

# 國立交通大學

網路工程研究所

碩士論文

在 NCTUns 網路模擬器上進行 IEEE 802.16j

非穿透式網路的效能評估與驗證



Performance Evaluation of IEEE 802.16j Non-transparent Networks  
on the NCTUns Network Simulator

研究生：莊士緯

指導教授：王協源 教授

中華民國九十九年七月

在 NCTUns 網路模擬器上進行 IEEE 802.16j 非穿透式網路的效能評估與驗證

Performance Evaluation of IEEE 802.16j Non-transparent Networks on the NCTUns Network Simulator

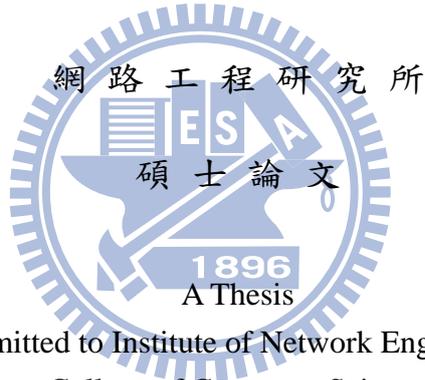
研究生：莊士緯

Student : Shih-Wei Chuang

指導教授：王協源

Advisor : Shie-Yuan Wang

國立交通大學



Submitted to Institute of Network Engineering  
College of Computer Science  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in  
Computer Science

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

# 在 NCTUns 網路模擬器上進行 IEEE 802.16j 非穿透式網路的效能評估與驗證

研究生：莊士緯

指導教授：王協源

國立交通大學 網路工程研究所 碩士班

## 摘要

隨著無線網路的使用越來越普及，網路頻寬需求也日益趨增，目前已有發展多項無線存取技術來提升整體系統的涵蓋率以及網路的頻寬，其中，WiMAX 正是近年來各國極力推廣的技術之一。WiMAX 是基於 IEEE 802.16 系列的標準，包含了固定式 WiMAX IEEE 802.16d、移動式 WiMAX IEEE 802.16e 以及目前最新發展的 IEEE 802.16j 與 IEEE 802.16m。IEEE 802.16j 是 IEEE 802.16e 標準的延伸增訂版本，目的是為了提升原本 IEEE 802.16e 網路佈建下仍有許多訊號死角的問題，以及藉由中繼台的佈建來擴展基地台的服務範圍而無需再新建新的基地台以耗費龐大的成本。

由於目前市面上還沒有真正的 IEEE 802.16j 設備，而目前眾多網路模擬器中也尚未完整支援此套標準，因此，我們將在 NCTUns 網路模擬器中開發實作此標準中的非穿透式網路，並改良非穿透式網路訊框結構以達到標準中提及之多段轉送的目的，使得相關的研究者能藉由此模擬平台對 IEEE 802.16j 進行更深入的研究。

關鍵字：NCTUns、網路模擬器、IEEE 802.16j、非穿透式網路、多段轉送

# Performance Evaluation of IEEE 802.16j Non-transparent Networks on the NCTUns Network Simulator

Student : Shih-Wei Chuang

Advisor : Shie-Yuan Wang

Institute of Network Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

With the growing popularity of wireless network use, network bandwidth requirements are increasing day by day, there are already developing a number of wireless access technologies to improve the overall system coverage and network bandwidth, which, WiMAX is. Many states strongly promoted this technology in recent years. WiMAX is based on the IEEE 802.16 series of standards, including the fixed WiMAX IEEE 802.16d, Mobile WiMAX IEEE 802.16e and IEEE 802.16j and IEEE 802.16m present the latest developments. IEEE 802.16j is an extended version of the original IEEE 802.16e standard to enhance the IEEE 802.16e networks that are many signal dead space, as well as to extend the base station's services range by developing relay stations which is low cost compared with reconstructing new base station.

So far many network simulators have not yet fully supported IEEE 802.16j non-transparent network. The most feature of this kind of network is it supports multi-hop relay and we want to know how the performance is under this network. According to this, we will implement it in NCTUns network simulator.

Keywords : IEEE 802.16j, NCTUns network simulator, multi-hop relay.

# 致 謝 辭

首先，我要感謝我的指導教授王協源老師兩年來的指導，使我無論在課業、研究或生活上都學到了許多寶貴的經驗和知識。透過老師平日分配的工作，更讓我接觸到許多新穎的技術，提升我在專業領域上的能力，並加強實務經驗而非紙上談兵，相信這些學習的過程對未來一定有很大的幫助。

感謝逢愛君教授、陳仁暉教授與賴源正教授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。

感謝周智良及林志哲兩位博班學長，在學長們細心的指導及帶領之下才能讓我在做研究時所遭遇到的問題能夠迎刃而解，而平時生活上的經驗傳承更讓我受益良多。此外感謝兩年來在實驗室一起奮鬥的好夥伴，因為有你們才使我研究所生涯豐富而精彩，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。還要感謝所有的同學及朋友們，有你們的支持與陪伴，我一路走來並不孤單。

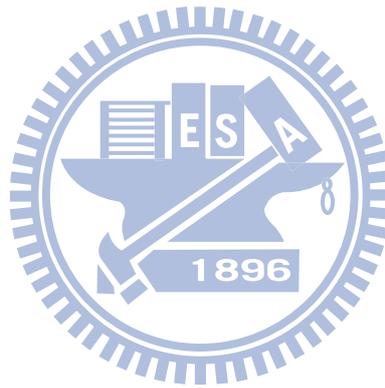
最後，我要感謝我的家人，謝謝你們在我研究所求學路程上的支持，讓我能夠無後顧之憂全心全意的完成我的碩士學程，希望這份榮耀能夠與你們分享。

# 目次

摘要.....	I
ABSTRACT .....	II
致謝辭 .....	III
目次.....	IV
表目錄.....	VII
圖目錄.....	VIII
1. 緒論.....	1
2. 背景.....	4
2.1 相關文獻.....	7
2.2 媒體存取控制層 .....	9
2.2.1 特定服務收斂子層 .....	9
2.2.2 通用子層.....	10
2.2.2.1 連線管理方式.....	11
2.2.2.2 MAC PDU 格式 .....	12
2.2.2.2.1 RS BANDWIDTH REQUEST HEADER (RS BR).....	15
2.2.2.2.2 MR CODE-REP HEADER .....	16
2.2.2.3 連線識別碼.....	17
2.2.2.4 MAC 管理訊息 .....	18
2.2.2.5 初始測距與入網程序 .....	20
2.2.2.6 定期測距.....	26
2.2.2.7 換手機制與程序 .....	27

2.2.3 安全子層.....	30
2.3 實體層.....	31
2.3.1 正交分頻多重存取.....	31
2.3.2 可適性調變與編碼.....	32
2.3.3 兩段式中繼網路訊框結構.....	34
2.3.4 多段式中繼網路訊框結構.....	37
<b>3. 系統設計與實作.....</b>	<b>38</b>
3.1 NCTUNS 網路模擬器平台介紹.....	38
3.2 支援的節點與網路拓樸.....	41
3.3 IEEE 802.16j 非穿透式網路協定堆疊.....	43
3.3.1 MR-BS 節點.....	43
3.3.2 NT-RS 節點.....	44
3.3.3 MS 節點.....	45
3.4 IEEE 802.16j 中控型非穿透式網路模組設計與實作.....	46
3.4.1 媒體存取控制層模組的設計.....	47
3.4.1.1 MR-BS 媒體存取控制層的模組設計與實作.....	54
3.4.1.2 NT-RS 媒體存取控制層的模組設計與實作.....	65
3.4.1.3 MS 媒體存取控制層的模組設計與實作.....	68
3.4.1.4 多段轉送排程方法.....	69
3.4.2 實體層模組設計與實作.....	72
3.4.2.1 MR-BS 實體層的模組設計與實作.....	75
3.4.2.2 NT-RS 實體層的模組設計與實作.....	76
3.4.2.3 MS 實體層的模組設計與實作.....	79
<b>4. 模擬結果驗證.....</b>	<b>81</b>

4.1 模擬結果分析與驗證.....	82
4.1.1 效能量測參數.....	82
4.1.2 UDP 效能測量.....	84
4.1.3 時間延遲量測.....	92
5. 未來展望.....	96
6. 結論.....	98
7. 參考文獻.....	99



# 表目錄

表 2-1 穿透式模式與非穿透式模式比較.....	6
表 2-2 MAC 連線管理模式比較.....	12
表 2-3 GENERIC MAC HEADER TYPE 欄位說明.....	14
表 2-4 GENERIC MAC HEADER 欄位說明.....	14
表 2-5 EXTENDED MAC SIGNALING HEADER TYPE II 的 TYPE 欄位說明.....	15
表 2-6 RS BR HEADER 欄位.....	16
表 2-7 MR CODE-REP HEADER 欄位.....	17
表 2-8 連線識別碼(CID)配置範圍.....	18
表 2-9 管理訊息類別與描述.....	20
表 2-10 OFDMA 實體層相關係數.....	32
表 2-11 不同 FEC 下的單位 SLOT 傳輸量.....	34
表 3-1 DLPUSC 參數表.....	59
表 3-2 ULPUSC 參數表.....	59
表 4-1 模擬時的系統參數.....	81
表 4-2 MR-BS 與 MS (1-HOP) 在不同 FEC 下的傳輸效能量測.....	85
表 4-4 超級訊框排程下搭配不同調變方式與編碼技術的傳輸效能.....	90
表 4-5 不同 HOP 數情形下針對不同調變方式的下行資料傳輸量.....	91
表 4-6 不同 HOP 數情形下針對不同調變方式的下行訊框使用率(UP).....	92
表 4-7 不同 HOP 數情形下針對不同調變方式的下行訊框使用率(UF).....	92

# 圖目錄

圖 2-1 IEEE 802.16 分層架構.....	8
圖 2-2 收斂子層支援的封包型態.....	10
圖 2-3 MAC PDU 格式.....	13
圖 2-4 GENERIC MAC HEADER 欄位格式.....	13
圖 2-5 RS BR HEADER 格式.....	15
圖 2-6 MR CODE-REP HEADER 格式.....	16
圖 2-7 MAC 管理訊息格式.....	19
圖 2-8 MS 入網程序.....	22
圖 2-9 MS 對中控型非穿透式中繼台的初始測距流程.....	24
圖 2-10 RS 入網程序.....	26
圖 2-11 MS 定期測距流程.....	27
圖 2-13 用戶端換手機制下重新入網程序.....	30
圖 2-14 實體層傳送與接收的調變與編碼流程.....	33
圖 2-15 二段式非穿透式網路下 MR-BS 訊框架構.....	35
圖 2-16 二段式非穿透式網路下 RS 訊框架構.....	35
圖 2-17 超級訊框架構.....	37
圖 3-1 NCTUNS 裡的模組堆疊架構.....	39
圖 3-2 NSOBJECT CLASS 定義.....	40
圖 3-3 模組間封包的傳遞架構.....	41
圖 3-4 IEEE 802.16J 非穿透式網路節點.....	42
圖 3-5 IEEE 802.16J 非穿透式網路拓樸.....	42
圖 3-6 非穿透式網路下節點的協定堆疊.....	45
圖 3-7 MS OBJECT 與 RS OBJECT 物件結構.....	55

圖 3-8 MR-BS、MS 與 NT-RS 物件間的資料傳送.....	57
圖 3-9 下行子訊框與上行子訊框 SLOT 配置方法.....	59
圖 3-10 MR-BS 訊框結構.....	60
圖 3-11 三段式轉傳網路拓樸.....	61
圖 3-12 上行轉送地帶的測距子通道分配方式.....	62
圖 3-14 以 RR 方式配置下行轉送地帶.....	64
圖 3-15 基地台排程器流程圖.....	65
圖 3-16 NT-RS 媒體存取控制層處理封包流程.....	67
圖 3-17 MS 換手流程.....	69
圖 3-18 兩段式轉傳訊框結構.....	70
圖 3-19 多重轉送訊框結構.....	72
圖 3-20 FCH 與 R-FCH 的配置方式.....	73
圖 3-21 3-SECTOR MR-BS 與 NT-RS 的頻段分配.....	76
圖 3-22 NT-RS 實體層處理封包流程.....	78
圖 3-23 MS 掃描各頻段流程圖.....	80
圖 4-1 基地台下行存取地帶 UDP 效能量測之網路拓樸.....	84
圖 4-2 用戶端下行存取地帶最大配置情形.....	85
圖 4-3 不同 FEC 下的 UDP 效能.....	87
圖 4-4 基地台下行轉送地帶 UDP 效能測量之網路拓樸.....	87
圖 4-5 下行轉送地帶最大配置情形.....	88
圖 4-6 下行最大傳輸率量測.....	90
圖 4-7 在 2-HOP 下的 PING DELAY.....	93
圖 4-8 在 MULTI-HOP 下的 PING DELAY.....	93
圖 4-9 1-HOP 情形下 ICMP 封包時序圖.....	94

# 1.緒論

近年來，無線寬頻網路存取技術的需求已日漸茁壯，越來越多的使用者藉由這項技術進行高效率的無線訊號傳輸，因其擁有傳統定點寬頻的高傳輸率並具有任意移動的高行動性與方便性。其中，WiMAX (Worldwide Interoperability of Microwave Access，全球互通微波存取) 適用於無線都會型區域網路 (Wireless MAN)，不但具有高傳輸速率、訊號涵蓋範圍廣、支援行動通訊、提供不同網路頻寬需求 (Quality of Service；QoS) 服務等特性，並彌補傳統網路最後一哩 (Last mile) 的不足，是近來各國極力發展的一項新興無線寬頻存取技術。

WiMAX 是 IEEE 802.16 工作小組針對無線都會網路進行規畫的一套標準。其發展大致可分為五個階段：(1) IEEE 802.16，這是最早的 802.16 標準，於 2001 年 12 月提出。主要著重在點對多點的直視性(Line of Sight，簡稱：LOS)傳輸，使用 10GHz~66GHz 頻段。(2) IEEE 802.16a，這是針對 IEEE 802.16 標準的修訂版，於 2003 年 1 月提出。主要增加非直視性(None Line of Sight，簡稱：NLOS)傳輸並將可用頻段調整為 2GHz~11GHz。其中使用了正交分頻多工(Orthogonal Frequency Division Multiplexing，簡稱：OFDM)技術與正交分頻多重存取(Orthogonal Frequency Division Multiple Access，簡稱：OFDMA)技術，可以抵抗無線傳輸多重路徑衰減的問題。(3) IEEE 802.16-2004 (以下簡稱 IEEE 802.16d)，這是 IEEE 802.16 與 IEEE 802.16a 以及 IEEE 802.16c 整合的版本，在 2004 年 6 月提出，並成為未來固接式通訊裝置所應遵循的規格，一般稱為「固定式 WiMAX」 (Fixed WiMAX)。(4) IEEE 802.16e-2005 (以下簡稱 IEEE 802.16e)，這是 IEEE 802.16-2004 的增訂版，在 2005 年 12 月提出，主要針對原本固接式網路的基礎上增加行動性的支援，一般稱為「行動式 WiMAX」 (Mobile WiMAX)。(5)

IEEE 802.16-2009，在 2009 年 5 月發布，這份標準整合了 IEEE 802.16d、IEEE 802.16e、IEEE 802.16f、IEEE 802.16g 等規格，算是目前為止 WiMAX 最新最完整的文件。除了上述的正式規格之外，在 2009 年 6 月也發表了 IEEE 802.16j-2009 (以下簡稱 IEEE

802.16j)，主要是為了降低設備價格、鋪設速度以及基地台收購的成本並且提供行動多段轉傳 (Mobile Multi-hop Relay，簡稱：MMR)功能。此外目前尚有針對支援更高傳輸速率並致力符合 4G 標準的 IEEE 802.16m 標準草案正在進行中。

前面提到，為了提升基地台覆蓋範圍以及強化資料傳輸率，MMR 的概念產生了。其在 2005 年 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，而正式的規格已於 2009 年 6 月完成。由於 IEEE 802.16j 是以 IEEE 802.16e 標準為基礎而制定延伸的規格，所以也向下相容於舊有的 IEEE 802.16d 規格，其主要目的在於延伸 WiMAX 系統的系統覆蓋範圍，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。

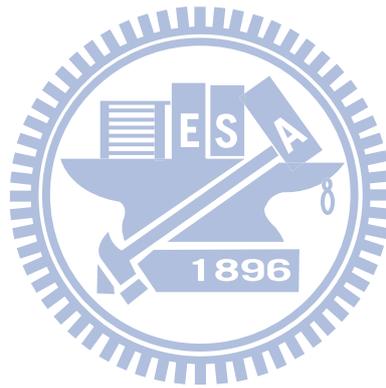
IEEE 802.16j 標準中定義了一種新的設備：中繼台 (Relay Station)，藉由中繼台的部屬來達成上述的目標。也因此原有的 WiMAX 媒體存取控制層 (Medium Access Control Layer，簡稱：MAC)及實體層 (Physical Layer，簡稱：PHY) 規範都需要做對應的調整。在實體層必須修改訊框(frame)結構以達到轉傳的目的；而在媒體存取控制層增加了中繼台入網程序以及使中繼台與基地台同步並避免中繼台間相互干擾的機制；同時為了提升系統服務效能，IEEE 802.16j 標準亦規範支援各種資料傳輸之路由管理機制、混合式自動重送請求機制、中繼台群播機制及支援中繼台移動換手之機制等。

目前 WiMAX 的研究已經相當普遍，但尚未有支援 IEEE 802.16j 非穿透式網路並能與真實世界的網路協定堆疊結合的網路模擬工具，因此無法導入真實網路流量並做效能測量。為了提供一個良好的 WiMAX 網路模擬研究平台，我們將在 NCTUns 網路模擬器上開發 IEEE 802.16j 網路協定，讓對 IEEE 802.16j 非穿透式網路有興趣的研究者，可以方便地使用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 中控型非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。



## 2. 背景

WiMAX 具有傳輸距離遠(最遠可達 50 公里)、傳輸速率高(最高可達 70Mbps) 、能快速布建及低成本等特性，適合中距離的無線傳輸服務，並作為無線高速接取網路的媒介。它以 IEEE 802.16 系列的標準做為其發展的依據。到目前為止，歷經幾個重要的版本如下：802.16 (2001)、802.16c (2002)、802.16a (2003)、802.16d (2004)、802.16e (2005)、802.16j (2009)。除了上述幾個已經正式通過的規格外，目前尚有 802.16m 的標準草案正在密集的訂定中，希望能提供更高的傳輸速率。底下我們將一一簡介各個版本的演進。

IEEE Std 802.16 是 IEEE 802.16 工作小組第一個提出的正式標準，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)。由於使用頻帶較高，訊號穿透力不足，基地台(Base Station, BS) 與用戶端(Subscribe Station, SS)必須進行直視性(LOS)的傳輸。因此，本規格較適用於戶外空曠的場合。

IEEE Std 802.16a 是 IEEE Std 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，並支援非直視性(NLOS)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 (Adaptive Modulation and Coding Scheme, 簡稱：AMC) 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 是以 IEEE Std 802.16e 點對點模式網路為基礎而延伸的規格，其目的是為了解決現行 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。因此在原本的移動式 WiMAX 架構下新增中繼台 (Relay Station; RS) 用來提供多段轉傳 (Multi-hop Relay) 的功能，在此份規格中，定義了兩種不同型態的中繼台：穿透式 (Transparent mode) 和非穿透式 (Non-transparent mode)，此兩種中繼台最主要的差異在於穿透式中繼台 (Transparent RS, 簡稱：T-RS) 不會發送前置訊號 (preamble) 也不會轉送基地台所發送的廣播管理訊息 (DLMAP、ULMAP、DCD 與 UCD 等) 到下屬的 (subordinate) 中繼台或用戶端，因此用戶端並不會藉由偵測前置訊號而得知中繼台的存在；非穿透式中繼台 (Non-transparent RS, NT-RS) 則如同基地台一般，在每個訊框 (frame) 的開端會發送前置訊號並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屬設備台上。也因此，穿透式模式的中繼台主要是用來提升整體傳輸速率，部屬在訊號死角，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。

IEEE 802.16j 為了相容於 IEEE 802.16e，原本 IEEE 802.16e 底下訂定的用戶端 (Mobile Station, MS) 不用變動就可以在此系統中運行。但是，基地台 (Base Station, BS)

為了提供多段轉傳的功能，除了與既有的用戶端(Mobile Station, MS)溝通，也需增加與中繼台(Relay Station, RS)溝通的能力，並同時支援中繼台和用戶端的初始測距和入網程序，因此，IEEE 802.16j 標準中定義了這種新的基地台稱為多段轉傳基地台(Multi-hop Relay Base Station, 簡稱：MR-BS)。此外，為了因應多段轉傳網路拓樸的成長而造成基地台的負擔和設計複雜度增加，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。在穿透式模式下，資源排程必為中控型，且最多僅能提供基地台至用戶端間經由中繼台進行二段式轉傳，其目的主要為提升基地台涵蓋範圍內整體的效能；而在非穿透式模式中，基地台可以選擇中控型或分散型的資源排程方式，並提供轉傳個數超過二以上的網路拓樸建置，其目的主要是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。表 2-1 比較了這兩種中繼模式的特性。

	穿透式模式	非穿透式模式
資源排程方式	中控型	中控型／分散型
中繼轉傳數量	2	2 或更多
成本／複雜度	低	高
整體效能提升	高	低
延伸涵蓋範圍	無	有
傳送前置訊號、廣播訊息	無	有

表 2-1 穿透式模式與非穿透式模式比較

目前在 NCTUns 網路模擬器中已經有支援的 WiMAX 網路如下：IEEE 802.16d 點對多點模式及網狀模式、IEEE 802.16e 點對點模式、IEEE 802.16j 穿透式模式。本篇論文主要是針對 IEEE 802.16j 規格中所定義的非穿透式模式進行設計實作，我們將在 NCTUns 網路模擬器上開發中控型非穿透式 (Centralized scheduling, Non-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[15]與 QualNet[16]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。[14]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 6.0 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 網路協定以及 IEEE 802.16j 穿透式模式網路。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 非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。

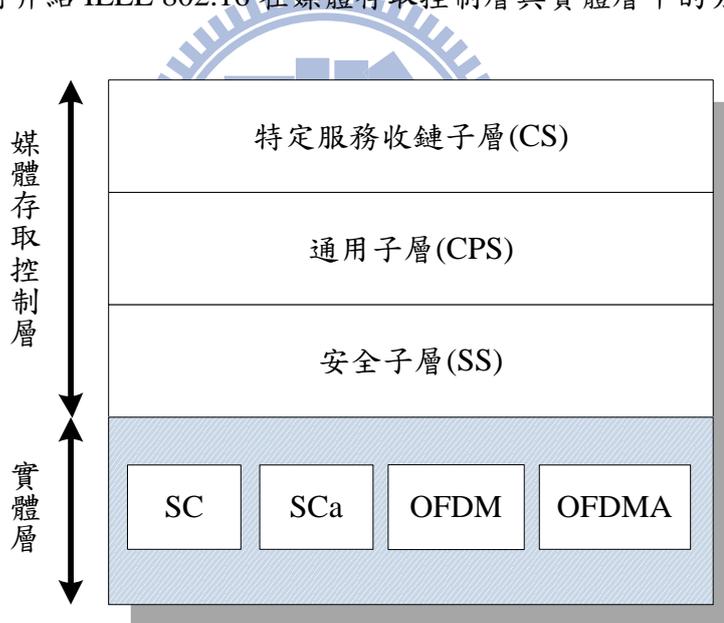


圖 2-1 IEEE 802.16 分層架構

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 ; CS)**：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 ; CPS)**：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 , SS)**：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。

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。

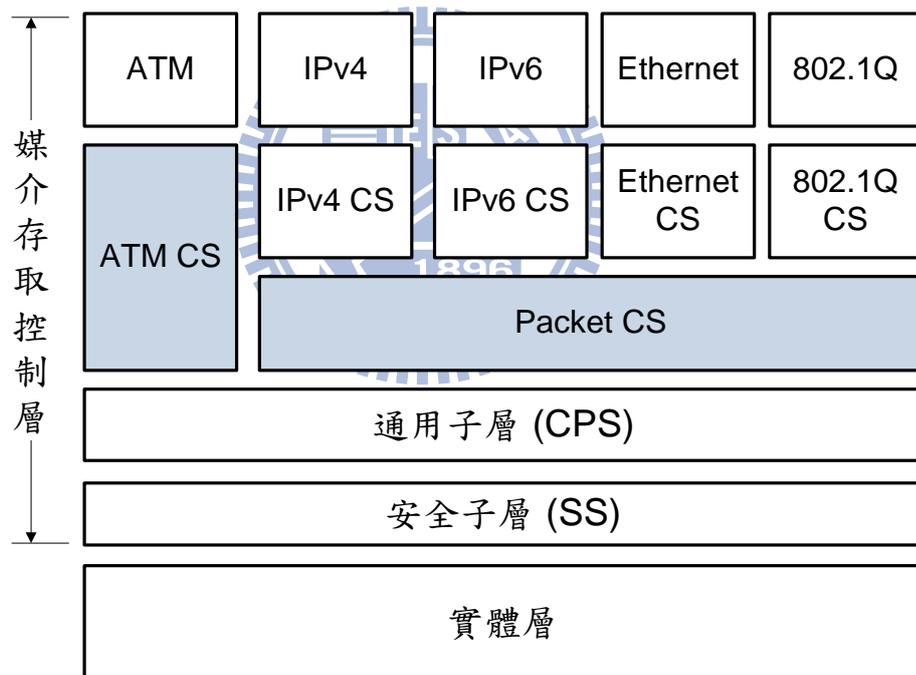


圖 2-2 收斂子層支援的封包型態

## 2.2.2 通用子層

此層是媒體存取控制層的主要核心運作部分，其負責了包含連線建立與管理、頻寬資源配置、服務品質保證 (QoS)、用戶端入網程序 (Network entry) 與測距 (Ranging)、

換手機制等，並且承接上層的 SDUs，從已分類的特定連線 (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，所有的資源均由基地台進行配置管理。基地台可採分時雙工 (Time Division Duplexing；TDD)或分頻雙工 (Frequency Division Duplexing；FDD)的模式配置每一個訊框 (frame)。為了支援多段中繼轉送，IEEE 802.16j 定義的訊框結構比 IEEE 802.16e 更複雜化，大致可還是分為兩大部分：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。而下行和上行子訊框又可再分為存取地帶 (access zone)和中繼傳輸地帶 (relay zone)。前者用於基地台與用戶端或中繼台與用戶端之間的傳輸 (基地台或中繼台都可以成為用戶端的接取點；Access Station)；後者用於基地台與中繼台或中繼台語中繼台之間的傳輸。

在 MAP 的管理訊息方面，除了既有的 DL-MAP、UL-MAP，IEEE 802.16j 中多了一種稱為 R-MAP 的管理訊息。DL-MAP 是用來描述下行子訊框的資料分配情形，UL-MAP 則是用來讓用戶端知道如何使用可競爭的測距頻道(Ranging sub-channel)以進行入網程序，以及了解何時可以上傳自己的資料。而 R-MAP 是放在下行中繼傳輸區塊，讓中繼站得知中繼區塊的資源分費方式以取得有用的資訊，並能在適當時間於上行傳輸區塊將自己與服務的用戶端資料上傳，達到中繼轉送的目的。

### 2.2.2.1 連線管理方式

IEEE 802.16j 定義了兩種連線管理模式，分別為：連線識別碼模式 (CID-base mode)與通道模式 (Tunnel mode)。前者為傳統的連線方式，從 IEEE 802.16d、IEEE 802.16e 乃至現在的 IEEE 802.16j 都適用。雖在多段轉送的非穿透式網路拓樸下亦能運作，但由於其傳遞方式必須先解開 PDU 比對連線識別碼再決定是否繼續轉送，當轉送的中繼台數量增加時，花費在解開 PDU 並進行封裝的過程中將造成時間的浪費與系統的負擔。因此，通道模式才因應而生，其目的即是為了減少不斷拆解 PDU 的負擔以便能更順暢

的轉送封包。以下為此兩種模式的定義：

(1) **連線識別碼模式 (CID-base mode)：**

使用連線識別碼中繼傳送 PDU 不用額外加上任何標頭，僅需將收到的突衝(burst)中的每一個 PDU 分別各自處理，基地台會傳送特定的管理訊息給中繼台上並於中繼台上維護一個轉送識別碼列表，因此藉由比對 PDU 中的連線識別碼與識別碼列表即可判斷是否要繼續往後中繼傳送。

