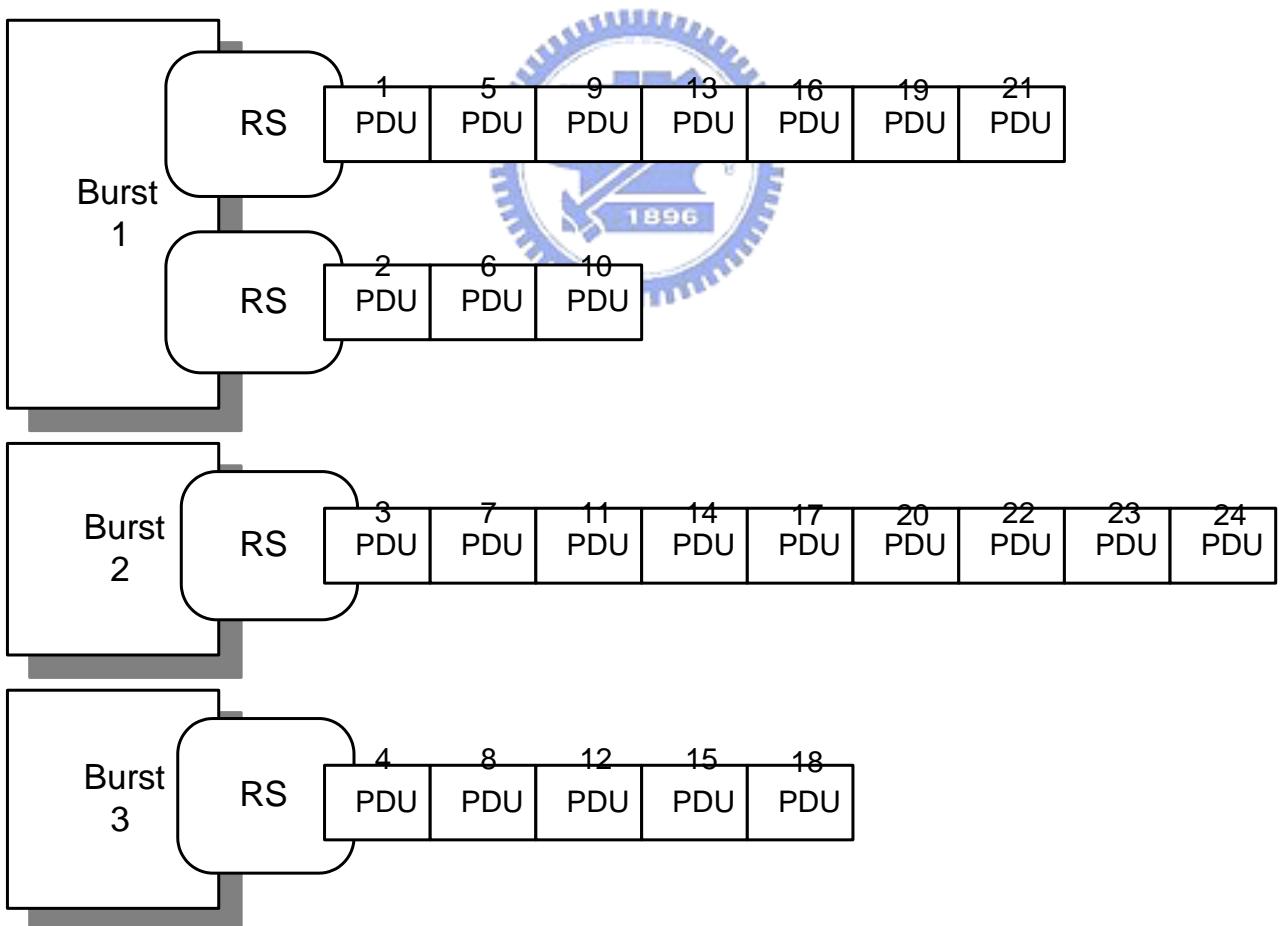


圖 3-10 基地台以 Round-Robin 進行下行頻寬配置

訊框排程的最後一塊區塊為下行存取地帶，此地帶為基地台用來傳送用戶端資料的區段，

經由排程器的配置可以得到下行穿透地帶所佔用的 symbol 個數，並且可以得知整個訊框所剩下可以用來進行下行存取地帶的資料傳送的資源，在此區段中主要由三個部分所組成，包含基地台與中繼台、用戶端進行同步的前置符號部分、基地台對於下行頻寬的配置分配狀況 DL-MAP 和用來傳送用戶端下行資料的免競爭區塊，由於在模擬器上無法對於實體設備的同步進行模擬，我們僅在訊框一開始延遲一個 symbol 的時間來進行前置符號進行同步的模擬；如同基地台配置下行穿透地帶中繼台的轉送資料，基地台於下行存取地帶會根據用戶端所使用的調變方式與編碼技術來進行頻寬配置，並且使用 Round-Robin 方式公平分配用戶端使用頻寬資源的機會，當所有下行子訊框區域都配置完成後，基地台會將下行存取地帶與下行穿透地帶的頻寬配置狀況封裝在 DL-MAP 中，若在訊框中存在下行穿透地帶，則必須在下行存取地帶頻寬配置 IE 與下行穿透地帶頻寬配置 IE 之間封裝 STC_DL_ZONE_IN() IE 來通知用戶端進行下行穿透地帶的資料接收。

為了提供基地台在排程訊框時能夠動態調整訊框內各地帶的分佈，在配置上行子訊框時，我們會先進行上行轉送地帶的排程，且此地帶所能配置的 symbol 個數不能超過整個上行子訊框個數的一半，當進行完上行轉送地帶的配置後再使用上行子訊框中剩餘的 symbol 個數來進行上行存取地帶排程，且上行轉送地帶和上行存取地帶所使用的 symbol 總和不能超過整個訊框所使用的 symbol 個數的一半；在下行子訊框的配置方面，由於下行穿透地帶可能不存在，排程器會先對下行穿透地帶進行排程，此地帶所能使用的 symbol 個數為下行子訊框所能使用的 symbol 個數的一半，最後，再將剩餘的 symbol 執行下行存取地帶的資料傳輸使用。

為了支援多段轉傳資料傳送路徑的管理，用戶端在進行入網程序時，必須決定其上位的存取台，由於在 IEEE 802.16j 規格中並沒有定義路徑管理中存取台選擇的演算法，在我們的設計中將參考[13]的作法，根據用戶端至中繼台、中繼台至基地台與用戶端至基地台之間所使用的調變方式與編碼技術來決定用戶端是否選取中繼台作為其存取台。以下為二段式穿透式中繼台網路下路徑選擇演算法的介紹。

在二段式穿透式網路下用戶端最佳資料傳輸路徑的選擇必須著眼於 MS/MR-BS、MS/RS

與 RS/MR-BS 之間的訊號品質和所使用的調變編碼方式，如表 3-4，以 IEEE 802.16 實體層所支援傳輸速率最小的調變編碼技術 QPSK 1/2 為基底，將調變方式與編碼技術的組合使用權重比重方式對應出來，每一種調變編碼技術的組合對應的權重值代表傳送單位位元資料所需的時間 (symbol/bit)。基地台、中繼台與用戶端間會根據 IEEE 802.16e 規格中所定義的接收端訊號強度的 threshold，如表 3-4，由基地台動態調整各設備台間的調變編碼技術，藉由設備台間使用的不同調變技術，可以估算出固定長度的資料量透過中繼台實施二段式傳送與直接傳送至基地台所需的傳送時間權重比，我們以 W_s 表示用戶端至基地台間上行方向所使用的調變與編碼組合所對應的權重； W_r 表示用戶端至中繼台間上行方向所使用的調變與編碼組合所對應的權重； W_p 表示中繼台至基地台間上行方向所使用的調變與編碼組合所對應的權重。根據 IEEE 802.16j 規格中基地台決定用戶端最佳路徑的機制，基地台會於接收到用戶端的測距碼或中繼台所發送的 MR_RNGREP 等待一段 T60 的時間，收集所有經由中繼台所發送的 MR_RNGREP，藉由接收這些訊息，我們可以得到各設備台間訊號經過衰減過後的強度和其所使用的調變方式與編碼技術的組合，之後再根據表 4-3 轉換成對應的權重。當 $W_r + W_p < W_s$ 時，表示經由中繼台傳送單位位元資料所耗費的時間會比直接由用戶端傳送資料至基地台來得更有效率，此時，用戶端會經由中繼台來傳輸和接收資料封包。由於用戶端具可移動性，為了能夠動態調整最佳傳輸路徑，基地台會藉由用戶端所發送的定期測距碼來調整用戶端傳輸的最佳路徑。

