

# IEEE 802.16e 及時通訊頻道品質感知的最大傳輸單元調整機制

## Channel-Quality-Aware Maximum Transmission Unit Adjustment for Real-time Communication in IEEE 802.16e System

研究生：楊佳祥

Student : Chia-Hsiang Yang

指導教授：曾建超

Advisor : Chien-Chao Tseng

國立交通大學  
電機資訊學院 資訊學程  
碩士論文



Submitted to Degree Program of Electrical Engineering and Computer Science ,

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

For the Degree of

Master of Science

in

Computer Science

December 2006

Hsinchu , Taiwan , Republic of China

中華民國九十五年十二月

# IEEE 802.16e 及時通訊頻道品質感知的傳輸單元調整機制

學生：楊佳祥

指導教授：曾建超 教授

國立交通大學電機資訊學系（研究所）碩士班

## 摘 要

隨著科技越來越普及，人們對於網路的依賴也越來越深，從早期的窄頻撥接，到現在的 xDSL 寬頻上網、光纖上網等，頻寬的成長似乎是無止境的，只因為人們總是有新的應用，把提升的頻寬作有效的應用。

無線網路技術的進步，讓網路的使用更方便。無線網路技術較為人知的有紅外線、藍芽和 IEEE 802.11 無線區域網路等。而近期的 IEEE 802.16，很多國際大公司像北電，英特爾等，更把它視為網路電信產品的明日之星。

和有線網路比起來，無線網路的環境較不穩定，也因此，無線網路實際的頻寬使用率相較於有線網路低，在開發高頻寬技術的同時，有效的利用現有的頻寬也是一項選擇。

本篇論文針對 IEEE 802.16e 系統提出了一套即時動態頻道相依的流量分析方法，並利用分析結果，提出一套可以根據不同 Bit Error Rate (BER)，動態改變 Protocol Data Unit (PDU) 的 Maximum Transmission Unit (MTU) 機制，以減少資料拋棄，並增加有效頻寬使用率。

如上面所述，藉由修改 MTU，可提高有效頻寬使用率，但修改 MTU 會衍生出另一個問題，那就是當 MTU 變小時，可能會增加資料傳輸的 Overhead (如 MAC header、Cyclic Redundancy Check 等) 的數量，進而可能會造成部分資料延遲傳送。因此，本論文亦提出一個 Lazy MTU 調整的方法，以避免因為修改 MTU 而產生的資料傳送延遲。



# Channel-Quality-Aware Maximum Transmission Unit Adjustment for Real-time Communication in IEEE 802.16e System

Student: Chia-Hsiang Yang

Advisor: Dr. Chien-Chao Tseng

Degree Program of Electrical Engineering Computer Science  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

The advance of technologies has changed the way people access the Internet - from narrow band modem dialing to xDSL broadband access. This change stimulates more and more new applications, including multimedia audio/video services, and thus increases the demand of network bandwidth.

The development of wireless communication technologies makes it more convenient for people to network access anytime, anywhere, and even when moving. Several well-known wireless technologies, such as Bluetooth and IEEE 802.11 standard, have already been equipped with modern Internet or telecommunication products. Among them, IEEE 802.16 is the most promising wireless communication standard and is regarded as the most important technology for the next-generation wireless networks.

Compared with wired networks, wireless networks are more

sensitive to the environmental interferences and is relatively unstable. Moreover, bandwidth utilization of a wireless network is considerably lower than that of a wired network. One intuitive way is to develop new wireless technologies with higher bandwidth. Alternatively, increasing the utilization of available bandwidth is also a good approach to extending the throughput of a wireless network.

In this thesis, we propose a Channel-Quality-Aware Maximum Transmission Unit (MTU) adjustment mechanism for real-time communication in IEEE 802.16e networks. The proposed method can dynamically adjust MTU of Protocol Data Units (PDUs) in accordance with the current Bit Error Rate a mobile station experienced. By decreasing the MTUs when BERs are high, a mobile station can help to reduce the packet loss ratios and thus increase the system throughput.

However, decreasing the size of MTUs may introduce extra framing overhead, such as MAC headers and Cyclic Redundancy Check codes. As a consequence, a mobile station may need an extra cycle to complete the transmission of the PDUs that the mobile station can transmit in one cycle before adjusting the size of MTUs. Therefore we also propose a Lazy MTU adjustment scheme to eliminate such delay. Performance results show that our proposal is very effective.

## 誌 謝

在此，感謝指導教授曾建超老師，指導我論文的方向及研究的方法，更不厭其煩的糾正我論文表達方式及擷取論文精華的方法，雖然去年教授遠在國外，但仍與我遠距離的討論論文相關技術，讓我非常感謝。

再來，感謝百忙之中特地撥空指導的許獻聰教授及曹孝櫟教授，二位教授相繼的提出許多創新的想法供我參考，讓我有更寬廣的視野。

此外，我也要感謝實驗室的學長及同學，多次的協助與討論，給我很多新興的想法。並且教導我實驗室研究方向，讓我能很快進入狀況，及早從事研究。特別是黃貴笠學長，還放下手邊重要工作，熬夜教導、修改我的論文，真的非常感謝。

最後，要感謝工研院的同事們，因為有他們的鼓勵和協助，讓我能快速的完成此論文，在此對各位獻上由衷的感謝，謝謝大家的教導及鼓勵。

# 目 錄

摘 要 .....	I
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
誌 謝 .....	V
目 錄 .....	VI
圖 目 錄 .....	VIII
表 目 錄 .....	IX
縮寫和縮略字說明 .....	X
<b>第一章 緒論</b> .....	<b>1</b>
1.1 研究動機 .....	1
1.2 研究目標 .....	2
1.3 章節介紹 .....	2
<b>第二章 背景知識介紹</b> .....	<b>3</b>
2.1 IEEE 802.16E架構 .....	3
2.2 IEEE 802.16E參考原型 .....	5
2.3 OFDMA FRAME架構 (TDD) .....	7
2.3.1 OFDMA Time Relevance of DL-MAP and UL-MAP (TDD) .....	10
2.4 MAC PDU格式 .....	11
2.4.1 MAC header格式 .....	13
2.4.2 MAC subheader和special payloads .....	16
2.5 頻寬要求和配置機制 .....	18
<b>第三章 系統架構與設計</b> .....	<b>20</b>
3.1 系統架構 .....	20
3.2 系統設計 .....	22
3.2.1 最佳有效頻寬使用率的方法 .....	22
3.2.2 Lazy MTU調整方法 .....	23
<b>第四章 效能評估</b> .....	<b>31</b>
4.1 固定MTU的頻寬使用率評估 .....	31
4.2 動態調整MTU .....	32
<b>第五章 結論與未來工作</b> .....	<b>35</b>

5.1 結論.....	35
5.2 未來工作 .....	35
參考文獻.....	37



## 圖 目 錄

圖 2-1 IEEE 802.16E 架構 (PMP模式) .....	4
圖 2-2 IEEE 802.16E 架構 (MESH模式).....	4
圖 2-3 IEEE 802.16E PROTOCOL LAYER.....	6
圖 2-4 OFDMA FRAME FORMAT.....	7
圖 2-5 TIMING OF DL/UL MAP DESIGN.....	11
圖 2-6 MAC PDU格式 .....	11
圖 2-7 GENERIC MAC HEADER FORMAT .....	12
圖 2-8 MAC SIGNALING HEADER TYPE I FORMAT .....	12
圖 2-9 MAC SIGNALING HEADER TYPE II FORMAT .....	14
圖 2-10 頻寬要求與配置流程圖 .....	19
圖 3-1 系統架構 .....	20
圖 3-2 BANDWIDTH REQUEST/GRANT AND DATA TRANSMISSION FLOWCHART WITHOUT MTU MODIFY .....	25
圖 3-3 BANDWIDTH REQUEST/GRANT AND DATA TRANSMISSION FLOWCHART WITH MTU MODIFY .....	26
圖 3-4 資料傳輸分析圖 .....	28
圖 3-5 改良式BANDWIDTH REQUEST/GRANT AND DATA TRANSMISSION FLOWCHART.....	29
圖 4-1 個別BER在不同的MTU下的頻寬使用率.....	32
圖 4-2 最佳MTU .....	33
圖 4-3 變動BER的有效頻寬頻寬使用率.....	34

## 表 目 錄

表 2-1 OFDMA FRAME DURATION CODES .....	6
表 2-2 DL-MAP MESSAGE FORMAT .....	9
表 2-3 UL-MAP MESSAGE FORMAT .....	9
表 2-4 GMH TYPE ENCODINGS .....	14
表 2-5 TYPE FIELD ENCODINGS FOR MAC SIGNALING HEADER TYPE I .....	15
表 2-6 FEEDBACK TYPE AND FEEDBACK CONTENT .....	16
表 3-1 NEW UL/DL EXTENDED SUBHEADER TYPE .....	22
表 4-1 MTU、BER和有效頻寬使用率統計表 .....	31



## 縮寫和縮略字說明

BER	Bit Error Rate
BS	Base Station
BSN	Block Sequence Number
CDMA	Code Division Multiple Access
CI	CRC Indicate
CID	Connection Identifier
CINR	Carrier-to-interference-and-noise Ratio
CPS	Common Part Sublayer
CQICH	Channel Quality Information Channel
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Convergence Sublayer
EC	Encryption Control
EKS	Encryption Key Sequence
ertPS	extended real-time Polling Service
ESF	Extended Subheader Field
FCH	Frame Control Header
FDD	Frequency Division Duplex or Duplexing
FSN	Fragment Sequence Number
GMH	Generic MAC Header
HCS	Header Check Sequence
HT	Header Type
IE	Information Element
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MS	Mobile Station
MSB	Most Significant Bit
MTU	Maximum Transmission Unit
nrtPS	non-real-time Polling Service
PDU	Protocol Data Unit
PHY	Physical Layer
PMP	Point-to-multipoint
RTG	Receive / Transmit Transition Gap

rtPS	real-time Polling Service
Rx	Receiver
SAP	Service Access Point
SDU	Service Data Unit
SFID	Service Flow Identifier
SI	Slip Indicator
SS	Subscriber Station
TDD	Time Division Duplex or Duplexing
TEK	Traffic Encryption Key
TTG	Transmit/Receive Transition Gap
Tx	Transmitter
UGS	Unsolicited Grant Service
xDSL	x Digital Subscriber Line



# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機

近幾年來，無線的技術似乎變為顯學，並且廣泛的應用於生活中。例如無線電話、無線網路、藍芽耳機等，皆是透過無線的技術，讓使用者拋開以往有線的束縛，便利且輕易的就能享受使用數位產品的樂趣。

因此，全世界投入無線新技術的研發團隊，前仆後繼。政府及大型企業看好無線技術對於人們生活上的商機，更是投入大量的人力及金錢。例如，本論文所要討論IEEE 802.16e技術[1][2][3][4][5]，著名的英特爾、富士通、諾基亞、Airspan Networks、Alvarion、Aperto Networks、Ensemble Communications、OFDM Forum和Wi-LAN等多家企業聯合創建「WiMax論壇」。韓國更直接由政府推動，主要目的是想在IEEE 802.16<sup>1</sup>成為領導地位。

無線技術的進步，確實帶給人們許多便利性。從早期近距離、低速率的無線模式，慢慢的演進至遠距離、高速率的無線模式。演進的過程中，也進而將許多技術上的問題浮現出來，例如，安全及保密性、電力持久性、無線介質的穩定性和可靠性、有效頻寬使用率[6][7]等。這些問題，還需一一解決，使無線技術更趨純熟，大量的應用於日常生活中。

---

<sup>1</sup> IEEE 802.16 標準有多個版本，依其固定與移動性，可分為IEEE 802.16<sup>TM</sup>-2004 及IEEE 802.16e<sup>TM</sup>-2005，韓國主推WiBro，其標準始於 802.16d但經過了修改使得其設備可以在移動性的裝置上面使用並聲稱相容於 802.16e。

## 1.2 研究目標

如前節所述，當無線傳輸距離愈來愈遠，速度愈來愈快，很多問題也因此產生。本論文將針對眾多問題中的「無線介質的不穩定性和不可靠性」，做深入的研究，以取得最佳的 IEEE 802.16e 有效頻寬使用率。透過本論文所提出的方法，以期能得使 IEEE 802.16e 有效頻寬使用率得到改善。

## 1.3 章節介紹

本篇論文各章節簡述如下：

第一章 緒論，描述本論文的研究動機，以及本論文想要達到的目標。

第二章 背景知識介紹，本論文主要是要改善 IEEE 802.16e 的有效頻寬使用率，因此，在此章節，我們會描述 IEEE 802.16e 相關背景知識，其中包括 IEEE 802.16e 系統架構，參考原形，Time Division Duplex or Duplexing (TDD) frame 架構，Protocol Data Unit (PDU) 格式，header 格式，subheader 格式，頻寬要求與配置機制等。

第三章 系統設計與架構，在此章節提出論文的新方法，利用動態改變 PDU 的 Maximum Transmission Unit (MTU)，得以改善有效頻寬使用率。其次，描述該系統的可行架構，並說明架構中的模組，個別的功能。

第四章 效能評估，在此，利用數學分析式，配合上 MATLAB 圖形分析，用以求出最佳的實行例。

第五章 結論與未來工作，在此總結整篇論文，並提出未來可研究的研究方向。

## 第二章 背景知識介紹

### 2.1 IEEE 802.16e 架構

IEEE 802.16e無線網路主要分為Point-to-multipoint (PMP) 模式[如圖2-1]和Mesh模式[如圖2-2]兩種模式。

PMP模式為一個中控的Base Station (BS) 和多個Subscriber Station<sup>1</sup> (SS)所成的系統。

PMP模式下，下載 (downlink) 是指從BS到SS的方向，而BS是此方向唯一的傳送者。因此，做下載的動作時，不需要做任何的協調。而接收的SS，會經由確認Connection identifier (CID) 後，將指定到自己CID、group ID及broadcast ID，資料或資訊收下並處理。上傳 (uplink) 是指SS到BS的方向，在SS上傳資料前，必須要先得到BS的Grant後，依安排的時間，作上傳的動作。

Mesh模式則沒有中控BS的機制。此模式下，資料可由SS直接傳送，不用經過BS的中介。因此，SS本身亦有路由的功能。

---

<sup>1</sup> 在IEEE 802.16e標準中，BS可和SS或Mobile Station (MS) 做Connction，本論文使用SS作為統稱。

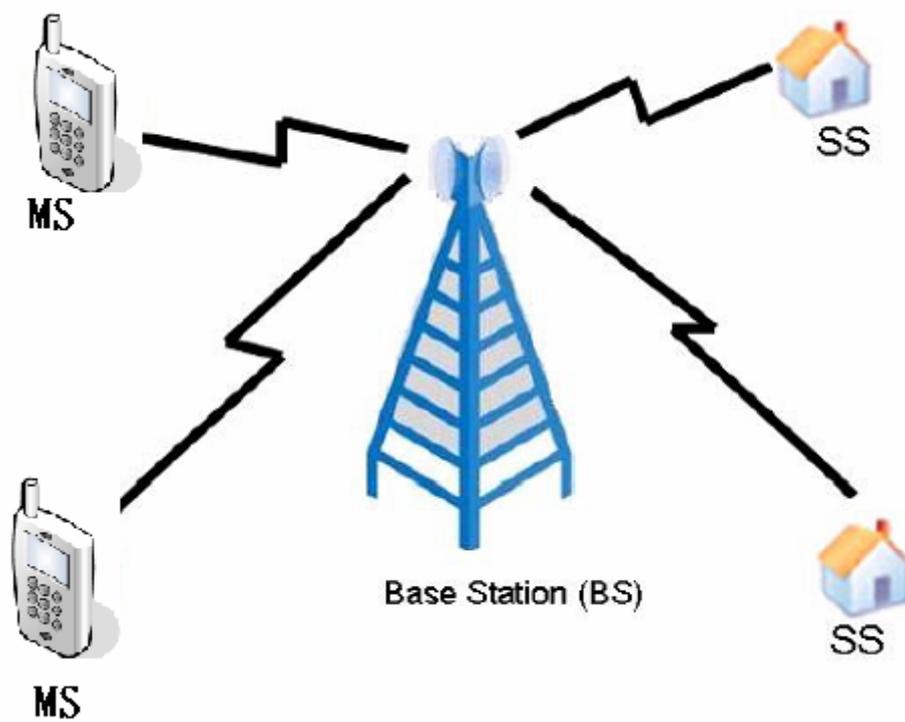


圖 2-1 IEEE 802.16e 架構 (PMP 模式)

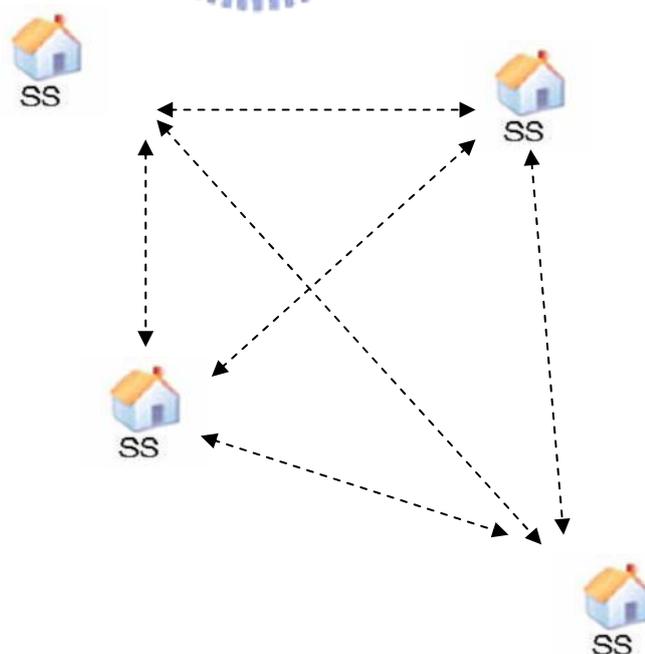


圖 2-2 IEEE 802.16e 架構 (Mesh 模式)

## 2.2 IEEE 802.16e 參考原型

IEEE 802.16e MAC protocol 層可區分為三個子層[如圖 2-3]，分別是 Service-Specific Convergence Sublayer (CS)[8]、MAC Common Part Sublayer (CPS)和 Physical Layer (PHY)，各子層有其專屬的任務，在此分述如下：

CS：CS 主要是將外部或應用程式的資料，先做轉換及分類，並將分類好的資料，關連到對應的 Service Flow Identifier (SFID) 和 CID。

MAC CPS：MAC CPS 提供了 MAC 核心功能，包含系統存取、頻寬配置、連線建立和連線的維護。同時，提供認證、密鑰交換及加密的安全層，也涵蓋在這子層中。

PHY：PHY定義了各個規格<sup>2</sup>，每個規格各自有其適用的頻率範圍及應用。

各子層之間，溝通或傳送資料，是藉由 Service Access Point (SAP)；Application 和 CS 的溝通是藉由 CS SAP；CS 和 MAC CPS 的溝通是藉由 MAC SAP；MAC CPS 和 PHY 的溝通則是藉由 PHY SAP。

而又依據傳送的内容，可分為資料性 (Data Plane) 和控制性 (Control Plane)。

---

<sup>2</sup> IEEE 802.16支援WirelessMAN-SC、WirelessMAN-SCa、WirelessMAN-OFDM、WirelessMAN-OFDMA 四種PHY規格。