(2) **通道模式 (Tunnel mode)：**

此種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。

表 2-2 比較了這兩種連線管理模式。

	連線識別碼模式	通道模式
PDU 處理程序	複雜	簡單
中繼轉送效率	低	高
額外標頭負擔	無	有

表 2-2 MAC 連線管理模式比較

### 2.2.2.2 MAC PDU 格式

如圖 2-3 所示，MAC PDU 包含了三個部分：(1) MAC 標頭，長度為 48 位元，每個 PDU 最前面都必須包上此標頭。(2) Payload，這是選擇性的欄位，主要是放 MAC 產生的管理訊息或是來是上層的資料，長度可變。(3) CRC 偵錯碼，這也是選擇性的欄

位，用來做錯誤偵測，長度為 32 位元。

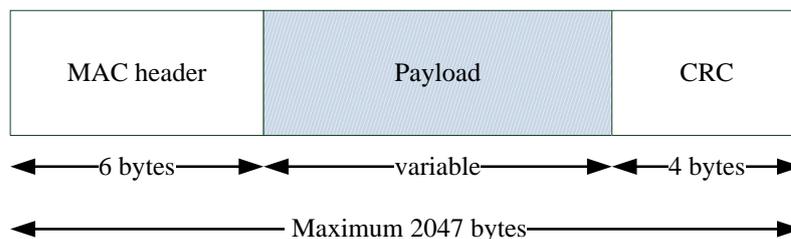


圖 2-3 MAC PDU 格式

MAC 標頭依照其後有沒有攜帶 payload 分為兩大類：Generic MAC Header 和 MAC Header without payload。Generic MAC Header 用來傳送資料和媒體控制層的管理訊息，上行和下行方向皆適用，其標頭欄位與內容，如圖 2-4 和表 2-4 所示。為了管理與傳輸各種訊息，可根據 MAC 標頭裡的 Type 欄位（表 2-3）夾帶不同用途的子標頭 (sub-header)。因此，子標頭也算是 payload 的一部分。MAC Header without payload 可分為 TYPE1 和 TYPE2 兩種型式，其僅適用於上行方向，而且標頭之後不能夾帶任何 payload 與 CRC，因此只有 48 位元。TYPE I 主要是用來提供下屬中繼台和用戶端進行頻寬請求、頻道品質偵測以及睡眠模式管理等，TYPE II 則是用在 Feedback Polling 相關的機制。

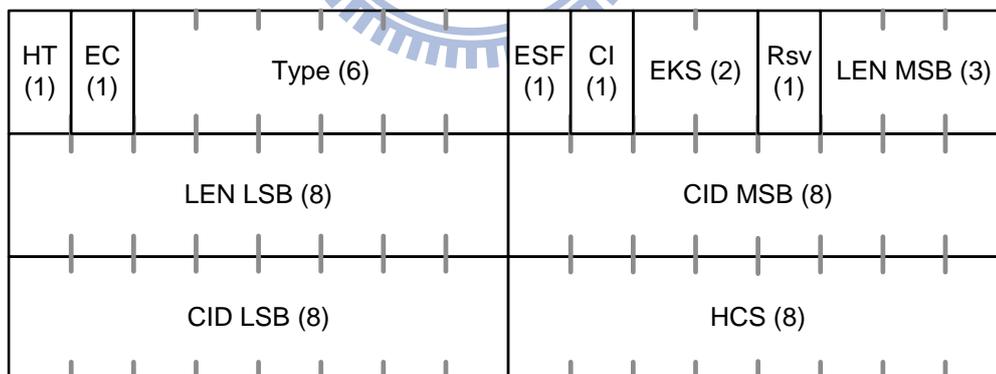


圖 2-4 Generic MAC Header 欄位格式

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 2-3 Generic MAC Header Type 欄位說明

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 2-4 Generic MAC Header 欄位說明

在 IEEE 802.16j 中，將 TYPE II 延伸並新增了幾個用於中繼台與基地台之間的標頭格式，如表 2-5 所示。其中 RS BR header (用於中繼台向基地台請求下行頻寬才能送 RNG-RSP 給用戶端)、MR Code-REP header (當非穿透式中繼台收到用戶端的 CDMA 碼之後會送此訊息給 BS，以便產生 CDMA allocation IEs) 是比較重要的兩個，我們也在模擬器中實做並使用，因此將在底下做詳盡的介紹。

延伸 Type 欄位	類型
0	RS BR header
1	RS UL_DCH signaling header
2	MR Acknowledgment header
3	MR HARQ error report header
4	MR Code-REP header
5	<i>Reserved</i>
6	Tunnel BR header
7	DL Flow Control Header

表 2-5 extended MAC signaling header type II 的 Type 欄位說明

#### 2.2.2.2.1 RS bandwidth request header (RS BR)

此標頭用於中控型的非穿透式中繼台向基地台請求下行存取區塊(access zone)的頻寬，以便能傳送諸如 RNG-RSP，MOB\_NBR-ADV，DCD，UCD 等訊息。其格式如圖 2-5 和表格 2-6。

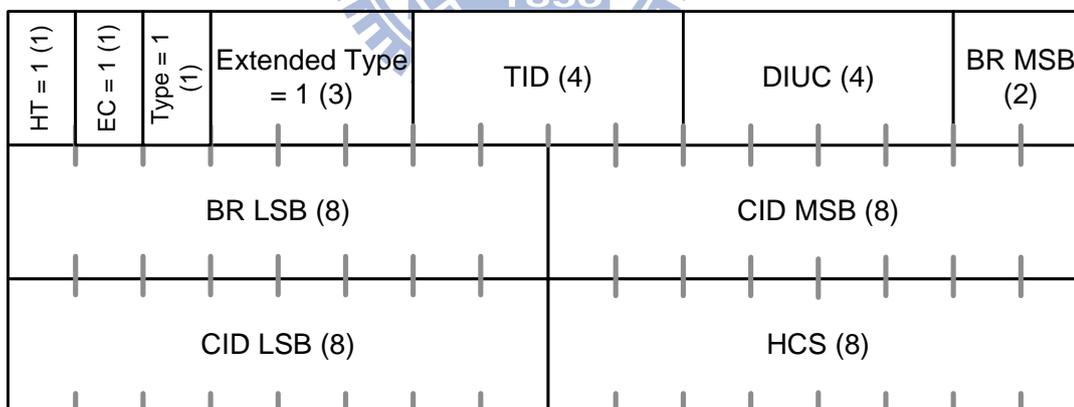


圖 2-5 RS BR header 格式

名稱	長度/bits	描述
TID	4	通道識別碼
DIUC	4	RS傳送訊息的DIUC
BR	10	向BS請求的頻寬(單位：位元組)
CID	16	RS的Basic CID
HCS	8	標頭檢查串列：用於標頭的錯誤檢測。

表 2-6 RS BR header 欄位

### 2.2.2.2.2 MR Code-REP header

此標頭適用於中控型的非穿透式中繼台。當中繼台收到用戶端的 CDMA 碼(IR CDMA code、BR CDMA code、HR CDMA code) 時會向基地台請求產生 CDMA Allocation IEs；基地台收到此標頭後產生 CDMA Allocation IE 並將 Frame Number Index、Ranging Code、Ranging Symbol，和 Ranging Subchannel 這四個欄位清成 0 再傳給中繼台，最後由中繼台填完這四個欄位再將 CDMA Allocation IE 回傳給用戶端。其格式如圖 2-6 和表 2-7 所示。

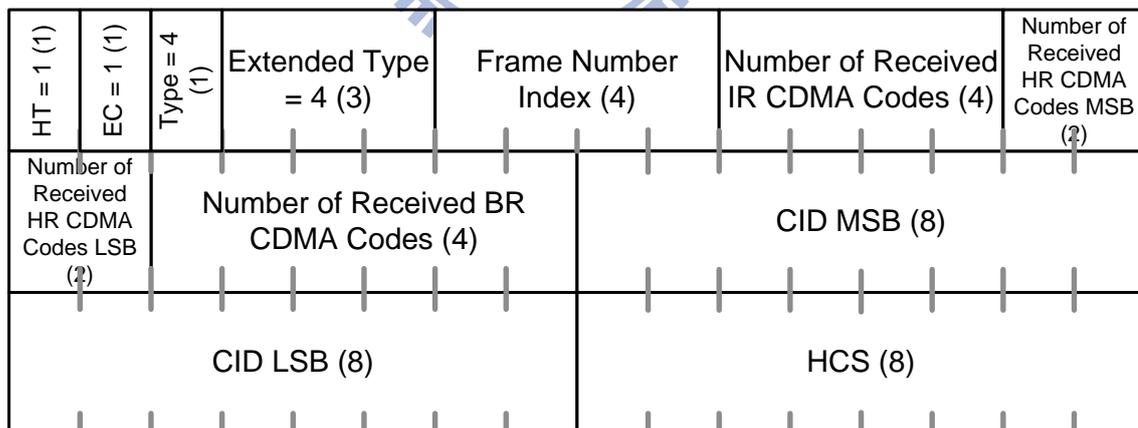


圖 2-6 MR Code-REP header 格式

名稱	長度/bits	描述
Frame Number Index	4	訊框號碼的LSB
Number of Received IR CDMA Codes	4	收到的初始測距CDMA碼的數量
Number of Received HR CDMA Codes	4	收到的換手測距CDMA碼的數量
Number of Received BR CDMA Codes	6	收到的頻寬請求CDMA碼的數量
Basic CID	16	RS的Basic CID
HCS	8	標頭檢查串列：用於標頭的錯誤檢測。

表 2-7 MR Code-REP header 欄位

### 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 2-8 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 CID	0x0000	初始測距時使用
MS/RS Basic CIDs	0x0000 – m	下行與上行連線需使用相同的值
MS/RS Primary CIDs	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	供 Secondary 管理連線使用，下行與上行連線需使用相同的值
Broadcast CID	0xFFFF	下行傳遞給其下所有的 MS/RS

表 2-8 連線識別碼(CID)配置範圍

#### 2.2.2.4 MAC 管理訊息

MAC 管理訊息是用來做為基地台、中繼台與用戶端之間溝通的訊息。其存放的位置在 MAC PDU 的 payload 欄位。MAC 管理訊息的格式如圖 2-7 所示，在最前面有一個型別的欄位，占 8 位元，用來分辨是何種管理訊息；內容的部分可以分為固定的欄位和變動長度的欄位，變動長度的欄位以 TLV (Type Length Value) 表示。

原本在 IEEE 802.16 媒體控制層規格中已定義了 70 種管理訊息(0 ~ 69)用在 BS 與 MS 之間的傳遞，而 IEEE 802.16j 為了支援多段轉傳的功能，從 type 70 開始又新增了 28 個 (70 ~ 97)管理訊息供 BS 與 RS 之間傳遞，表 2-9 列出了目前在 NCTUns 802.16j 非穿透式網路模組中實作的管理訊息。

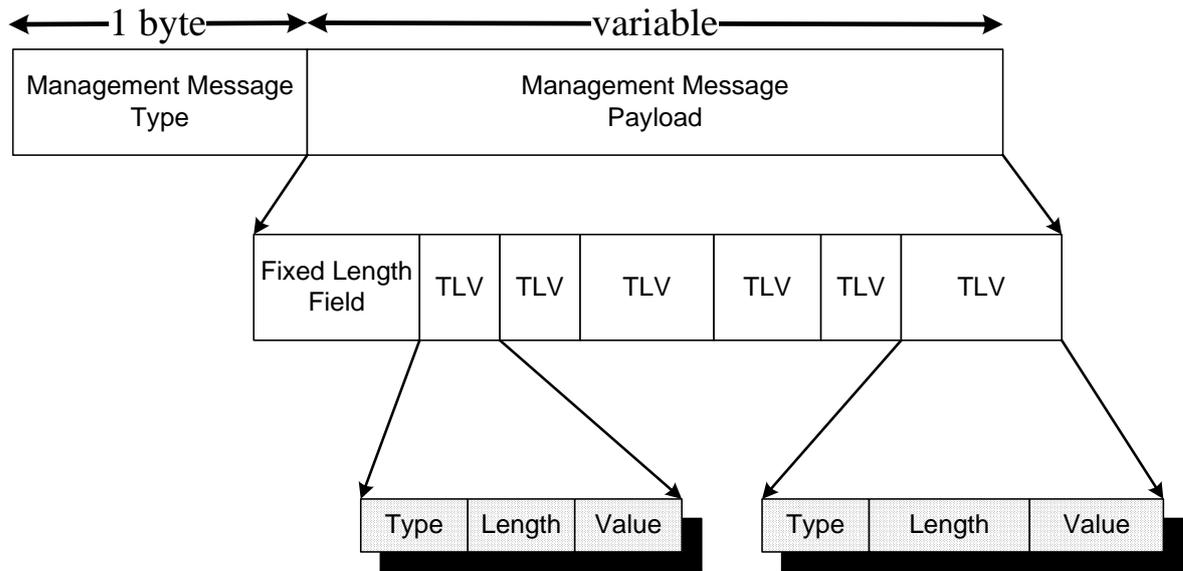


圖 2-7 MAC 管理訊息格式

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

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
70	RCD	R-link channel description	Primary Management
73	RS_Config-CMD	RS configuration command	Primary Management
79	MS_INFO-DEL	MS context information delete	Basic
91	MR_Generic-ACK	Generic ACK of received message	Basic
92	RS_Access-MAP	MAP information in centralized scheduling mode	Basic
93	RS_Relay-MAP	R-MAP information in centralized scheduling mode	Basic

表 2-9 管理訊息類別與描述

### 2.2.2.5 初始測距與入網程序

當一個新的用戶端或中繼台欲加入 WiMAX 網路時必須透過入網程序 (Network Entry) 向基地台請求提供服務。在入網程序的一開始經由收到基地台發送的下行資訊進行時序同步、功率調整等，即初始測距。過程中，基地台會建立與用戶端或中繼台之間必要的連線，並分配連線識別碼給用戶端或中繼台，獲得連線識別碼之後，即可傳遞 MAC 管理訊息完成入網程序並進入運作模式(operational mode)，此時方可進行資料傳遞。以下我們將個別針對用戶端與中繼台的入網程序進行說明。

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。

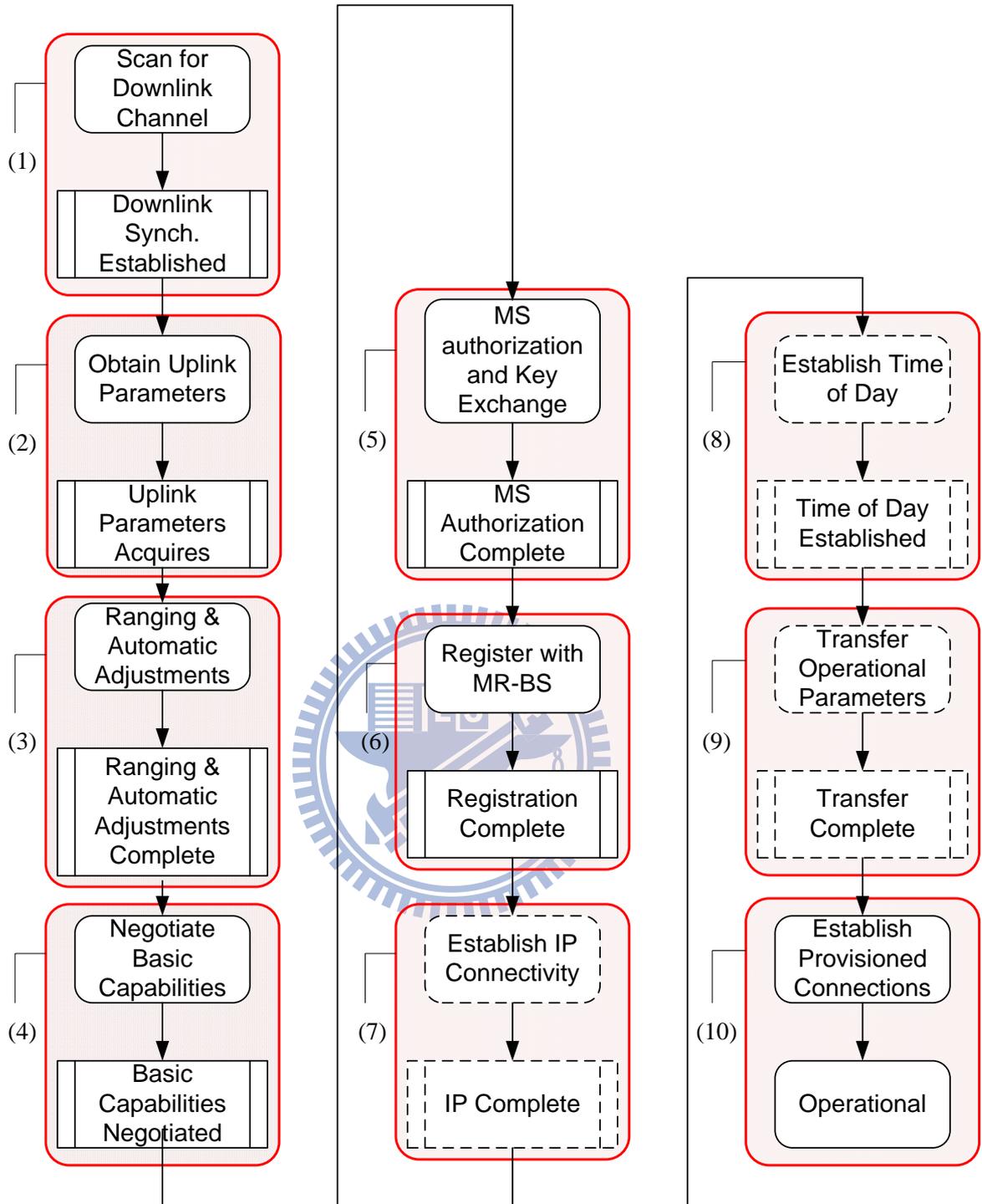


圖 2-8 MS 入網程序

在多段轉傳的網路架構下，用戶端在進行初始測距時可能是透過中繼台而非直接與基地台溝通，根據不同的中繼台類型以及不同基地台排程方式，基地台與中繼台交換的

管理訊息也有所不同。由於本篇論文主要是針對中控型非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。在中控型非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 測距碼時會向基地台發出 RS BR header 進行頻寬請求，基地台收到 RS BR header 會分配 RS\_BW\_ALLOC\_IE 給中繼台，中繼台方可將調整資訊、測距狀態等包在 RNG-RSP 回傳給用戶端，用戶端收到 RNG-RSP 進行功率、時間的調整後再送出 CDMA 測距碼，此時中繼台收到會向基地台發出 MR\_Code-REP header，基地台會產生 CDMA Allocation IE 並將 Frame Number Index、Ranging Code、Ranging Symbol，和 Ranging Subchannel 這四個欄位填為 0 傳給中繼台，中繼台收到後會根據當時的測距結果將此四個欄位填滿再回送給用戶端。詳細的初始測距流程如圖 2-9。

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) 給予用戶端，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。

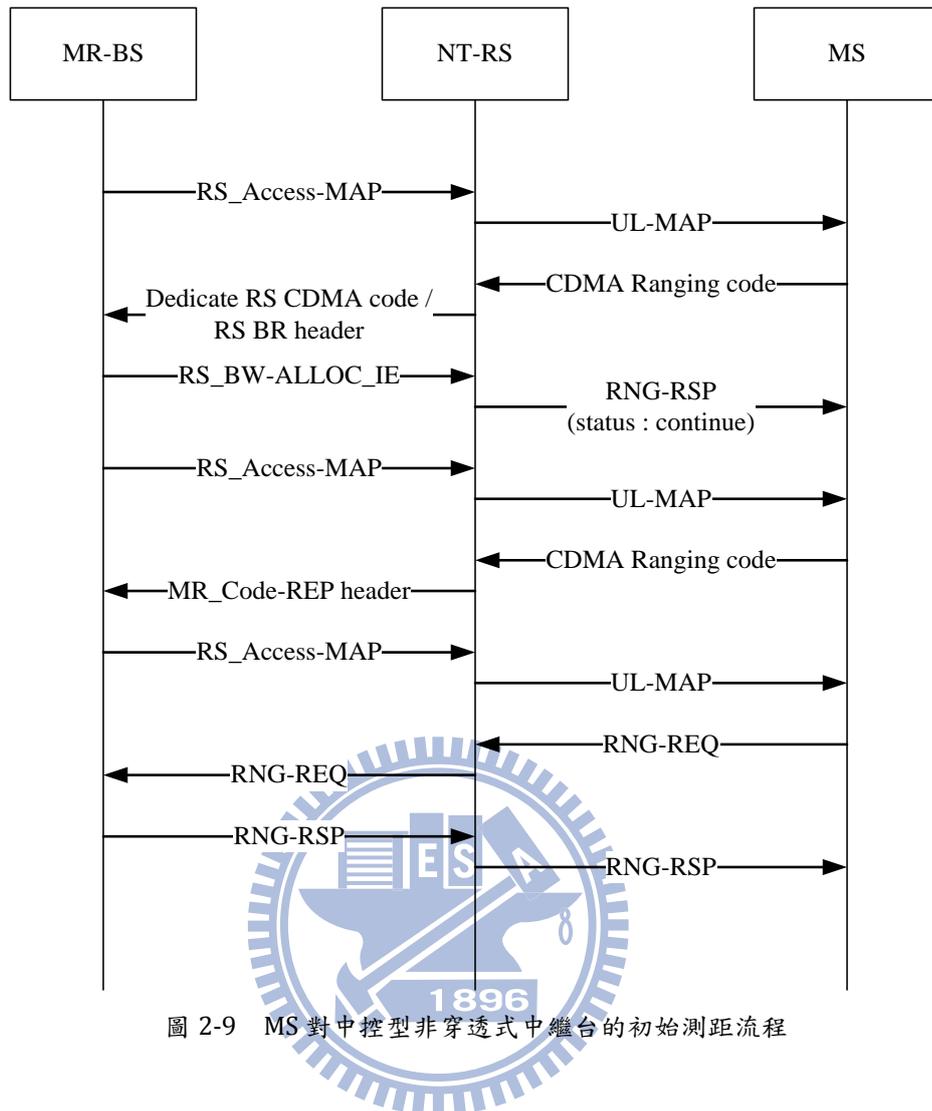


圖 2-9 MS 對中控型非穿透式中繼台的初始測距流程

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。

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。

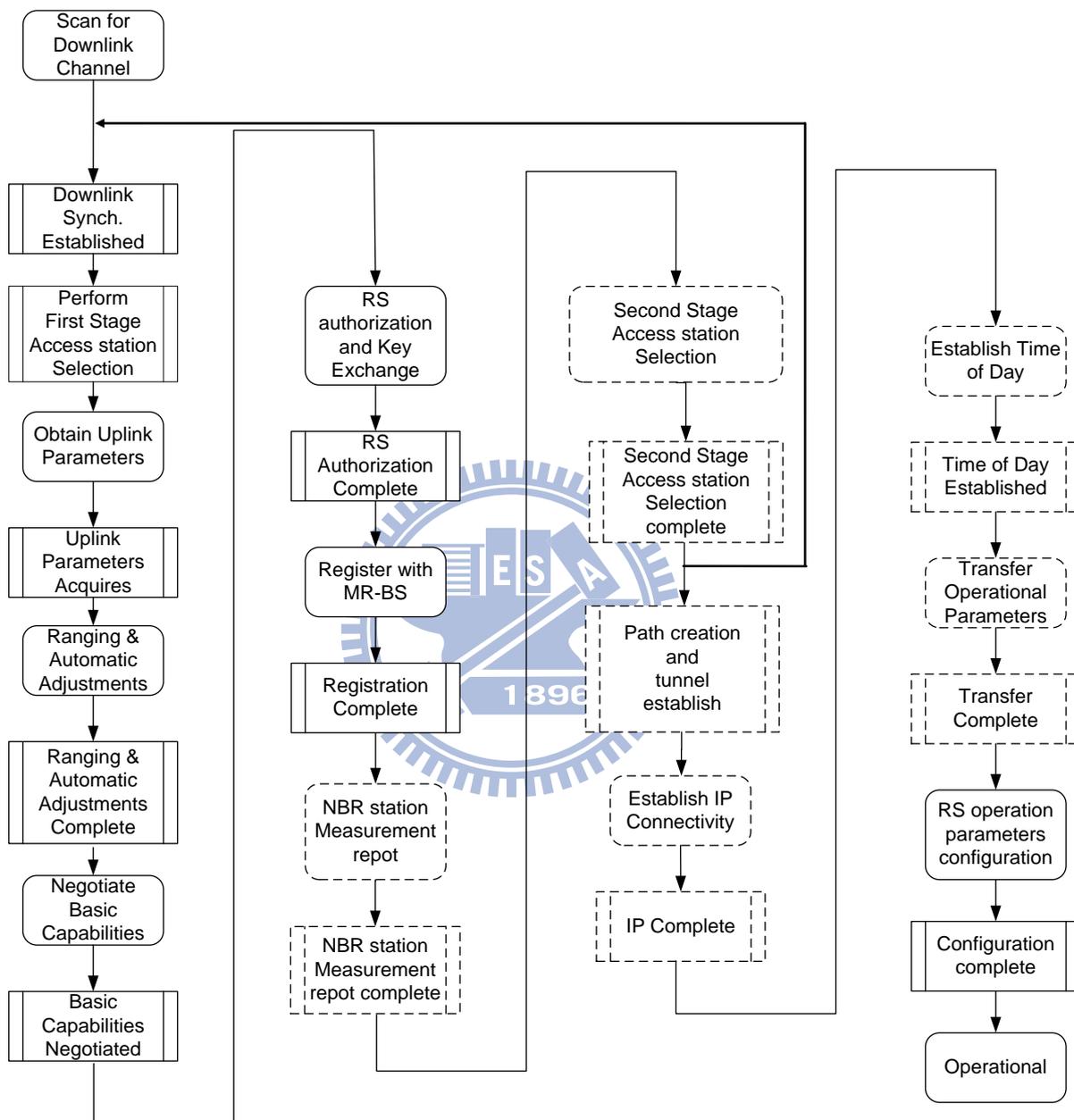


圖 2-10 RS 入網程序

### 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需要向基地台發送 RS BR header 以便能回送 RNG-RSP 給用戶端，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。

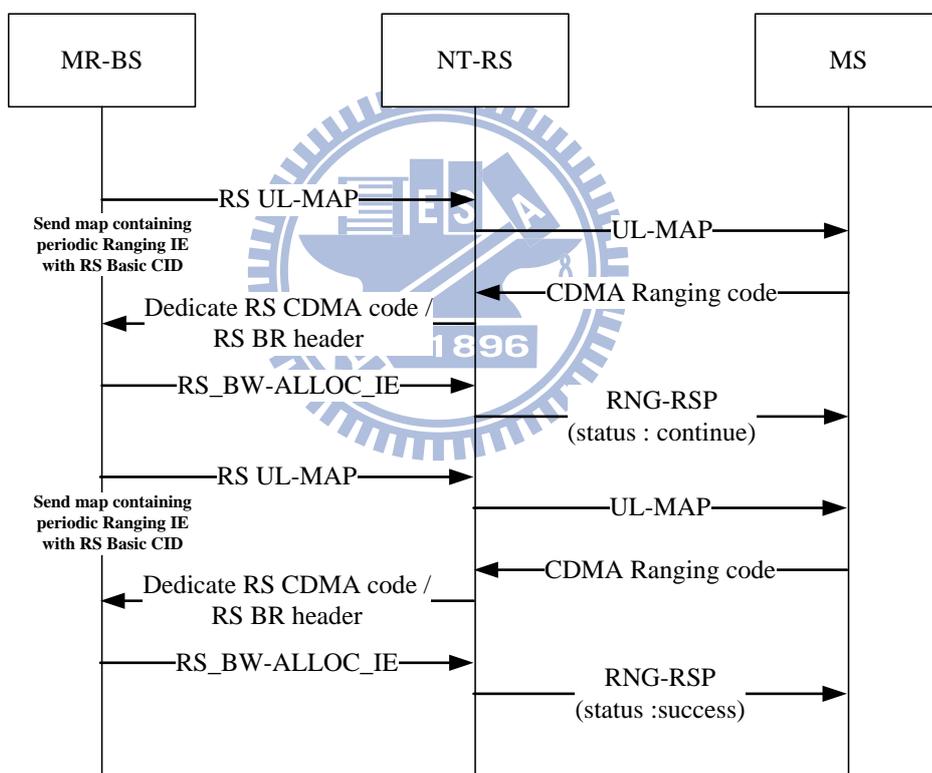


圖 2-11 MS 定期測距流程

### 2.2.2.7 換手機制與程序

IEEE 802.16j 為 IEEE 802.16e 的延伸，因此也支援用戶端的移動性，即換手機制 (Handover)，此外，在這份規格中還提供了中繼台移動性的能力。由於中繼台的換手機