Receiver SNR Threshold (dBm)	MCS Mode	Bit/Symbol	Weight (Symbol/Bit)
5	QPSK 1/2	1	1
8	QPSK 3/4	3/2	2/3
10.5	16-QAM 1/2	2	1/2
14	16-QAM 3/4	3	1/3
16	64-QAM 1/2	3	1/3
18	64-QAM 2/3	4	1/4
20	64-QAM 3/4	9/2	2/9

表 3-4 調變方式與編碼技術組合權重表

除此之外，為了支援我們所設計的基地台最佳傳輸路徑選擇演算法，基地台必須定期通知中繼台傳送 REP-REQ 管理訊息給所有以此中繼台作為存取台的用戶端，用來測量中繼台至用戶端下行方向衰減過後的訊號強度以獲得其所使用的調變方式與編碼技術，當用戶端收到 REP-RSP 訊息，必須將測量結果以 REP-RSP 回傳給基地台。

3.4.1.2. Transparent RS 媒體存取控制層的模組設計與實作

在穿透式中繼台媒體存取控制層設計方面，我們所實作的中繼台為固定式穿透式中繼台，除了增訂在 IEEE 802.16j 規格裡關於中繼台入網程序與媒體控制層基本溝通控制程序的運作之外，在中繼台的媒體控制層必須負責傳送下行穿透地帶的資料與上行轉送地帶用戶端的資料。

在中繼台下行穿透地帶資料傳送設計方面，中繼台會經由分析基地台所傳送的 DL-MAP 管理訊息後進行下行穿透地帶資料傳送，若在 DL-MAP 中包含 STC_DL_ZONE_IN() IE 中指示訊框中包含此中繼台下行穿透地帶的資料傳輸，中繼台會於下行存取地帶區段結束後進行資料傳送。在上行轉送地帶設計上，中繼台會經由分析 UL-MAP 來得知在此訊框中配置給中繼台進行上行資料轉送的頻寬並且於上行轉送地帶的排程區段進行用戶端資料轉送。

在中繼台管理用戶端連線列表佇列設計上，若用戶端於進行入網程序和執行定期測距其間，由基地台決定以此中繼台作為存取台時，基地台會針對此中繼台發送 RS_Member_List_Update 管理訊息並且在此管理訊息封裝用戶端所使用的連線識別碼，當中繼台收到此管理訊息後會於此中繼台的物件類別中建立用戶端的連線佇列，用來儲存經由中繼台轉送的資料。由於用戶端支援可移動性，當用戶端進行換手機制或基地台實施用戶端資料傳輸路徑重新規劃時，基地台必須傳送 MOB_INFO_DEL 和 RS_Member_List_Update 管理訊息將中繼台上用戶端的連線佇列資訊清除。當中繼台於下行存取地帶和上行存取地帶分別接收到基地台和用戶端傳送的資料時，中繼台的媒體控制層會比對 PDU 標頭中的連線識別碼與儲存在中繼台上的連線識別碼列表，若此連線識別碼存在於中繼台的列表中，此時

中繼台會將此 PDU 儲存至對應的連線識別碼佇列中暫存，否則則捨棄此 PDU。

3.4.1.3. MS 媒體存取控制層的模組設計與實作

為了支援穿透式中繼台網路下多段轉傳的功能，除了原本在 IEEE 802.16e 中為了提供用戶端在移動式 WiMAX 網路中所定義的換手程序與定期測距，在用戶端設計中，我們增加了 IEEE 802.16j 規格中於媒體控制層所增訂的基本流程管理控制訊息。

在移動式 WiMAX 中，用戶端會定期發送定期測距碼給基地台，用途在校調移動式用戶端與基地台之間的時序偏差，基地台在接收到用戶端所發送的定期測距碼時會回覆 RNG-RSP 管理訊息通知用戶端測距的結果。除此之外，中繼台必須監聽用戶端所發送的定期測距碼，並且轉發 MR_RNG-RSP 管理訊息給基地台，提供基地台在進行資料傳輸最佳路徑規畫使用。

在目前換手程序設計上主要是沿用先前 NCTUns 模擬器上移動式 WiMAX 所使用的機制，由用戶端發起，如同先前所介紹的，在網路模擬一開始，基地台會透過讀取檔案中記錄鄰近基地台的資訊來模擬基地台藉由骨幹網路取得鄰近基地台的資訊，之後用戶端會藉由 MOB_SCN_REQ 管理訊息向基地台請求鄰近基地台頻道訊號品質掃描，並且將掃描後的結果傳回基地台，提供基地台進行換手決策時參考，

在二段式穿透式多段轉傳網路拓樸下，中繼台與用戶端均必須在基地台的訊號涵蓋範圍下，在我們的設計下，若用戶端是透過中繼台與基地台進行資料傳輸，則用戶端的媒體控制層將不會接收由基地台直接傳送給用戶端的資料而是透過中繼台於下行穿透地帶傳送的方式進行接收；在上行方面亦然，在基地台則是接收經由中繼台所轉送的用戶端上行資料。

3.4.2. 實體層模組的設計

IEEE 802.16j 為以 802.16e 點對點模式為基礎而增訂的規格，所使用的實體層為 802.16e OFDMA 實體層的修訂，支援 FDD 與 TDD 兩種模式的訊框配置方式。WiMAX

OFDMA 實體層主要的功能包含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。

訊框標頭存在於每個訊框一開始的子通道上，為 OFDMA 實體層負責產生，用來儲存 DLFP (Downlink Frame Prefix)，在 DLFP 中會紀錄基地台封裝的 DL-MAP 管理訊息的長度和使用的調變編碼方式，中繼台與用戶端於接收基地台所傳送的訊框時，必須經由分析 DLFP 來對訊框中的 DL-MAP 管理訊息執行通道解碼，分析訊框中資源的配置方式。在目前的設計上，當基地台的排程器將 DL-MAP 管理訊息封裝完成後會將 DL-MAP 交由實體層進行 DLFP 的封裝，當中繼台與用戶端收到基地台所傳送的訊框時，再根據 DLFP 將 DL-MAP 管理訊息解碼出來並且傳送至上層媒體控制層，媒體控制層再根據 DL-MAP 所紀錄的下行存取地帶與下行穿透地帶的資源配置方式傳回至實體層進行訊框中免競爭區段的解碼。

為了模擬基地台傳送下行資料的傳輸時間，在中繼台與用戶端上根據下行子訊框的配置方式將下行資料處理的程序分成不同的區段；在穿透式中繼台方面，下行資料的處理分成兩個區段，第一個區段為處理前置符號和接收 DLFP 與 DL-MAP 的時間，包含一個 symbol 加上一個 slot 所需的時間，第二個區段則是接收下行存取地帶扣掉處理前置符號與 DL-MAP 所需的傳輸時間。在用戶端的實體層方面，除了上述中繼台所包含兩個區段，若在訊框排程中包含下行穿透地帶，則用戶端必須包含第三個區段，此區段為處理中繼台轉送下行資料的時間，此區段時間於排程器在進行排程時會動態調整，最長為下行子訊框所佔用的 symbol 個數時間的一半。

在上行子訊框的傳輸時間模擬方面，於上行子訊框中的上行存取地帶設計上，由競爭頻道區間和免競爭頻道區間組成，競爭頻道為中繼台進行初始測距碼傳送與用戶端進行所有種類測距碼的傳送所使用，基地台須模擬接收各測距碼所必須的時間；在規格中定義根據測距碼的方式不同，各測距碼所佔用的 symbol 個數會有所不同，在目前的設計上，初始測距碼與換手測距碼是以兩個 symbols 作為傳輸時間，定期測距碼與頻寬請求碼，則是以一個 symbol 當作傳輸時間。免競爭區間為用戶端進行上行資料傳送的時間，當基地台於上行存取地帶接收到資料時，基地台會根據上行存取帶所佔用的 symbol 個數所需的傳輸時間作為模

擬接收此區段資料所需的傳送時間。在上行轉送地帶，亦包含一個競爭頻道區間與一個免競爭頻道區間，競爭頻道區間為中繼台進行定期測距、換手測距與頻寬測距使用，由於目前設計中，我們僅支援固定式中繼台，目前在上行轉送地帶我們會保留此測據子通道區塊，但是中繼台並不會在此區塊上進行定期測距碼與換手測距碼的傳送；另外一段免競爭頻道區段則是中繼台進行上行資料轉送傳送的區段，同樣地，當基地台於上行轉送地帶接收到資料時，基地台會以上行轉送地帶所佔用的 symbol 個數所需的時間作為模擬接收此區段資料所需的傳送時間，圖 3-11 為二段式穿透式網路訊框資料傳輸時間示意圖。