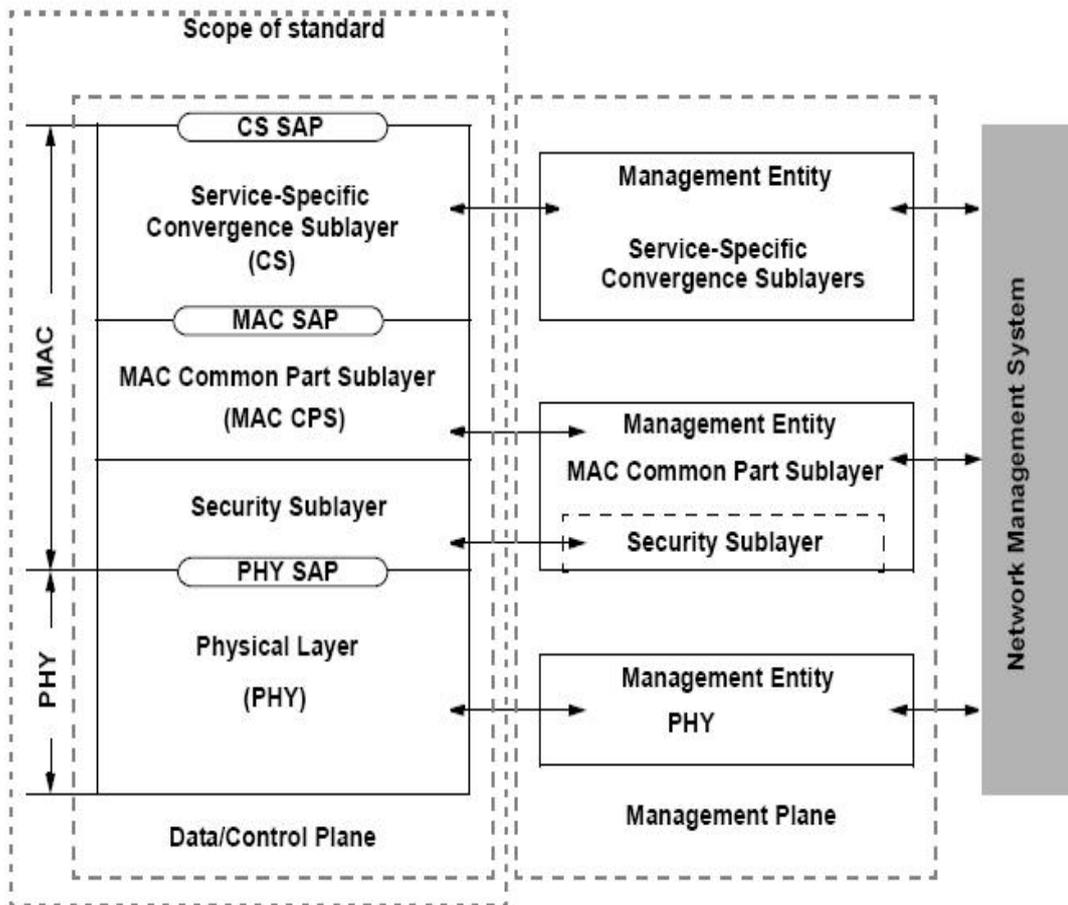


圖 2-3 IEEE 802.16e protocol layer

表 2-1 OFDMA frame duration codes

Code (N)	Frame duration (ms)	Frames per second
0	N/A	AAS-only gap up to 200 ms following (see 8.4.6.3)
1	2	500
2	2.5	400
3	4	250
4	5	200
5	8	125
6	10	100
7	12.5	80
8	20 ms	50
9-255		<i>reserved</i>

### 2.3 OFDMA Frame架構 (TDD<sup>3</sup>)

PHY 利用 Frame 為單位，組出固定時間長度 (Frame Duration) 的資料[如表 2-1]。OFDMA TDD frame format[如圖 2-4]是由 UL-Subframe 和 DL-Subframe 兩個 Subframe 所組成。當從 DL-Subframe 轉為 UL-Subframe 時，中間夾雜 Transmit/Receive Transition Gap (TTG)，這個 Gap 是讓 BS 有時間從傳輸轉為接收，而 SS 從接收轉為傳輸。當 UL-Subframe 轉為 DL-Subframe 時，中間夾雜 Receive/Transmit Transition Gap (RTG)，這個 Gap 剛好和 TTG 相反，它讓 BS 有時間從接收轉為傳輸，而 SS 從傳輸轉為接收。

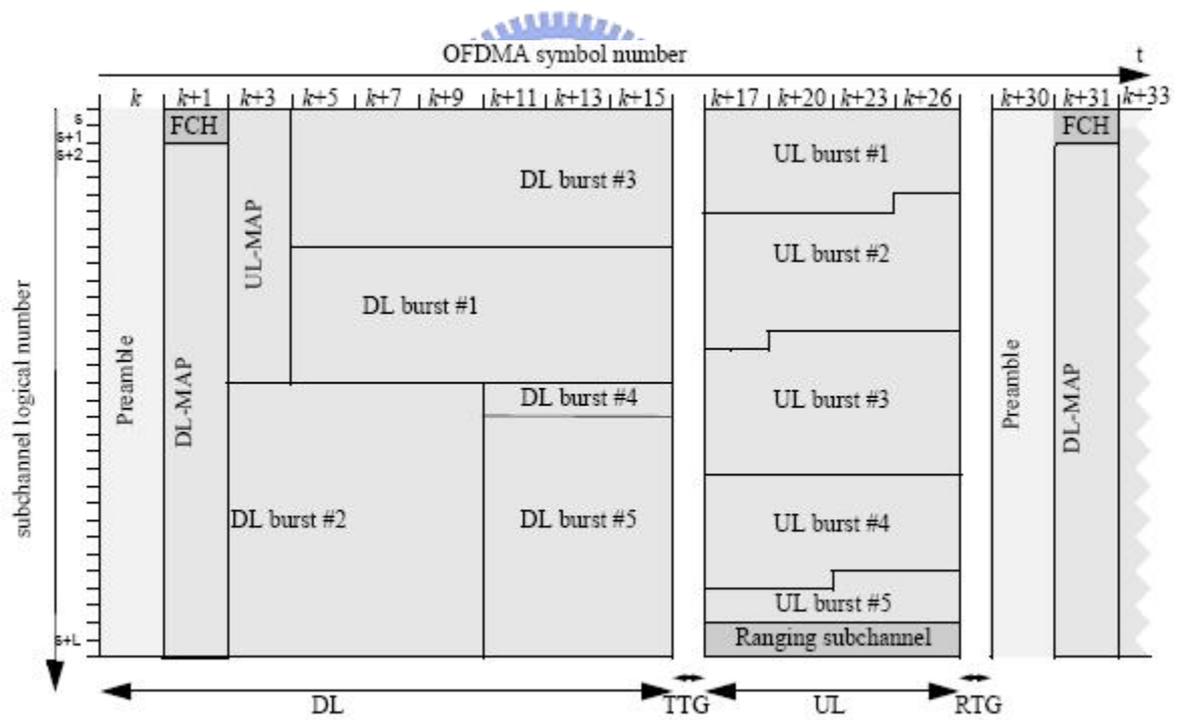


圖 2-4 OFDMA frame format

<sup>3</sup> IEEE 802.16 支援TDD和Frequency Division Duplex or Duplexing (FDD) 兩種技術。

DL-Subframe 是由 BS 所組而成，其組成元件包含 Preamble、Frame Control Header (FCH)、DL-MAP、UL-MAP、DL bursts 等，茲分述如下：

(1) Preamble：這是一個固定的值，SS 利用這個 Preamble 來和 BS 做時間和頻率的同步。

(2) FCH：它包含目前 Frame 的資訊，像是 DL-MAP 的長度，DL-MAP repetition coding 等。

(3) DL-MAP：DL-MAP[如表 2-2]定義了下載的資訊，其中主要包含了傳送這封包的 BS ID，與指定何時該由哪個 SS 接收下載的資訊的 DL-MAP Information element (IE)等。因為 DL-MAP 以 Broadcast 方式傳送，因此 SS 都會收到。

(4) UL-MAP：UL-MAP[如表 2-3]定義了上傳的資訊，其中主要定義了有效的上傳開始時間 (Allocation Start Time)，及各個SS上傳配置的時間 (UL-MAP\_IE)，UL-MAP也是以廣播的方式傳送，因此SS都會收到。

(5) DL burst：DL burst為BS所組而成，此為送到指定的SS之PDU集合，接收端的SS根據DL-MAP中的DL-MAP\_IE得知該何時起來收屬於自己的burst。

表 2-2 DL-MAP message format

Syntax	Size	Notes
DL-MAP_Message_Format() {		
Management Message Type = 2	8 bits	
PHY Synchronization Field	<i>variable</i>	See appropriate PHY specification.
DCD Count	8 bits	
Base Station ID	48 bits	
Begin PHY Specific Section {		See applicable PHY subclause.
if(WirelessMAN-OFDMA) {		
No. OFDMA symbols	8 bits	Number of OFDMA symbols in the DL subframe including all AAS/permutation zone.
}		
for (i = 1; i <= n; i++) {		For each DL-MAP element 1 to n.
DL-MAP_IE()	<i>variable</i>	See corresponding PHY specification.
}		
}		
if !(byte boundary) {		
Padding Nibble	4 bits	Padding to reach byte boundary.
}		
}		

表 2-3 UL-MAP message format

Syntax	Size	Notes
UL-MAP_Message_Format() {		
Management Message Type = 3	8 bits	
Reserved	8 bits	Shall be set to zero.
UCD Count	8 bits	
Allocation Start Time	32 bits	
Begin PHY Specific Section {		See applicable PHY subclause.
if(WirelessMAN-OFDMA) {		
No. OFDMA symbols	8 bits	Number of OFDMA symbols in the UL subframe
}		
for (i = 1; i <= n; i++) {		For each UL-MAP element 1 to n.
UL-MAP_IE()	<i>variable</i>	See corresponding PHY specification.
}		
}		
if !(byte boundary) {		
Padding Nibble	4 bits	Padding to reach byte boundary.
}		
}		