制仍存在許多議題，目前我們僅實做固定式的非穿透式中繼台以及可移動式的用戶端。底下我們將就換手的情境、換手的時機與程序做說明。

圖 2-12 顯示了在 IEEE 802.16j 網路下用戶端可能發生的換手情境。



換手機制有兩大類：硬式換手 (Hard Handover)和軟式換手 (Soft Handover)。前者為先斷後連 (Break before Make)的方式，在換手時會先與服務中的基地台(Serving BS)中斷連線，再與目標基地台(Target BS)進行連線，所以可能會造成資料遺失；後者為先連後斷 (Make before Break)，即先與目標基地台進行連線，成功後再與原本的服務基地台斷線。其中，硬式換手為必要項目而軟式換手為選擇項目。

換手程序為用戶端從服務中的基地台換手到目標基地台的過程，包含拓樸的取得、換手時機決策、重新建立連線等，主要分為下列兩大部分：

- I. **網路拓樸的取得：**在 IEEE 802.16j 非穿透式網路下，基地台和非穿透式中繼台都會定期的發送 MOB\_NBR\_ADV 廣播管理訊息來告知用戶端鄰近基地台的資訊，以方便用戶端進行換手程序時使用；另一方面，用戶端也會經由傳送 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。

II. **換手程序(Handover procedure)**：圖 2-13 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。

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服務的基地台而進入另外一個訊號較強的基地台時
- 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

用戶端換手程序的啟動可以由基地台或是用戶端發起，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。

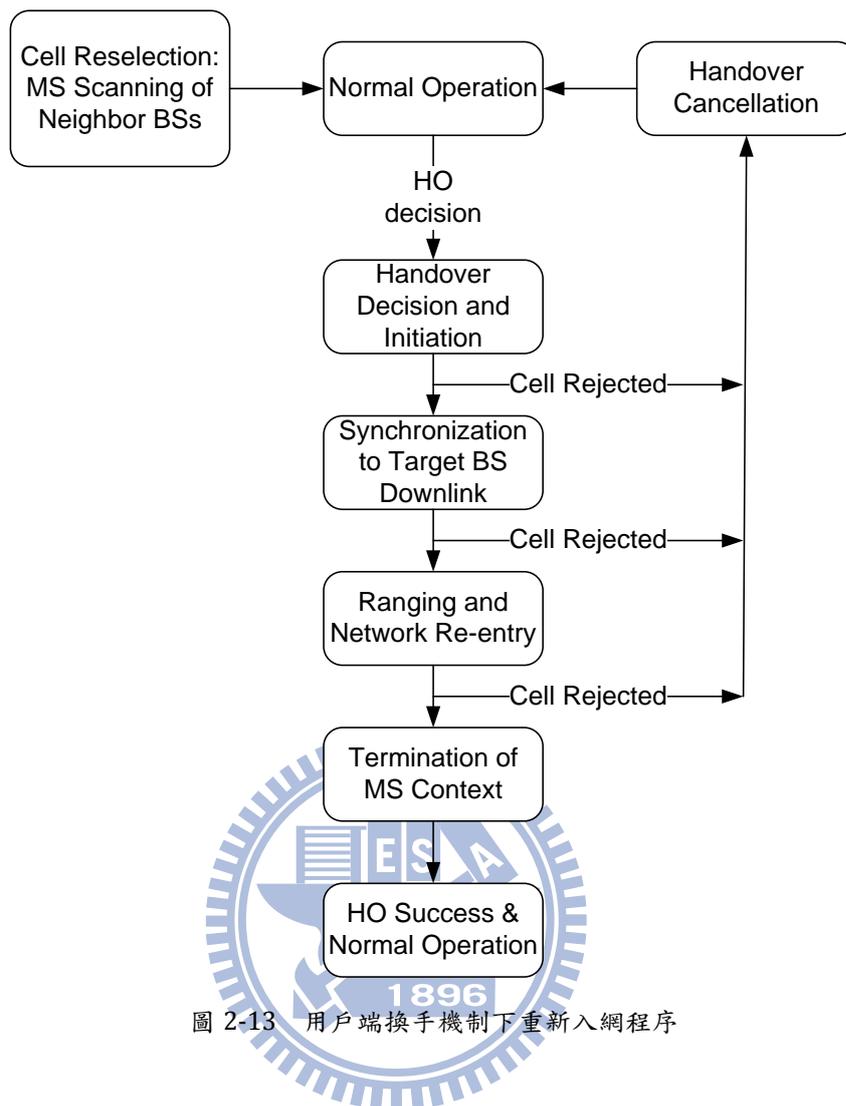


圖 2-13 用戶端換手機制下重新入網程序

### 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

在 IEEE 802.16 中，定義了四種不同的實體層介面規範，分別是 SC、SCa、OFDM、OFDMA。其中 SC 使用 10~66 GHz 頻帶，其餘三種則使用 2~11 GHz 頻帶。傳輸方面 SC、SCa 僅適用於 LOS 傳輸，OFDM 與 OFDMA 亦適用於 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，其實體層主要也是以 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) 是正交分頻多工 (OFDM) 加上多重存取技術的結合。OFDM 的基本概念是把一個高傳輸速率的串流切割成許多低傳輸速率的次串流，並將這些次串流調變到不同的次載波上 (sub-carrier)。其優點是可以有效對抗通道多重路徑效應、提高資料傳輸效率與頻道使用率，並將符碼間的干擾 (Inter-Symbol Interference, 簡稱：ISI) 減至最低。OFDMA 繼承了 OFDM 的優點，並使用 TDMA 和 FDMA 的結合做為其多重存取的技術。它將所有子載波 (subcarrier) 分割成若干集合，每一個集合裡的子載波未必連續，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，使得多個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 之實體層根據當時的頻道使用狀況，動態調整 FFT-size 以維持子載波的間距來維持上層的設計而不用做變更。在 OFDMA 實體層中支援了四種 FFT-size，分別是 128、512、1,024、2,048，表 2-10 列

出了 OFDMA 實體層所用到的相關參數。

Parameter	Fixed WiMAX OFDM-PHY	Mobile Multi-hop Relay WiMAX Scalable OFDMA-PHY			
		128	512	1,024	2,048
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, <b>1/8</b> , 1/4				
Oversampling rate ( $F_s / BW$ )	Depends on bandwidth: 7/6 for 256 OFDM, 8/7 for multiples of 1.75 MHz, and <b>28/25</b> for multiples of 1.25 MHz, 1.5MHz, 2 MHz, or 2.75 MHz				
Channel bandwidth (MHz)	3.5	1.25	5	<b>10</b>	20
Subcarrier frequency spacing (kHz)	15.625	<b>10.94</b>			
Useful symbol time ( $\mu s$ )	1696	<b>91.4</b>			
Guard symbol duration ( $\mu s$ )	8	<b>11.4</b>			
OFDM symbol duration ( $\mu s$ )	72	<b>102.9</b>			
Number of OFDM symbols in 5 ms frame	69	<b>48.0</b>			

表 2-10 OFDMA 實體層相關係數

### 2.3.2 可適性調變與編碼

WIMAX 支援可適性調變技術以針對不同的網路通道品質使用最適合的調變方式，進而達到最佳的傳輸品質。目前在 IEEE 802.16 中支援了三種調變機制：QPSK、16-QAM、64-QAM。依照基地台與用戶端之間的距離遠近，訊號的強度、品質也有所不同，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 2-14 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 2-11 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。

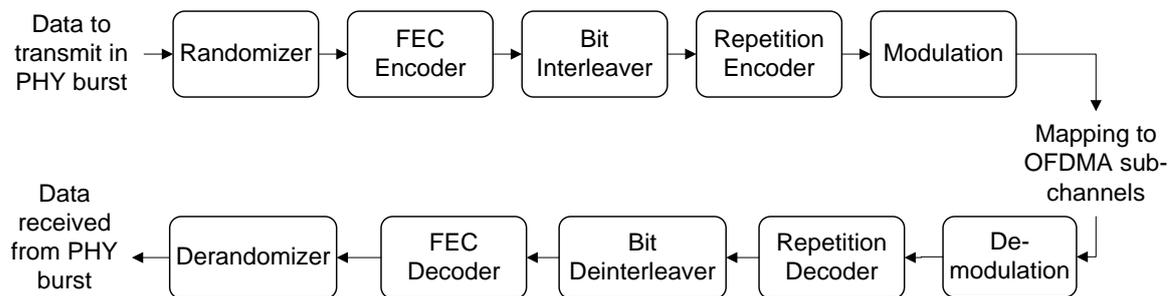


圖 2-14 實體層傳送與接收的調變與編碼流程

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 2-11 不同 FEC 下的單位 slot 傳輸量

### 2.3.3 兩段式中繼網路訊框結構

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非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)。在二段式非穿透式中繼台網路拓撲中，下行子訊框包含兩個地帶，分別為下行存取地帶 (DL access zone) 與下行轉送地帶 (DL

relay 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 2-15、2-16，分別代表在二段式非穿透式中繼台網路拓撲下，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的時間區段，下行轉送地帶則為基地台分配用來傳送下行資料至中繼台或中繼台將資料轉送到別的中繼台的時間區段；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。

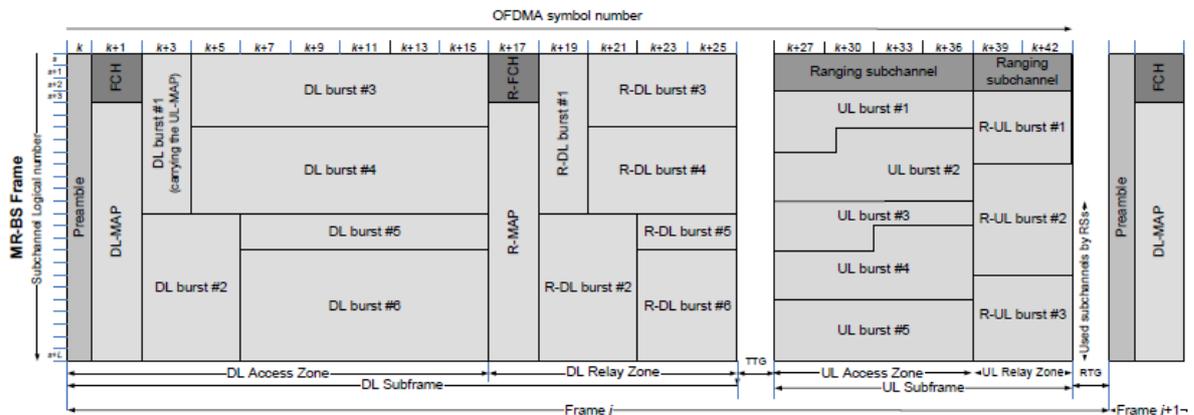


圖 2-15 二段式非穿透式網路下 MR-BS 訊框架構

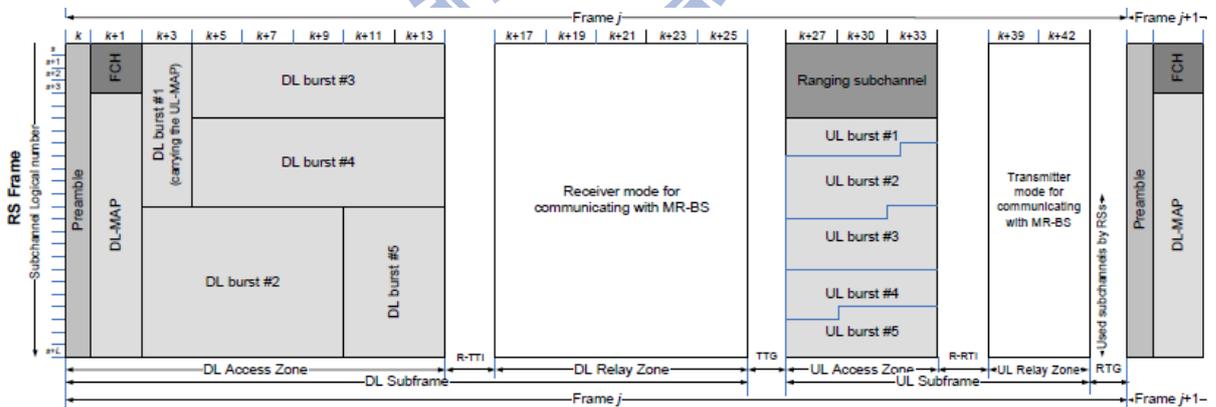


圖 2-16 二段式非穿透式網路下 RS 訊框架構

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。

下行轉送地帶主要是基地台將資料要傳送給中繼台的傳輸區段，或者配置給中繼台進行下行傳送資料轉送的傳輸區段。由於中繼台接收下行封包都要透過此區段，因此此區段的訊框結構跟下行存取地帶有些類似，包含 R-FCH 和 R-MAP，主要目的跟 FCH 和 DL-MAP 一樣，都是紀錄下行子訊框的 burst 資訊，只是一個是用來與用戶端進行傳輸使用，另一個則是在中繼台間傳輸所使用。R-FCH 是一個定義為 R-Zone Prefix 的資料結構所組成，其中包含了 R-MAP 的長度與位置以及使用的調變技術與編碼方式，中繼台會在實體層進行 R-FCH (R-Zone Prefix) 的解析後才有足夠的訊息解開 R-MAP。R-MAP 是一個類似 DL-MAP 的資料結構，其中包含了下行轉送地帶的 DL-MAP IE，目的是幫助中繼台進行下行轉送地帶 burst 的解析。

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，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，如同上行存取地帶，此區段也包含一段特殊的競爭子通道，用來提供給中繼台進行初始測距、定期測距、頻寬請求及換手測距等，當中繼台於下行轉送地帶的 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。若是在多段轉送網路下，中繼台則會利用此區段將上行封包轉送給它的上屬中繼台。

### 2.3.4 多段式中繼網路訊框結構

在 IEEE 802.16j 裡並未明確定義多段式中繼的訊框結構，而在轉送地帶中，其狀態同一時間只能是傳送(Tx)、接收(Rx)或閒置(Idle)三者其中一個，因此上述提到的訊框結構將無法在多段轉送網路中運作，因為中繼台的下行轉送地帶都為 Rx 狀態而上行轉送地帶都為 Tx 狀態，如此勢必不能在兩個以上的中繼台間傳輸，目前標準有提到兩種可行的方案：超級訊框結構與轉送區間分割法，底下我們將就此兩種方法做說明。

所謂超級訊框，即是指將原本兩個或多個訊框結構視為一個大的訊框結構，在此大的訊框結構下裡面的小訊框其轉送地帶的狀態可以視情形來做更換。如圖 2-17，此為一個 2-frame 的超級訊框結構範例，其中第一個轉送的中繼台 NT-RS<sub>1</sub> 在第一個大訊框裡的第一個小訊框之下行轉送地帶狀態為 Rx，因為要接收來自基地台的下行轉送封包，而為了能將資料轉送給下一個中繼台 NT-RS<sub>2</sub>，在此大訊框裡的第二個小訊框其下行轉送地帶應調整成 Tx，藉由這種方式，將可達到多段轉送的目的。此種方法的好處是不會影響到原本訊框結構的，只是在時間上會隨著本身是第幾個 hop 以及第幾個訊框去改變轉送地帶的狀態。

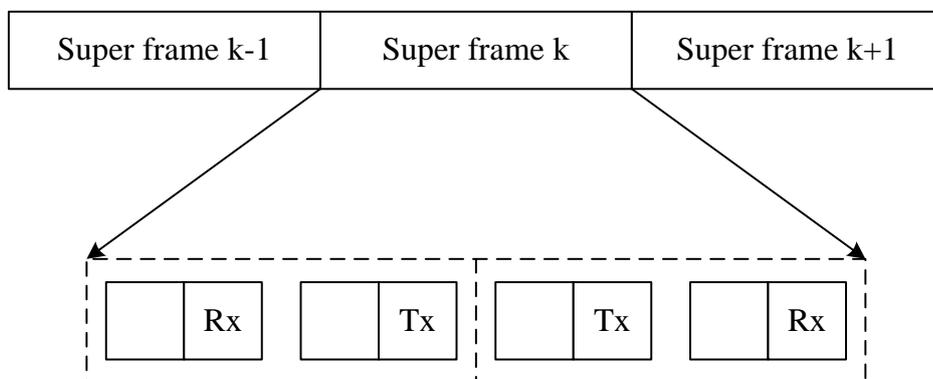


圖 2-17 超級訊框架構

另一種方法是則轉送區間分割法，因為標準中有提到，轉送區間可以不只一個，因此利用多個轉送區間，每個區間即可使用不同的狀態。由於考慮到訊框結構的完整性，我們將於之後實作第一種超級訊框法。

## 3.系統設計與實作

本章將說明如何在 NCTUns 網路模擬器上實作開發 IEEE 802.16j 中控型非穿透式網路模組，因此，一開始會先介紹 NCTUns 網路模擬器的架構以及模組的概念；接著介紹模擬 IEEE 802.16j 中控型非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。最後將詳細說明各協定模組的設計與實作方式，包括基地台、中繼台、用戶端之媒體存取控制層與實體層的設計實作概念。

### 3.1 NCTUns 網路模擬器平台介紹

NCTUns 網路模擬器是一套用來模擬不同網路型態的模擬器，目前已支援的網路型態包括 WiMAX (IEEE 802.16d PMP/Mesh, IEEE 802.16e, IEEE 802.16j)、IEEE 802.11 a/b/p、GPRS、Ethernet、DVB-RCS 等，其具有三大特點：(1) 結合真實世界的網路協定堆疊(TCP/IP 或 UDP/IP)進行模擬，以得到更真實的模擬結果。(2) 允許真實世界的應用程式在模擬器上運作，例如 VLC、P2P 軟體等。(3) 高度整合的圖形化介面(Graphical User Interface；GUI)，讓使用者操作更方便且設置模擬環境更加容易。

模擬器的組成主要分為三大部分：(1) 圖形化使用者介面、(2) 模擬引擎、(3) 修改過的系統核心。圖形化使用者介面提供了一個方便而簡單的模擬操作環境，使用者可以藉由此工具輕鬆且任意的部屬網路拓樸並進行相關參數的設定，簡化了操作所需的時間；模擬引擎是整個模擬系統的核心部分，其功能為模擬事件的建立、排程與執行、計時器

的管理與網路封包的組成並提供一套 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。此外，模擬引擎裡還包含了眾多網路協定模組，NCTUns 模擬器將網路協定模組化，不同的網路協定可以經由連結多個模組所構成，使用者可以很方便地在 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；最後是關於修改過的核心的部分，藉此才可讓真實世界的應用程式透過 socket 介面在模擬器上運作。

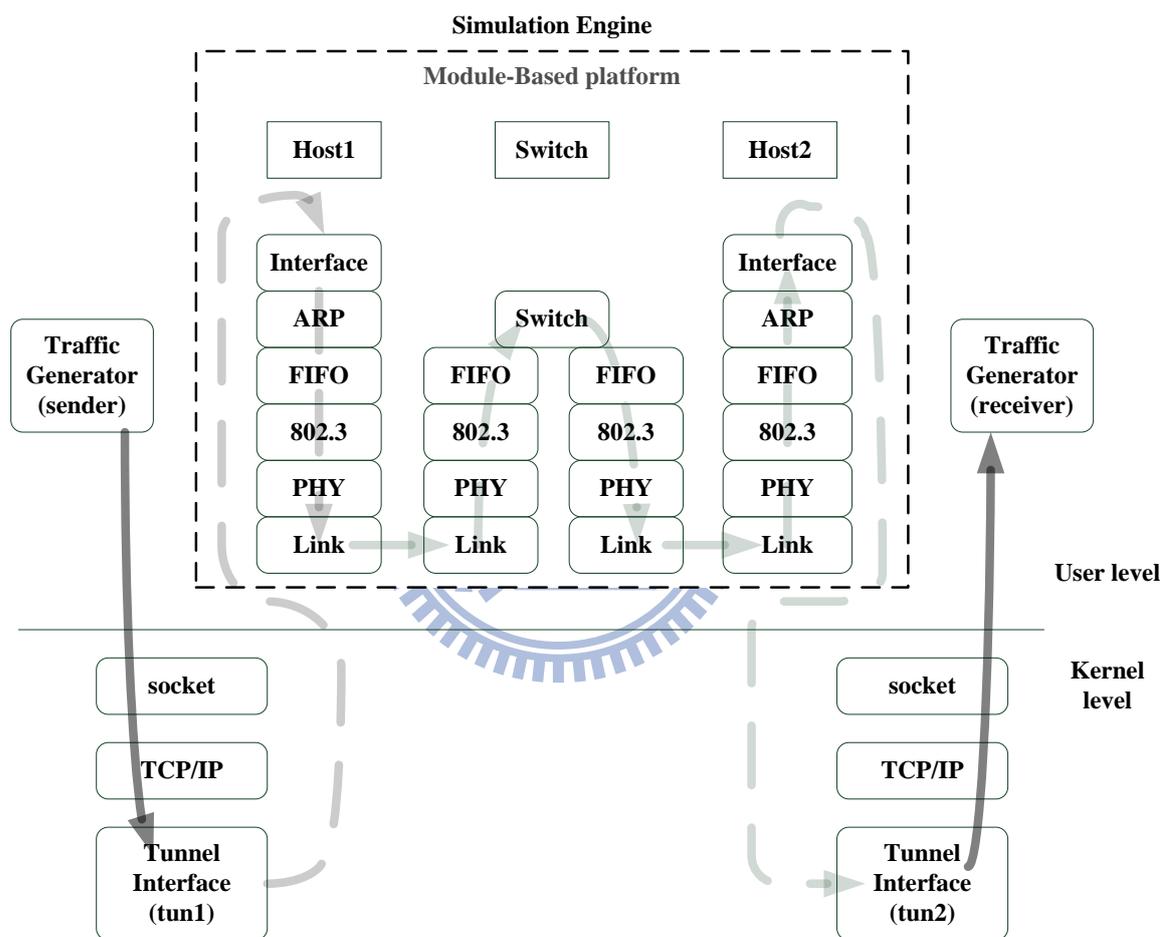


圖 3-1 NCTUns 裡的模組堆疊架構

圖 3-1 顯示了在 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。在此圖中，封包傳送方向是由 Host1 到 Host2，Host1 上執行的應用程式(Traffic Generator)

所送出的封包從應用層往下經過作業系統的傳輸層、網路層後送往 tunnel interface，此時 Host1 的 Interface 模組會從 kernel 的 tunnel interface 抓取封包。封包進入 interface 後再一路經過 ARP、FIFO 模組的處理往下送至 Link 模組，這是傳送端的角度來看。若是以接收封包的角度來看，Host2 接收由 Link 傳送過來的封包，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。底下將近一步說明模組的基本架構以及封包如何在模組間傳遞。

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

NsIObject 是 NCTUns 網路模擬器中最基本的類別，如圖 3-2 所示，所有實作的模組都必須繼承這個類別，並可依照個別模組的功能與需求自行定義其中的函式。在此類別中最重要兩個函式是 send()與 recv()，兩者代表不同的傳遞方向，如圖 3-3：send()是將封包往下一個模組傳遞；recv()則是收到封包時由底層往上層的模組傳遞。例如圖 3-1 中，當封包要從 Host1 傳遞到 Host2 時，Host1 的 Interface 模組會呼叫 send()並利用 put()將封包傳遞至下一個模組即 ARP，而 ARP 模組會在 send()函式收到封包並繼續往下層

丟，以此順序，最後在 Host1 的 Link 模組呼叫 send() 才算走完傳送端的流程。另一方面，Host2 最底層的 Link 模組會先被呼叫，接著利用 put() 將封包送至下個目標，即 PHY 模組，PHY 再呼叫 recv() 將封包往上傳遞，依此順序，最後封包將到達 Host2 的 Interface 模組並將封包導入 kernel 的 tunnel interface 再藉由 Host2 應用層的 traffic generator 接收端將封包收上來。

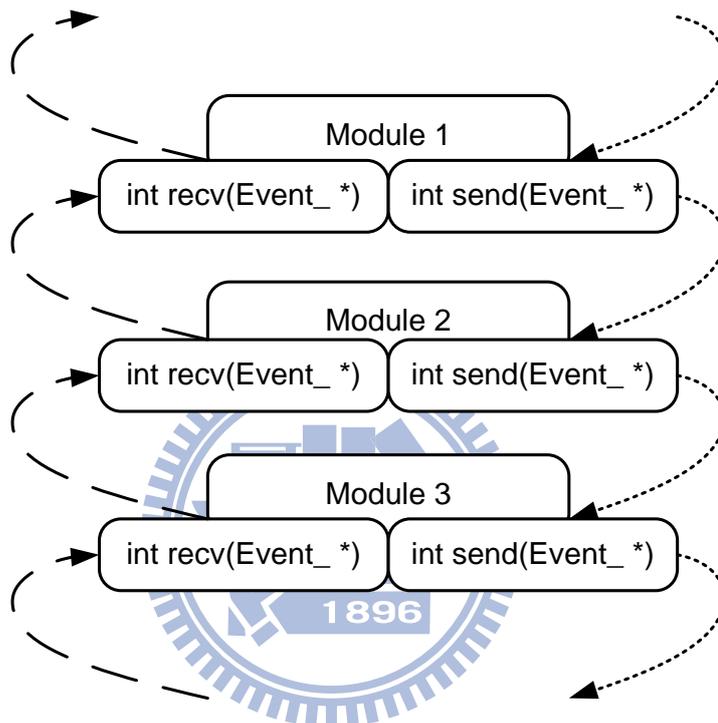


圖 3-3 模組間封包的傳遞架構

## 3.2 支援的節點與網路拓樸

為了支援 IEEE 802.16j 中控型非穿透式網路，我們將在 NCTUns 網路模擬器上新增三種新的節點如圖 3-4 所示，分別為 IEEE 802.16j 非穿透式基地台 (Multi-hop Relay Base Station in Non-transparent Mode，簡稱：MR-BS)、IEEE 802.16j 固定式非穿透式中繼台 (Fixed Relay Station in Non-transparent mode，簡稱：NT-RS) 和 IEEE 802.16j 用戶端 (Mobile Station，簡稱：MS)。圖 3-5 顯示了此種網路的基本拓樸。其中，基地台(MR-BS)

節點具有無線和有線介面，有線介面可與後端骨幹網路連結，以提供網際網路服務；無線介面則是用來與中繼台和用戶端溝通的介面並使用 IEEE 802.16j 定義的無線介面協定堆疊。中繼台(NT-RS)佈署於基地台的服務範圍邊界以增加基地台的服務涵蓋範圍，其有一個無線介面，使用 IEEE 802.16j 定義的中繼台協定堆疊，用來與基地台、其他中繼台以及用戶端溝通以達到中繼的目的。用戶端(MS)可以部屬在任意位置，若在基地台範圍則與基地台進行連線，若在基地台範圍外的中繼台範圍內，則與中繼台進行連線，其具有一個無線介面，使用 IEEE 802.16j 用戶端協定堆疊，作為與基地台和中繼台連線的無線介面。



圖 3-4 IEEE 802.16j 非穿透式網路節點

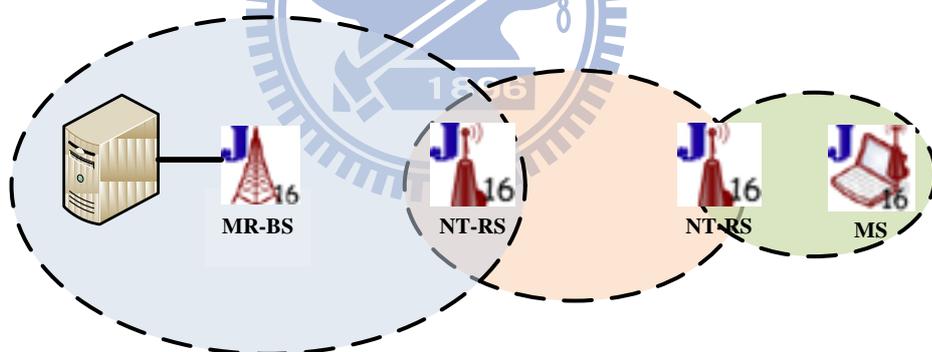


圖 3-5 IEEE 802.16j 非穿透式網路拓樸

由於 IEEE 802.16j 定義了媒體存取控制層與實體層的協定規範，對於網路層(IP 網路或是 ATM 網路)的封包將由媒體存取控制層的收斂子層來處理並進行分類。而 NCTUns 網路模擬器所使用的是 IPv4 網路，所以在媒體控制層的收斂子層部分僅處理 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。在 IEEE 802.16j 非穿透式網路下，IPv4 封包在收斂子層先進行處理，將其分割成 IEEE 802.16j 網路的最小封包資料單元(PDU)，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。當中繼台(NT-RS)接收到基地台或用戶端傳送的資料時，會先在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並進行轉送。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 IEEE 802.16j 非穿透式網路協定堆疊