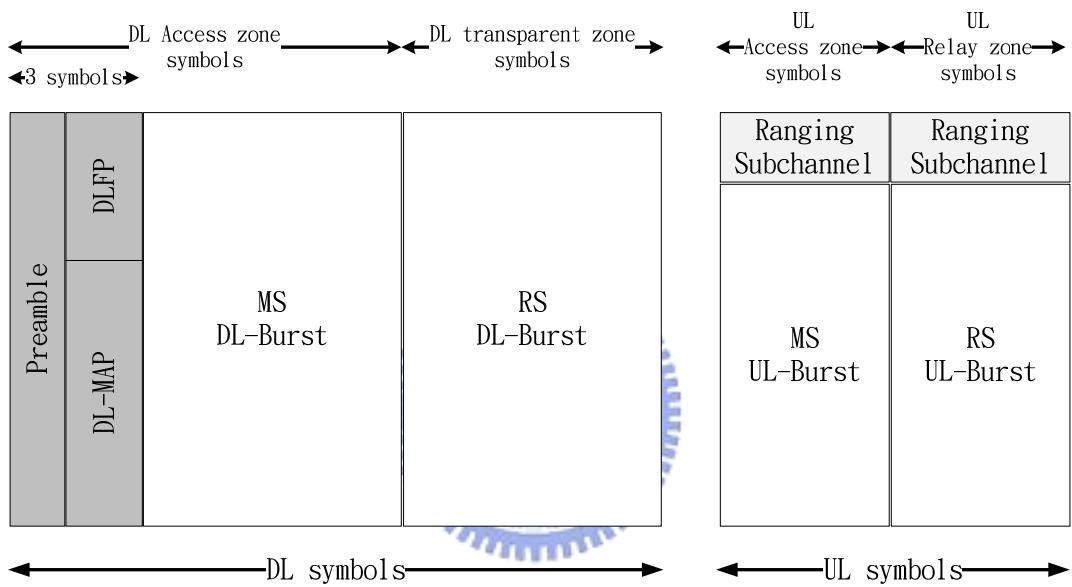


圖 3-11 二段式穿透式網路訊框資料傳輸時間示意圖

在調變技術模擬方面，由於模擬器無法模擬呈現真實調變技術，我們將僅模擬調變技術所產生的功能。調變是實體層在進行傳送時將數位訊號轉為類比訊號透過無線介面傳輸到空氣介質上的程序，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 802.16j OFDMA 實體層規範裡所使用的調變方式分別為 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。為了要支援媒體控制層用戶端在移動中對於傳輸路徑能夠進行動態調整的，我們在媒體控制層上支援基地台、中繼台與用戶端之間動態變換調變的方式的技術。

至於在通道編碼方面，目前 NCTUns 模擬器上 WiMAX 所支援的編碼技術為最基本的 Convolution Code，其通道編碼率包括 $1/2$ 、 $2/3$ 、 $3/4$ 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[5]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。在規格中訂定除了 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，在目前的模組設計中，除了傳輸 DLFP 以外的資料都不提供重複編碼，以降低設計的複雜度。

3.4.2.1. MR-BS 實體層的模組設計與實作

在中控型基地台實體層模組的實作設計上，由於基地台必須根據 DL-MAP 訊息對訊框一開始的 FCH 執行 DLFP 封裝，所以當基地台的排程器將 DL-MAP 管理訊息封裝完成後會將 DLMAP 管理訊息交由實體層來進行 DLFP 封裝，然後再將完整封裝好的整個訊框，於下行存取地帶區段傳送給中繼台與用戶端。

此外，我們沿用目前 NCTUns 上移動式 WiMAX 的做法，假設再同一個拓樸上的所有的基地台都會運作在不同的頻帶上，且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. Transparent RS 實體層的模組設計與實作

在穿透式中繼台實體層模組設計方面，包括兩個區段的接收與兩個區段的資料轉送，在資料接收方面，由接收基地台下行存取地帶的資料和接收用戶端上行存取地帶的資料組成；轉送資料則分別為中繼台於下行穿透地帶中轉送下行資料至用戶端和上行轉送地帶進行用戶端上行資料的轉送。

在中控型排程網路中，由於訊框資源配置主要由提供服務的基地台統籌進行排程，在接

收由基地所傳送的下行存取帶設計方面，中繼台必須根據 DLFP 來對基地台所廣播的 DL-MAP 進行資料解碼，並且將解碼後的 DL-MAP 傳送至媒體控制層進行分析，經由分析 DL-MAP 可以取得基地台對下行存取地帶免競爭區段的資源配置方式並且進行解碼。另外在接收上行存取地帶設計方面，中繼台會接收用戶端所傳送的上行資料，包含競爭區段測距資料與免競爭區段一般性用戶端資料，再將解碼後的資料傳送至媒體控制層進行分析。

在傳送下行穿透地帶的資料設計方面，基地台的排程器會將下行穿透地帶所要的轉送的資料封裝後交由各中繼台，中繼台在於下行穿透地帶區段將資料傳送至用戶端。在傳送上行轉送地帶資料設計上，各中繼台會根據 UL-MAP 中基地台對於各中繼台的資源配置狀況，於上行轉送地帶將資料傳送到基地台。

3.4.2.3. MS 實體層的模組設計與實作

在穿透式中繼台網路中，用戶端所接收的下行資料可能為基地台或中繼台所傳送，用戶端透過 DLFP 來對基地台所廣播的 DL-MAP 進行資料解碼，再將解碼後的 DL-MAP 傳送至媒體控制層進行分析。在下行子訊框接收方面分成下行存取地帶與下行穿透地帶兩個區段，因為下行穿透地帶有可能不存在，在用戶端的媒體控制層會根據分析 DL-MAP 中 STC_DL_ZONE_IN() IE 來判斷目前正在傳送的訊框內是否存在下行穿透地帶，經由媒體控制層對 DL-MAP 解析後，用戶端可以取得此訊框中下行存取地帶與下行穿透地帶免競爭區段資源的配置方式，透過這些資訊實體層才能對下行子訊框的資料進行解碼。

為了支援換手機制中用戶端進行鄰近基地台頻道掃描，當用戶端進行換手程序中的頻道掃描收到鄰近基地台所傳送的訊框資訊時，在媒體控制層中將不會分析由實體層所傳送上來的 DL-MAP 管理訊息，只紀錄由此基地台所傳送訊框資料的訊號強度，提供換手機制時作為換手決策時參考。

Chaper 4. Simulation Result

在本章裡，我們將於 NCTUns 模擬器上對於所實作的 802.16j 穿透式網路模組進行效能量測與驗證。表 4-1 為我們進行模擬驗證的各項參數設定。

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)	$\text{floor}(n \cdot \text{BW} / 8000) * 8000$	11.2 MHz
CP ratio	1/32, 1/16, 1/8, 1/4	1/8
CP time (Tg)	CPratio * Tb	11.425 us
Symbol time (Ts)	Tb + 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 4-1 模擬時的系統參數

4.1. 模擬結果分析與驗證

在網路模擬系統中，模擬結果的分析與驗證為不可獲缺的一環，以下我們將對於在 NCTUns 模擬器上所實作的 IEEE 802.16j 穿透式網路模組進行各項模擬驗證。我們將對於 UDP 效能量測、基地台選擇用戶端最佳路徑決策與動態調整設備台間調變編碼技術進行驗證與分析。

4.1.1. 中控型排程穿透式網路 UDP 效能量測

在此節中，我們將進行二段式穿透式中繼台網路拓樸下傳送 UDP 封包的效能量測，分成兩個部分進行，第一個部分為基地台與用戶端間的下行 UDP 效能量測；第二部分為經由穿透式中繼台轉送 UDP 的效能量測。

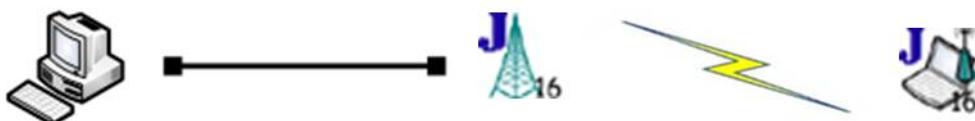


圖 4-1 基地台與用戶端間下行存取地帶 UDP 效能量測拓樸

圖 4-1 為第一部分效能量測的網路示意圖，由 Host、MR-BS 與 MS 組成，Host 模擬經由骨幹網路傳送 1400 byte 封包大小的 greedy UDP 的資料經由基地台直接傳送至用戶端。我們將藉由使用不同的調變方式與編碼技術來量測其效能的正確性。表 4-2 為各種調變方式與編碼技術下，下行可傳輸資料的效能理論值與實際進行 UDP 量測所得到的流量，其中，scheduled slots 代表經過排程器處理後實際上用來進行用戶端下行資料傳輸的 slots。在此網路拓樸下，下行子訊框將被全部用來作為下行存取地帶資料傳送所使用，因為下行存取地帶中包括用來傳送廣播訊息和前置符號的時間，所以實際用來傳送資料的 slot 個數必須扣除掉前置符號與用來傳送廣播訊息的 slots。