UL-Subframe 是由 SS 所組而成，其組成元件包含 Ranging Subchannel和UL burst，茲分述如下：

(1) Ranging Subchannel：這是一個保留用來送 Code Division Multiple Access (CDMA) code 的 subchannel，在 OFDMA 中，CDMA code 共有四組，分別是 initial-ranging codes、periodic-ranging codes、bandwidth-request codes 和 handover-ranging codes。

(2) UL burst：UL burst 為 SS 所組而成，此為同一個 SS PDU 的集合，發送端的 SS 根據 UL-MAP 中的 UL-MAP\_IE 得知該在哪一段時間有權發送 burst。

### 2.3.1 OFDMA Time Relevance of DL-MAP and UL-MAP (TDD)

在 DL-MAP 和 UL-MAP 中，Timing 資訊是相關聯的，DL-MAP 中所描述的時間區間會指定在目前接收的 Frame 中，UL-MAP 中所描述的時間區間會指定在下一個 Frame 中，[如圖 2-5]。DL subframe 和 UL subframe 不會相互覆蓋，且中間會有 TTG 及 RTG 做分隔。

DL-MAP 和 UL-MAP 所能配置的時間，大致分述如下：

(1) DL-MAP：

最小值：在收完 MAP 後

最大值：在目前 Frame 結束前

(2) UL-MAP：

最小值：在下一個 Frame 收完 MAP 後

最大值：在下一個 Frame 結束前

也因此，當 SS 收到 Grant 時，最快也要在下個 frame time 時才能將

資料送出。

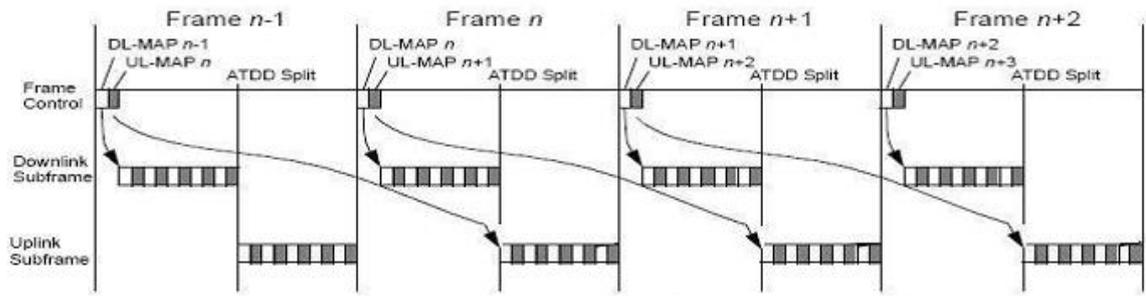


圖 2-5 Timing of DL/UL MAP design

## 2.4 MAC PDU 格式

MAC PDU 格式如同圖 2-6 所示，每個 PDU 開頭先放固定六個 bytes 的 MAC header，接著可能放 PDU 的 Payload。如果有 PDU Payload 存在，在 PDU Payload 內會存放零個或多個 extended subheaders，接著存放零個或多個由 subheader 加上 Service Data Unit (SDU) 的組合。

MAC PDU 可選擇是否要包含 Cyclic Redundancy Check (CRC)，但當 PHY layer 為 OFDMA 時，則強制要將 CRC 加入。

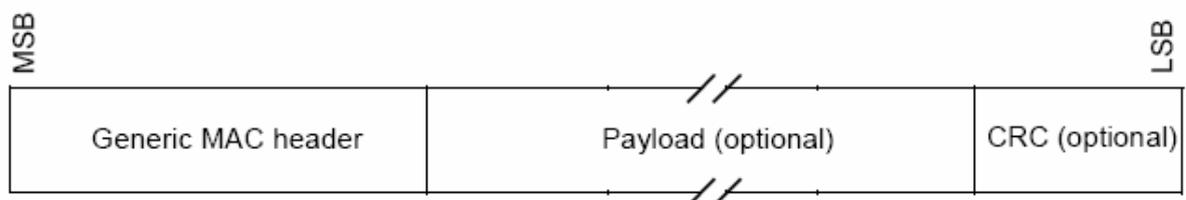


圖 2-6 MAC PDU 格式

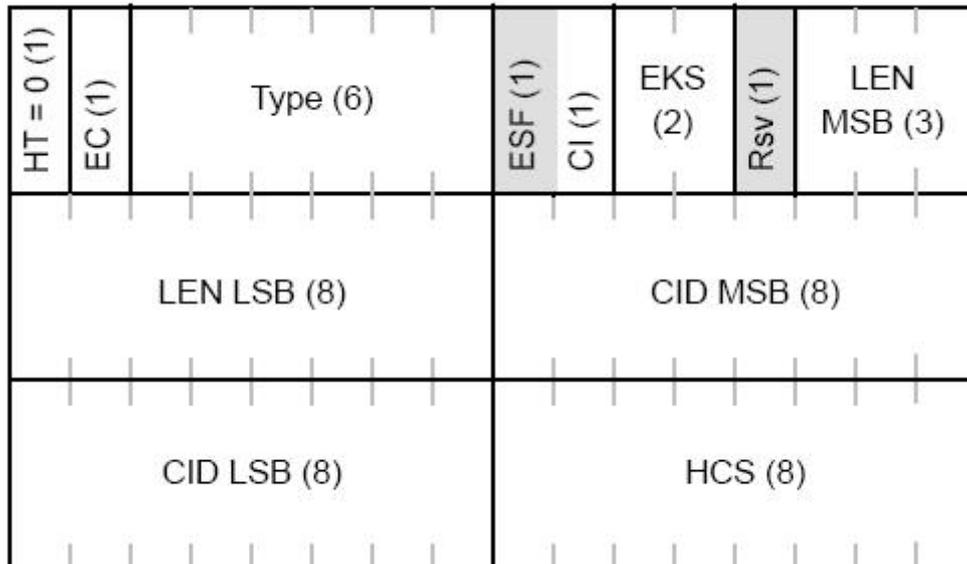


圖 2-7 Generic MAC header format

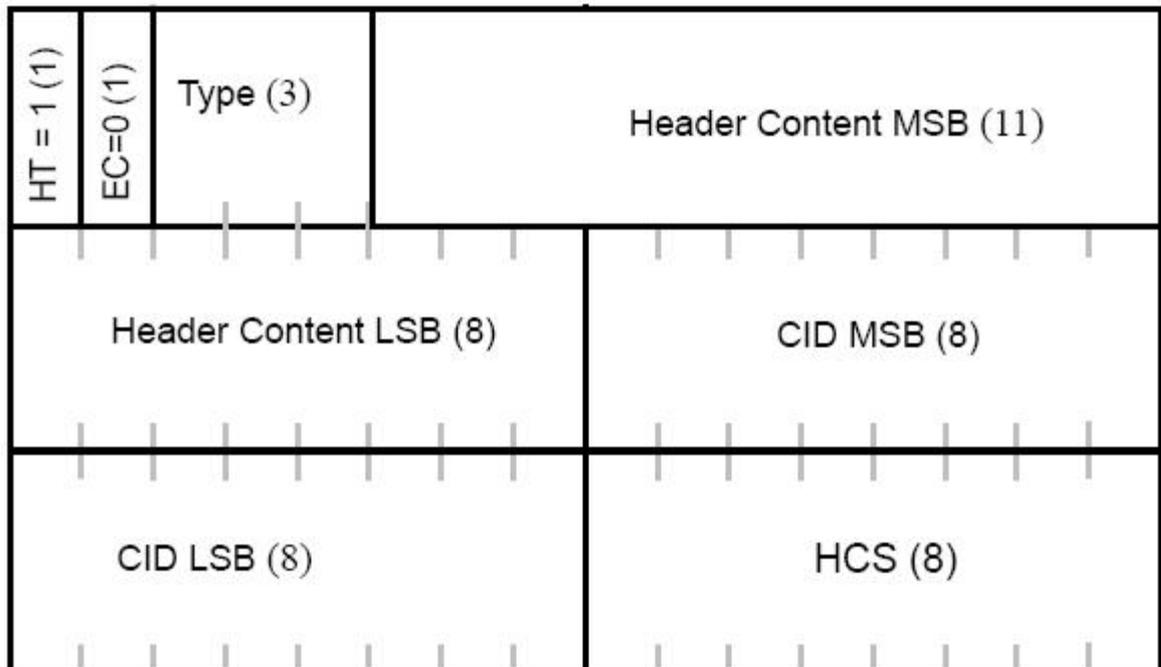


圖 2-8 MAC signaling header type I format

### 2.4.1 MAC header 格式

MAC header 可分為大兩類，一類為有包含 Payload 的 Generic MAC header (GMH)[如圖 2-7]，另一類為不包含 Payload 的 header，而不帶 Payload 的 MAC header 又為兩類，分別稱為 MAC signaling header type I[如圖 2-8]，及 MAC signaling header type II[如圖 2-9]茲分述如下：

Generic MAC header: 在此 header 之後，會帶 MAC 管理訊息或是 CS 層傳下的資料，Generic MAC header 各欄位分述如下：

- (1) HT：Header Type，在此該值設定為 0。
- (2) EC：Encryption Control，設定 Payload 是否要加密。
- (3) Type：指示 PDU 中是否有 subheaders 或 special Payload。在此欄位中，每個 bit 代表的含意如表 2-4 所示。
- (4) ESF：Extended Subheader Field，設定 GMH 之後是否有跟隨 extended subheader。
- (5) CI：CRC Indicate，表示 PDU 中是否包含 CRC。
- (6) EKS：Encryption Key Sequence，表示用來加密的 Traffic Encryption Key(TEK)和 initialization vector 的 index。
- (7) Len：用以表示整個 PDU 的長度，包含 GMH、Payload 及 CRC，但不包含 Preamble。
- (8) CID：Connection Identifier，指定收此 PDU 的 Connection Identifier。
- (9) HCS：Header Check Sequence，用來做 Header 錯誤偵測。