圖 3-6 顯示了為了支援 IEEE 802.16j 非穿透式網路所實作的節點之網路協定堆疊。由於 IEEE 802.16j 是由 IEEE 802.16e 延伸並強調 MS 不需更動便可透過中繼台得到更好的服務品質，因此 MS 的網路協定堆疊維持原狀即可；為了支援多段中繼轉送，基地台(MR-BS)和中繼台(NT-RS)的網路協定堆疊模組均須重新設計。底下將就 MR-BS 節點、NT-RS 節點和 MS 節點的網路協定堆疊進行說明。

#### 3.3.1 MR-BS 節點

在 IEEE 802.16j 中為了支援多段中繼，原本 IEEE 802.16e 的基地台(BS 節點)也必須做相對應的變動，由於其媒體控制層新增的功能和實體層的訊框結構均有大幅的更動，因此必須定義新的 MR-BS 節點，當然它包含了原有 IEEE 802.16e 中 BS 的功能。在 NCTUns 模擬器中，基地台就像是一個 Router，扮演連接骨幹網路和用戶端的角色，並利用骨幹網路對用戶端提供服務。其中，連接骨幹網路端有線介面的 IEEE 802.3 網路協定堆疊(由 Interface 模組、ARP 模組、FIFO 模組、802.3 模組、Phy 模組、Link 模組串接而成)在模擬器中已經完全支援，因此 MR-BS 的有線介面將沿用原有的 IEEE 802.3 網路協定堆疊並實作 IEEE 802.16j 無線介面模組。無線介面協定堆疊是由 Interface 模組、MAC802\_16J\_PMPBS\_NT 模組、OFDMA\_PMPBS\_NT 模組、CM 模組與 Link 模組所構成，並作為基地台與中繼台、基地台與用戶端之間溝通的無線介面。其中，

MAC802\_16J\_PMPBS\_NT 與 OFDMA\_PMPBS\_NT 這兩個模組是依照 IEEE 802.16j 的媒體控制層和實體層規格分別進行實作。

MAC802\_16J\_PMPBS 為非穿透式網路下中控型基地台的媒體控制層模組，主要處理來自上層的 IP 封包，並依據不同的連線識別碼暫存在連線序列裡，直到 MR-BS 在做排程時才會從序列取出且封裝傳送出去。OFDMA\_PMPBS\_NT 則是非穿透式網路下中控型基地台的實體控制層模組，負責資料的編碼與調變。此外，為了能夠更真實的模擬無線訊號在不同網路環境中衰減的情境，我們在 OFDMA\_PMPBS\_NT 模組的下面加入了 CM (Channel Model) 模組，此模組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的影響。

### 3.3.2 NT-RS 節點

NT-RS 節點代表的是 IEEE 802.16j 標準中定義的非穿透式中繼台，非穿透式中繼台跟標準中定義的另一種穿透式中繼台 (T-RS) 一樣主要是作為中繼站，幫助基地台可以更順利服務用戶端，不同的是它還可以具有排程的能力，因為非穿透式中繼台的主要特色是拓展基地台的服務範圍，用戶端可能不在基地台的直屬範圍內，此時必須透過非穿透式中繼台對用戶端進行最佳化的排程。

NT-RS 具有一個無線介面，作為其與基地台、其他非穿透式中繼台、用戶端進行溝通的介面。NT-RS 的無線介面由 Interface 模組、MAC802\_16J\_PMPRS\_NT 模組、OFDMA\_PMPRS\_NT 模組、CM 模組與 Link 模組所構成。其中，MAC802\_16J\_PMPRS\_NT 為中控型非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支援基地台與中繼台之間的管理訊息交換機制以及需透過中繼台進行資料轉送的連線管理(透過連線識別碼)。OFDMA\_PMPRS\_NT 模組為中控型非穿透式中繼台實體層的模組，主要的功能為資料的編碼和解碼以及調變，並將資料經由無線介面傳送出去。如同 MR-BS 節點一樣，NT-RS 節點的無線介面上亦在 OFDMA\_PMPRS\_NT

的底下掛上 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響。

### 3.3.3 MS 節點

如前述提到，為了讓 IEEE 802.16e 的用戶端相容於 IEEE 802.16j 網路系統，規格在媒體控制層和實體層上均只有最小幅度的增訂，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。

MS 具有一個無線介面，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響。

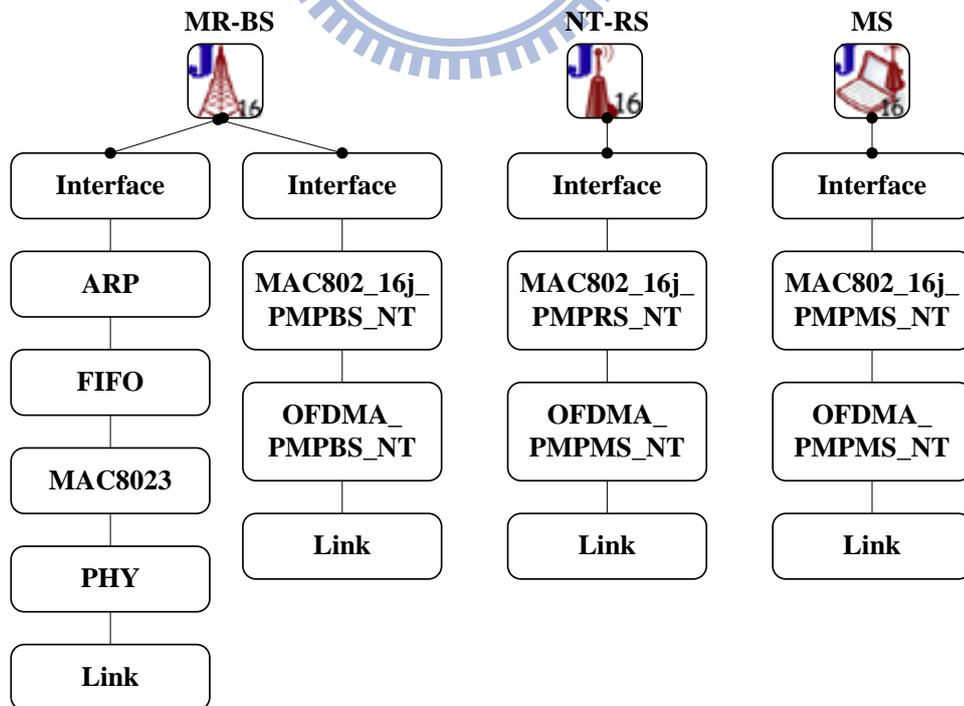


圖 3-6 非穿透式網路下節點的協定堆疊

### 3.4 IEEE 802.16j 中控型非穿透式網路模組設計與實作

在 IEEE 802.16j 中針對不同目的定義了兩種中繼台，分別為穿透式中繼台 (Transparent Relay Station; T-RS) 與非穿透式中繼台 (Non-transparent Relay Station; NT-RS)；前者主要目的是在基地台的涵蓋範圍內藉由中繼台的部屬來提供位於訊號死角的用戶端進行更可靠的傳輸，進而提升整體的傳輸速率；後者則以延展基地台服務涵蓋範圍為目標，因為部屬一個基地台的成本太高，還須包含後端有線網路的建置，因此才發展出此種中繼台，透過無線介面即可幫基地台進行中繼的工作，進而服務到位於基地台範圍外的用戶端。

穿透式基地台的設計較為簡單，其僅僅具有中繼的功能。也就是說，他不能自行規劃訊框結構，針對個別用戶端進行最佳化排程，所有的訊框資源都由基地台規劃，中繼台也不會轉送由基地台發出的廣播訊息，因為中繼台和用戶端都必須位於基地台涵蓋範圍內，如此一來他們皆可在每個訊框的最前端收到基地台發出的廣播訊息，而中繼台的中繼傳輸區塊 (relay zone) 只能用來對用戶端進行傳輸，無法與其他穿透式中繼台溝通，因此穿透式中繼台只能部屬在兩段式 (2-hop) 轉傳的網路拓撲下。

相較之下，非穿透式基地台的設計就複雜許多。非穿透式中繼台行為上就像是個不具有線介面的基地台，由於當初設計的概念就是希望這種中繼台能拓展基地台的服務範圍，想當然爾，必須讓基地台服務涵蓋範圍外的用戶端聽的到 preamble 以及一些廣播訊息像是 DL-MAP、UL-MAP、DCD、UCD 等才能進行下行與上行的同步，進而完成連線的動作，而非穿透式中繼台會將用戶端傳送的訊息都轉送給基地台，最終基地台還是可以擁有這些非直屬範圍內的用戶端的資訊並提供服務。由上述可知，非穿透式中繼台利用訊框的前半段 (下行存取區塊，DL access zone) 傳送資訊給用戶端，就像是基地台做的事情一樣，另一方面，中繼傳輸區塊則是基地台用來與非穿透式中繼台溝通的時段，同理，非穿透式中繼台來也是利用此區塊並改變區塊狀態 (傳送或接收或閒置) 來與其他非穿透式中繼台溝通，進而達到多段轉送的目的。

在資源排程方面，IEEE 802.16j 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排程和分散型排程兩種。中控型基地台排程是指所有的資源調配均由基地台進行管理分配，包括非穿透式中繼台以及其下的用戶端。因此，隨著基地台所管理的非穿透式中繼台與用戶端個數增加，基地台的排程複雜度將會大幅提升。為了降低基地台設計的複雜度，在規格中也支援分散型排程，在此種排程下的基地台會配置給中繼台一些可用的下行頻寬，使其可以對其下的用戶端(在基地台直屬範圍外、中繼台範圍內)進行將資源控管，並可以製造適合自己範圍的廣播管理訊息，因此只有非穿透式中繼台才支援分散式排程。

基於實作的方便性及可行性，雖然使用中控型排程會造成基地台和中繼台的設計複雜度升高，但這樣也比較節省資源，因為基地台掌握了其下所有中繼台和用戶端的資訊，有多少需求就分配多少；但在分散式排程下須先分配一段可用頻寬給中繼台，過多是浪費，過少則無法服務其下的用戶端，若要透過頻寬請求機制也會造成上行頻寬的浪費，綜合以上理由我們將實作中控型非穿透式網路模組。

底下將分別介紹各節點的媒體存取控制層與實體控制層的設計方法。

### 3.4.1 媒體存取控制層模組的設計

媒體存取控制層負責了大部分的工作，包含資料的封裝(包成 PDU)、連線管理機制(連線建立、刪除、依照連線識別碼管理等)、用戶端入網程序(Network Entry)、頻寬資源配置、訊框排程(將欲傳送的資料包成 burst 的型式塞在訊框裡)、用戶端換手機制等重要機制。IEEE 802.16j 提出中繼台的概念，因此也新增了中繼台的入網程序、MAC PDU 的中繼傳遞方式、中繼台群組 (Grouping)、中繼台的路徑選擇與路由管理以及中繼台的換手機制等。本篇論文將針對標準中提到關於中控型基地台以及非穿透式中繼台的必要支援部分進行設計與實作並於底下一一說明。

#### ● 入網程序設計

入網程序是用戶端或中繼台要取得跟基地台服務並與之建立連線時必要的步驟。首先，基地台會透過周期性的發送廣播管理訊息(DL-MAP、UL-MAP、DCD、UCD...等)使得欲加入此網路的用戶端或基地台獲得可用的資訊以供之後入網程序使用，例如上、下行資源配置情形與網路服務參數以及上下行傳輸通道的基本設定值。用戶端或中繼台需先取得這些資訊方可與基地台進行同步，做進一步的傳送功率調整與傳送時間校準。完成同步後才可以繼續進行之後的入網程序。而如同規格中提到，一些選擇性的入網程序就先暫不實作，其中包括：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 位址在設置模擬環境時就會自動分配，也就是模擬前就已給定，這部分牽涉到模擬器的運作原理，而且 IP 的值對於模擬結果並不會影響因此可以忽略此選項；而加解密機制與時間資訊則也不會影響基本功能與效能，所以在模組設計中將不實作這些項目。在中繼台的入網程序方面，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，由於實作的便利性而且目前僅支援固定式中繼台，要取得存取點並不需藉由此三個步驟也可達成，因此暫不考量。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。

用戶端的入網程序設計方式如下。首先，用戶端需正確取得基地台所廣播的管理訊息並完成同步，再來經由分析 UL-MAP 管理訊息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(初始測距碼)並且於此競爭頻道上進行傳送。基地台和非穿透式中繼台都有可能收到用戶端進行入網程序所發送的初始測距碼外，但同一個用戶端不會同時對兩個發送，因為他們使用的傳輸頻段不同。若是基地台收到，則基地台會直接量測其傳送時間即功率是否在合理範圍並發送 RNG-RSP 給用戶端；相反的，若是非穿透式中繼台收到，中繼台將先向基地台發送 RS BR header 請求下行頻寬，接著基地台收到後會回 RS\_BW-ALLOC\_IE 讓中繼台於稍後能回 RNG-RSP 給用戶端。經過第一次的調整後，用戶端會再傳送一次 CDMA 測距碼(第一次測距狀態為 continue)，

此時若非穿透式中繼台收到便會向基地台發送 MR\_Code-REP header，這是為了讓基地台產生 CDMA Allocation IE 以便讓用戶端能於其後發送 RNG-REQ，由於用戶端的測距碼是存在非穿透式中繼台這邊，基地台並未有足夠資訊，因此在產生 CDMA Allocation IE 後會將其跟測距碼有關的四個欄位清空並傳給中繼台，非穿透式中繼台收到後會依據先前收到的用戶端測距碼將此四個欄位填上再把 CDMA Allocation IE 傳給用戶端。此後用戶端便能繼續入網程序，過程中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。

而在非穿透式中繼台的入網程序設計方面，基本上與用戶端所進行的入網程序所執行的步驟大同小異，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，在目前的設計中並沒有進行實作，原因如先前所敘述過。因此在目前的非穿透式網路拓樸設計下，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 管理訊息中加入 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。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，所以並不會建立上層的資料連線。

### ● 連線識別碼管理

所有的連線均要透過連線識別碼來辨別。連線識別碼大概分為 Broadcast CID、Initial Ranging CID、管理訊息 CID (Basic、Primary CID)、資料傳輸 CID (Secondary CID)。Broadcast CID 是基地台用來傳送廣播訊息的 CID，其中包含提供中繼台和用戶端進行入網程序與分析的資訊；Initial Ranging CID 則是在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；至於 Basic CID 和 Primary CID 則是用來傳輸一般的管理訊息，這兩個都是在入網程序的過程中可以得到；最後還有傳

輸資料(非管理訊息)專用的 Secondary CID。

- **收斂子層實作**

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。

- **資料排程**

在中控型的非穿透式網路中，基地台必須對所有的下屬中繼台和用戶端傳輸下行和上行的資料進行排程管理，IEEE 802.16j 為了支援多段轉傳的功能，將原本 IEEE 802.16e 的下行跟上行子訊框又分別切割成兩個不同的地帶：下(上)行存取區塊和下(上)行轉送區塊。其中下行存取跟上行存取區塊是為了基地台與用戶端、非穿透式中繼台與用戶端進行傳送的區間。而下行轉送區塊跟上行轉送區塊則是用來傳送基地台與非穿透式中繼台、非穿透式中繼台與非穿透式中繼台之間的資料。基地台下行存取區塊的排程是針對要傳送給連接在其下的用戶端的資料進行資源規劃，而非穿透式中繼台也會進行下行存取區塊的排程，但主要的資訊還是要來自基地台或其他非穿透式中繼台透過下行轉送區段將資料傳送過來；中繼台在下行轉送區段接收到的資料後需先依照連線識別碼將其中的資訊分配到不同的連線佇列裡，待中繼台要進行下一個訊框的排程時再從這些佇列中

取出，並針對連接在中繼台下的用戶端進行下行存取區段的規劃，而下行轉送地帶則是用來規畫要傳給連接在中繼台下的其他非穿透式中繼台以及連接在中繼台下的其他非穿透式中繼台底下的用戶端的資訊。上行存取區段是給連接在基地台底下的用戶端或連接在非穿透式中繼台底下的用戶端進行測距並上傳用戶資訊的區段；上行轉送區段則是給連接在基地台下的中繼台進行測距以並上傳資訊以及規畫連接在基地台下中繼台之下的用戶端所需上傳的頻寬。無論是上行存取區塊或是上行轉送區塊，對於上行頻寬的分配都跟 QoS 的設定參數有關，這將影響上行子訊框總共佔多少頻寬。

## ● QoS 支援

在 IEEE 802.16 規格中共定義了五種 QoS 層級，分別是 UGS、rtPS、ertPS、nrtPS、BE。目前僅實作類似 UGS (Unsolicited Grant Service) 的作法，基地台每次在做資源排程時都會檢查用戶端與中繼台事先設定好的 QoS 參數表並搭配個別的調變方式計算出所需分配的頻寬，因此用戶端和中繼台無須經由頻寬請求的方式來取得傳輸機會，僅需在一開始設定好想要的上行頻寬，基地台在稍後排程時便會主動分配。雖然此機制的實作方式較簡單，卻可能造成可用頻寬的浪費，甚至如果個別用戶端都要求很大的上傳頻寬將會不夠用。目前在平台的設計裡暫不考慮其他 QoS 需求，未來若需要此機制的支援，可再另外擴充。接下來將說明 QoS 參數設定對於上行排程規畫的影響。在上行存取區塊排程設計方面，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。

### ● 測距(Ranging)

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作為基地台提供給用戶端進行所有類型的測距(包含初始測距、定期測距、頻寬請求測距和換手測距)使用；而上行轉送地帶上的競爭子通道則是用來提供給非穿透式中繼台進行所有測距類型使用。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，基地台會比對在同一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。

### ● 換手機制

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非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 IEEE 802.16j 中控型非穿透式網路下，基地台 MR-BS 具有控管整個網路的能力，也就是說，基地台必須負責管理其下的用戶端和基地台的資訊並對這些用戶端和中繼台進行資源的分配。在用戶端與中繼台進行入網程序過程中會和基地台請求連線，基地台則會分配連線識別碼並建立專屬的連線，方後基地台若要傳送資訊便可依連線識別碼丟到對應的連線佇列；而當基地台收到封包時也可以依照連線識別碼來辨別是哪個用戶或中繼台的資料並進行相對應的分析與處理。因此連線管理是基地台在維護用戶端和中繼台資訊的主要工作。

為了方便基地台對於用戶端和中繼台的連線管理，我們將新增兩種 C++物件類別：MS object 和 RS object。其中，MS object 是有別於 MS 物件的 C++類別，它是基地台用來儲存用戶端節點資訊和連線資訊的資料結構；同理，每個在基地台服務下的非穿透式中繼台也將用一個 RS object 物件來管理。因此在基地台物件(MR-BS 的 C++類別)中將維護一個 MS object 串列(list)和一個 RS object 串列，當用戶端或中繼台完成入網程序後便會建立一個 MS object 或 RS object 物件並加入串列中。圖 3-7 顯示了此兩種物件類別的基本定義，其中 diuc、uiuc 是記錄用戶端和中繼台與存取點(Access Station，可能是 MR-BS 或 NT-RS)間的下行與上行通道狀況，accessStation 是指到存取點物件的指標，servingBS 則是指向提供服務的基地台物件的指標，還有一個紀錄連線資訊的陣列 MnConnections 和儲存一般資料的 DtConnections，MnConnections[0]儲存 Basic CID 連線的資訊，MnConnections[1]儲存 Primary CID 連線的資訊，而 MnConnections[2]則紀錄 Secondary CID 連線的資訊。這些連線的資訊將於之後基地台進行排程時取出並封裝。此外，這兩個物件還實作了一些處理 MAC 管理訊息的函式，例如 MS object 中的 procREGREQ 就是在基地台收到 REG-REQ 後經由連線識別碼判別是哪個 MS object 再

去呼叫，其產生的 REG-RSP 將會儲存在 MS object 對應的 MnConnections 裡以待之後排程時送出。RS object 基本架構與 MS object 類似，但需多處理一些中繼台與基地台之間傳遞的訊息，例如基地台在中繼台入網程序中會發送 RS\_Config-CMD。

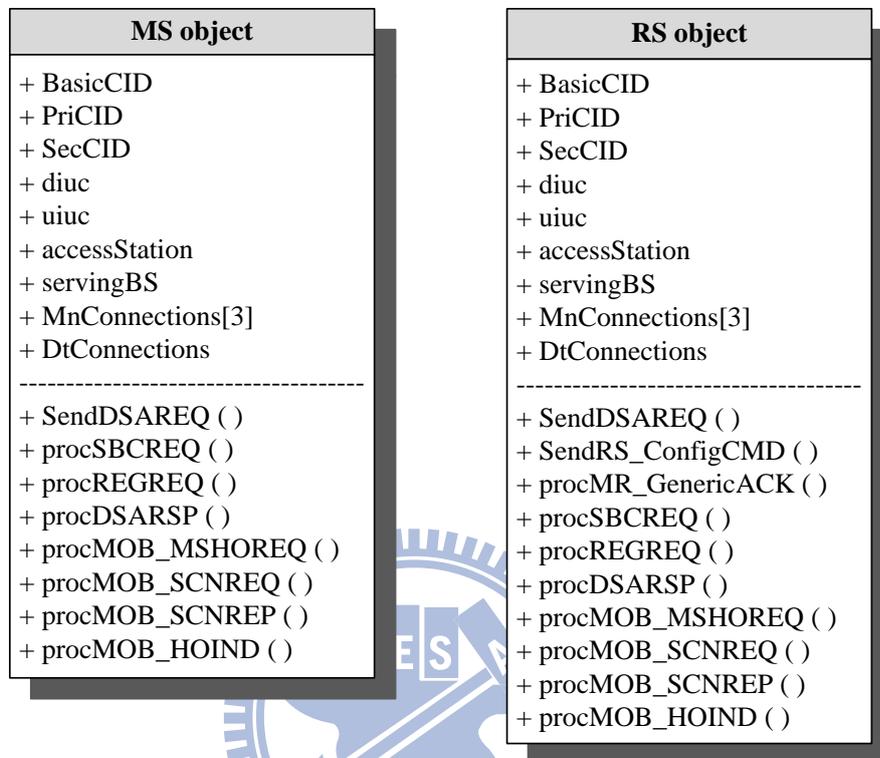


圖 3-7 MS object 與 RS object 物件結構

在基地台物件裡為了對不同的連線識別碼做適當的處理，維護了包括廣播訊息佇列(儲存 Broadcast CID 訊息)、初始測距佇列(儲存使用 Initial CID 的訊息)還有 MS object 和 RS object 分別維護了各自的管理連線佇列(Basic CID、Primary CID、Secondary CID、Transport CID)，因此當 recv() 函式收到封包時會先拆解成 PDU 並分析其連線識別碼再決定要丟到何種連線佇列，可能的情形有下列幾種狀況：

- (1) 特殊管理訊息連線識別碼：例如 Broadcast CID 或 Initial CID，由於這種不是屬於特定的用戶端或基地台所擁有的連線識別碼，因此也不在 MS object 或 RS object 中做處理，而是直間根據是何種訊息型態再去做作相對應的分析。而當基地台要傳送 Broadcast CID 或 Initial CID 的管理訊息會丟到對應的連線佇列(廣播訊息佇列或初始測距佇列)，之後排程時會從中取出封裝並放在傳送封包內。

- (2) 一般管理訊息連線識別碼：用戶端與中繼台在入網程序後所分配到的連線識別碼都有一定的範圍，因此若判斷是屬於用戶端的識別碼範圍就去找到對應的 MS object 處理；反之則代表是中繼台的傳送的管理訊息，找對應的 RS object 處理。基地台處理完這些管理訊息後往往會產生回覆的訊息，這些回覆訊息將藉由 MS object 與 RS object 中的 MnConnections 來儲存，待基地台開始排程會去一一檢查各個管理物件的 MnConnections 是否有訊息要送。
- (3) 一般資料連線識別碼：這些通常是來自上層的訊息，由於資料連線識別碼也是有固定範圍，因此只要找到對應的 MS object 或 RS object 將這些資料存入其中的 DtConnections 即可。如同一般管理連線訊息，這些資料將等稍後的排程才會再被檢查看是否有足夠的頻寬可以傳輸。

圖 3-8 呈現了在非穿透式網路下 MR-BS、NT-RS 與 MS 間傳遞封包時各物件模組的處理情形。MR-BS 或 NT-RS 都會在下行存取區段產生 DL Access burst 封包，若 MS 選擇直接與 MR-BS 進行連線，它將收到 MR-BS 產生的 DL Access burst 封包並在上行存取區段傳送 UL Access burst 封包至 MR-BS，如圖 3-8 上半部分所示；反之，若 MS 在 MR-BS 涵蓋範圍外，則它必須與 NT-RS 進行連線，圖 3-8 虛線部分代表 MS 連接在 NT-RS<sub>2</sub> 下並透過 NT-RS<sub>1</sub> 與 MR-BS 進行連線的傳送流程，首先 MR-BS 透過排程器產生 DL Relay burst 並在下行轉送區段傳給 NT-RS<sub>1</sub>，NTRS<sub>1</sub> 收到後會將需要中繼轉送的資料放到對應的連線佇列，稍後在 NT-RS 的排程器會去檢查這些連線佇列並產生 DL Relay burst 再往 NT-RS<sub>2</sub> 傳送，最後 NT-RS<sub>2</sub> 收到 DL Relay burst 後也會將這些資料依照連線識別碼放進連線佇列，並利用排程器產生 DL Access burst 傳送給 MS。因此對 MS 而言，與 MR-BS 連線或與 NT-RS 連線並無差異，因為收到的封包型態都一樣是 DL Access burst，只是透過中繼台轉送會有時間上的延遲。

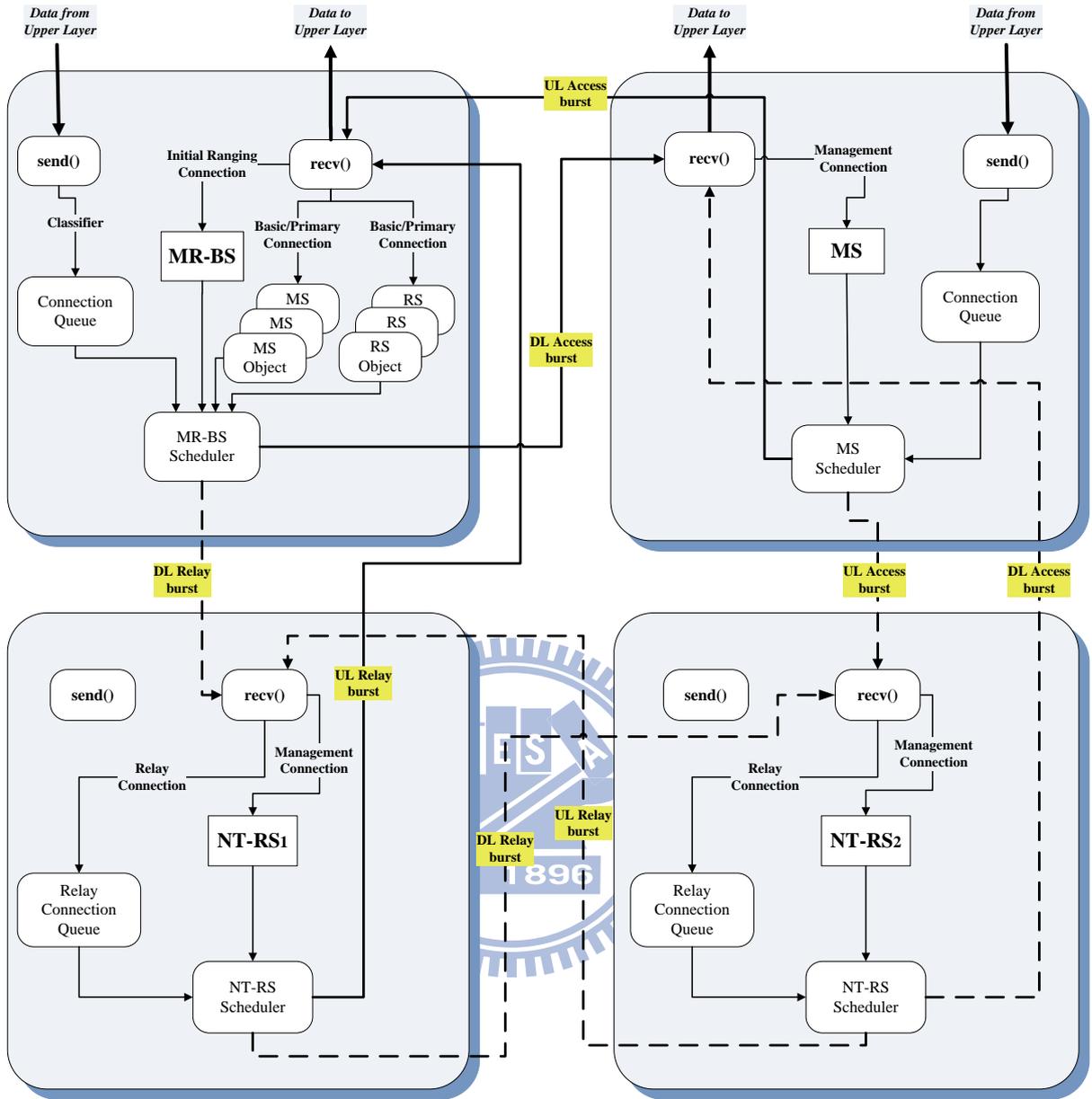


圖 3-8 MR-BS、MS 與 NT-RS 物件間的資料傳送

基地台的排程器負責規劃要傳送給用戶端或中繼台的資料，並將這些資料依照 WiMAX 資料封裝的格式放進訊框結構。IEEE 802.16j 非穿透式訊框結構定義於實體層，主要分為四個區塊，分別是下行存取地帶、下行轉送地帶、上行存取地帶和上行轉送地帶，因此，排程器會分別針對這四個區塊進行排程並做成封包往實體層傳送。基地台規畫的封包可依照傳送對象不同分為 DL Access burst 和 DL Relay burst，前者是傳送給直