在此拓樸下訊框經過排程器處理後，我們得出在訊框中下行子訊框總共包含 660 個 slots 個數，再扣除掉傳送廣播訊息和前置符號所使用的 slot 個數之後所剩下可用來進行免競爭區段排程的 slot 個數為 630 個。在目前的設計中，訊框中的 UL-MAP 管理訊息會在免競爭區段中使用調變編碼方式最健全的 QPSK 1/2 進行編碼，經過排程器計算 UL-MAP 總共會佔用 7 個 slots，但是在目前設計下，slot 配置是以 10 個子通道為單位進行配置，實際上此區塊會佔用掉 10 個 slots 的下行存取地帶資源，所以若使用不為 QPSL 1/2 的調變編碼方式進行資料傳送，最後會只剩下 620 個 slots 用來進行上層的資料的傳送，相反的，若使用調變方式與編碼技術為 QPSK 1/2，則下行資料與 UL-MAP 必須共用整個下行可以進行配置的 slots，

其中 UL-MAP 管理訊息佔用了 7 個 slots，所以會剩下的 623 slots 用來傳輸下行存取地帶資料。我們將根據下列公式來對所使用的調變方式與編碼技術進行效能計算，表 4-2 為所量測的結果。

$$Throughput = \frac{Bytes_{slot} * Slots_{DL}}{Frame Duration}$$

FEC	Mode	Slot size (Bytes)	Scheduled slots	Theoretical MAC throughputs[TT] (Mbps) (without UDP/IP header overhead)	Simulation throughputs[ST] (Mbps) (with UDP/IP header overhead)	Difference between TT and ST (%) (equal to the UDP/IP header overhead)
0	QPSK 1/2	6	623	5.840625	5.6771	2.80
1	QPSK 3/4	9	620	8.71875	8.486	2.67
2	16QAM 1/2	12	620	11.625	11.3313	2.53
3	16QAM 3/4	18	620	17.4375	16.9472	2.81
4	64QAM 1/2	18	620	17.4375	16.952	2.78
5	64QAM 2/3	24	620	23.25	22.5985	2.80
6	64QAM 3/4	27	620	26.15625	25.4421	2.73

表 4-2 MR-BS 與 MS 間在不同調變方式與編碼技術下 UDP 效能

根據表 4-2 的結果發現 UDP 效能並沒辦法到達 100%，主要的原因是在應用層所傳送的資料在到達媒體控制層時會被進行封裝並且加上 MAC Header，造成標頭負擔。我們將各層所產生的標頭考慮進來，並且以下列公式來進行計算：

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

在公式中，IP header 與 UDP header 的表頭負擔總共為 28 bytes，mac_header 為媒體控制層標頭長度為 6 bytes，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，長度為 1 byte。另外，還包含基地台與用戶端用來溝通控制的週期性管理訊息所產生的負擔，例如：換手機制控制訊息，但是由於此部分管理訊息是以 2 秒為間隔進行週期性傳送，我們將忽略此部分的負擔。考慮以上因素後，我們可以得到理論上所計算出來的流量扣除掉各層標頭負擔部分所耗費的頻寬與模擬所得出來的流量相符，標頭負擔部分大約在 2.7%~2.8% 之間。

在第二部分中，我們將進行在二段式多段轉傳下行穿透地帶的 UDP 效能量測。圖 4-2 為此部分量測的網路拓樸示意圖。



圖 4-2 中繼台與用戶端間下行穿透地帶 UDP 效能量測拓樸

在此網路拓樸下，包含一個模擬於骨幹網路進行封包傳送的 Host 和一個典型的 802.16j 二段式穿透式中繼台網路型態，經由基地台進行資料傳送並且經由中繼台將資料轉發至用戶端。與第一部分所進行的 UDP 效能量測一樣，經由 Host 模擬由骨幹網路傳送 1400 bytes greedy UDP 封包透過基地台轉送至用戶端，表 4-3 為下行穿透地帶 UDP 效能量測表。

FEC	Mode	Slot size (Bytes)	Scheduled slots	Theoretical MAC throughputs[TT] (Mbps) (without UDP/IP header overhead)	Simulation throughputs[ST] (Mbps) (with UDP/IP header overhead)	Difference between TT and ST (%) (equal to the UDP/IP header overhead)
0	QPSK 1/2	6	267	2.503125	2.435	2.72
1	QPSK 3/4	9	268	3.76875	3.665	2.75
2	16QAM 1/2	12	268	5.025	4.887	2.75
3	16QAM 3/4	18	269	7.565625	7.358	2.74
4	64QAM 1/2	18	269	7.565625	7.358	2.74
5	64QAM 2/3	24	269	10.0875	9.812	2.73
6	64QAM 3/4	27	269	11.3484375	11.043	2.69

表 4-3 RS 與 MS 間在不同調變方式與編碼技術下 UDP 效能

在目前的排程器設計中，下行子訊框中扣掉前置符號與用來進行 DL-MAP 傳輸的區段最多會有一半用來進行下行穿透地帶使用，在此地帶中所有的免競爭區段都是用來進行資料傳送。在此網路拓樸下，經由排程器分配後在下行穿透地帶所可用的 slot 個數總共為 270 個 slots，除了第一部分所考慮的標頭負擔之外，尚要考慮中繼台與用戶端之間會定期在每一個單位訊框中封裝 REPREQ 管理訊息來實施中繼台與用戶端之間頻道訊號品質量測所造成的負擔，此部分管理訊息連同媒體控制層標頭部分所造成的負擔為 18 bytes，此部分負擔會根據所使用的調變編碼方式不同而耗費掉不同 slot 個數的資源，例如，若是使用調變編碼技術為 QPSK

1/2 來進行通道編碼，在每一個單位訊框中總共會耗費掉 3 個 slot 個數，所以會剩下 267 個 slot 用來進行上層 UDP 資料傳輸，扣除掉這部分的負擔後所得到的流量會與上一個驗證中所得的結果一樣，僅剩下上層標頭與媒體控制層所耗費的標頭負擔，負擔約在 2.7%~2.8% 之間，符合我們所預期的驗證結果。

4.1.2. 用戶端最佳傳輸路徑選擇

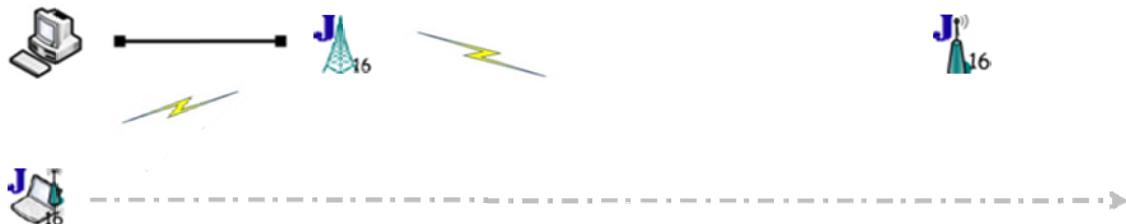


圖 4-3 用戶端最佳傳輸路徑選擇網路拓樸-1

在此小節中，我們將針對所設計的用戶端最佳傳輸路徑選擇與 UDP/TCP 流量進行驗證，第一種網路拓樸如圖 4-3，包含一個 Host、一個基地台、一個中繼台與一個用戶端，由 Host 傳送 greedy UDP 封包與 TCP 封包經由中控型基地台至用戶端，用戶端會從基地台往中繼台方向進行移動，我們會觀察基地台進行路徑選擇前後對於流量產生的變化。在模擬一開始，中繼台與用戶端會與基地台進行入網程序，用戶端一開始會選擇以基地台作為存取台，並且接收由基地台所直接發送的封包，基地台藉由定期接收由用戶端傳送的定期測距碼和中繼台所轉發的 MR_RNG-REP 來決定用戶端的最佳傳輸路徑，在目前的設計中，基地台會根據 MS/RS、RS/MR-BS 和 MS/MR-BS 的上行方向所使用的調變方式與編碼技術組合所對應的權重來決定用戶端的存取台，若滿足以下等式則基地台會選擇中繼台為用戶端轉送資料的存取台，