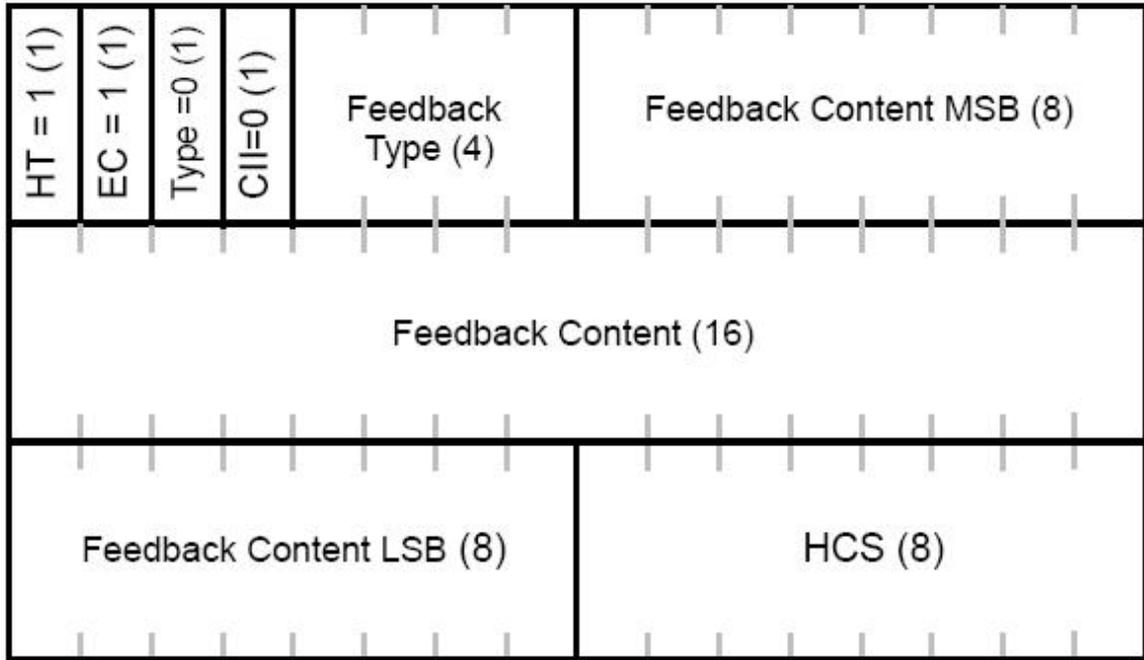


圖 2-9 MAC signaling header type II format

表 2-4 GMH type encodings

Type bit	Value
#5	Mesh subheader
#4	ARQ FeedBack Payload
#3	Indicates whether the present Packing or Fragmentation subheaders is Extended
#2	Fragmentation subheader
#1	Packing subheader
#0	Downlink : FAST-FEEDBACK Allocation Uplink : Grant management subheader

MAC signaling header type I：這是不會帶 Payload 的 header，他的欄位中，HT、EC、CID 及 HCS 和 GMH 內的欄位定義相同，其他欄位定義如下

- (1) Type：Type 欄位有做更動，各個值有其代表的意義，如表 2-5 所示。
- (2) Header Content：Header Content 會因不同的 Type 欄位值，而有不同的組成欄位。

MAC signaling header type II：這和 MAC signaling header type I 相似，都是不會帶 Payload 的 header，且固定的欄位更為精簡。

- (1) Type：此欄位只有一個 bit，值永遠都是 0，表示這是 feedback header。
- (2) CII：CID inclusion indication，表示 Feedback content 是否含有 CID 欄位
- (3) Feedback Type：此用於表示 Feedback 的形式，[如表 2-6]。



表 2-5 Type field encodings for MAC signaling header Type I

Type field	MAC header type
000	Bandwidth Request (BR) incremental
001	BR aggregate
010	PHY channel report
011	BR with UL Transmitter (Tx) Power report
100	BR and Carrier-to-interference-and-noise Ratio (CINR) report
101	BR with UL sleep control
110	Sequence Number (SN) report
111	Channel Quality Information Channel (CQICH) allocation request

表2-6 Feedback type and feedback content

Feedback Type	Feedback Contents
0b0000	CQI and MIMO feedback
0b0001	DL average Carrier-to-interference-and-noise Ratio (CINR)
0b0010	Multiple Input Multiple Output (MIMO) antenna feedback
0b0011	Preferred DL channel DIUC feedback
0b0100	UL transmission power
0b0101	PHY channel feedback
0b0110	CQIs of DL multiple AMC bands
0b0111	The recommended number of frames for which the short-term precoding feedback can be used
0b1000	Multiple types of feedback
0b1001	Long-term precoding feedback
0b1010	Combined DL average CINR of Active BSs
0b1011	MIMO mode channel condition feedback
0b1100	CINR feedback
0b1101	Close-loop MIMO feedback

#### 2.4.2 MAC subheader 和 special payloads

IEEE 802.16e 有六個型態的 subheaders，經分類，可歸為 per-PDU subheader 和 per-SDU subheader，per-PDU subheader 有 extended subheader、Mesh subheader、Fragmentation subheader、Fast-feedback allocation subheader 和 Grant Managements subheader，per-SDU subheader 的有 Packing subheader。他們出現的先後順序為 per-PDU 先

於 per-SDU，而 per-PDU 中，優先權最高為為 extended subheader，其後依序在為 Mesh subheader、Grant Managements subheader、Fragmentation subheader、和 Fast-feedback allocation。

每個 subheader 有個別的意義，茲分述如下：

- (1) Fragmentation subheader[9]：此用來表示這個 SDU 是否有被 fragment，並有欄位用於指出 Block Sequence Number (BSN) 或 Fragment Sequence Number (FSN)。
- (2) Grant Management subheader：此用來向 BS 要求頻寬，並有調整 frame latency 的功能。
- (3) Packing subheader[9]：IEEE 802.16e 能夠組合多個 SDU 到一個 PDU 中，Packing subheader 表示這個 SDU 的 BSN 或 FSN。
- (4) Mesh subheader：如果使用 Mesh 模式，Mesh subheader 就會出現。
- (5) FAST-feedback allocation subheader：用來指定 FAST-feedback allocation 的 offset 及 feedback type。
- (6) Extended subheader：此可分為上傳和下載兩類。下載包含 SDU\_SN extended subheader、DL sleep control extended subheader、Feedback request extended subheader、SN request extended subheader、PDU SN extended subheader。上傳包含 MIMO mode feedback extended subheader、UL Tx Power Report extended subheader、Mini-Feedback extended subheader、PDU SN extended subheader。

## 2.5 頻寬要求和配置機制

IEEE 802.16e 用來要求上傳頻寬的機制有三種，分別為 Contention，Polling 和 Unsolicited Grant。當 SS 剛剛加入網路，或是沒有被配置到頻寬時，SS 必須使用 Contention 的方式，在 Ranging Subchannel 中放置一個 CDMA bandwidth-request code，用來向 BS 要取頻寬，並用此要來的頻寬發送 Bandwidth Request。因為 Ranging Subchannel 是用 Contention 的方式要求頻寬，因此頻寬的要求不一定會成功。

當 SS 的連線型態為 real-time Polling Service (rtPS)[10] 或是 non-real-time Polling Service (nrtPS) 時，BS 會依據連線建立時所定的參數，週期的對這些 Connections 做 Polling 的動作，讓這些 Connections 有足夠的頻寬來發送 Bandwidth Request。

當 SS 的連線型態為 Unsolicited Grant Service (UGS) 或 extended real-time Polling Service (ertPS)[11][12]，BS 會依據連線建立時所定的參數，週期性的給這些 Connections 約定的頻寬。當 UGS connection 的 queue 資料過多時，可藉 Grant subheader 的 Slip Indicate (SI) 欄位向 BS 要求額外的頻寬。

頻寬要求和配置如圖 2-10 所示，當 SS 完全沒有頻寬可用時，SS 會利用 Contention 的機制，發送 CDMA bandwidth-request code，向 BS 要求頻寬，用以發送 Bandwidth Request。如果 BS 有收到，會回應 CDMA\_Allocation\_IE，並於此 IE 中分配頻寬給 SS。

SS 要發送 Bandwidth Request 的頻寬，除了從 CDMA\_Allocation\_IE 得到外，SS 亦可從 Polling 中得到。BS 和 SS 在建立 rtPS 及 nrtPS 連線時，會協調出 Connection 相關的參數，BS 依據這些參數，定期會 Polling SS，藉由 Polling 機制，BS 提供 SS 做 Bandwidth Request 所需的頻寬。

SS 除了可發 Bandwidth Request 向 BS 要求頻寬外，若 SS 有 UGS

或 ertPS 的 Connection 存在，BS 也會主動的配置頻寬給 SS。

由圖 2-10 可看出，若是由 Contention 機制送資料，最快要經過五個 frames 的時間才能將資料送出，若是由 Polling 機制送資料，最快要經過三個 frames 的時間才能將資料送出，若是由 BS 主動 Grant，SS 在資料進 Queue 後，最快可馬上就將資料送出。