接連接在基地台底下的用戶端的封包，用戶端收到後藉由解開 DL-MAP 便會知道下行存取地帶和上行存取地帶的分配情形；後者是傳送給非穿透式中繼台的封包，中繼台收到後藉由解開 R-MAP 便可知道下行轉送地帶和上行轉送地帶的分配情形。底下將說明基地台排程器的設計。

由於頻寬的配置方式會根據使用的實體層的不同而有所差異，因此排程器也必須先了解實體層的頻寬配置特性才能進行資料的排程。IEEE 802.16j 使用 OFDMA 實體層，頻寬分配的最小單位是 slot，圖 3-9(a)、(b)分別顯示了 slot 在下行子訊框(包含下行存取地帶和下行轉送地帶)和上行子訊框(包含上行存取地帶和上行存取地帶)的分配方式，一個 slot 是由 symbol 和 sub-channel 兩個維度所組成，而 slot 的大小則與實體層使用的 permutation zone 之排列方式有關，目前下行子訊框使用的是 DL-PUSC 的載波排列方式，每個下行 slot 由一個 sub-channel 和兩個 symbols 所組成，上行子訊框則使用 UL-PUSC 的載波排列方式，每個上行 slot 由一個 sub-channel 與三個 symbols 所組成。表 3-1 和 3-2 分別列出了 OFDMA 的 DL\_PUSC 和 UL\_PUSC 的相關參數設定。至於 slot 配置的方法，在下行子訊框和上行子訊框也有所不同，在下行的部分，資料的分配採區塊的方式，即依照 burst 的大小換算成所需 slot 個數，再分配最小連續的 slot 區塊，如圖 3-9(a)，缺點是可能造成頻寬的浪費。上行 slot 分配方式則無此限制，因此可以接著上一個 burst 佔用 slot 位置的結尾繼續往下進行，如圖 3-9 (b) 所示，slot 可以不用限制在某個區塊內。

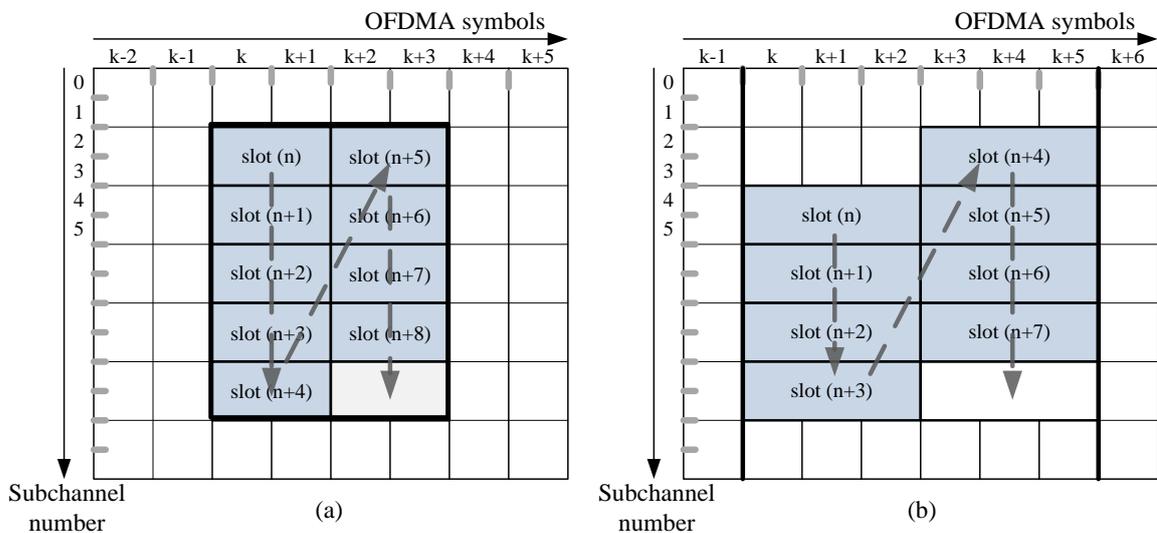


圖 3-9 下行子訊框與上行子訊框 slot 配置方法

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

接下來將說明中控型非穿透式基地台排程器如何配置訊框結構。基地台經由排程器產生的訊框結構如圖 3-10 所示，在我們的設計中，訊框結構採動態配置方式，也就是說，下行存取地帶 (DL Access zone)、下行轉送地帶 (DL Relay zone)、上行存取地帶 (UL Access zone)和上行轉送地帶 (UL Relay zone)這四個區塊每一次所佔的 subchannel 數都可能因為每一次需要傳送的資料量多寡不同而有所差異。為了確保能滿足用戶端的 QoS 並使整體傳輸效率能達到最高或下行頻寬盡量達到最大，排程器規畫這四個區塊的順序為由後往前，即從上行轉送地帶排程開始，依序是上行存取地帶排程、下行轉送地帶排程、最後才是下行存取地帶排程。其中，排程須在以下的條件限制下進行：

- i. 上行子訊框 (上行存取地帶 + 上行轉送地帶) 所佔的 symbol 數不能超過全部可用 symbol 數的一半，而全部可用 symbol 數減去上行子訊框所佔 symbol 屬即為下行子訊框可用 symbol 數。
- ii. 上行轉送地帶所佔的 symbol 數不能超過上行子訊框可用 symbol 數的一半，如此保證至少有一半以上的上行存取地帶可供用戶端上傳資料。
- iii. 下行轉送地帶所佔的 symbol 數不能超過下行子訊框可用 symbol 數的一半，如此保重至少有一半以上的下行存取地帶可以傳資料給用戶端。

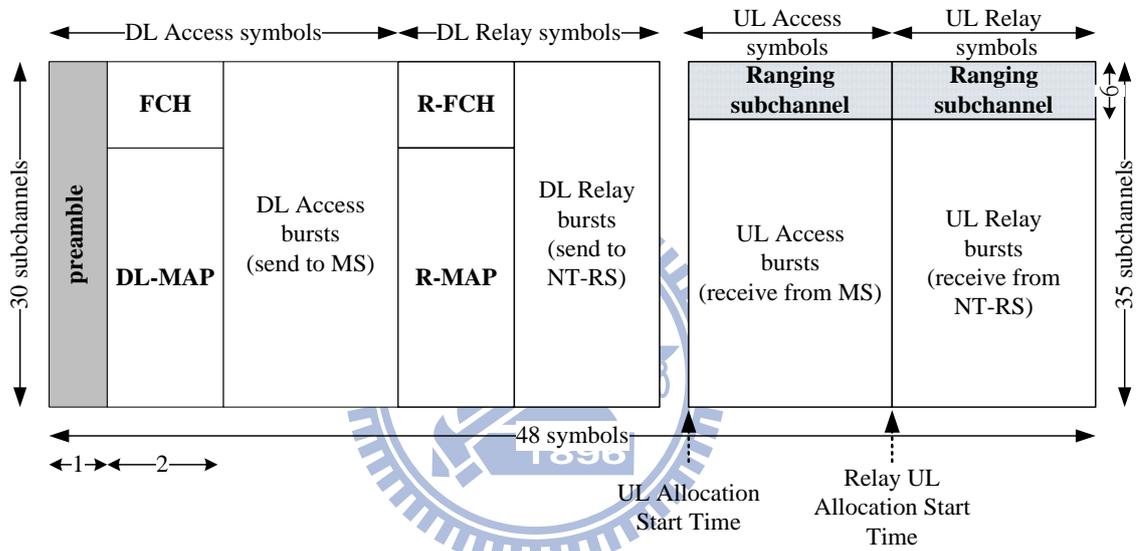


圖 3-10 MR-BS 訊框結構

為了方便理解各區塊排程設計的原理，在此使用一個 3-hop 的多重轉送非穿透式網路拓樸 (圖 3-11) 的例子作為輔助，此圖中除了 MS<sub>1</sub> 和 NT-RS<sub>1</sub>，其他的節點皆位於 MR-BS 的傳輸範圍之外，因此，MS<sub>1</sub> 的存取台為 MR-BS，MS<sub>2</sub> 的存取台為 NT-RS<sub>1</sub>，MS<sub>3</sub> 的存取台為 NT-RS<sub>2</sub>。底下一一將就各區塊的排程方法進行說明。

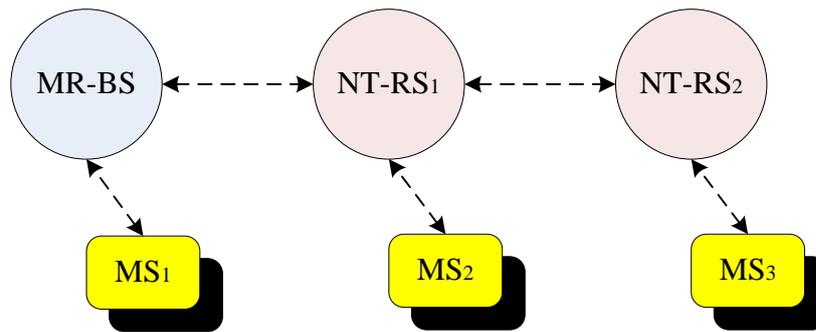


圖 3-11 三段式轉傳網路拓模

- (1) 上行轉送地帶排程：此區段需做排程的資料包含：基地台服務底下的非穿透式中繼台(NT-RS<sub>1</sub> 和 NT-RS<sub>2</sub>)的上行管理訊息、透過非穿透式中繼台轉送的用戶端(MS<sub>2</sub>、MS<sub>3</sub>)的上行資料。此區塊可再分為競爭區間和免競爭區間，競爭區間是位於上行轉送地帶的一段子通道，稱為競爭子通道(Ranging subchannel)，用來提供中繼台進行初始測距和定期測距以及頻寬請求測距，圖 3-12 顯示了競爭子通道對於各種測距碼的安排方式，其中全部測距子通道所佔的 symbol 數為 UL Relay symbols，並佔了 6 個子通道。由於上行轉送地帶所佔多少 symbols 一開始並不知道，因此這邊必須先做非競爭區間的排程（因為分配的上行頻寬是固定的並可以計算其所佔的 slot 個數，進而轉成 symbol 個數）才能獲得 UL Relay symbols，此外初始測距碼佔 2 symbols、定期測距碼佔 1 symbol；免競爭區間是提供給中繼台上傳中繼台本身傳送的管理訊息或轉送其下用戶端所傳送的資料。由於目前中繼台並不會提供應用層的服務因此不像用戶端必須設定 QoS 參數，但中繼台又必須負責轉送下屬用戶端的資料，為了避免每次中繼台都要向基地台請求上行頻寬造成的負擔，當中繼台完成入網程序後，基地台會定期分配給中繼台可用的上行頻寬，中繼台無須經由頻寬請求機制取得。無論是競爭區段還是免競爭區段，基地台在對這些資料做排程時最後都會依照其用途(不同的 uiuc)表示成不同的 UL-MAP IE(Information Element)的格式，當基地台完成上行轉送地帶的排程之後，必須將這些 IE 放置在 UL-MAP 中，待下行轉送地帶排程結束後會包裝成下行轉送封包並傳送至中繼台，而中繼台藉由分

析 UL-MAP 便可得知上行轉送地帶的起始位置和相關參數，才能在正確的時間點進行上行資料的傳送。

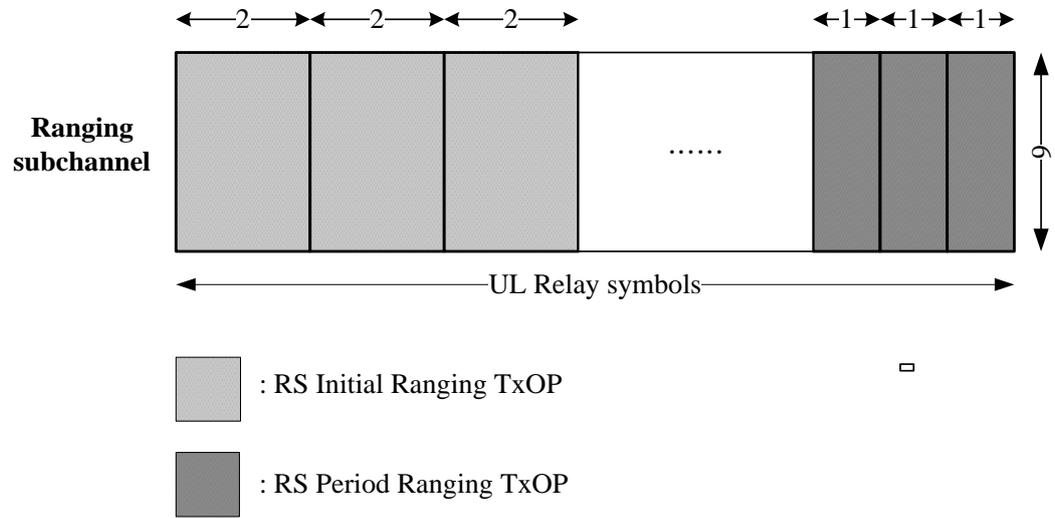


圖 3-12 上行轉送地帶的測距子通道分配方式

- (2) 上行存取地帶排程：在完成上行轉送地帶排程過後，便可得知 DL Relay symbols，由於上行子訊框最多只能用掉全部訊框一半的 symbol 數，因此可以推算出上行存取地帶可用 symbol 個數為 (上行子訊框可用 symbol 數) - (DL Relay symbols)，進而可以算出可用的 slot 個數以便進行上行存取地帶的排程。此區塊一樣由一段競爭區間和一塊免競爭區間組成，有別於上行轉送的競爭區間，此競爭區間是用來提供用戶端進行初始測距、換手測距、頻寬請求測距、定期測距使用，而非中繼台。圖 3-13 顯示上行存取地帶競爭子通道對於各測距碼的安排方式；免競爭區間用來提供用戶端上傳資料的區域。基地台經由用戶端所提供的上行 QoS 參數(MaxSustainedRate)以及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 個數以配給足夠的頻寬，若用戶端是經由非穿透式中繼台進行資料轉送，則用戶端必須使用其與中繼台傳輸連結的調變方式與編碼技術進行 slot 個數的計算。當基地台完成上行存取地帶排程之後，一樣先封裝成 UL-MAP，待下行存取地帶排程結束後，基地台會產生下行存取封包並傳送到用戶端，用戶端藉由分析 UL-MAP 可以得知上行存取地帶的開

始位置及其他參數並在適當的時機上傳用戶資料。

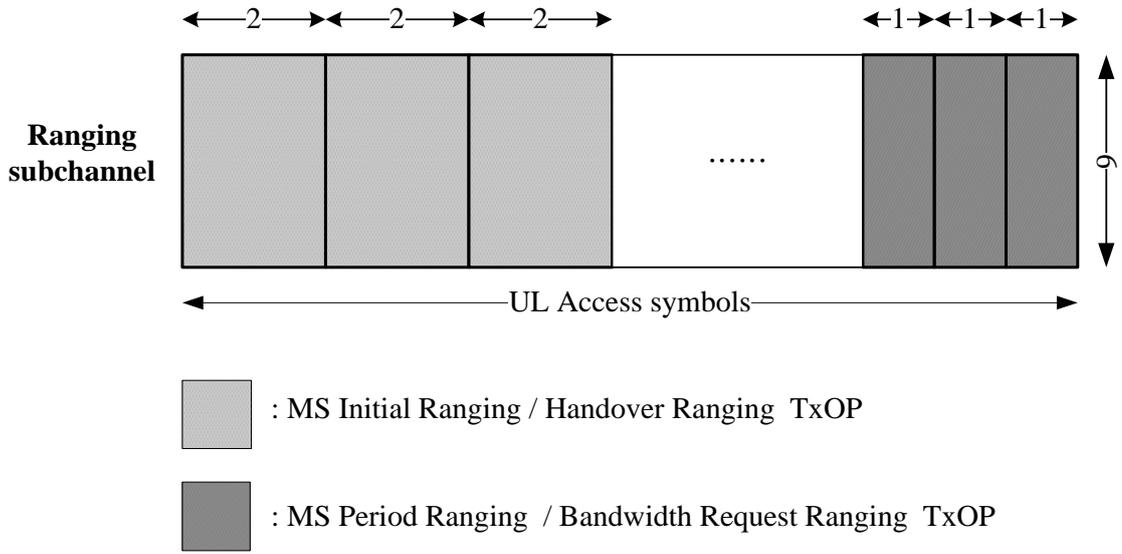


圖 3-13 上行存取地帶的測距子通道分配方式

- (3) 下行轉送地帶排程:在進行下行轉送地帶排程之前,先計算其可用的 slot 個數。由於上行子訊框所佔的 symbol 數已知(UL Access symbols + UL Relay symbols)而下行轉送地帶又不能使用超過 1/2 的下行子訊框可用 symbol 數。因此下行存取地帶可用 symbol 數 = (全部 symbol 數 - 上行子訊框佔用 symbol 數) / 2, 得到此值便能再進一步換算成下行存取地帶可用的 slot 個數。在資料的排程方面,此區塊主要是針對基地台服務的中繼台以及透過中繼台轉送之用戶端的資料進行配置。因此基地台先檢查每一個 RS object 裡的資料連線佇列是否有需要做排程,這是基地台傳要送給中繼台資訊的部分;至於基地台若要傳送給經由中繼台轉送服務的用戶端,則需對中繼台維護的轉送連線資料佇列進行排程,並且使用中繼台與用戶端之間的傳送連結所使用調變方式和編碼技術當作基地台配置時的依據。而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 3-14 所示。在配置完所有的資料後會表示成 burst 的型式,每一個 burst 都代表著不同的編碼和調變方式,而下行轉送訊框裡每個 burst 的資訊都將先包成 DL-MAP IE,最後再封裝成

R-MAP，其中也包括先前上行轉送地帶所產生的 UL-MAP IE。基地台在此區塊會產生下行轉送封包並送給其下的中繼台，中繼台藉由分析 R-MAP 便可得知整個下行轉送地帶的配置情形。

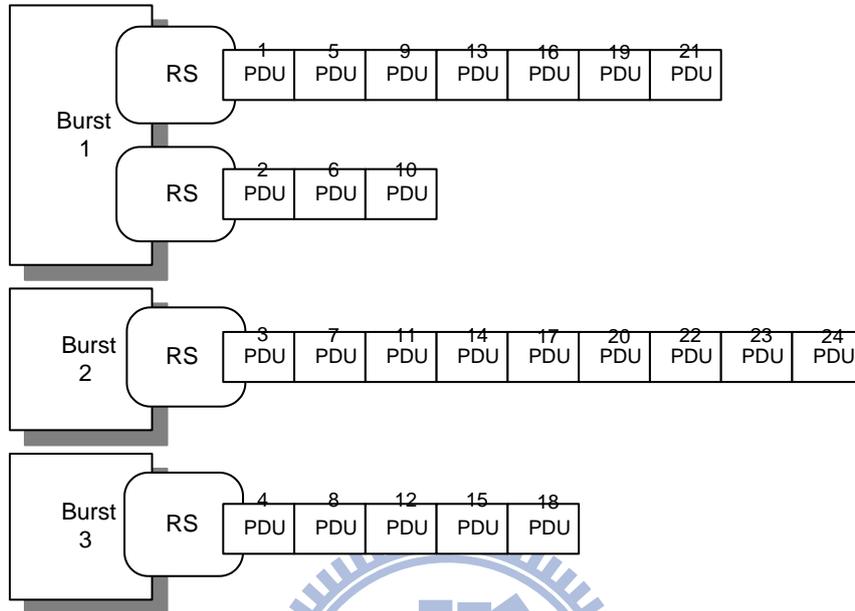


圖 3-14 以 RR 方式配置下行轉送地帶

- (4) 下行存取地帶排程：扣除掉上行子訊框佔用的 symbol 數和下行轉送地帶佔用的 symbols 數，最後剩下的可用 symbol 將全部留給下行存取地帶使用，當然，要先轉成 slot 再進行分配。此區塊中主要分為三大部分：前置訊號、DL-MAP 和 DL bursts。其中，前置訊號是一組已知的碼，佔一個 symbol，用來讓用戶端進行同步，而且每個基地台都會發出不同的前置訊號碼。DL-MAP 是對於下行存取訊框的描述；DL bursts 則是儲存用戶端的資料並依照不同的調變和編碼方式分裝在 burst 中。如同基地台在配置下行轉送地帶時對中繼台資料的排程方法，基地台在下行存取地帶從各個 MS object 的連線佇列取出資料後也是使用 Round-Robin 的方式公平分配用戶端資料。當所有下行存取地帶配置完成後，基地台會將封裝後的 burst 資訊及位置紀錄在 DL-MAP 中，由於對用戶端而言可能不知道有轉送區段的存在，因此 IEEE 802.16j 標準中也提到，可以利用 diuc = 13 的 DL-MAP IE 告知用戶端這項資訊，以讓用戶端方便調整接收的狀態。

最後，圖 3-15 總結了基地台排程器對於各區塊的資料分配的流程。

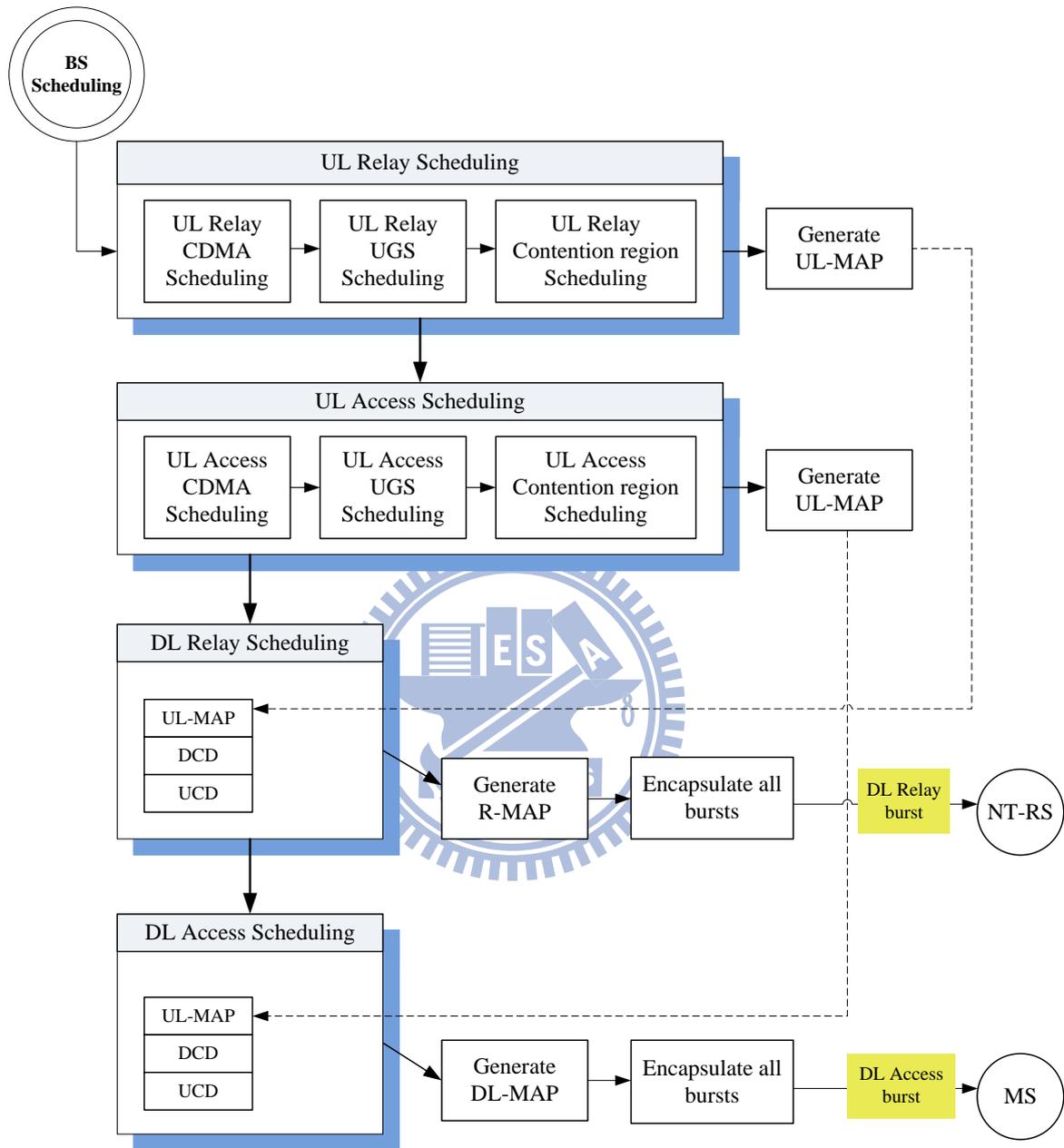


圖 3-15 基地台排程器流程圖

### 3.4.1.2 NT-RS 媒體存取控制層的模組設計與實作

中控型非穿透式中繼台雖然定位為中繼台，但卻擁有和基地台類似的能力，例如它

會在每個訊框的一開始發送前置訊號，緊接著是廣播管理訊息，因此對用戶端而言，幾乎察覺不出非穿透式中繼台與基地台有何異樣，甚至可以說，非穿透式中繼台就是基地台，只是它具有轉送的能力而且也不像基地台需要建置後端有線網路，而是靠著無線傳輸連接基地台或者其他非穿透式中繼台以及用戶端。此外，非穿透式基地台還可以對訊框結構做排程，主要是因為在非穿透式網路下，用戶端大多離基地台很遠，甚至在服務範圍之外，此時便須藉由非穿透式中繼台當作中介幫忙兩端傳遞，但若中繼台不幫忙記錄一些直屬用戶端的訊息而全部回傳給基地台，將會大幅增加轉送連結(Relay Link)的負擔。底下介紹非穿透式中繼台排程器的實作方法。

當非穿透式中繼台完成入網程序後始具有排程的能力，在中控型基地台下，非穿透式中繼台排程的資訊主要還是來自基地台，基地台會將需要中繼台轉送的資料包在 RS\_Access-MAP 和 RS\_Relay-MAP 訊息中。RS\_Access-MAP 的格式中有一個 indicator 欄位(共 12 bits)的每個 bit 都代表不同的意義，例如 bit-2 代表 DL-MAP IE 是否涵蓋其中(0:無,1:有),bit-3 代表 UL-MAP IE 是否涵蓋其中(0:無,1:有),bit-6 代表 RS BW-ALLOC IE 是否涵蓋其中(0:無,1:有)，藉由此方式，基地台可將要經由中繼台傳送給用戶端的 IE 放在此訊息中，當中繼台收到之後再將這些 IE 封裝成 DL-MAP、UL-MAP 傳至用戶端，因此 RS\_Access-MAP 訊息是非穿透式中繼台安排下行存取訊框時的重要依據。此外，RS\_Relay-MAP 則是在多段轉傳(hop 數大於 2)時才會使用的訊息，用來幫助中繼台得以對下行轉送訊框進行配置。圖 3-16 顯示了非穿透中繼台媒體存取控制層的運作情形，和基地台一樣，非穿透式中繼台會利用排程器分別對四個子區塊進行配置並產生 DL Access burst 和 DL Relay burst，不同的是，排程時的訊框結構基本上是依據從基地台收到的訊框結構而定，也就是說，中繼台會紀錄從基地台送來封包的 DL Access symbol、DL Relay symbol、UL Access symbol 和 UL Relay symbol，當中繼台排程器進行排程時便已知這些區塊的大小，因此，中繼台只需在這個架構下將要轉送給用戶端的資料進行排程而無需再去計算，中繼台上行的部分也是。簡單來說，使用的訊框其四個子區塊所佔用的 symbol 數和上一次從基地台收到的訊框結構一樣，中繼台只是在這個結構下將收