$W_s : MS \text{ 與 } MR-BS \text{ 間上行方向調變編碼技術所對應的權重}$

$$W_r + W_p < W_s \quad W_r : MS \text{ 與 } RS \text{ 間上行方向調變編碼技術所對應的權重}$$

$$W_p : RS \text{ 與 } MR-BS \text{ 間上行方向調變編碼技術所對應的權重}$$

表示經由中繼台傳送單位位元資料所耗費的時間會比直接由用戶端傳送資料至基地台來得更有效率，此時，用戶端會經由中繼台來傳輸和接收資料封包。

圖 4-4 為基地台進行用戶端最佳傳輸入徑決策時，所得到的用戶端權重圖。在第一個網路拓樸下，中繼台至基地台所使用的調變方式固定為 16QAM 3/4，而在模擬一開始，用戶端至中繼台的調變方式為 QPSK 1/2、用戶端至基地台間所使用的調變方式為 64QAM 3/4，根據表 3-4 的調變方式與權重的對應，我們可以看到在模擬一開始時 $W_s < W_p + W_r$ ，所以基地台被選取作為用戶端的存取台；在第 24 秒時，因為基地台會根據接收訊號強度動態調整調變方式，用戶端至中繼台的調變方式變為 64QAM 3/4、用戶端至基地台間調變方式變為 QPSK 3/4，此時，上述等式成立，基地台會選擇以中繼台作為用戶端的中繼存取台進行資料轉送，然後再第 49 秒時，基地台又再次被選擇作為用戶端的存取台。圖 4-5 為用戶端接收由基地台傳送 UDP 與 TCP 封包的流量圖，由圖中可以看到在模擬一開始時，用戶端會直接接收由基地台所傳送的 UDP 與 TCP 封包且此時基地台與用戶端之間所使用的調變編碼技術為傳輸速率最好的 QAM64 3/4 調變方式，此時用戶端的下行的流量約為 22 Mbit/Sec，所得的流量會比前一小節來得少，主要的原因為在目前排程器的設計上，基地台會根據用戶端 QoS 參數設定配置固定大小的上行資源給用戶端，所以在上行轉送地帶與上行存取地帶上會各自佔用掉一個 slot 大小的 symbol，也就是 3 個 symbols，所以實際上進行下行子訊框傳送的 slot 個數經由排程後為 540 個，套用到上一節用來計算流量的公式中可以得到為 22.78125 Mbit/Sec，與我們所量測到的相符。當用戶端逐漸遠離基地台時，基地台會根據訊號品質來選擇較好的調變編碼方式，所以用戶端的流量會逐漸降低。由圖中可以發現在模擬一開始用戶端接收由基地台所傳送的下資料，因為用戶端並沒有透過中繼台進行轉送資料，所以下行子訊框整個區段是配置給下行存取地帶使用，所得到用戶端的下行流量約為 22 Mbit/Sec，當用戶端逐漸遠離基地台，因為動態調整調變編碼技術的原因，用戶端的流量會逐漸下降；在第 24 秒左右用戶端的存取台被切換成中繼台，此時，基地台所傳送的下行子訊框會被切割成下行存取地帶與下行穿透地帶來進行資料傳送，在目前的設計上，下行存取地帶與下行穿透地帶根據下行子訊框中免競爭區段的大小所使用的比例為 1:1；在目前的拓樸下於的 24

秒時，下行穿透地帶所允許配置的 slots 個數為 270 個，理論上，此時用戶端流量應該約為 11 Mbit/Sec，但是實際上我們所量測出來的流量約為 9 Mbit/sec 左右，主因為基地台與中繼台間所使用的下行調變編碼技術為 16QAM 3/4 而中繼台至用戶端間所使用的調變編碼技術為 64QAM 3/4，這會造成單位訊框配置上基地台至中繼台的區段成為用戶端流量的 bottleneck，導致下行穿透地帶所允許配置的 slots 並沒有完全配置作為下行穿透地帶傳送使用，所以並沒有達到理論上的流量；然後在第 49 秒時，基地台再次被選取作為用戶端的存取台，此時基地台與用戶端間的調變編碼技術為 QPSK 1/2，所得到的用戶端流量接近 5 Mbit/Sec。

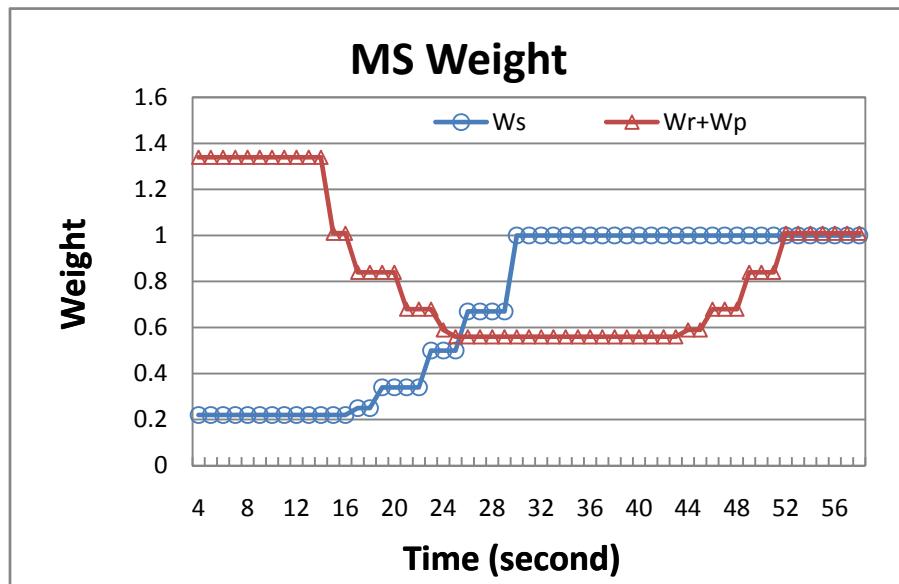


圖 4-4 用戶端調變方式與編碼技術權重圖-1

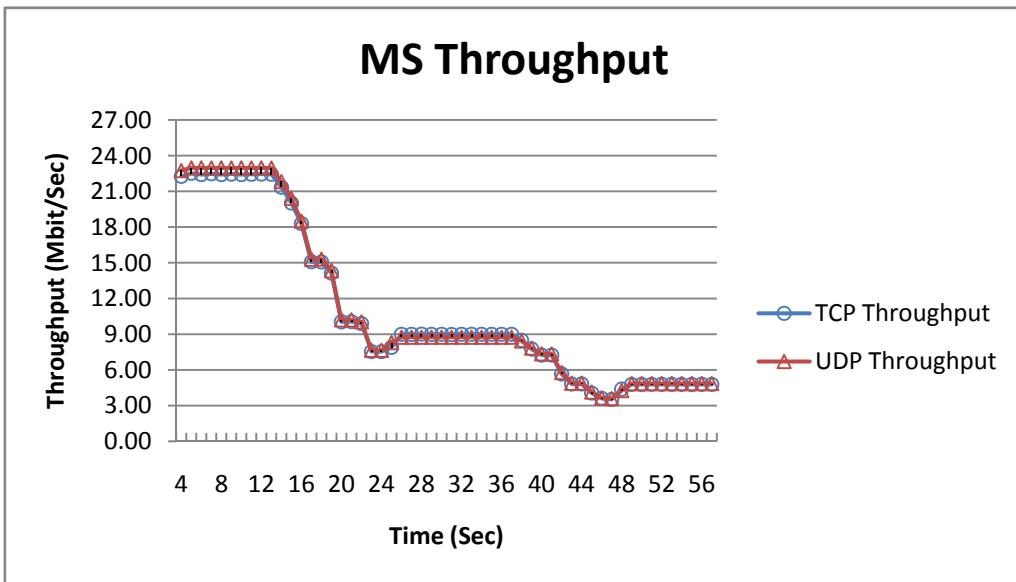


圖 4-5 用戶端下行 TCP 與 UDP 流量-1

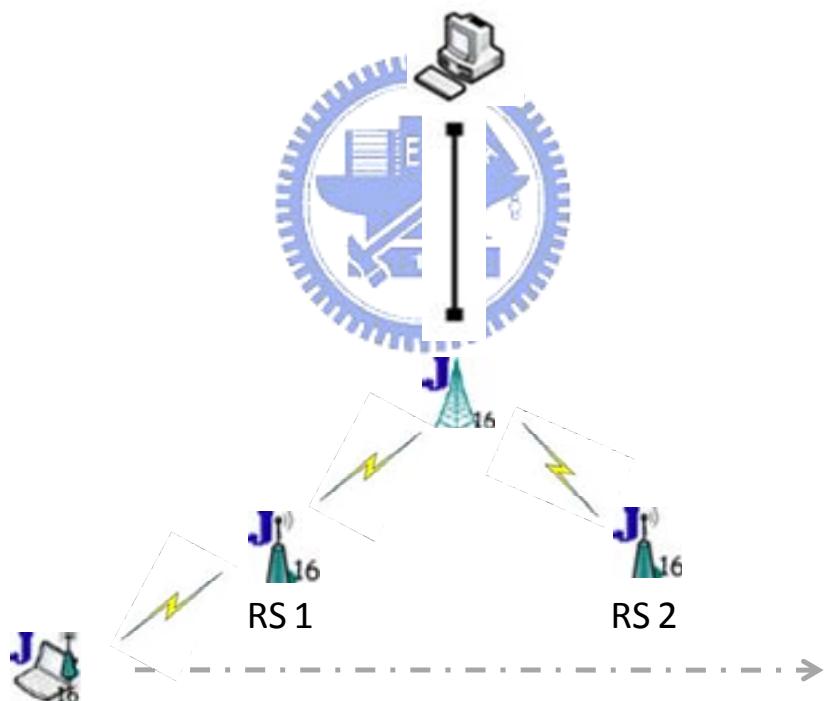


圖 4-6 用戶端最佳傳輸路徑選擇網路拓樸-2

圖 4-6 為我們進行最佳路徑選擇的第二種網路拓樸，由一個 Host、一個基地台、二個中繼台與一個用戶端所組成，在此拓樸中我們會由 Host 傳送 UDP 與 TCP 封包經由基地台至用戶端並且進行流量的量測，並且觀察用戶端在中繼台間進行切換對於流量的影響。圖 4-7 為用戶端經由中繼台進行最佳路徑演算法的權重圖，在模擬一開始時，由於中繼台尚未完成