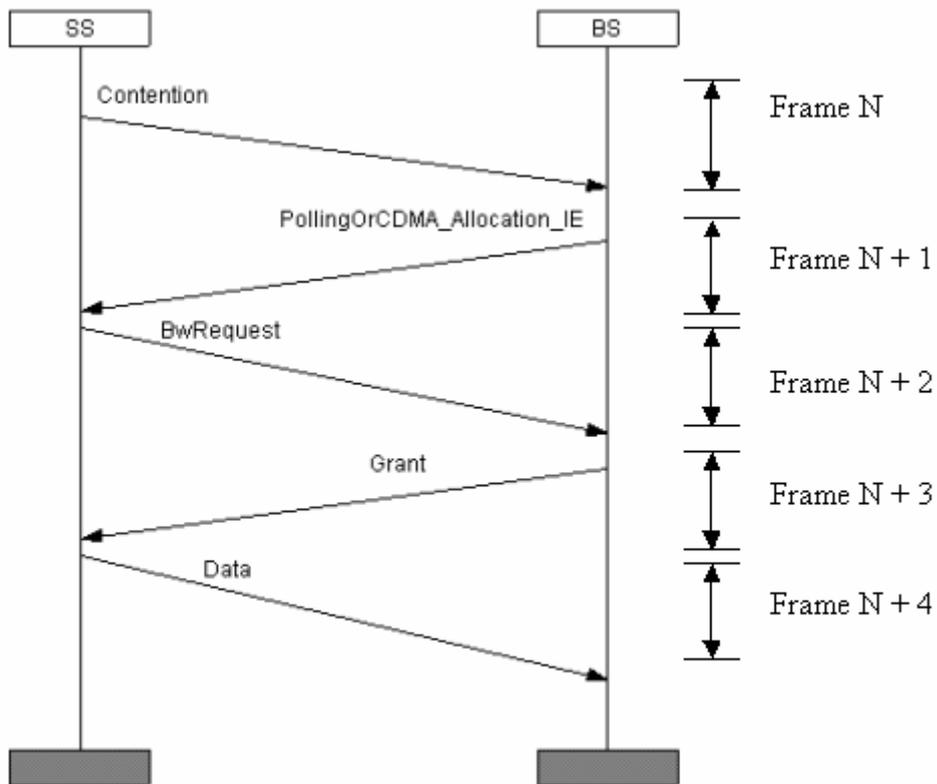


圖 2-10 頻寬要求與配置流程圖

### 第三章 系統架構與設計

#### 3.1 系統架構

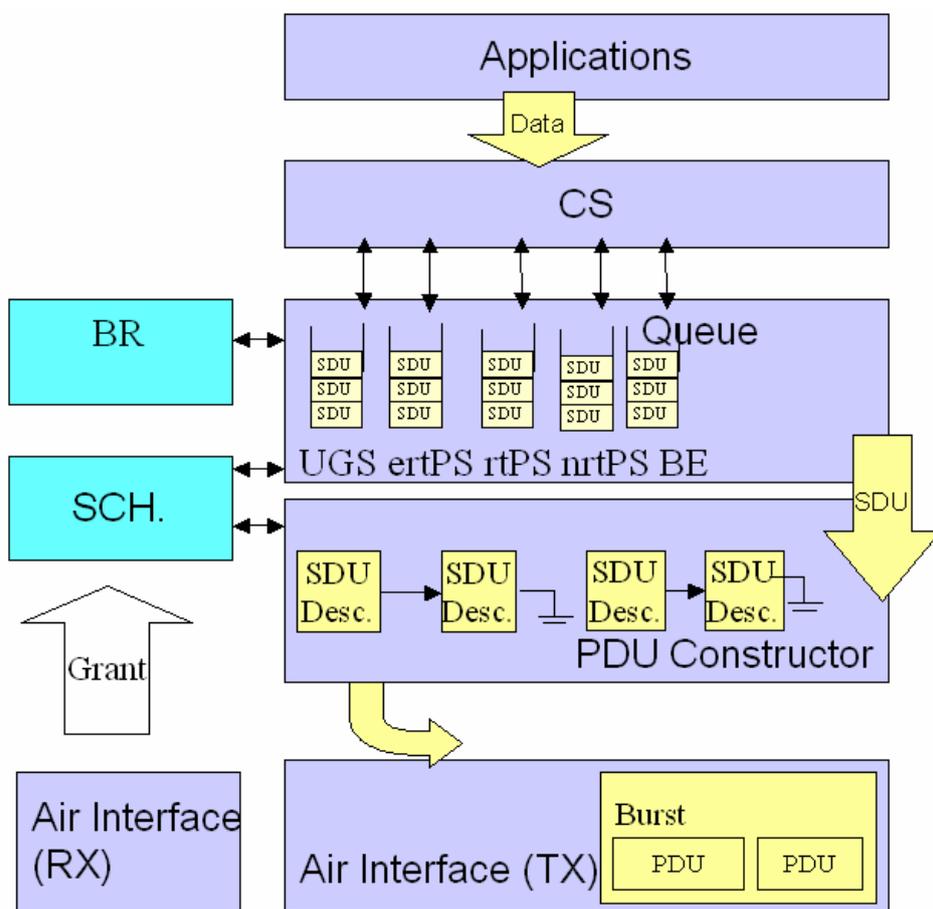


圖 3-1 系統架構

系統架構[如圖 3-1][13]，共分為 Application、CS、Queue、PDU Constructor、Bandwidth Request (BR)、Scheduler (SCH.)和 Air Interface 等七個模組，各個模組有其負責的任務。

- (1) Application：此模組會產生資料，經由和其他模組的配合，將資料傳送出去。
- (2) CS：Convergence sublayer 此模組會接收從 Application 模組傳送下來的資料，並依據 Classify rules，將收到的 SDU 分類並轉換到對應的 IEEE 802.16e Connection。

- (3) Queue：本模組會依不同的 service type (UGS、ertPS、rtPS、nrtPS 和 BE) 及 QoS 參數，建立多組 Connection Queues，用來接收 CS 傳送下來的資料 SDU 或是 SS 自身產生的 Management SDU。並且，當有新的 SDU 進入 Queue 時，通知 BR 模組。
- (4) BR：當 Queue 通知 BR 模組有新的 SDU 進入，或是 SS 需要額外的頻寬時，BR 模組會組“Incremental” Bandwidth Request 的 header 或 PiggyBack 的 subheader，用以向 BS 要求頻寬。並依 IEEE 802.16e 規定，SS 定期要對 BS 發送“Aggregate”Bandwidth Request 的 Header，用來做 BS 和 SS Bandwidth Request 的同步。
- (5) SCH.：當 SS 被配置到頻寬後，SCH. 模組依各 Connection Queue 的 QoS[14] 參數，配合 SS 被分配到的頻寬，組出即將送出的資料的 PDU description[15]。
- (6) PDU Constructor：PDU Constructor 依據 SCH. 模組完成的 PDU description，組出最後要送出的 PDU[15]。
- (7) Air Interface：此模組分為 Transmitter (Tx) 和 Receiver (Rx) 兩部分，Tx 主要是將 PDUs 組成 Burst，並以 Air 為媒介，將組好的 Burst 依 UL-MAP\_IE 中指示的時間送出；Rx 主要是將 Frame 收進來，分析並過濾完所有和 SS 相關的資訊後，將他們往 MAC layer 上傳。就本論文討論的議題，Rx 需要告知 SCH. 模組有關於 BS 分派給 SS 的頻寬及時間。

## 3.2 系統設計

### 3.2.1 最佳有效頻寬使用率的方法

因為無線傳輸的可靠性比較低，傳輸過程中，訊號發生錯誤或是遺失比例也較高，因此，在本實驗中，要提出一個能提高有效頻寬使用率的機制，藉由這個機制，可得到較好的有效頻寬使用率。

本論文是針對不同的 BER 作深入研究，利用論文提出的方法，求出最佳的有效頻寬使用率。因為在 IEEE 802.16e 中，並沒有機制可回傳 BER 的值，因此，我們在 UL/DL extended subheader type 中，分別都加入一個 type，命名為“BER extended subheader”，用來回傳 BER 的值，如表 3-1 所示。

表3-1 New UL/DL extended subheader type



ES type	Name (DL)	Name (UL)
0	SDU_SN extended subheader	MIMO mode feedback extended subheader
1	DL Sleep control extended subheader	UL Tx Power Report extended subheader
2	Feedback request extended subheader	Mini-Feedback extended subheader
3	SN request extended subheader	PDU SN (short) extended subheader
4	PDU SN(short) extended subheader	PDU SN (long) extended subheader
5	PDU SN(long) extended subheader	BER extended subheader
6	BER extended subheader	Reserved
7-127	Reserved	Reserved

當 BER 升高時，我們將 MTU 變小，以減少無效資料的量，但並非無止盡的縮小 MTU，因為在此同時，Overhead(如 MAC Header、subheader 和 CRC 等) [16]會浪費掉頻寬。因此，該如何取得最佳的 MTU，成為一個研究的方向。

我們利用數學推理的方式，求出一個 MTU、有效頻寬使用率和 BER 的關係，其公式如下

Definitions:

R = Bandwidth utilization

B = BER

M = MTU

OH<sup>1</sup> = Overhead

$$R = \frac{(1-B)^{8M} * (M - OH)}{M} \dots\dots\dots(1)$$

對算式(1)取極值，即可得到最佳的 MTU，如算式(2)

$$\frac{\partial R}{\partial M} = \frac{8M(1-B)^{8M-1} * (M - OH)}{M} + \frac{(1-B)^{8M}}{M} + \frac{(1-B)^{8M} * (M - OH)}{M^2} \dots\dots\dots(2)$$

利用算式(2)推算出的值，依據 BER 的不同，動態的調整 MTU，即可得到最佳的有效頻寬使用率。



### 3.2.2 Lazy MTU 調整方法

本實驗為動態的調整 MTU，但當 MTU 變小時，原本一個 PDU 就可送出的資料，可能會變為兩個或多個 PDU 才能送出，因此，Overhead 的數量也增加，這會導致先前 SS 要到的頻寬不足，有些資料可能會延遲到有足夠頻寬後才能送出[17]。這對於一些時間敏感的的應用程式來說（如網路電視），不是一個很好的政策，因此，本論文提出一個解決的方法（Lazy MTU 調整），用來克服因為動態調整 MTU 所造成的延遲。

---

<sup>1</sup>公式中的Overhead指的是MAC header、Packing/Fragmentation subheader 及CRC，因為Grant Management subheader並非每個PDU都會出現，在此於以省略。