到的 MAP IE 重新組裝，以及從用戶端的連線佇列中取出資料進行排程。此外，由於轉送地帶的狀態必須為 Tx (傳送)、Rx (接收)或 Idle (閒置)三者其中一個，當基地台送出 DL Relay burst 時，中繼台的下行轉送地帶應為 Rx 狀態，因此若要支援多段轉送，中繼台的下行轉送地帶必須轉變成為 Tx 並傳送 DL Relay burst 給其下的中繼台，但這樣就必須更動到基地台和中繼台的排程，在此，先說明兩段式轉送的網路拓樸下，非穿透式中繼台的排程方法，至於多段轉送將於後面詳細說明。

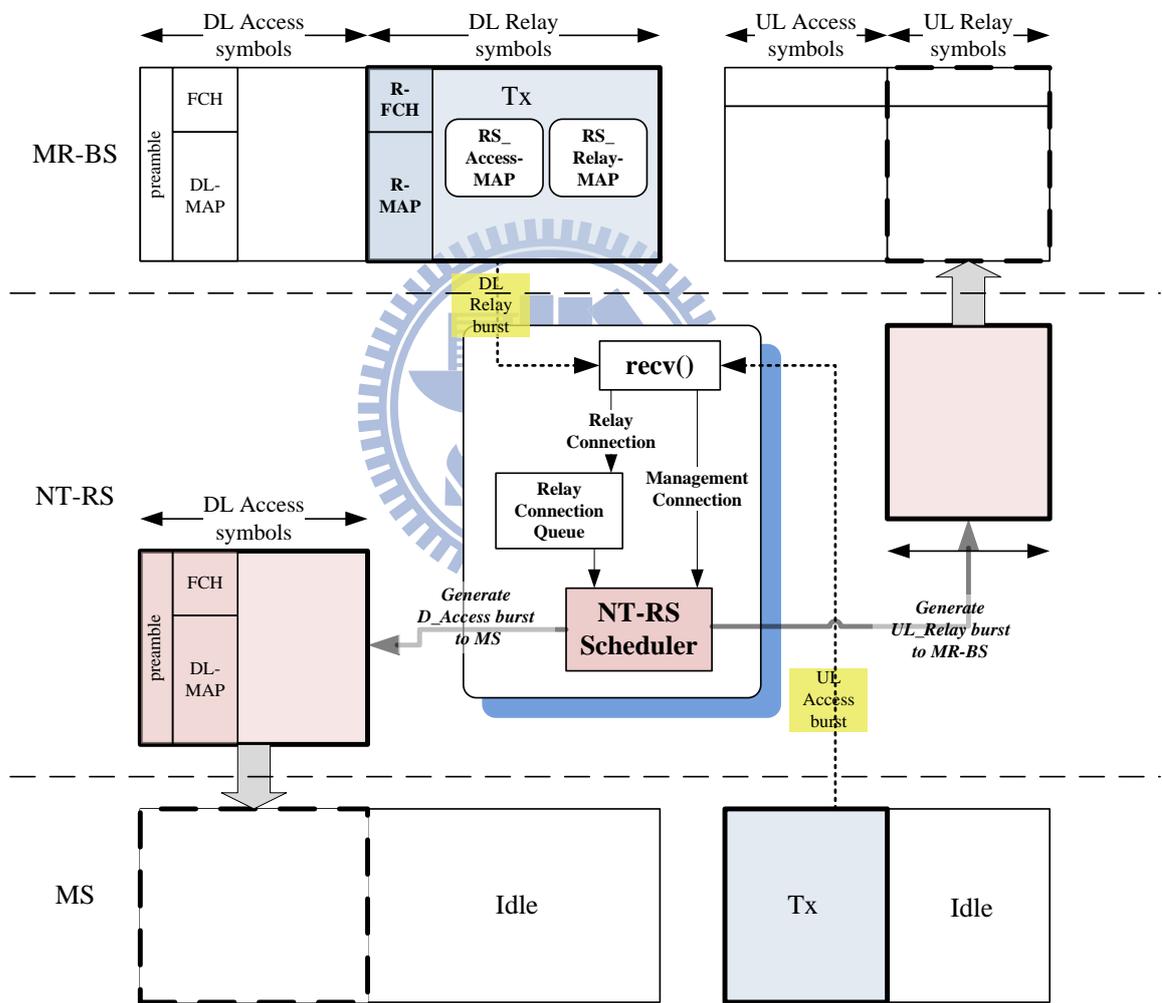


圖 3-16 NT-RS 媒體存取控制層處理封包流程

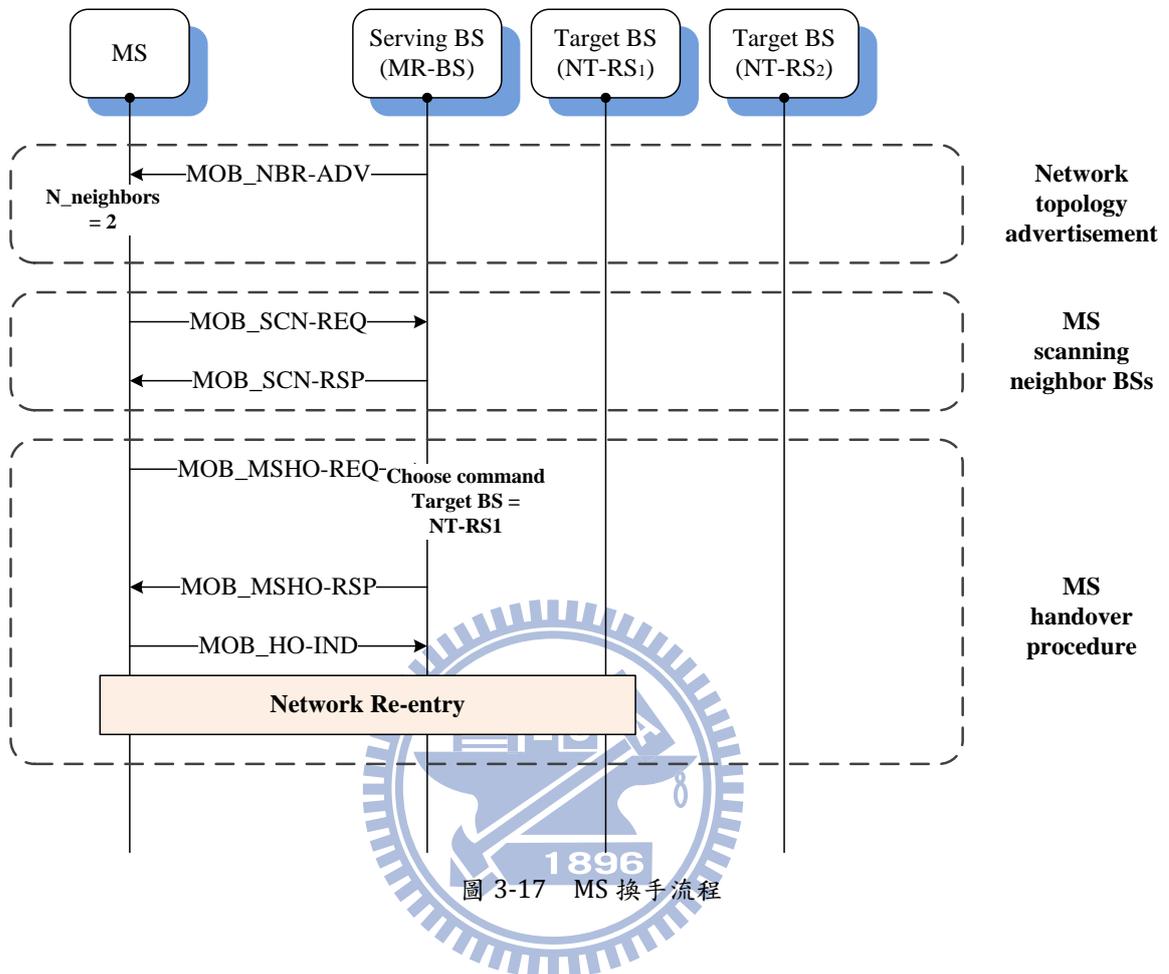
### 3.4.1.3 MS 媒體存取控制層的模組設計與實作

關於用戶端 MS 媒體存取控制層的設計方面，原本 IEEE 802.16e 用戶端的設計在 IEEE 802.16j 非穿透式網路中幾乎無須修改即可支援多段轉傳的功能，因為非穿透中繼台對於用戶端而言就像是基地台一般，因此用戶端在媒體存取控制層不必再多做什麼特殊的設計。唯一的調整是一開始在加入網路前必須切換頻段去監聽各基地台或非穿透式中繼台所發送的前置訊號，此後便會依照各頻段監聽訊號的強段來選擇要切換到何種頻段，自此將只會收到該頻段的訊號，詳細的說明將在實體層設計部分介紹。

在 IEEE 802.16j 中，用戶端仍支援移動性，並會週期性的發送定期測距碼給基地台，用來校正其與基地台之間的時序偏差以防訊框收到時偏差太多造成資料解析錯誤，基地台或中繼台在接收到用戶端所發送的定期測距碼時會回覆 RNG-RSP 管理訊息告知用戶端測距的結果，可能結果為 continue、success 或 abort，若用戶端收到的 RNG-RSP 狀態為 continue 則會先調正自己得傳送時間再送一次測距碼，若收到狀態為 success 的 RNG-RSP 代表可以開始發送 RNG-REQ 做為初始測距用途。如果用戶端透過非穿透式中繼台進行連線，其測距碼會暫存在中繼台上而中繼台則會向基地台要求下行頻寬以便能回復 RNG-RSP 給其下的用戶端。

而目前用戶端的換手程序設計主要是沿用先前 NCTUns 模擬器上 IEEE 802.16e 所使用的機制。一開始，基地台和非穿透式中繼台會定期的廣播 MOB\_NBR-ADV 管理訊息已告知用戶端有哪些鄰近的基地台可以做連結。接著當用戶端逐漸往基地台或非穿透式中繼台的訊號範圍外移動時，用戶端將開始掃描鄰近可用的基地台，此部分即是由用戶端發出 MOB\_SCN-REQ 管理訊息，其中包含 scan duration (總共掃描幾個 frame)、scan iteration (總共掃描次數)、interleaving interval (用戶端離開掃描區間的時段，此時基地台方可再對用戶端發送訊息，否則在一般掃描區間時用戶端不會接收封包)等資訊，稍後基地台會回覆 MOB\_SCN-RSP 訊息給用戶端告知何時可以開始掃描。用戶端在掃描的過程會偵測收到的 CINR 值，當 CINR 大於某一個 threshold value (目前訂為 8)即開始進

行換手程序。圖 3-17 表示了用戶端 MS 在圖 3-11 的網路拓樸下從基地台 MR-BS 換手到中繼台 NT-RS<sub>1</sub> 的過程。



### 3.4.1.4 多段轉送排程方法

IEEE 802.16j 標準中提供的非穿透式訊框結構如圖 3-18 所示，此架構僅能支援兩段式 (2-hop) 轉傳，原因如先前提到，轉送地帶同一時間只能有一種狀態，但中繼台的下行轉送地帶其狀態都為 Rx (接收來自基地台 MR-BS 的封包) 而上行轉送地帶的狀態都為 Tx (傳送上行封包至 MR-BS)，因此，兩個連續的中繼台不能利用轉送地帶互相溝通，當然也就無法達到多段轉送的目的。為了讓轉送中繼站台數能夠透過達到 2 hop 以上，必須針對訊框結構加以變化，讓轉送地帶的狀態能夠改變，而非永遠是 Tx 或 Rx，藉由狀態的轉換便方能使將封包繼續往下傳遞。目前解決此問題的方法分為兩大類，分別是

轉送地帶切割法(partition approach)和超級訊框法 (super-frame approach)，前者是指將轉送地帶再切割成多個區塊以讓中繼資料得以在不同 hop 間傳輸；後者則是將多個訊框組合成一個大的訊框當成一個排程的單位，進而改變其中子訊框轉送地帶的狀態。由於後者的設計方案會保留原本兩段式轉送的訊框結構，只是在訊框的排程需做調整，因此我們將選擇由兩個訊框組合的 2-frame 超級訊框結構作為支援多段轉送的基本訊框結構。

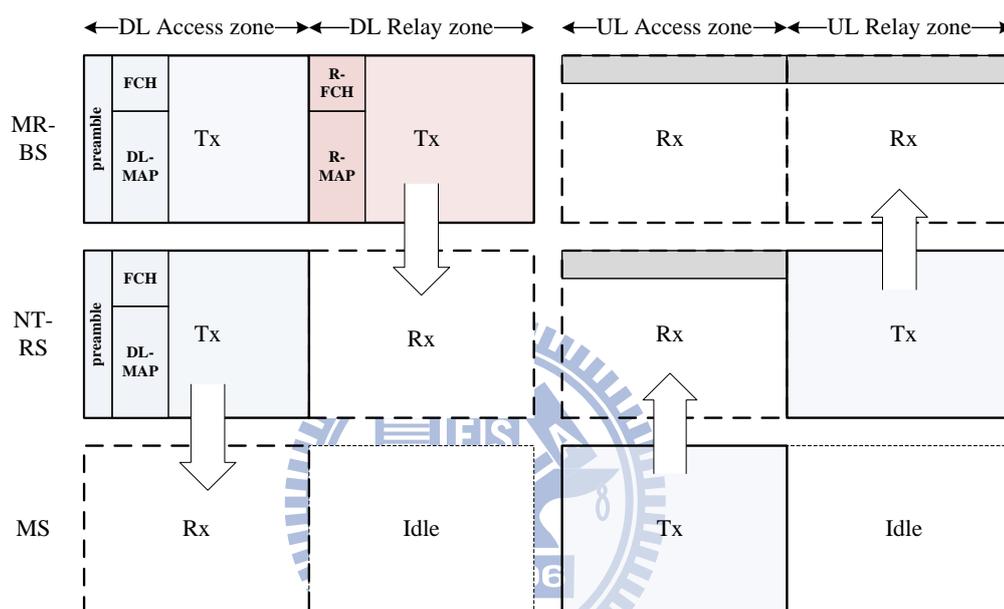


圖 3-18 兩段式轉傳訊框結構

所謂的 2-frame 超級訊框是指將原本兩個訊框視為一個大訊框，利用排程器週期性的配置其中的資源。每一個大訊框看起來結構都一樣，但大訊框之中的兩個小訊框可以依照不同的目的改變轉送地帶的狀態，藉此設計便可達到多段轉送的效果。圖 3-19 為多段轉送的訊框配置情形，為了支援此種設計，基地台的排程器和非穿透式中繼台排程器都需要做相對應的修改，底下將分別進行說明。

- 多段轉送基地台排程器 (Multi-hop Relay MR-BS Scheduler)：在 2-frame 的超級訊框架構下，基地台排程器所應產生的超級訊框如圖 3-19 所示。若以原本的訊框結構為單位來看，奇數訊框時的結構與原本的訊框結構並無二異，差別只在偶數訊框時，下行轉送地帶和上行轉送地帶的狀態均為 Idle。原本基地台(MR-BS)會在下行轉送

地帶傳送下行轉送訊框給其下的中繼台(NT-RS<sub>1</sub>)，但在多段轉送的情形下，中繼台(NT-RS<sub>1</sub>)會在偶數訊框時傳送下行轉送訊框給其下的中繼台(NT-RS<sub>2</sub>)，因此基地台應該保持 Idle 狀態而不產生下行轉送封包，否則中繼台(NT-RS<sub>1</sub>)將無法接收。反之，上行轉送地帶則是因為在偶數訊框時，中繼台(NT-RS<sub>1</sub>)會接受其下中繼台(NT-RS<sub>2</sub>)的上行轉送封包，此時基地台底下的中繼台 NT-RS<sub>1</sub> 狀態為 Rx，無法進行上傳，所以基地台應該將上行轉送地帶狀態改為 Idle。為達到此種排程效果，基地台排程器僅需做些微的修改，就是只在奇數訊框時去做轉送地帶的排程包括 DL Relay Scheduling 和 UL Relay Scheduling 。

- 多段轉送中繼台排程器 (Multi-hop Relay NT-RS Scheduler)：中繼台在 2-frame 超級訊框的架構下所呈現的訊框結構也如圖 3-19 所示，在此同樣以原本的訊框架構為單位來看，中繼台的訊框排程依照其 hop 數不同以及訊框編號不同又分成兩大類，其中 hop 數是從基地台開始算到用戶端的距離，因此基地台 hop 數為 1。
  - (1) 奇數 hop 中繼台：此種中繼台在奇數訊框時的下行轉送地帶的狀態為 Tx，上行轉送地帶狀態為 Rx；而在偶數訊框時的下行轉送地帶為 Rx，上行轉送地帶狀態為 Tx。
  - (2) 偶數 hop 中繼台：此種中繼台在奇數訊框時的下行轉送地帶的狀態為 Rx，上行轉送地帶狀態為 Tx；而在偶數訊框時的下行轉送地帶為 Tx，上行轉送地帶狀態為 Rx。

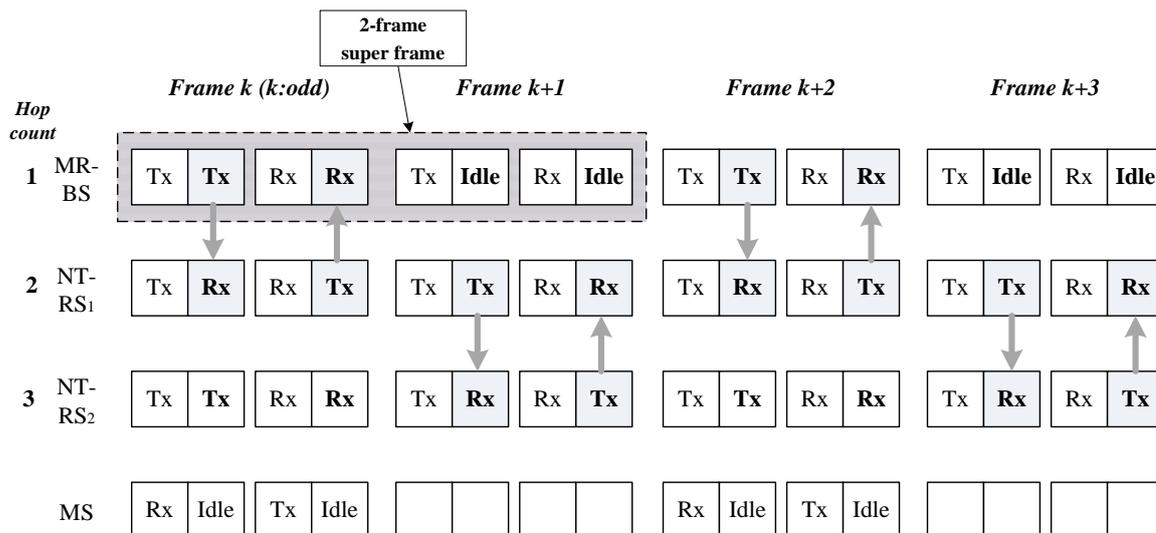


圖 3-19 多重轉送訊框結構

### 3.4.2 實體層模組設計與實作

IEEE 802.16j 的實體層主要沿用自 IEEE 802.16e 的 OFDMA 實體層，支援 TDD 與 FDD 兩種訊框配置方式，主要的功能包含訊框控制標頭(Frame Control Header，簡稱：FCH)的處理、中繼訊框控制標頭(R-FCH)的處理、調變技術的模擬(Channel Model)、通道編碼與解碼(Channel Coding & Decoding)的實作及通道模型的模擬等。

每個訊框一開始都有一個訊框標頭，用來記錄 DL-MAP 的長度以及使用的調變與編碼方式，其格式用一個 DLFP(Downlink Frame Prefix)的資料結構表示，共佔 24 位元，使用 4 次的重複編碼以及 QPSK 的調變方式、編碼率 1/2，配置在訊框的最開端，佔四個 slot。然而下行轉送封包是位於下行轉送地帶而非訊框的開頭，因此標準中也特別設計了一種放置在下行轉送地帶的標頭，用來記錄 R-MAP 的長度以及使用的調變與編碼方式，其格式稱做 R-Zone Prefix，一樣佔 24 位元，也是使用 4 次的重複編碼以及 QPSK 的調變方式、編碼率 1/2。圖 3-20 說明 FCH 和 R-FCH 在訊框中的位置與配置方式。

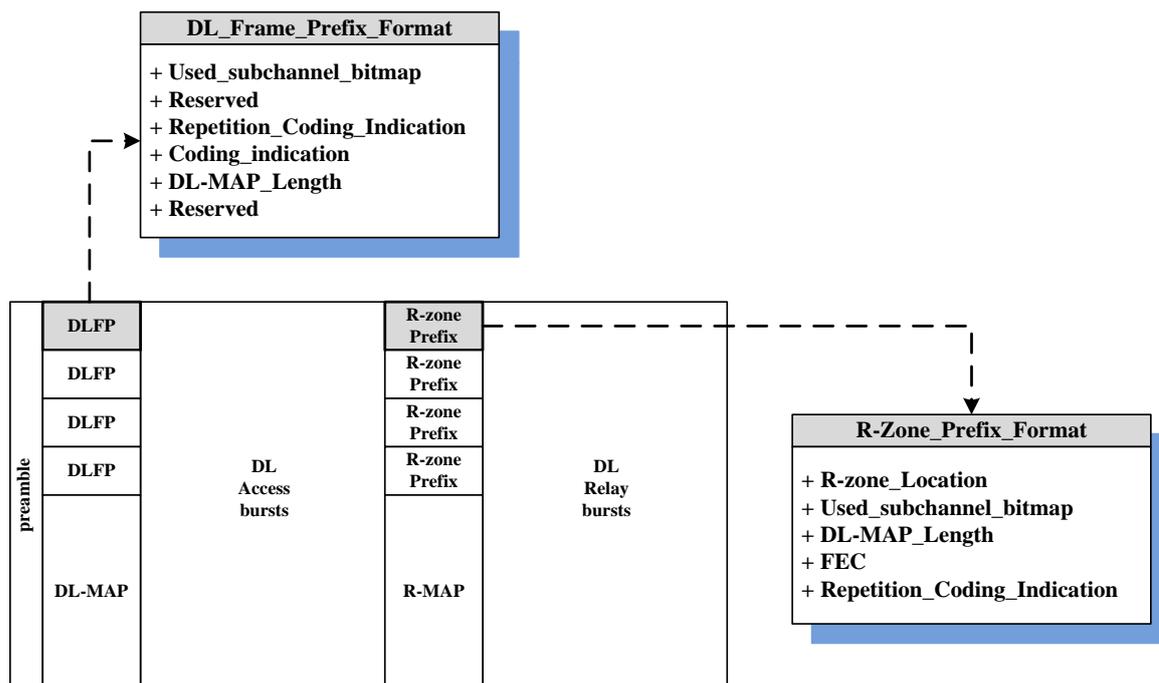


圖 3-20 FCH 與 R-FCH 的配置方式

當基地台排程器在完成下行存取區塊的配置後會產生 DL-MAP，並將 DL-MAP 交由實體層進行 DLFP 的封裝。因此用戶端收到下行存取封包後須先解開 DLFP 以得到 DL-MAP 訊息並往媒體控制層傳送，媒體控制層再根據 DL-MAP 所紀錄的下行存取地帶與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。另一方面，基地台排程器在完成下行轉送區塊的配置後會產生 R-MAP，並將 R-MAP 交由實體層進行 R-zone Prefix 的封裝。因此中繼台收到下行轉送封包後須先解開 R-zone Prefix 以得到 R-MAP 訊息並往媒體控制層傳送，媒體控制層再根據 R-MAP 所紀錄的下行存取地帶與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存取封包至用戶端的傳輸時間，用戶端的處理程序可以分為兩個階段：

- (1) 接收 preamble 和 FCH 以及 DL-MAP 的時間：preamble 佔一個 symbol 而 FCH 和 DL-MAP 則佔一個 DL\_PUSC(兩個 symbol)。
- (2) 接收 DL Access bursts 的時間：這段時間即是 DL Access symbol 數扣掉 3 (preamble + FCH、DL-MAP)。

而基地台在傳送下行轉送封包給中繼台的時間時的處理程序也可分為兩個階段：

- (1) 接收 R-FCH 以及 R-MAP 的時間：FCH 和 DL-MAP 佔兩個 symbol。
- (2) 接收 DL Relay bursts 的時間：這段時間即是 DL Relay symbol 數扣掉一個 DL\_PUSC (兩個 symbol)。

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初始測距、定期測距、換手測距與頻寬測距使用，由於目前僅支援固定式中繼台，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。

此外，在模擬調變技術時，由於無法真實模擬實體層在進行傳送時將數位訊號轉為類比訊號並透過無線介面傳輸到空氣介質上的程序，我們僅模擬不同的調變技術對傳輸速率造成的影響。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。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

基地台 MR-BS 實體層模組依照要傳送的封包類型(下行存取封包和下行轉送封包)分為兩種執程序。在處理下行存取封包的流程如下：首先根據基地台排程器在媒體存取控制層產生的 DL-MAP 進行 DLFP 的封裝，即 FCH，之後對於封包中的 burst 依據其使用調變技術的不同分別進行編碼，最後要送出去給用戶端 MS 時會在訊框的最前面加上前置訊號碼(preamble)；而處理下行轉送封包的流程如下：根據基地台排程器在媒體存取控制層產生的 R-MAP 進行 R-Zone Prefix 的封裝，即 R-FCH，之後再對封包中的每一個 burst 依據其使用調變技術的不同分別進行編碼並傳送給中繼台 NT-RS。由於中控型非穿透式中繼台在每個訊框最前面也會發送前置訊號，而這個前置訊號是由基地台分配，因此基地台會告知中繼台可用的前置訊號碼供其後發送使用。

在頻帶的分配上，原本 NCTUns 上的 IEEE 802.16e 模組實體層是假設同一個拓撲上的所有的基地台都會運作在不同的頻帶(Channel)上，且為了區別各自的頻帶，將以模擬時的節點識別碼(Node ID；NID)作為頻帶識別之用，此部份是我們自行實做的方法，標準中並無定義。但在 IEEE 802.16j 非穿透式網路中，基地台底下可以部屬非穿透式中繼台，而基地台和非穿透式中繼台必須在不同頻帶上發送訊號，否則將會發生嚴重的干擾，兩者涵蓋範圍底下的用戶端將會同時收到來自這兩個基地台的封包造成用戶端解析封

包流程的錯誤。為了解決此問題，在此採用 3-sector 的基地台，也就是將基地台的頻帶分為三個頻段(segment)，分別在基地台的三個區段(sector)中發送，其中每一個頻段都是不同的子載波集合，而中繼台只要使用跟基地台不同的頻段發送即可，如圖 3-21 所示。