入網程序，此時用戶端是直接透過基地台接收由 Host 所傳送過來的封包，在約第 4 秒時，透過最佳路徑演算法基地台會選擇以 RS1 作為用戶端的中繼存取台進行封包轉送，然後約第 23 秒時，用戶端會切換成以 RS2 為存取台，接收 Host 所傳送的封包，最後在第 36 秒左右因為透過 RS2 進行 two hop 轉送封包並沒有直接由基地台傳送封包來得有效率，所以用戶端是直接經由基地台接收由 Host 所傳送的封包。圖 4-8 為由 Host 傳送至用戶端的封包流量圖，由圖中可以當用戶端在於同一基地台服務範圍內在中繼台間進行切換時，原本與基地台已經建立好的連線並不需要重新進行建立，在資料封包傳輸方面並不會造成大量的遺失，在 TCP 資料封包傳輸上，我們使用了兩種不同的 TCP congestion control algorithm 的版本進行量測，由圖中可以看到使用 reno congestion control algorithm 的 TCP 版本在第 23 秒因為中繼台的切換造成 TCP 降速機制被啟動使得流量下降，另外一種 cubic congestion control algorithm 的 TCP 版本則因為使用 TCP SACK 機制使得降速機制沒有被啟動而維持一定的傳輸速率。由於資料封包是透過中繼台進行二段式的傳送，所以使得訊框中有大約一半的資源必須用來提供中繼台進行下行穿透地帶的利用，在目前此網路拓樸下，由於中繼台為固定式的所以當中繼台完成入網程序後，中繼台與基地台間所使用的調變編碼技術就不會改變，但是用戶端與中繼台和用戶端與基地台間的調變編碼技術會隨著用戶端移動而進行動態的調整，在目前模擬環境中，中繼台與基地台間使用的為傳輸速率最好的 64QAM 3/4 調變編碼技術，所以當中繼台與用戶端也使用此種調變編碼技術時，在目前排程器的設計方式下，用戶端所能夠達到的最佳流量大概為原本的一半，如圖中第 4~22 秒時，用戶端以 RS1 作為存取台和第 23~36 秒時以 RS2 為存取台的流量。

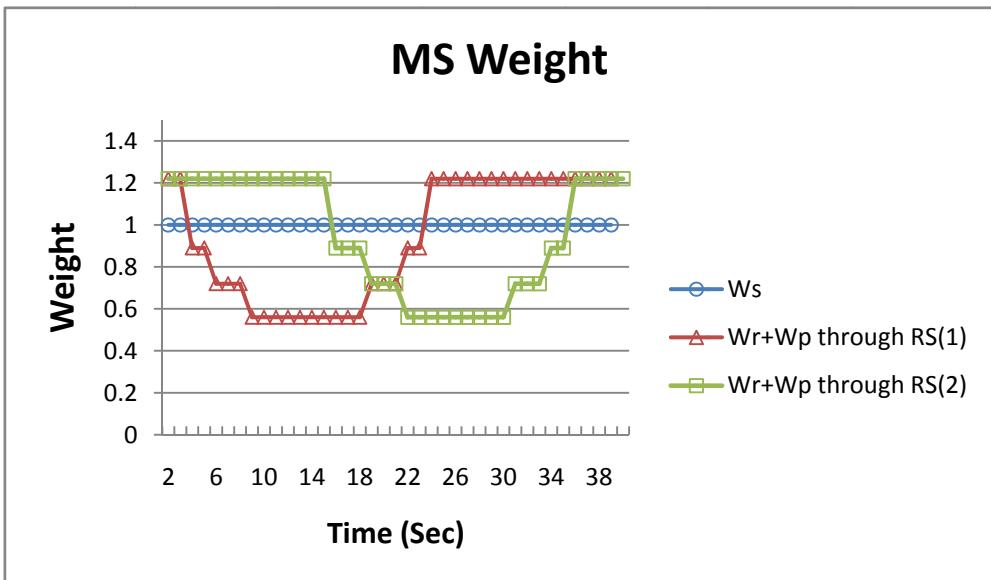


圖 4-7 用戶端調變方式與編碼技術權重圖-2

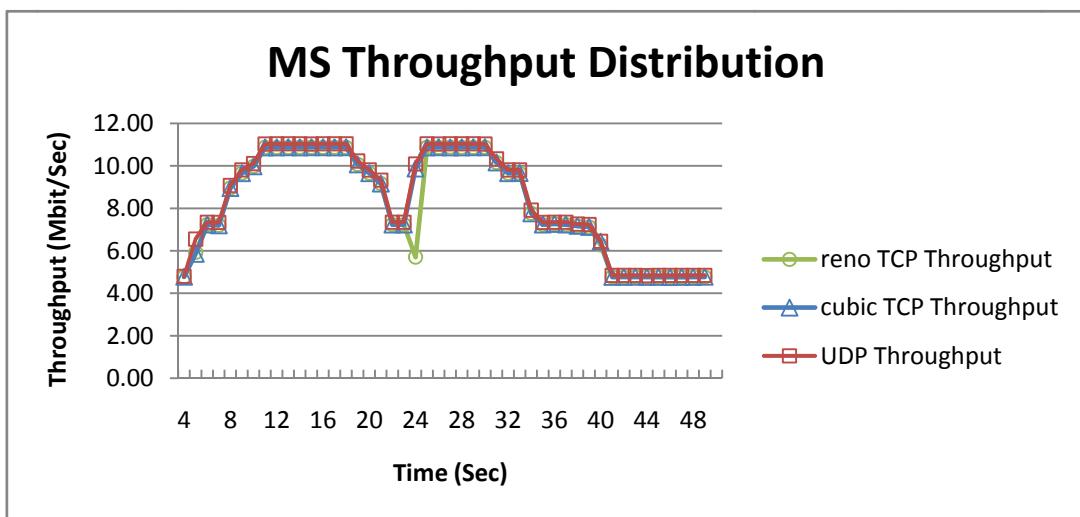


圖 4-8 用戶端下行 TCP 與 UDP 流量-2

4.1.3. 動態調整調變方式與編碼技術

在此小節中，我們將進行用戶端與基地台間動態調整的調變方式與編碼技術下的 UDP 效能量測，圖 4-9 為驗證此功能的網路拓樸。



圖 4-9 基地台與用戶端間動態調整調變方式與編碼技術的網路拓樸

為了能夠看出動態調整基地台與用戶端間所使用的調變方式與編碼技術對於用戶端資料接收的正確性，我們在此模擬驗證中將會啟動通道編碼功能並且調整 CM 模組中的環境參數來觀察從基地台傳送到用戶端的 UDP throughput 效能的分布。以下為我們進行此項模擬 CM 模組中所設定的環境參數：

- Channel Model : Empirical model (COST_231_Hata)
- Transmit Power : MR-BS (43dBm) ; MS (35dBm)
- Antenna Height : MR-BS (30m) ; MS (1.5m)

在此網路拓樸中，包含一個 Host、一個 MR-BS 與一個用戶端節點；在此模擬中，用戶端會於距離基地台 35 公尺的地點以 15 公尺/秒的行進速度往遠離基地台的方向移動，並且由 Host 傳送 greedy UDP 封包至用戶端，為了觀察調變方式與編碼技術在不同距離下對於資料正確性所造成的影响，我們會啟動通道編碼的功能，並且量測在不同距離下用戶端所能正確接收到的封包，如圖 4-10，由圖中可以發現當使用傳輸速率越高的調變編碼技術，用戶端能夠正確接收到基地台所傳輸的封包距離越短，例如：當使用 64QAM 3/4 的調變編碼技術時，在目前 CM 模組參數所設定的環境參數底下，用戶端在距離基地台 380 公尺遠處已經無法正確收到由基地台所傳送的 UDP 封包。圖 4-11，為我們使用動態調整基地台與用戶端所使用的調變編碼技術所量測出來用戶端的 UDP throughput 效能，我們可以發現藉由動態調整基地台與用戶端間的調變編碼技術，可以確保用戶端在移動式網路中能夠正確的接收基地台所傳送的封包。