圖 3-2 為一般沒有動態調整 MTU，頻寬的 Request，Grant 及資料的傳送方式，其解釋如下：

首先，設定 MTU 為 1024bytes，要傳送的資料為 500bytes，H 是六個 bytes 的 MAC Header，C 是四個 bytes 的 CRC，G 是兩個 bytes 的 Grant Management subheader。

步驟一：當 SS 收到 BS 的 Polling 後，SS 送出值為 510 (Data + H + C) bytes 的 Bandwidth Request PDU。

步驟二：當 BS 收到 SS 的 Bandwidth Request PDU 後，BS Grant SS 512 (Data + H + C + G) bytes 的頻寬。

步驟三：當 SS 收到 Grant 後，組出一個長為 512bytes 的 PDU，並在此 Frame 中順利的將全部 500 bytes 的資料送出。



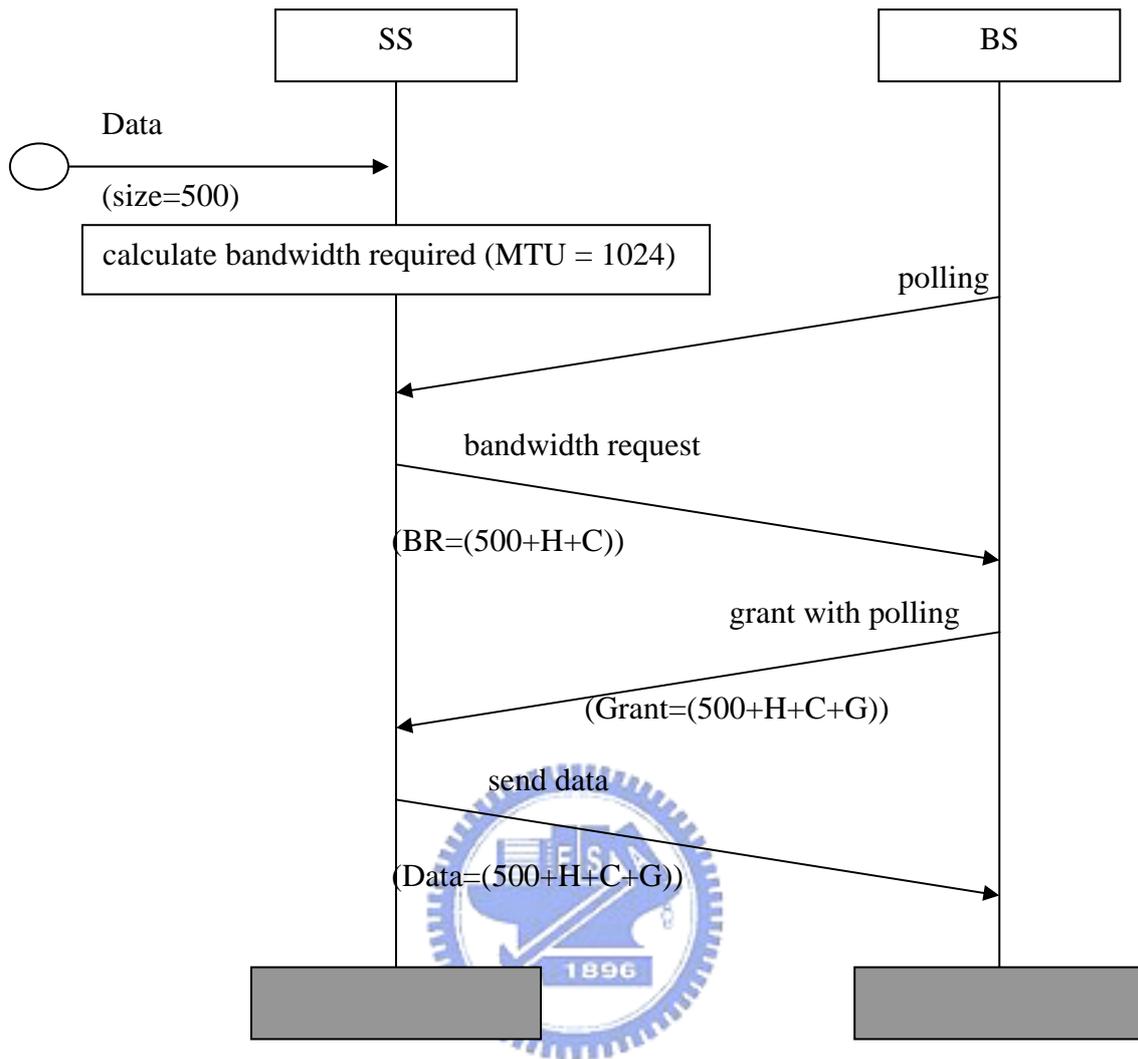


圖 3-2 Bandwidth Request/Grant and data transmission flowchart without MTU modify

由圖 3-2 我們可看出，從 SS 收到 Polling 至整個 500 bytes Data 送出，總共花了 3 個 Frame Time 的時間。

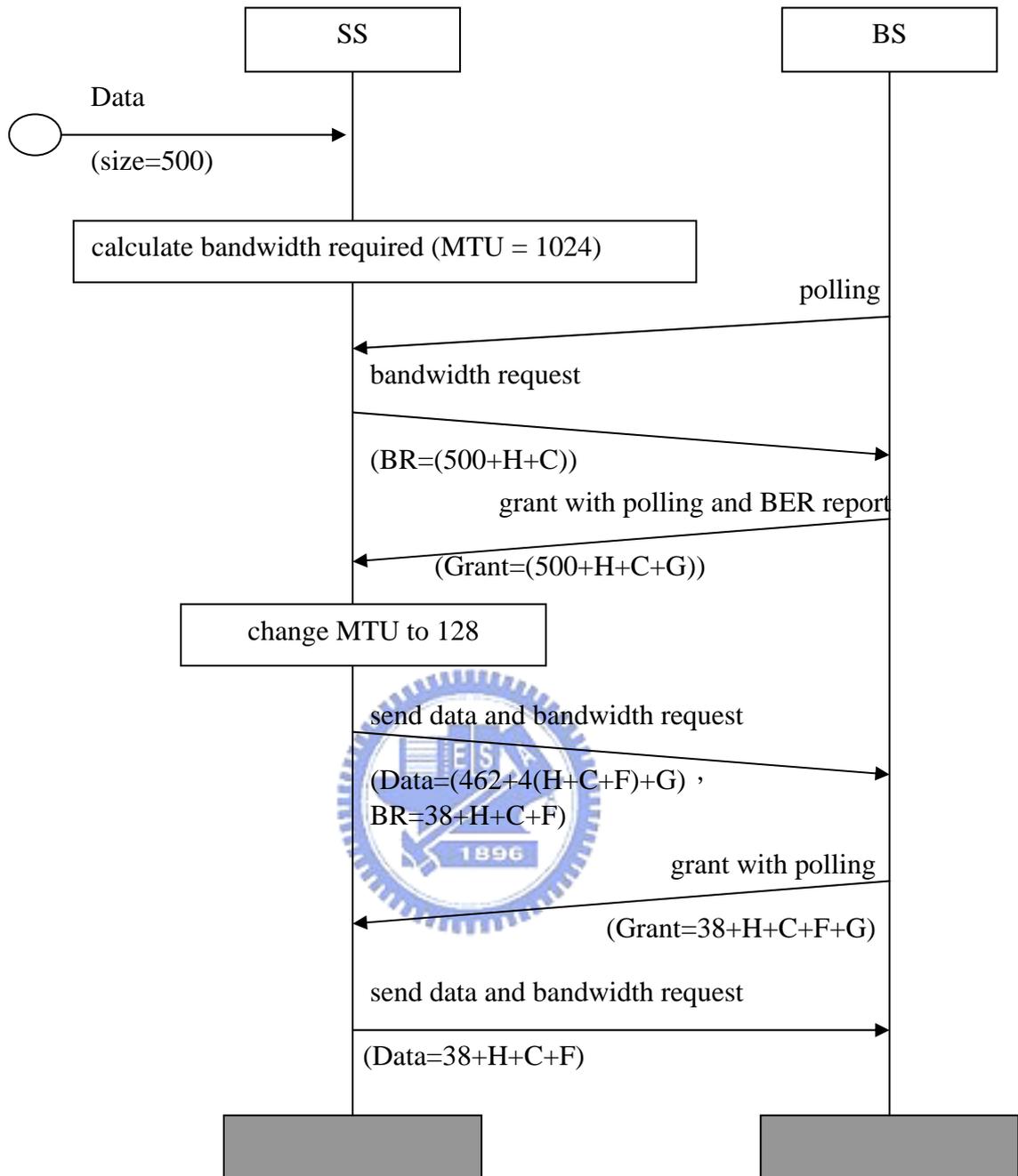


圖 3-3 Bandwidth Request/Grant and data transmission flowchart with MTU modify

圖 3-3 為 BER 升高後，SS 動態的調整成最佳 MTU 後，Bandwidth Request、Grant 及資料的傳送方式，其解釋如下：

SS 起初 MTU 為 1024bytes，要傳送的資料為 500bytes，H 是六個 bytes 的 MAC Header，C 是四個 bytes 的 CRC，G 是兩個 bytes 的 Grant Management subheader，F 是兩個 bytes 的 Fragmentation subheader，經 BS 回報 BER 升高後，SS 動態調整成最佳 MTU，值為 128 bytes。

步驟一：當 SS 收到 BS 的 Polling 後，SS 送出值為 510bytes (Data + H + C) 的 Bandwidth Request。

步驟二：當 BS 收到 SS 的 Bandwidth Request 後，BS Grant SS 512 bytes (Data + H + C + G) 的頻寬。