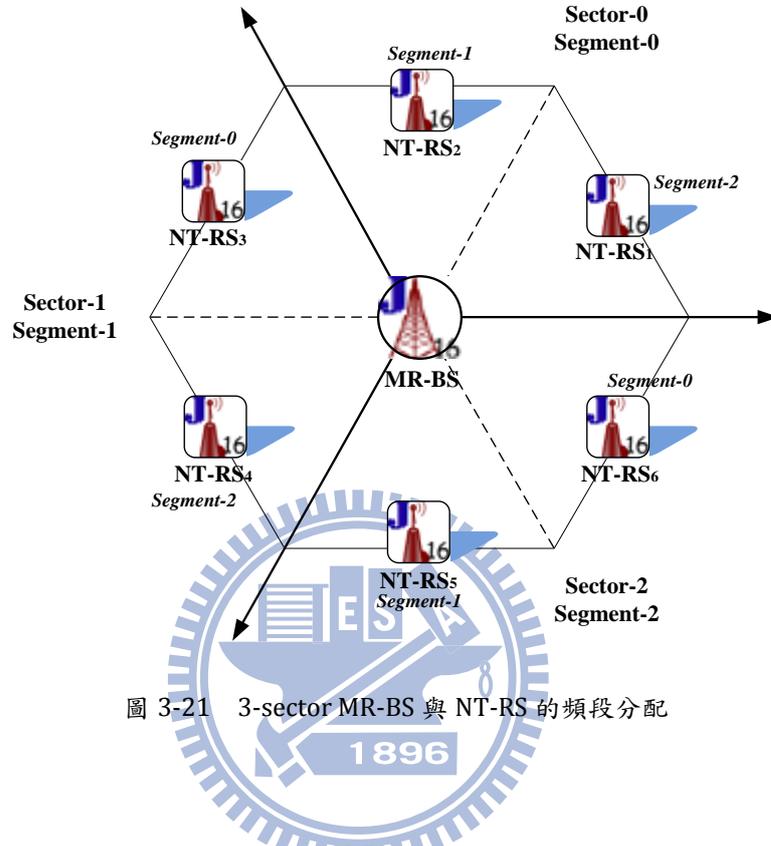


圖 3-21 3-sector MR-BS 與 NT-RS 的頻段分配

### 3.4.2.2. NT-RS 實體層的模組設計與實作

非穿透式中繼台部屬於基地台和用戶端之間，負責轉送基地台和用戶端的資料，因此實體層的工作相當複雜，主要分為傳送和接收兩種處理程序。圖 3-22 顯示了 NT-RS 實體層模組的設計。在傳送資料方面，依照傳送封包的類型不同而有不同的處理方式，若是下行存取封包，會依照在媒體存取控制層產生的 DL-MAP 製作 DLFP，並對其它的下行存取 burst 進行調變與編碼，最後才送給用戶端；反之若是下行轉送封包，則依照 R-MAP 製作 R-Zone Prefix，並對其他下行轉送 burst 進行調變與編碼，最後送給非穿透式中繼台。而在接收資料方面，中繼台可能收到的封包類型有三種：(1) 來自基地台或其他中繼台的下行轉送封包 (DL Relay burst)，(2) 用戶端的上行存取封包 (UL

Access burst)，(3) 其他中繼台的上行轉送封包(UL Relay burst)。當收到下行轉送封包後，須先解開 R-Zone Prefix，接著解開 R-MAP 才能得知整個下行轉送地帶的配置情形，最後將所有下行轉送封包裡的 burst 都解碼後便可往媒體存取控制層送。另一方面，當接收到上行存取封包或上行轉送封包後先進行解碼，依照其中的 uiuc 可以分辨是否為特殊的上行封包，例如 uiuc = 12 代表是 CDMA 碼，uiuc = 14 代表是 RNG-RSP 訊息，其他的則是一般的上行資料。

在圖 3-22 中，NT-RS1 是連接在 MR-BS 底下，NT-RS2 連接在 NT-RS1 底下而 MS 則是連接在 NT-RS1 底下。因此，NT-RS1 會收到來自 MR-BS 的下行轉送封包並由實體層的 recv() 收上來，經由解開 R-Zone Prefix 並對其他 burst 解碼後再往媒體存取控制層送。而在下行傳送方面，NT-RS1 的排程器會產生下行存取封包和下行轉送封包並往下送至實體層，實體層的 send() 會收到來自媒體存取控制層的封包，並依照型態在最前面加上 DLFP 或是 R-Zone Prefix 再送出去，最後，MS 會收到來自 NT-RS1 的下行存取封包而 NT-RS2 會收到來自 NT-RS1 的下行轉送封包。在上行封包的部分，由於 NT-RS2 和 MS 都連接在 NT-RS1 底下，因此 NT-RS1 實體層的 recv() 會分別收到來自 MS 的上行存取封包和來自 NT-RS2 的上行轉送封包，經由封包解碼後再往上送至媒體存取控制層。

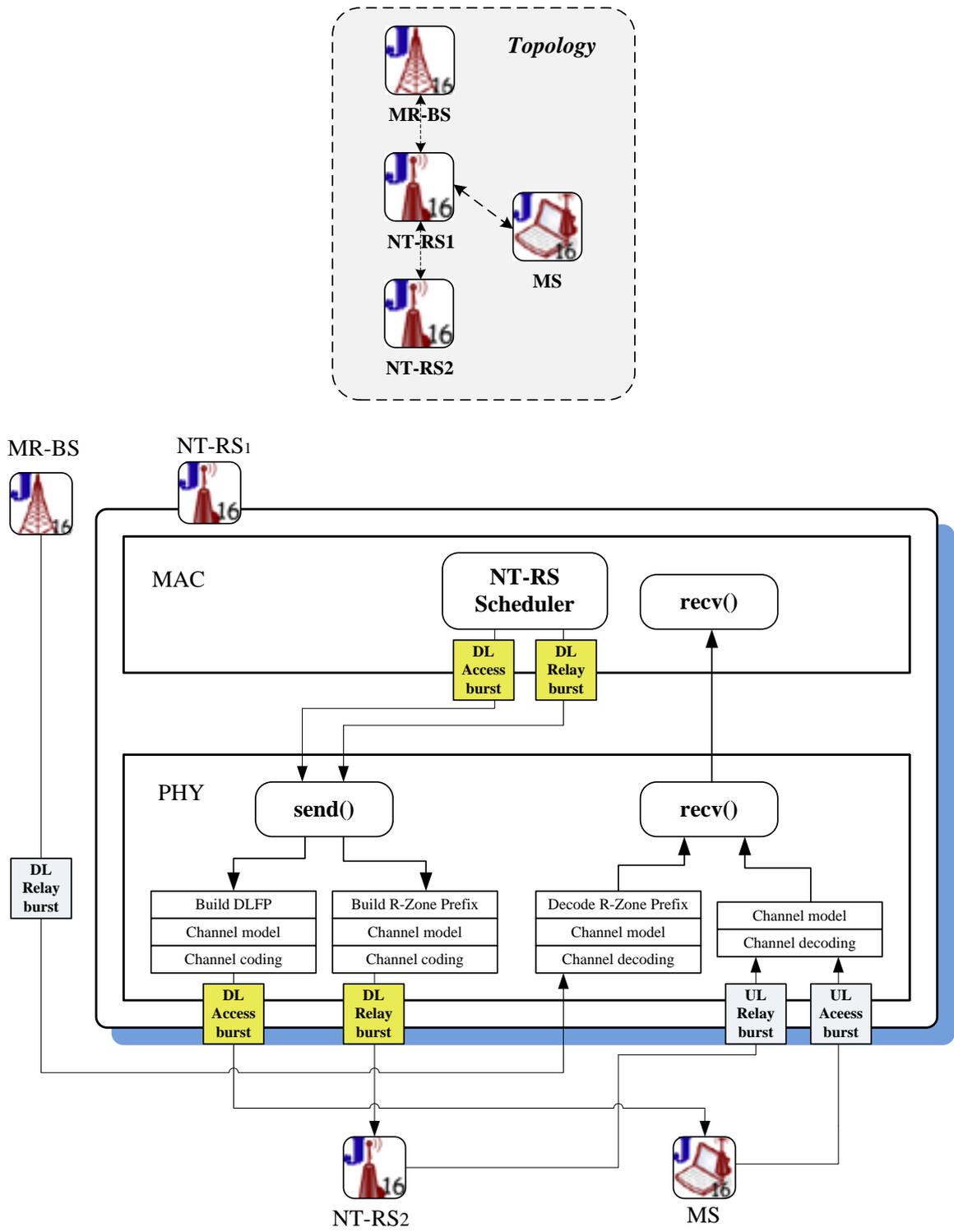


圖 3-22 NT-RS 實體層處理封包流程

### 3.4.2.3. MS 實體層的模組設計與實作

在非穿透式網路中，用戶端所接收的下行資料可能為基地台或非穿透式中繼台所傳送，無論來自何者，封包的最前端都有 DLFP 的結構，用戶端必須先解開 DLFP 才能對 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。由於下行子訊框分成下行存取地帶與下行轉送地帶，但用戶端只能在下行存取地帶接收封包，因為下行轉送封包主要是送給中繼台專用，因此用戶端在下行轉送地帶的狀態應為 Idle。至於用戶端要如何得知下行轉送地帶是否存在則是透過解開 DL-MAP 後檢查裡面 diuc = 13 的 DL-MAP IE 其中的 relay zone indicator 欄位。

為了能讓用戶端在非穿透式網路下順利運作，我們在用戶端實體層新增了掃描各頻段的功能。由於非穿透式網路裡有非穿透式中繼台的存在，這些中繼台在每個訊框結構的前端也都會發送前置訊號，因此用戶端在一開始需要偵測附近基地台的前置訊號，再根據訊號強度來決定要調整到哪個頻段，方後就只會接收選取基地台的封包，而對於其他基地台的封包則都捨棄(Drop)掉，但當用戶端逐漸往基地台服務範圍外移動時，來自原本基地台的訊號將越來越低，此時用戶端會開始掃描附近可用的基地台，並再做一次頻段掃描看要連接到哪個基地台底下。底下將詳細說明用戶端頻段掃描的實作方法。

圖 3-23 顯示了用戶端在一個基地台、兩個中繼台的網路拓樸下，要加入網路前的掃描過程。在此例子中，用戶端可以收到來自基地台 MR-BS、中繼台 NT-RS<sub>1</sub> 和中繼台 NT-RS<sub>2</sub> 的訊號，基地台對用戶端發送封包是使用 segment-0 的頻段，其前置訊號碼為 2；中繼台 NT-RS<sub>1</sub> 使用 segment-1 的頻段，前置訊號碼為 3，而中繼台 NT-RS<sub>2</sub> 則使用 segment-2 的頻段，前置訊號碼為 4。用戶端在進行掃描時會從 segment-0 開始，跳到各自的頻段去接收封包，並記錄各自收到的 SNR 以及前置訊號碼，待 segment-0 到 segment-2 都掃描完後會比較先前紀錄的 SNR，看何者最大，此後將只會收帶有發送此前置訊號碼的封包，其他的封包將會被捨棄。

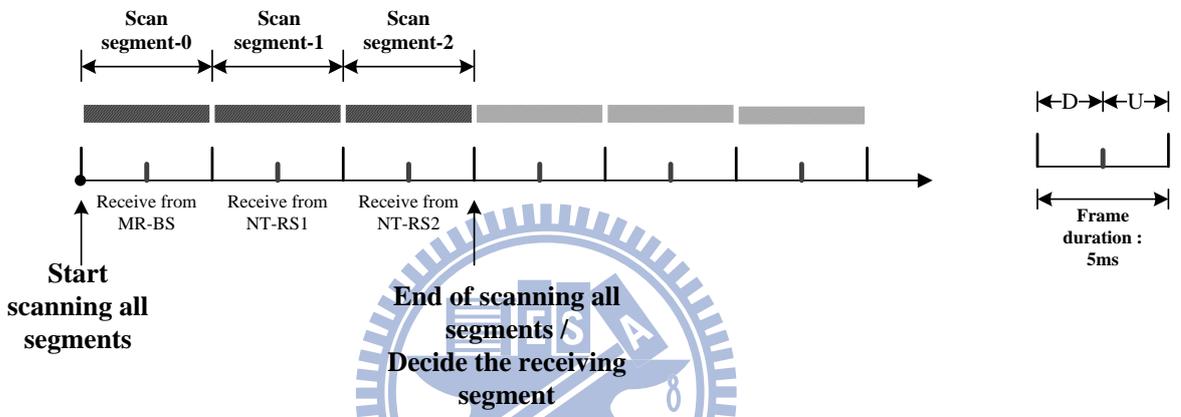
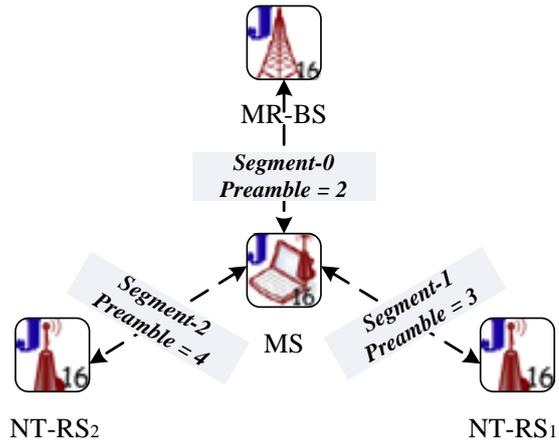


圖 3-23 MS 掃描各頻段流程圖

## 4. 模擬結果驗證

在本章，我們將對於實作在 NCTUns 網路模擬器平台上的 IEEE 802.16j 非穿透式模組進行效能(throughput)與延遲時間的量測與驗證，在效能量測方面，我們使用 greedy UDP 來猛灌流量以達到最高 throughput，此外我們使用 ping 來觀察在多段轉送的情形下，其時間延遲的關係為何。表 4-1 為模擬時所使用的參數。

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)	$\text{floor}(n * BW / 8000) * 8000$	11.2 MHz
CP ratio	1/32, 1/16, 1/8, 1/4	1/8
CP time (Tg)	$CP_{ratio} * T_b$	11.425 us
Symbol time (Ts)	$T_b + T_g$	102.825 us
Frame duration	2, 2.5, 4, 5, 8, 10, 12.5, 20	5 ms
Physical slot (PS)	$4.0 / (F_s / 1000000)$	0.357143 us
TTG		90 PS
RTG		90 PS
R-TTI		90 PS
R-RTI		90 PS

表 4-1 模擬時的系統參數

## 4.1 模擬結果分析與驗證

為確保模擬結果的正確性，對於在實作的非穿透式網路模擬平台上所跑出來的結果都需要加以分析及驗證。因此，底下將就在非穿透式基地台底下的下行最大傳輸效能，以及在多段轉送中的下行傳輸效能和多段轉送造成的時間延遲進行分析與驗證。

### 4.1.1 效能量測參數

以下定義了在進行效能量測時所需用到的參數及公式。

- (1) FEC code: 在 802.16 OFDMA PHY 裡定義了 53 種 FEC code type，每一種 FEC code 都對應到不同的 Modulation and Coding Scheme (MCS)，其中，FEC code type 0 ~ 6 為不同 modulation (BPSK、16 QAM、64 QAM) 搭配 code scheme 為 Convolution Code (CC) 以及不同的 coding rate (1/2、2/3、3/4)。
- (2) B.P.S. : Bytes Per Slot，代表不同 MCS 每個 slot 可表示的資料量。
- (3) Available slots ( $S_f$ ) : 所有下行可用來傳輸資料的 slot 個數，包含下行存取地帶和下行轉送地帶。
- (4) Scheduled slots ( $S_p$ ) : 排程器針對下行存取地帶或下行轉送地帶計算後，可以用來進行資料傳輸的 slot 個數。若使用者沒有透過中繼台轉送， $S_p$  會等於  $S_f$ 。
- (5) Throughput : 每秒傳遞的資料量，單位：Mbit / sec。定義如公式 4-1。由於使用者傳輸資料的排程是以一個訊框為單位，一個訊框是 5 ms，此外，每次排程時都會算出可用的 slot 個數，再乘上每個 slot 可攜帶的 byte 數 (依不同的 MCS 有所不同)，即為每次排程的資料量。

$$\text{Throughput} \left( \frac{\text{Mbit}}{\text{sec}} \right) = \frac{\text{Bytes}_{\text{slot}} \times \text{Slots}_{\text{DL}} \times 8 \times 10^{-6}}{\text{Frame Duration}(\text{ms}) \times 10^{-3}}$$

公式 4-1 傳輸效能定義

- (6) Theoretical throughput ( $T_p$ )：依照規劃的 slot 個數(Scheduled slots； $S_p$ ) 搭配傳輸時使用的調變方式與編碼技術所計算出的理論流量值 (參考公式 4-2)。

$$T_p = \frac{Bytes_{slot} \times S_p \times 8 \times 10^{-6}}{Frame\ Duration(ms) \times 10^{-3}}$$

公式 4-2 傳輸效能( $T_p$ )定義

- (7) Maximum throughput ( $T_f$ )：依照可用的 slot 個數(Available slots； $S_f$ ) 搭配傳輸時使用的調變方式與編碼技術所計算出的理論流量值 (參考公式 4-3)。

$$T_f = \frac{Bytes_{slot} \times S_f \times 8 \times 10^{-6}}{Frame\ Duration(ms) \times 10^{-3}}$$

公式 4-3 傳輸效能( $T_f$ )定義

- (8) Simulation throughput ( $T_s$ )：實際利用真實世界流量(TCP 或 UDP)所測量的結果，此 throughput 單位也是 Mbit / sec，但並非由公式 4-1 算得，而是在接收端的應用層有一支程式去計算每秒所接收的資料量。

- (9) Partial Utilization ( $U_p$ )：實際測量所得的 throughput 與理論上應得的 throughput 之比率 (參考公式 4-4)。

$$U_p = \frac{T_s}{T_p} \times 100\%$$

公式 4-4 傳輸利用率( $U_p$ )定義

- (10) Full Utilization ( $U_f$ )：實際測量所得的 throughput 與最大 throughput 之比率 (參考公式 4-5)。

$$U_f = \frac{T_s}{T_f} \times 100\%$$

公式 4-5 傳輸利用率( $U_f$ )定義

## 4.1.2 UDP 效能測量

在 UDP 的效能量測方面，我們將採 greedy UDP 猛灌的封包的方式由基地台往用戶端方向傳送來達到其下行最大傳輸率，並依照有無透過中繼台轉送資料以及是否使用超級訊框結構分為三個部分進行模擬與驗證：(1) 1-hop 情形，即基地台不透過中繼台直接與用戶端進行傳輸，(2) 2-hop 情形，兩段式轉送，基地台透過一個中繼台進行資料轉送，(3) multi-hop 情形，多段轉送，使用 2-frame 的超級訊框結構與用戶端進行傳輸。底下為各自的量測結果分析。

- 基地台直接與用戶端連結時的下行傳輸效能

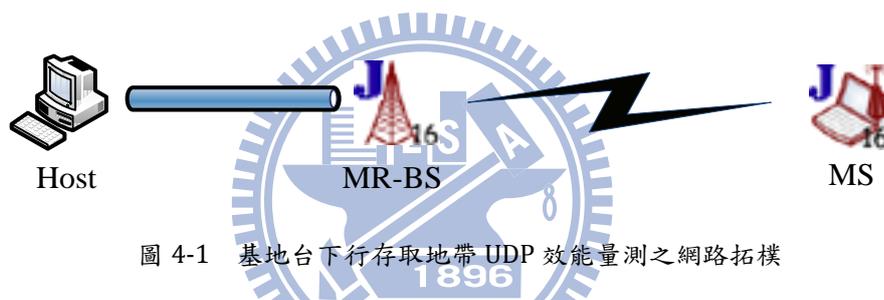


圖 4-1 為基地台與用戶端進行下行存取地帶效能量測的網路拓模，由 Host、MR-BS 與 MS 所組成，其模擬情境如下，基地台 MR-BS 連接後端網路至 Host，為達到最大效能，將此段有線網路頻寬設為 100 MB/sec，Host 往用戶端傳送的資料會經由基地台排程後直接傳至用戶端，而傳送的封包大小為 1400 byte 並使用 greedy UDP 猛灌流量，此外，我們也將針對不同的調變方式與編碼技術來量測其效能的正確性。

量測的結果如表 4-2 所示，此為各種調變方式與編碼技術下，下行最多可傳輸資料的效能理論值與實際進行 UDP 量測所得到的結果。

FEC	MCS	B.P.S.	Sf	Sp	Tf	Tp	Ts	Uf	Up
0	QPSK 1/2	6	503	503	4.8288	4.8288	4.6967	97.26%	97.26%
1	QPSK 3/4	9	500	500	7.2000	7.2000	6.9979	97.19%	97.19%
2	16QAM 1/2	12	500	500	9.6000	9.6000	9.3332	97.22%	97.22%
3	16QAM 3/4	18	500	500	14.4000	14.4000	13.9939	97.16%	97.16%
4	64QAM 1/2	18	500	500	14.4000	14.4000	13.9939	97.16%	97.16%
5	64QAM 2/3	24	500	500	19.2000	19.2000	18.6684	97.21%	97.21%
6	64QAM 3/4	27	500	500	21.6000	21.6000	21.0003	97.22%	97.22%

表 4-2 MR-BS 與 MS (1-hop) 在不同 FEC 下的傳輸效能量測

在此網路拓撲下，雖然沒有中繼台的存在，但下行子訊框仍分為下行存取地帶和下行轉送地帶，這是因為我們實作的非穿透式網路中，並不能在模擬過程中動態加入中繼台，因此一開始都假設至少有一個非穿透式中繼台存在，所以上行轉送地帶會至少分配一個 slot (佔三個 symbol) 給非穿透式中繼台作為競爭區間使用。而下行的部分也是為了讓中繼台能收到 R-MAP 等資訊，必須配置下行轉送地帶，最後，剩下的資源 (symbol 個數) 都將留給下行存取地帶使用，其中，扣除掉前置訊號(1 symbol) 和 DL-MAP (2 symbol) 佔的部分，才是基地台用來傳送用戶端資料的區域，其配置情形如圖 4-2 所示。

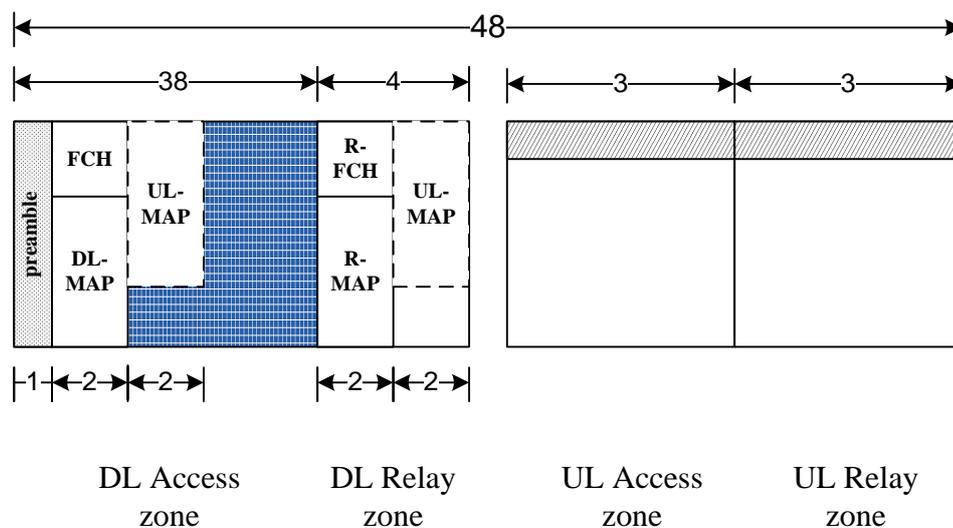


圖 4-2 用戶端下行存取地帶最大配置情形

圖 4-2 顯示了下行存取地帶的最大配置情形，即在只有基地台和用戶端的網路拓樸下，可以用來傳送給用戶端的訊框配置情形。一個訊框總共可用的 symbol 個數為 48 個，上行存取地帶和上行轉送地帶至少會分配一個 slot 給用戶端和中繼台當作競爭區間使用，因此下行子訊框最多可用 symbol 個數為  $48 - 6 = 42$  個。而在下行子訊框中，又分為下行存取地帶和下行轉送地帶，其中下行轉送地帶的 R-MAP 佔一個 DL\_PUSC 即兩個 symbol 而 DL-MAP 在我們的實作中佔 10 個 slots，經換算，也是兩個 symbol。最後，下行存取地帶剩下  $42 - 4 = 38$  個可用 symbol 個數，再扣掉 preamble 佔一個 symbol，DL-MAP 佔一個 DL\_PUSC 即兩個 symbol，剩下可以用來配置用戶端資料的 symbol 個數為  $38 - 3 = 35$  個，換算成 slot 就是 510 個。而在目前的設計中，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 共會佔用 7 個 slots，但在目前設計下，slot 配置是以 10 個子通道為單位進行配置，因此 UL-MAP 實際上會佔用掉 10 個 slots 的下行存取地帶資源，所以若使用不為 QPSK 1/2 的調變編碼方式進行資料傳送，最後會只剩下 500 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 503 個 slots 傳輸下行存取地帶資料。

由表 4-2 可知  $U_p$  和  $U_f$  並沒有達到 100%，這是因為從應用層送出的資料經過各層網路協定都會再加上標頭，例如我們在應用層產生的 UDP 封包會經過網路層(IP)、傳輸層(TCP)、媒體存取控制層(MAC)等，這些都會造成額外的負擔。在 NCTUns 網路模擬器裡 ipheader 佔 20 bytes，udpheader 佔 8 bytes，而 IEEE 802.16 定義的 MAC header 都為 6 byte，此外可能還有額外的 MAC subheader 佔 1 byte，而 payload 則是我們在應用層設定的 UDP 封包大小 1400 bytes，此外基地台和用戶端之間會傳送一些管理訊息，例如定期測距訊息和換手訊息，這些訊息也會造成負擔。最後，圖 4-3 總結了此模擬實驗的數據結果。

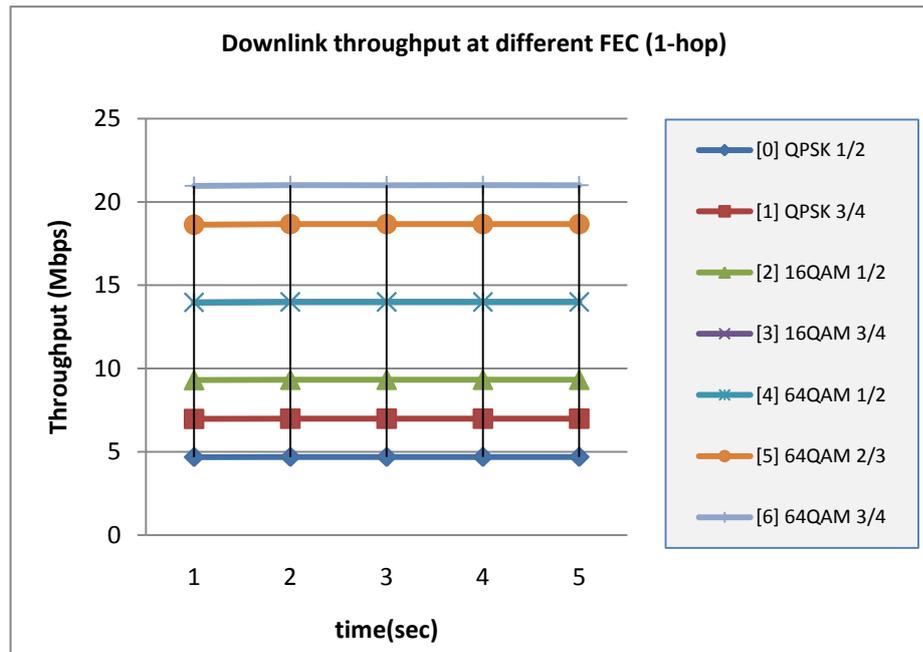


圖 4-3 不同 FEC 下的 UDP 效能

- 基地台透過中繼台與用戶端連接時的下行傳輸效能

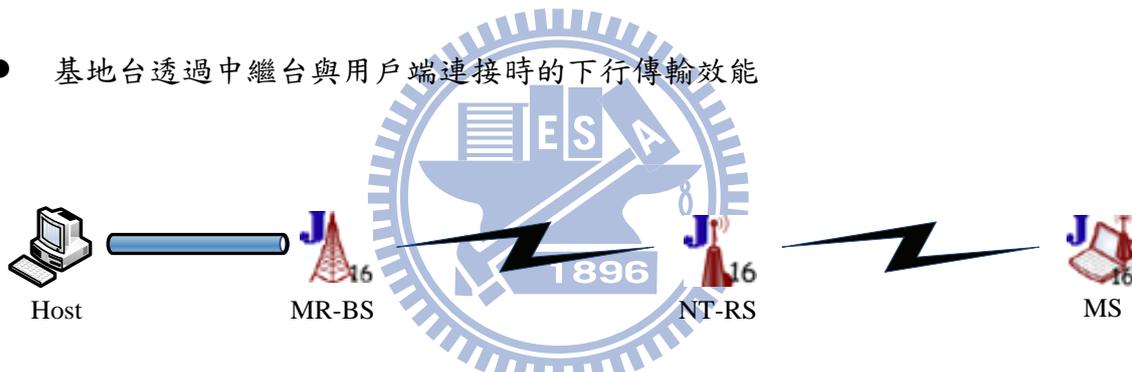


圖 4-4 基地台下行轉送地帶 UDP 效能測量之網路拓樸

圖 4-4 為基地台進行下行轉送地帶效能量測的網路拓樸，由 Host、MR-BS、NT-RS 與 MS 所組成，其模擬情境如下，基地台 MR-BS 連接後端網路至 Host，為達到最大效能，將此段有線網路頻寬設為 100 MB/sec，Host 往用戶端傳送的資料會先經由基地台排程後傳送至中繼台 NT-RS，隨後中繼台將會在下一個訊框時將基地台傳送過來的資料轉送給用戶端。傳送的封包大小一樣為 1400 byte 並使用 greedy UDP 猛灌流量，此外，我們也將針對不同的調變方式與編碼技術來量測其效能的正確性。表 4-3 顯示了在此拓樸下進行 UDP 測試流量的結果。