Downlink Throughput under Different Modulation Scheme

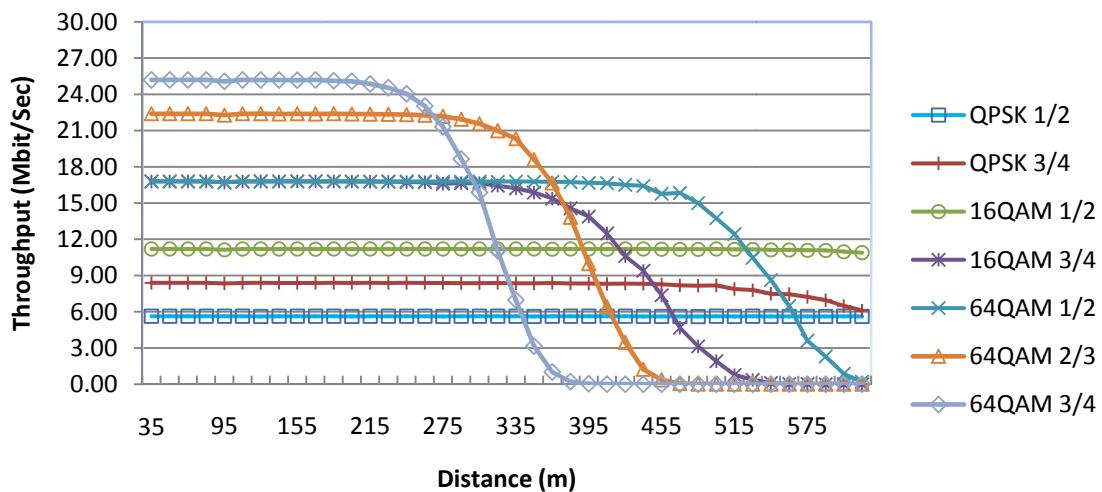


圖 4-10 用戶端在不同距離下使用不同調變技術的 UDP 流量

Downlink Throughput with Adaptive Modulation Scheme

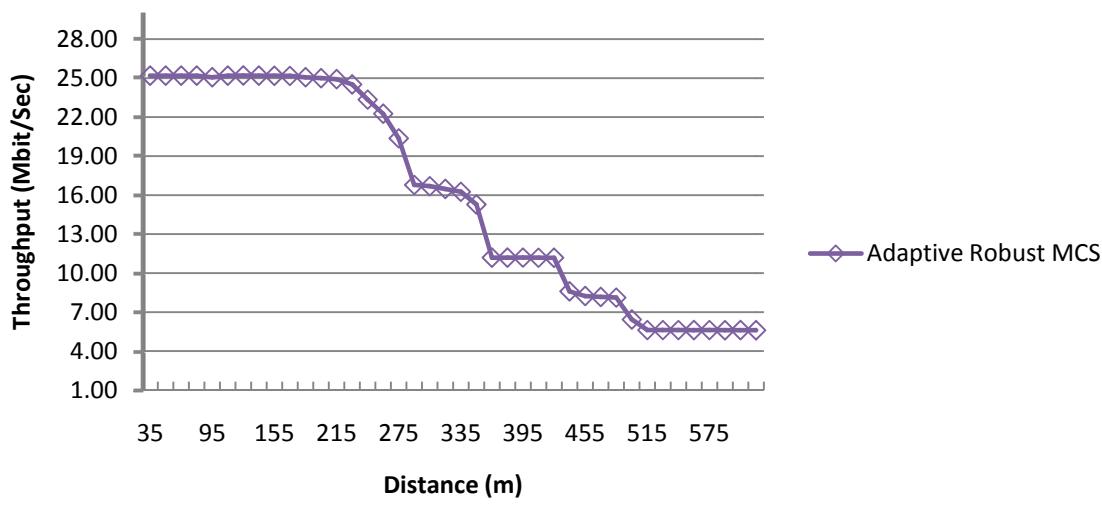


圖 4-11 使用 Adaptive Modulation 後用戶端的 UDP 流量

4.2. 模擬效能分析

在本小節中，我們將根據基地台、中繼台和用戶端之間所使用的調變方式與編碼技術並且搭配傳送上層資料來進行模擬的效能量測，以下為我們進行模擬效能量測的平台與環境：

CPU : Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q9300 2.50GHz (使用單核心)。

Memory : 4 GB

OS : Linux Fedora 10 with kernel 2.6.27.7-nctuns-20090319

在第一項模擬效能測試中，我們將分成兩種網路拓樸來進行模擬效能量測，第一種網路拓樸為一個 802.16j MR-BS 節點搭配一個 802.16j MS 節點；第二種網路拓樸為一個 802.16j MR-BS 節點搭配一個 RS 節點與一個 MS 節點。在此模擬中，我們會開啟通道編碼功能，此功能會將 WiMAX 網路中所傳遞的封包根據所使用的調變編碼技術以 slot 為單位進行編碼與解碼程序，用來模擬實體層的行為，所以會耗費相當大的時間。在此模擬量測中，設備台之間只有傳輸 802.16j 網路協定下進行溝通的管理訊息，並且根據各節點之間所使用的調變方式與編碼技術的不同來對效能進行量測。效能量測結果如表 4-4、4-5。在第一種網路拓樸中，在網路中只充斥著基地台與用戶端進行溝通的管理訊息，從結果中顯示當我們開啟通道編碼功能後，在此種拓樸下模擬所需的時間大概為真實世界時間的 2.1 倍慢，而在第二種網路拓樸中我們多增加了一個中繼台節點，結果顯示在此種拓樸下所花費的時間比第一種拓樸多將近了一倍，模擬所需的時間為真實世界時間的 4.03 倍慢，原因是因為在 IEEE 802.16j 網路中，中繼台進行入網程序所需傳送的管理訊息與用戶端相去不遠，所以此種拓樸對於基地台而言相當於網路拓樸下包含處理兩個用戶端所進行入網程序所必須花費的時間，符合我們所預期的結果。在此兩個拓樸下所使用的記憶體範圍介於 14,400~14,812 Kb 間，根據模擬時間的進展，記憶體的使用量為穩定的。

Simulation Time (second)		30		60		90	
FEC	Mode	Time (Sec)	Mem (KB)	Time (Sec)	Mem (KB)	Time (Sec)	Mem (KB)
0	QPSK 1/2	63	14,492	123	14,492	186	14,628
1	QPSK 3/4	62	14,492	124	14,492	186	14,628
2	16QAM 1/2	62	14,492	124	14,628	186	14,640
3	16QAM 3/4	63	14,492	123	14,628	186	14,632
4	64QAM 1/2	62	14,492	123	14,628	186	14,628
5	64QAM 2/3	62	14,492	124	14,628	186	14,640
6	64QAM 3/4	62	14,492	124	14,628	186	14,640

表 4-4 MR-BS 與 MS 間僅傳輸管理訊息並開啟通道編碼功能的實驗結果

Simulation Time (second)		30		60		90	
FEC	Mode	Time (Sec)	Mem (KB)	Time (Sec)	Mem (KB)	Time (Sec)	Mem (KB)
0	QPSK 1/2	121	14,400	241	14,400	369	14,460
1	QPSK 3/4	122	14,528	241	14,684	368	14,816
2	16QAM 1/2	122	14,528	242	14,684	368	14,816
3	16QAM 3/4	122	14,528	240	14,684	369	14,816
4	64QAM 1/2	121	14,528	241	14,684	369	14,816
5	64QAM 2/3	124	14,528	241	14,684	368	14,812
6	64QAM 3/4	124	14,680	247	14,812	374	14,812

表 4-5 MR-BS、RS 與 MS 間僅傳輸管理訊息並開啟通道編碼功能的實驗結果

在第二項模擬效能測試中，我們會再第一項模擬測試的兩種網路拓樸中加入由基地台傳送至用戶端的 greedy UDP 封包，並且分別觀察在通道編碼功能啟動與關閉下，所耗費的時間與記憶體使用量。表 4-6、4-7 為兩種拓樸下模擬效能量測的結果。在表中我們可以發現，通道編碼啟動與否對於記憶體使用量並不會造成影響，只會影響模擬所需的時間，由於我們在此項模擬測試中加入上層所傳送的 UDP 封包，封包在經由傳送端的實體層到接收端的實體層間都必須經過通道編碼和解碼，所以會耗費相當多的時間。由表中可以看出在 QPSK 1/2 的調變編碼技術下，開啟通道編碼後所需的時間大約為模擬時間的 37 倍慢，且隨著單位 slot 中所含的資料量變多，所需的時間也會跟著成長，在傳輸速率最好的 64QAM 3/4 調變編碼技術下，實際所耗費的時間成長至模擬時間的 160 倍。此外，因為在第二種網路拓樸中比第