FEC	MCS	B.P.S.	Sf	Sp	Tf	Tp	Ts	Uf	Up
0	QPSK 1/2	6	503	223	4.8288	2.1408	2.0785	43.04%	95.74%
1	QPSK 3/4	9	500	220	7.2000	3.1680	3.0468	42.31%	96.17%
2	16QAM 1/2	12	500	220	9.6000	4.2240	4.0790	42.49%	96.56%
3	16QAM 3/4	18	500	220	14.4000	6.3360	6.1279	42.55%	96.71%
4	64QAM 1/2	18	500	220	14.4000	6.3360	6.1279	42.55%	96.71%
5	64QAM 2/3	24	500	220	19.2000	8.4480	8.1769	42.59%	96.79%
6	64QAM 3/4	27	500	220	21.6000	9.5040	9.2205	42.69%	97.01%

表 4-3 MS 與 NT-RS 間在不同調變方式與編碼技術下的傳輸效能

在此網路拓樸下，基地台到用戶端的資料必須經過中繼台轉送，也就是基地台要透過下行轉送地帶先把資料傳給中繼台，中繼台在下一個訊框才往用戶端送，因此，下行資料的頻寬會受限在下行轉送地帶的大小，圖 4-5 顯示了下行轉送地帶最大配置情形。

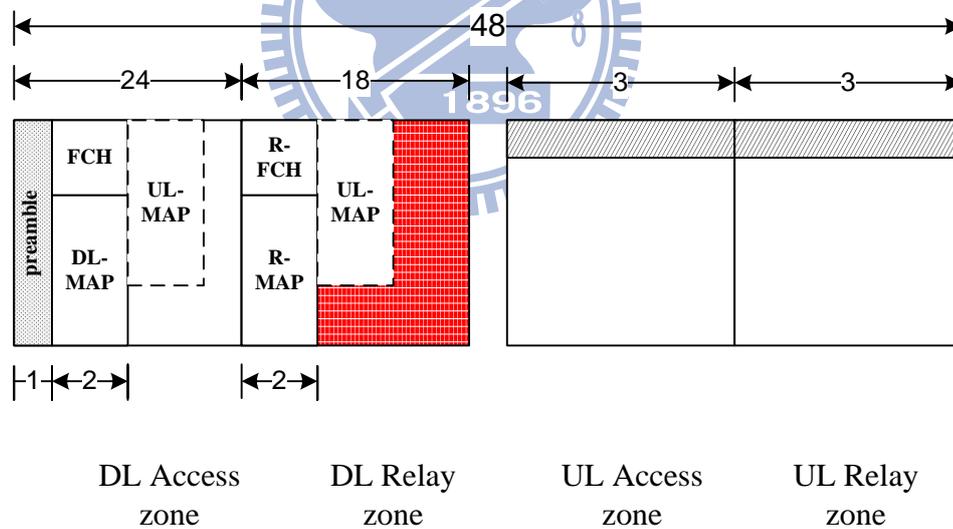


圖 4-5 下行轉送地帶最大配置情形

在我們的實作中，下行轉送地帶不能超過下行子訊框可用來配置資源的一半，即下行子訊框扣除 preamble、DL-MAP 剩下的一半可以規畫給下行轉送地帶使用，因此下行轉送地帶可用的 symbol 數為  $(42 - 3) / 2 = 19$  個，扣掉 R-MAP 佔一個 DL\_PUSC 即兩個

symbol，實際可用為 17 個 symbol，經換算，下行轉送地帶中可用來放置要傳送給用戶端的空間共有 230 個 slots，而 UL-MAP 如同先前說明應該佔 7 slots，但為求實作方便，實際上分配 10 slots，因此若是使用 QPSK 調變，將可多 3 slots 用來傳輸資料。而其它的調變方式就只有 230 個 slots 可用。

由表 4-3 可知  $U_p$  沒有達到 100%，這是因為在基地台和中繼台之間會傳輸一些提供中繼台排程的資訊，這些資訊大小依照基地台到中繼台所使用的調變之不同也會造成不同程度的負擔，因此下行轉送地帶的傳輸率無法完全達到理想的效果。此外  $U_f$  依照我們的定義(佔用整個下行地帶的 1/2) 也沒有達到 50%，這則是因為下行轉送地帶的 R-FCH、R-MAP 和 UL-MAP 並不能用來夾帶傳輸的資料，因此這些訊息所佔用的 slot 就造成了浪費。

- 超級訊框排程下的 UDP 效能量測

首先我們先驗證超級訊框排程法的正確性，因此延續上個部分的模擬情境，並在兩段式轉送的網路拓樸下，利用 2-frame 的超級訊框排程進行 UDP 的效能量測。表 4-4 為測量的結果。在 theoretical throughput 的部分，由於 2-frame 的排程是使用兩個訊框為單位，因此 frame duration 由 5ms 變為 10ms，也就是說，理論的量測值應為原本的一半，而在實際的 UDP 測量結果方面也的確是非常接近，即  $U_p$  仍維持在 97% 左右，如同前面說明這是由於 IP header 和 udp header 以及 mac header 所造成的負擔，另外  $U_f$  的部分，原本預期應該是 25% 但因為下行轉送地帶一些 MAP 所造成的負擔使得實際測得的傳輸利用率只有 21% 左右。因此，我們可以藉此驗證實作超級訊框排程法的正確性，進而研究更複雜的多段式網路拓樸，

FEC	MCS	B.P.S.	Sf	Sp	Tf	Tp	Ts	Uf	Up
0	QPSK 1/2	6	503	223	4.8288	1.0704	1.0358	21.45%	96.76%
1	QPSK 3/4	9	500	220	7.2000	1.5840	1.5220	21.14%	96.08%
2	16QAM 1/2	12	500	220	9.6000	2.1120	2.0322	21.17%	96.22%
3	16QAM 3/4	18	500	220	14.4000	3.1680	3.0526	21.20%	96.35%
4	64QAM 1/2	18	500	220	14.4000	3.1680	3.0526	21.20%	96.35%
5	64QAM 2/3	24	500	220	19.2000	4.2240	4.0737	21.22%	96.44%
6	64QAM 3/4	27	500	220	21.6000	4.7520	4.6314	21.44%	97.40%

表 4-4 超級訊框排程下搭配不同調變方式與編碼技術的傳輸效能

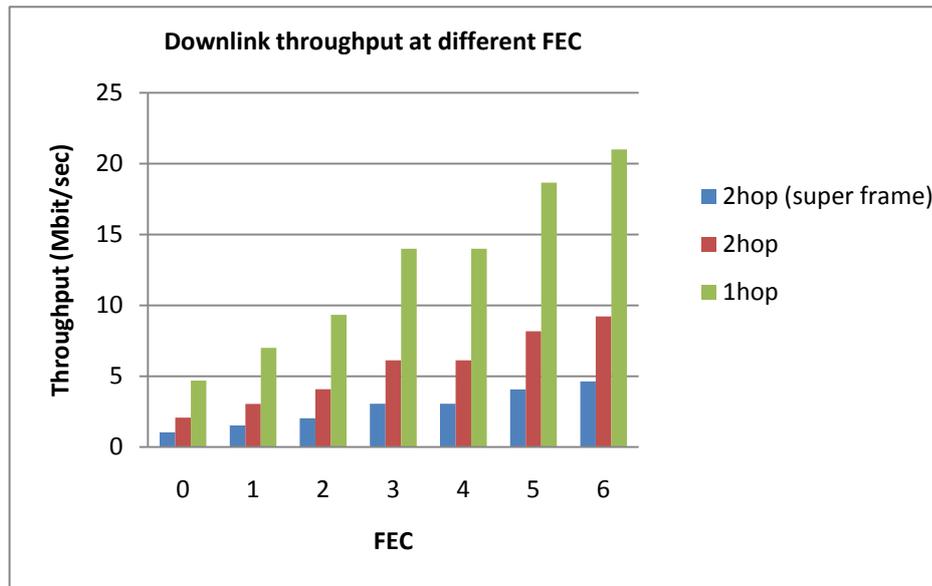


圖 4-6 下行最大傳輸率量測

圖 4-6 總結了前面三種基本模擬情境的下行傳輸率之量測情形，由圖可知，在兩段式轉送網路中，使用各種調變方法與編碼技術所量測的下行傳輸量約為原本的一半，原因是限制於轉送地帶的大小，在我們的設計中，下行轉送地帶不能超過原本下行子訊框的一半，所以下行傳輸率看起來會是原本沒有透過中繼轉送時傳輸率的一半；而當使用 2-frame 的超級訊框架構時，整體的傳輸率會再降一半，原因是因為 2-frame 的超級訊框

其 frame duration 是原本的兩倍，而且只有其中一個子 frame 是用來傳輸。

以下我們將更進一步的探討 hop 數增加時對下行傳輸量的影響，由表 4-5 可知，當 hop 數增加時，其下行的 utilization 會降低，這是由於浪費在基地台與中繼台之間溝通的訊息，例如 RS\_Access-MAP、RS\_Relay-MAP 這種專門為中繼台傳輸的訊息，目的幫助其了解下行存取地帶和下行轉送地帶該如何配置，因此轉送的節點越多即 hop 數越多，這些訊息所造成的負擔會越明顯。

FEC	MCS	Tf	Tp	Ts (2hop)	Ts (3hop)	Ts (4hop)	Ts (5hop)	Ts (6hop)
0	QPSK 1/2	4.8288	1.0704	1.0358	0.9836	0.9785	0.9677	0.8904
1	QPSK 3/4	7.2000	1.5840	1.5220	1.4424	1.4385	1.4318	1.3521
2	16QAM 1/2	9.6000	2.1120	2.0322	1.9236	1.9169	1.9069	1.8036
3	16QAM 3/4	14.4000	3.1680	3.0526	2.8924	2.8809	2.8657	2.7117
4	64QAM 1/2	14.4000	3.1680	3.0526	2.8924	2.8809	2.8657	2.7117
5	64QAM 2/3	19.2000	4.2240	4.0737	3.8592	3.8450	3.8251	3.6229
6	64QAM 3/4	21.6000	4.7520	4.6314	4.4864	4.4188	4.3351	4.2362

表 4-5 不同 hop 數情形下針對不同調變方式的下行資料傳輸量

此外，若我們從 frame utilization 的角度來看，根據實驗結果，如表 4-6 所示，當 hop 數大於 5 時，即基地台與用戶端之間需透過超過五個中繼台轉送時，其下行訊框的使用率將低於 90%，這意味著基地台與中繼台之間傳送的管理訊息所造成的負擔將大於 10%，因而造成在轉送過程中不必要的頻寬浪費。表 4-7 則展示了在超級訊框的結構下，多段轉送的 hop 數依序增加對於其資料傳輸使用率的影響，可以看到大約都維持在 20% 左右，當然 hop 數越多， $U_f$  就越低，這是因為中繼台間轉送的負擔越來越多的因素，但無論如何都比原本 2-hop 的訊框結構效能差很多，也就是說，若要支援 2 hop 以上的轉送，將要犧牲一半的傳輸效能，這是非常划不來的，由其在多個使用者情形下更是不利。

FEC	MCS	Tf	Tp	Up (2hop)	Up (3hop)	Up (4hop)	Up (5hop)	Up (6hop)
0	QPSK 1/2	4.8288	1.0704	96.76%	91.89%	91.41%	90.40%	85.56%
1	QPSK 3/4	7.2000	1.5840	96.08%	91.06%	90.81%	90.39%	85.56%
2	16QAM 1/2	9.6000	2.1120	96.22%	91.08%	90.76%	90.28%	85.44%
3	16QAM 3/4	14.4000	3.1680	96.35%	91.30%	90.93%	90.45%	85.59%
4	64QAM 1/2	14.4000	3.1680	96.35%	91.30%	90.93%	90.45%	85.59%
5	64QAM 2/3	19.2000	4.2240	96.44%	91.36%	91.02%	90.55%	85.77%
6	64QAM 3/4	21.6000	4.7520	97.40%	94.41%	92.98%	91.22%	89.14%

表 4-6 不同 hop 數情形下針對不同調變方式的下行訊框使用率(Up)

FEC	MCS	Tf	Tp	Uf (2hop)	Uf (3hop)	Uf (4hop)	Uf (5hop)	Uf (6hop)
0	QPSK 1/2	4.8288	1.0704	21.45%	20.37%	20.26%	20.04%	18.44%
1	QPSK 3/4	7.2000	1.5840	21.14%	20.03%	19.98%	19.89%	18.78%
2	16QAM 1/2	9.6000	2.1120	21.17%	20.03%	19.97%	19.86%	18.79%
3	16QAM 3/4	14.4000	3.1680	21.20%	20.08%	20.00%	19.90%	18.83%
4	64QAM 1/2	14.4000	3.1680	21.20%	20.08%	20.00%	19.90%	18.83%
5	64QAM 2/3	19.2000	4.2240	21.22%	20.10%	20.02%	19.92%	18.87%
6	64QAM 3/4	21.6000	4.7520	21.44%	20.77%	20.46%	20.07%	19.61%

表 4-7 不同 hop 數情形下針對不同調變方式的下行訊框使用率(Uf)

### 4.1.3 時間延遲量測

在做效能分析與驗證時，除了傳輸速率的快慢是我們所關心的，另一個重點就是傳輸時間的延遲，尤其在多段轉送時，其時間延遲勢必會增加，但增加的幅度為何？以及增加趨勢是否呈現線性關係亦或是指數成長，這些都將在此做深入的探討。

資料傳遞的過程中，有可能經過某些地方先暫存起來，等待下一個傳送時機到了才

送出，也就是說，時間的延遲跟排程有關，而排程是依照訊框結構下去排的，由於 2 hop 以下以及大於 2 hop 時所使用的訊框結構並不相同，2 hop 以下，即使用者直接與基地台傳輸或是透過一個中繼台傳輸，所使用的是一般的訊框結構，當超過 2 hop 時則需使用超級訊框結構，因此我們將這兩種訊框結構來做時間的量測，量測的工具為 ping。結果分別如圖 4-7 (2-hop) 與圖 4-8 (multi-hop) 所示。

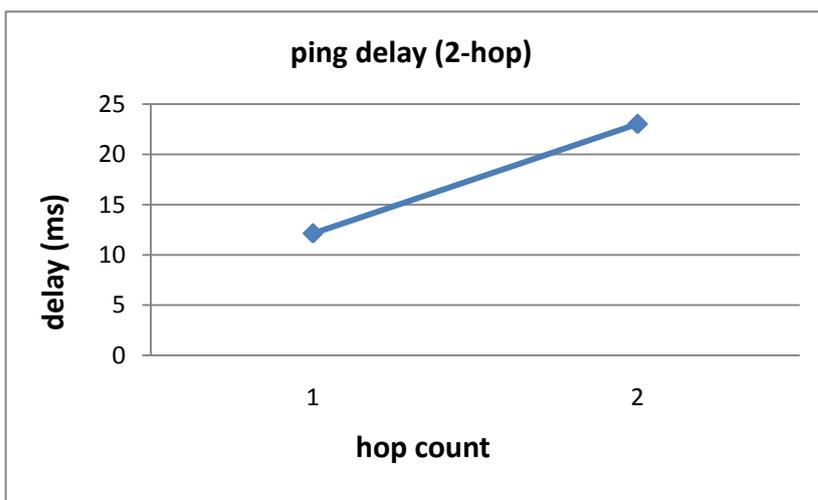


圖 4-7 在 2-hop 下的 ping delay

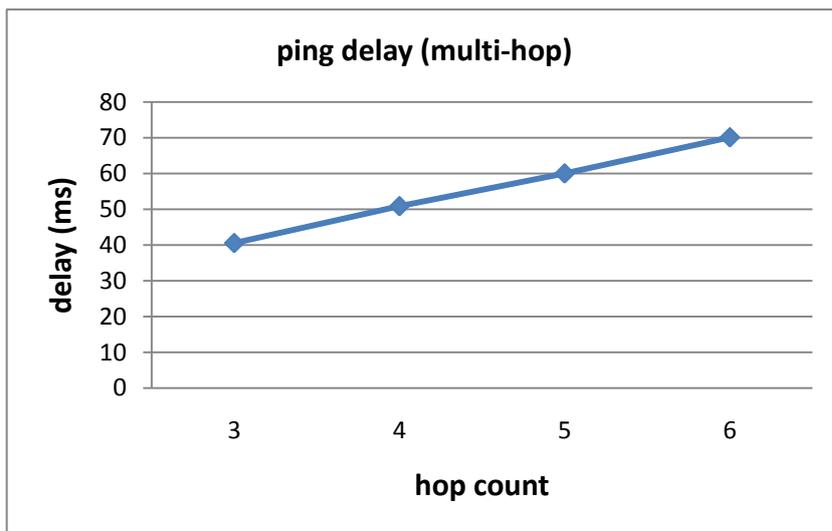


圖 4-8 在 multi-hop 下的 ping delay

由圖 4-7 可知，在 1-hop，即使用者與基地台直接傳輸的情形下其時間延遲(ping delay)大約為 12 ms，由於訊框的 duration 是 5 ms，因此排程的周期是每 5 ms 一次，理論上若不經中繼站轉送，ICMP-REPLY 應該會跟 ICMP-REQUEST 在同一個訊框時間內送回來，也就是說，ping delay 應該是 5 ms 左右，但實際觀察的 12 ms 似乎是多 delay 了一個訊框時間，這是跟我們的排程機制有關，如圖 4-9 所示，假設由 Host 去 ping 使用者 MS，中間經過基地台 MR-BS，Host 會發出 ICMP-REQUEST，若從 Host 到 MR-BS 的時間趕不上排程的時間，就必須等到排程時間才可送出，因此會有一點點(小於一個訊框時間)的延遲，接著 MR-BS 轉送這個 ICMP-REQUEST 到 MS，理論上 MS 應於同一個訊框時間內回送 ICMP-REPLY，但因我們排程是由上行地帶開始檢查，因此下行收的資料會在下一個訊框時間處理，也就是為什麼會多一個訊框時間的延遲。

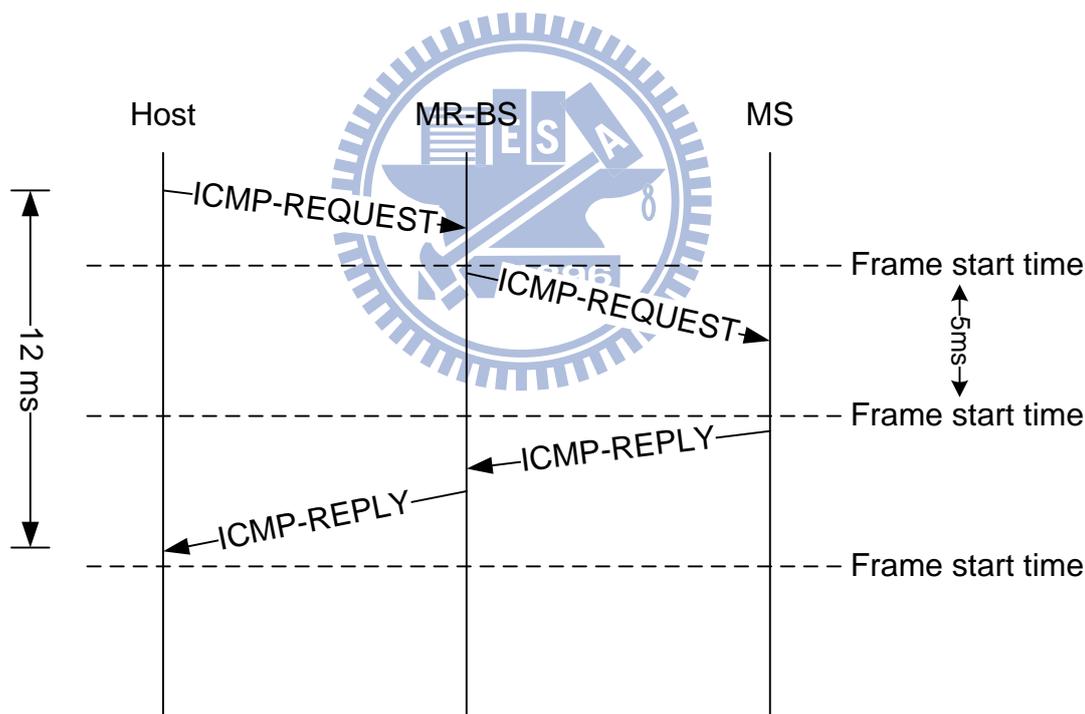


圖 4-9 1-hop 情形下 ICMP 封包時序圖

若是 2-hop 的情形，中間會多經過一個中繼站，因此在轉送 ICMP-REQUEST 和 ICMP-REPLY 時會各多一個訊框的延遲時間，也就是 10 ms，因此 2-hop 的 ping delay 大約在 22 ms 左右。此外，圖 4-8 則顯示了 multi-hop 的 ping delay 情形，一開始 3-hop

的 ping delay 大約是 40 ms，和原本 2-hop 的 22 ms 差了約 20 ms，這是因為超級訊框結構的關係，封包的傳送時間變成兩倍，即每 10 ms 才排程一次，因此會 delay 兩倍的時間，原本 delay 一個訊框時間是 5 ms 現在是 10 ms。3-hop 以後也是一樣，每多一個中繼站就多 delay 10 ms，呈線性成長。

由上述實驗的分析及驗證，我們可以知道在 802.16j 非穿透式網路下，封包傳輸的時間延遲與轉送的中繼站數目成正比，但傳輸效能並不會因轉送的中繼站數目變多而有明顯的下降，反而是因為超級訊框結構造成單位時間排程的資料量減半，因為一半要用來中繼，因此原本一般的訊框結構不但可以達到延伸基地台涵蓋範圍的目的也不會有太大的傳輸延遲，更可以維持一定的傳輸效能，至少可以擁有原本的 50% 而不至於在多段轉送時只有 25% 不到的傳輸利用率。



## 5.未來展望

目前為止，我們已經在 NCTUns 網路模擬器上實作 IEEE 802.16j 非穿透式網路模組，並於前述的章節中進行詳細的說明，最後也透過各種模擬情境來驗證其正確性。現在實作的版本主要是依照 IEEE 802.16j 標準中所規範之最基本的功能進行開發與設計，然而，IEEE 802.16j 標準中為了支援更多元的服務與應用，定義了許多進階的功能以適應不同的系統參數與環境，其中有很多選擇性的選項，在這次的實作裡並未完全納入，以下將分別列出一些目前尚未實作，可以在未來加強的部分。

- 支援移動式中繼台

目前我們僅支援固定式的非穿透式中繼台模組以供在基地台範圍外的用戶端或中繼台可以透過這些固定式非穿透式中繼台進行連線，取得基地台的服務。在 IEEE 802.16j 標準中有另外針對中繼台的換手機制進行規範，由於用戶端可能會透過中繼台進行存取，當中繼台在基地台與中繼台間換手或中繼台與中繼台間換手的過程中，底下的用戶端將如何維持正常的連線，都是可以研究的議題。

- 支援中繼台群組(Grouping)功能

在規格中有定義中繼台群組的功能，主要可以節省眾多中繼台間頻繁溝通所造成的負擔，並且使基地台在管理中繼台以及其下的用戶端時更為方便，此外，中繼台群組對於頻帶的使用也更為節省，在同一群組中可以使用相同頻帶，因此基地台在規劃中繼台頻帶的分配時將更有彈性。

- 支援群撥 (multicast)功能

群撥有點類似廣播，可以同時將資料送給許多用戶，但不同的是它多了選擇性，因此可以指定要送給服務範圍內的哪些用戶而不像廣播則是全部都會收到，另外，他也不

用像單一傳播模式，必需與每一個用戶端建立獨立的連線，因此可以減少基地台與用戶端甚至這也可以應用在上述的中繼台群組功能，以節省基地台與中繼台、中繼台與用戶端的連線建立。此外，在標準中，也有為群撥規範特定的連線識別碼以供辨別。

- 用戶端服務品質保證與頻寬請求機制

IEEE 802.16 針對用戶的服務品質保證定義了五種機制，分別為 UGS、rtPS、ertPS、nrtPS 以及 BE，基地台需要依照用戶端使用的服務其流量特性，選擇適當的服務機制，以提供基地台排程時，頻寬分配的依據。此外，在這些服務中除了 UGS 是基地台定期分配固定的上行頻寬供用戶端使用，其他都必須透過頻寬請求機制向基地台要求上行頻寬，基地台依照目前資源分配情形來決定是否可以提供用戶端的請求，但目前在我們的排程器中的上行訊框規畫時，無法先得知用戶端需要多少頻寬，因此才透過類似 UGS 的方式，用戶端須先設定一個預設的上行頻寬大小，屆時基地台便可依此資訊搭配用戶端使用的調變與編碼方式進行上行資源的分配，然而若支援頻寬請求機制，便可動態依照目前使用者需要多少頻寬而全部有多少資源可用來做資源的分配。

- 支援軟式換手機制

目前在模擬器中實作的換手機制是硬式換手，即當用戶端在移動過程中接收自原本基地台的訊號減弱時，便會開始對鄰近基地台進行頻道的掃描，偵測其訊號品質，以供方後換手時的決策參考。硬式換手的缺點是在建立新的連線時需與原本服務的基地台中斷連線，再與目標基地台進行連線，如此會造成短暫的訊號中斷而導致資料的遺失，因此若能在非穿透式網路模組中實作軟式換手的功能，將會對用戶端通訊品質有更好的提升，避免因為換手造成的斷線損失。

## 6. 結論

在先前的章節裡，我們依序介紹了 IEEE 802.16j 這套標準以及其中媒體存取控制層與實體層的規範，包含用戶端與新增的中繼台之入網程序、測距流程、基地台連線管理機制、用戶端換手程序、基地台如何對實體層的訊框結構進行資源配置、實體層的調變與編碼/解碼機制等等，其中也提到在標準中定義的非穿透式訊框結構為何不能直接應用在多段轉送網路中。接著，我們根據這些標準的規範在 NCTUns 網路模擬器上開發 IEEE 802.16j 非穿透式網路模擬平台，目的是提供一個真實的模擬環境且方便使用者在上面進行不同情境的測試。為了支援標準中提到的這些功能，我們將在模擬器上加入自行開發的非穿透式網路模組，包含新增的三種類型節點(基地台 MR-BS、非穿透式中繼台 NT-RS、用戶端 MS) 以及其中媒體存取層和實體層的設計與實作在第三章都有詳盡的說明，此外我們也克服了標準中實體層所定義的非穿透式訊框結構之先天限制，改造成超級訊框的方式，才能在多轉轉送網路的架構中運行。最後，我們在實作出來的模擬平台上利用真實世界的 TCP/UDP 流量搭配模擬不同的調變與編碼技術進行資料傳輸效能測試，並與理論估算進行驗證，以證實模擬的正確性。

總結以上所論，我們提供了一個適用於 IEEE 802.16j 非穿透式網路之真實且可靠的模擬環境，使用者在此平台上可以任意的佈署網路拓樸，例如基地台、中繼台與用戶端的佈建位置、基地台到用戶端之間的中繼台個數之變化，並且可以進行 TCP/UDP 的效能量測，甚至也可搭配許多實體層的通道模型進行測試。由於目前為止，WiMAX 設備的佈建仍在全世界如火如荼的進行中，並以移動式 WiMAX 為主，而 IEEE 802.16j 正是針對移動式 WiMAX，為提升其效能以及擴展基地台涵蓋範圍減少佈建成本所訂定的延伸標準，雖然尚未有相關設備產出，研究者藉由此模擬平台可以輕易的在上面實現其想法，以做出更多更深入的研究。

## 7. 參考文獻

- [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 Std 802.16j-2009*, “**Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems, Multi-hop Relay Specification**”, June 2009
- [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] *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.
- [14] The Light WiMAX Simulator available at <http://sites.google.com/site/lwxns2/>
- [15] The OPNET modeler. available at <http://www.opnet.com/>
- [16] The QualNet software. available at <http://www.scalable-networks.com/> .