一種網路拓樸多了一個中繼台，中繼台在下行存取地帶還是會接收到由基地台所發送的封包，在實體層上還是會進行通道解碼的行為，所以耗費的時間又比第一種拓樸多了將近一倍的時間，由表中可以看出符合我們所預期的狀況。

Simulation Time (second)		30 seconds with coding		30 second without coding	
FEC	Mode	Time (Sec)	Mem (KB)	Time (Sec)	Mem (KB)
0	QPSK 1/2	1,117	36,300	40	36,160
1	QPSK 3/4	1,645	36,240	49	36,048
2	16QAM 1/2	2,185	36,276	49	36,308
3	16QAM 3/4	3,245	36,496	50	36,308
4	64QAM 1/2	3,215	36,452	49	36,324
5	64QAM 2/3	4,315	36,284	50	36,436
6	64QAM 3/4	4,815	36,468	50	36,432

表 4-6 MR-BS 與 MS 間傳輸 greedy UDP 封包並開啟通道編碼功能的實驗結果

Simulation Time (second)		30 seconds with coding		30 second without coding	
FEC	Mode	Time (Sec)	Mem (KB)	Time (Sec)	Mem (KB)
0	QPSK 1/2	2,070	36,260	69	36,540
1	QPSK 3/4	3,050	36,264	73	36,172
2	16QAM 1/2	3,935	36,392	71	36,160
3	16QAM 3/4	5,870	36,400	68	36,168
4	64QAM 1/2	5,805	36,540	70	36,576
5	64QAM 2/3	7,825	36,568	69	36,168
6	64QAM 3/4	8,765	36,604	69	36,540

表 4-7 MR-BS、RS 與 MS 間傳輸 greedy UDP 封包並開啟通道編碼功能的實驗結果

Chaper 5. Future Work

在上述章節中，我們說明了在 NCTUns 模擬器上設計與實作 IEEE 802.16j 中控型穿透式中繼台網路的流程與架構，並且透過各項模擬來驗證實作的正確性。在目前的實作設計上，我們只針對必要的機制基本流程進行實作，且由於目前 IEEE 802.16j 尚在草案階段，在規格中的各項機制有可能會在異動，目前我們所參考的草案版本為 IEEE 802.16j 第五版標準草案，其中有些機制在此版草案並沒有很詳盡的訂定。除此之外，在 IEEE 802.16 規格中為了支援不同的系統參數與環境，定義了許多額外的功能，在本章中，我們將列出目前在中控型穿透式中繼台網路實作尚未進行實作的部分，提供未來正式規格出版後，可以進行新增或修改。



I. 移動式中繼台的換手機制

在 IEEE 802.16j 規格中定義中繼台包含三種型態，分別為固定式、游牧式與移動式中繼台。為了支援可移動中繼台，規格中定義對於移動式中繼台進行換手程序所必須遵守的機制，包括基地台與中繼台間的換手程序和中繼台與所管理的用戶端之間的換手機制以及路徑重新規劃。在目前中控型穿透式網路實作中，我們僅支援固定式中繼台。

II. 服務品質與頻寬請求功能

在 IEEE 802.16 規格中定義了五種服務品質的支援，目前在我們的模組設計中，僅提供了類似 UGS (Unsolicited grant service) 的方式來對於所必須傳送的資料進行排程，基地台藉由用戶端所預先設定的 provisioned QoS profile 來進行用戶端所需的頻寬配置。在規範中，頻寬請求機制包括用戶端與中繼台和中繼台與基地台之

間，所以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。

III. 中繼台群組與中繼台群播功能

在規格中定義於多段轉傳網路下的中繼台可以進行中繼台群組設定，基地台可以透過群播的功能針對一個群組下的所管理的用戶端和中繼台進行群播資料傳送，在經由群組中繼台的接取點中繼台將資料轉送到下位的中繼台或用戶端上，透過中繼台群組執行群播的功能可以使得基地台可以節省與中繼台間連線的建立。

IV. 非穿透式中繼台網路設計

在規格中訂定了兩種中繼台模式，分別為穿透式中繼台與非穿透式中繼台。本篇論文所實作的為 IEEE 802.16j 所建議設計穿透式中繼台網路，主要是建置在二段式 WiMAX 多段轉傳網路拓樸下，非穿透式中繼台則是為了支援更多 hop count 個數多段轉傳功能所訂定的中繼台。在此種多段轉傳 WiMAX 網路下，必須支援通道模式的 PDU 遞送方式並且對於實體層的訊框架構有不同的規劃方式。除此之外，隨著多段轉傳的個數變多，基地台與中繼台間必須維護一套連線識別碼與路徑的路由表來幫忙轉傳資料。

V. 軟式換手的支援

目前在模組中僅支援規格中必須的硬式換手功能，用戶端藉由頻道掃描來取得鄰近基地台頻道的訊號品質，提供基地台進行換手決策參考。硬式換手的機制在於執行換手時，基地台與用戶端間所建立的連線會先被中斷，然後再與目標基地台重新進行連線，此舉會產生用戶端通訊會有短暫的中斷有可能會造成資料傳輸上的遺失或錯誤。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。

Chaper 6. Conclusion

在上述章節中，我們介紹了 IEEE 802.16j 中控型排程穿透式中繼台網路協定中最主要的核心部分，包括媒體控制層與實體層，並且根據目前在標準草案中所新制定的基地台、中繼台與用戶端之間的入網程序與基本控制溝通程序進行說明。緊接著，在第三章中，針對我們所要實作的中控型排程穿透式網路，我們提出在穿透式網路下所必須支援的三種設備台之設計方案與網路協定堆疊架構，且為了增進設計模組化的概念，分成媒體控制層與實體層兩個部分提出我們的設計概念。在媒體控制層設計上，包含基地台排程器設計、中繼台與用戶端的入網程序、用戶端的最佳路徑選擇方式、用戶端的換手機制與重新入網程序與中繼台封包的遞送方式等；另外，實體層設計方面，則包含二段式穿透式網路下使用 OFDMA 搭配 TDD 模式的實體層訊框架構設計方式、通道編碼方式等。除此之外，在協定堆疊中包含的通道模組 (CM module)可以進行各項模擬環境參數設定，提供更真實的模擬結果。在第四章中，我們對於在模擬器上所實作的中控型穿透式中繼台網路進行驗證，包括 UDP 與 TCP 流量量測、用戶端最佳路徑選擇與通道編碼功能驗證，並且進行模擬效能量測與分析。

隨著 IEEE 802.16 各項規範陸續底訂，越來越多國家與廠商陸續對 WiMAX 領域積極投入研究，為了要解決佈建基地台所耗費的龐大成本並且有效延伸基地台的服務範圍，IEEE 802.16j 規格因應而生，由於目前此規格還在草案階段，為了要提供研究者一個方便規劃多段轉傳網路拓樸的模擬平台，我們在 NCTUns 模擬器上開發了 IEEE 802.16j 穿透式中繼台網路模組並且在圖形化介面上新增了三個支援 IEEE 802.16j 穿透式網路的節點，分別為 MR-BS、RS in Transparent mode 與 MS，藉由此介面使用者可以很容易建置出模擬的網路拓樸，並且可以先行利用網路模擬器來評估中繼台佈建方式對於傳輸效能的提升，降低建置實際網路所必須耗費成本。

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] *IEEE Draft D5, “Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Multi-hop Relay Specification”, May 2008*
- [4] *Vasken Genc, Sean Murphy, Yang Yu, and John Murphy, “IEEE 802.16j Relay-based Wireless Access Networks: An Overview”, IEEE Wireless Communications, Oct. 2008.*
- [5] *Jeffrey G. Andrews, Arunabha Ghosh and Rias Muhamed, “Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking”, Prentice Hall, Feb. 2007.*
- [6] *Loutfi Nuaymi, “WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access”, John Wiley, Mar. 2007.*
- [7] *Se-Ying Lin, “Simulating WiMAX PMP Networks over the NCTUns Network Simulator”, Thesis of Master, June 2006.*
- [8] *Cheng-Kai Lai, “Simulating IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks over the NCTUns Network Simulator”, Thesis of Master, June 2008.*
- [9] *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.*
- [10] *Bill Wilkie and Beth Cowie, “Viterbi Decoder Block Decoding - Trellis Termination and Tail Biting”, XILINX, Feb. 2005.*

- [11] *J. Chen, et al. “The Design and Implementation of WiMAX Module for ns-2 Simulator”, WNS2 '06, Oct. 2006.*
- [12] *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.*
- [13] *Vasken Genc, Sean Murphy, John Murphy, “An Interference-Aware Analytic Model for Performance Analysis of Transparent Mode 802.16j Systems”, IEEE 2008 ,GLOBECOM Workshops*
- [14] *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.*
- [15] The Light WiMAX Simulator available at <http://sites.google.com/site/lwxns2/>
- [16] The OPNET modeler. available at <http://www.opnet.com/>
- [17] The QualNet software. available at <http://www.scalable-networks.com/>.