步驟三：SS 得到 BS 最新回報的 BER 報告，SS 動態調整 MTU 為 128 bytes。

步驟四：當 SS 收到 BS Grant 的 512bytes 的頻寬，SS 組出四個長為 128 bytes 的 PDU[如圖 3-4]，但因為 MTU 變小後，相對的 Overhead 增加，導致先前要求的頻寬不夠，SS 必須要另外再發 Bandwidth Request，替剩餘的 38 bytes 資料要頻寬。

步驟五：BS 在收到 SS 第二次的 Bandwidth Request 後，Grant SS 52 (remain Data + H + C + F + G) bytes 的頻寬。

步驟六：當 SS 收到 Grant 後，SS 將剩餘的 38 bytes 資料加上 Overhead 後，組成一個 PDU 並送出。

由圖 3-3 我們可看出，從 SS 收到 Polling 至整個 500 bytes Data 送出，總共花了 5 個 Frame Time 的時間。

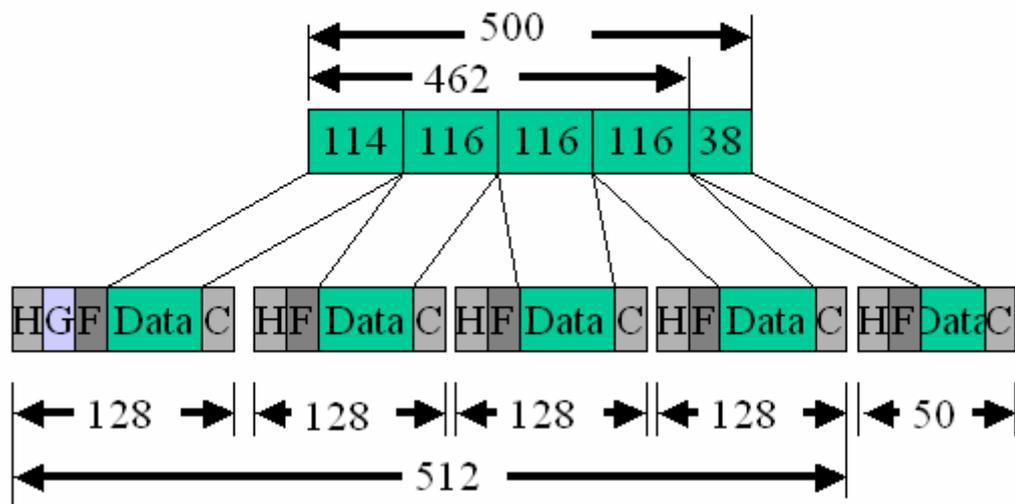


圖 3-4 資料傳輸分析圖

由圖 3-2 和圖 3-3 的結果可看出，當我們縮小了 MTU，會造成資料傳送上的延遲，這是大家所不樂見的。因此，本論文提出一個解決方法，如圖 3-5 所示。

首先，設定 MTU 為 1024 bytes，要傳送的資料為 500 bytes，H 是六個 bytes 的 MAC Header，C 是四個 bytes 的 CRC，G 是兩個 bytes 的 Grant Management subheader，F 是兩個 bytes 的 Fragmentation subheader，經 BS 回報 BER 升高後，SS 動態調整成最佳 MTU，值為 128 bytes。

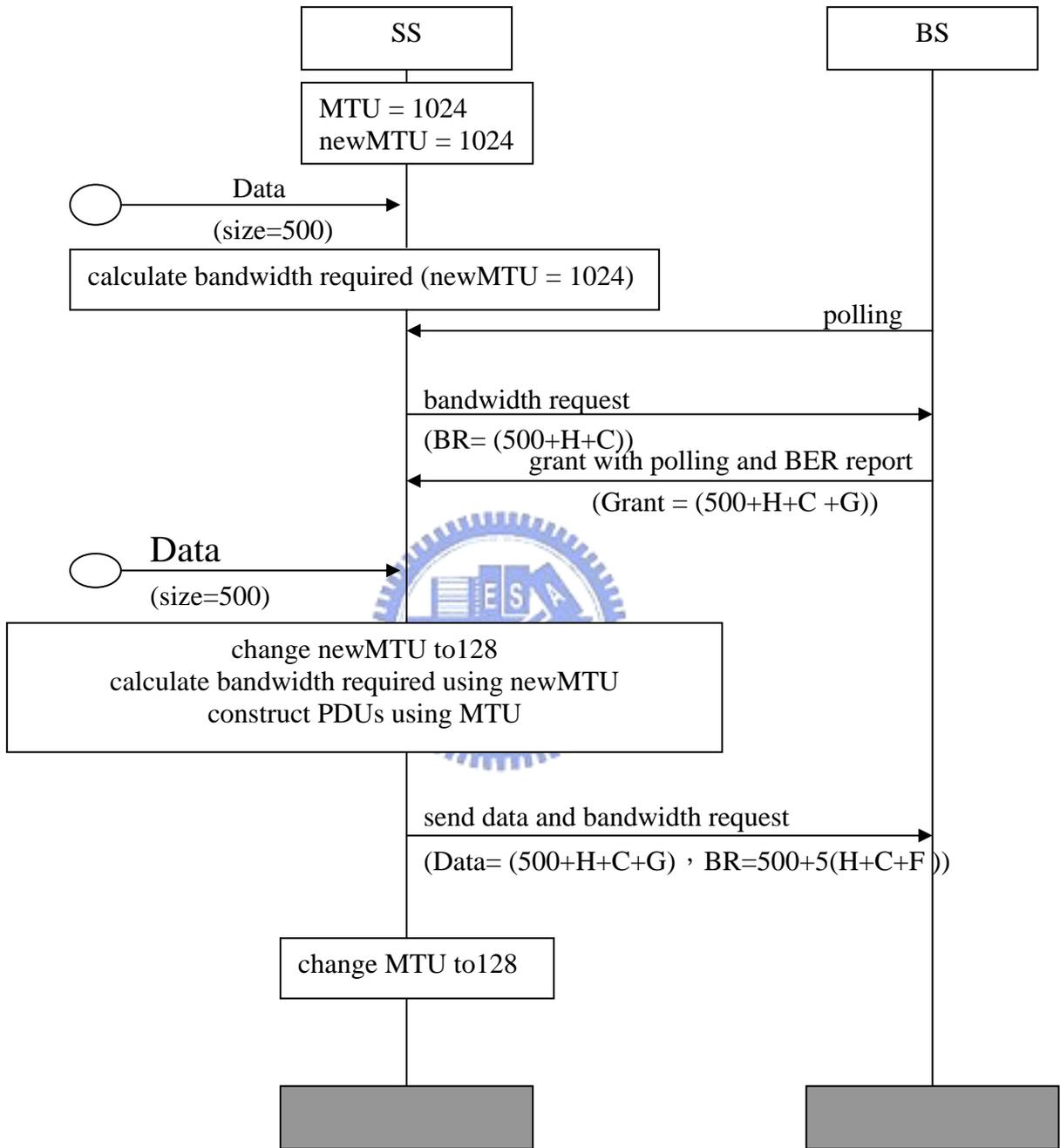


圖 3-5 改良式 Bandwidth request/grant and data transmission flowchart

步驟一：當 SS 收到 BS 的 Polling 後，SS 送出值為 510bytes (Data + H + C) bytes 的 Bandwidth Request。

步驟二：當 BS 收到 SS 的 Bandwidth Request 後，BS Grant SS 512 bytes (Data + H + C + G) 的頻寬。

步驟三：SS 得到 BS 最新回報的 BER 報告，SS 利用 BER 推算最佳的 MTU 為 128 bytes，但因為此時收到配置上傳的頻寬是利用 MTU 為 1024 bytes 為參數所推算出，因此，在此同時，組 PDU 還是利用 MTU 等於 1024 bytes 為參數，去做組 PDU 的動作，但是 Bandwidth Request 則需要用 MTU 等於 128 bytes 為參數，去推算出實際要的頻寬。

步驟四：當組好 Burst，並將 Burst 送出後，修改組 PDU 的 MTU 為 128 bytes，並套用到後面做組 PDU 的參數。

由圖 3-5 可看出，本論文提出的方法，和一般沒有動態調整 MTU，傳送資料所花的時間是相同的，不會有部分資料延遲傳送的狀況，因此可克服因為動態調整成最佳 MTU 所造成的資料傳送延遲。



## 第四章 效能評估

本章節將就論文第三章中，所提出的方法作評估。利用固定的 MTU 和動態調整最佳 MTU 做比較討論，用來證明使用本論文提出的方法，對系統的有效頻寬使用率有明顯的改善。

### 4.1 固定 MTU 的頻寬使用率評估

由第三章我們提出計算有效頻寬使用率的方法

$$R = \frac{(1-B)^{8M} * (M - OH)}{M}$$

可以整理出，固定的 MTU 在不同的 BER 下，有效頻寬使用率的變化，如表 4-1 所示。

表4-1 MTU、BER和有效頻寬使用率統計表



MTU \ BER	128	512	1024	2047
10 <sup>-4</sup>	<b>81.8</b>	64.8	43.5	19.3
5*10 <sup>-4</sup>	<b>86.1</b>	79.5	65.6	43.8
10 <sup>-5</sup>	89.7	<b>93.7</b>	91.1	84.3
5*10 <sup>-5</sup>	90.1	<b>95.6</b>	94.9	91.6
10 <sup>-6</sup>	90.5	97.2	<b>98.0</b>	97.8

由表 4-1 可得知，當 BER 為 10<sup>-4</sup> 時，MTU 為 128 bytes 有較好的有效頻寬使用率，但當 BER 為 10<sup>-6</sup> 時，MTU 為 1024 bytes 有較好的有效頻寬使用率。我們無法找出一個固定的 MTU 能讓有效頻寬使用率在不同的 BER 狀態下，一直維持最好，因此，要達到最佳有效頻寬使用率，動態的調整成最

佳MTU是有必要的。

## 4.2 動態調整 MTU

由上節的分析得知，在不同的 BER 下，MTU 會影響有效頻寬使用率。利用本論文所提出的算式，可列出如圖 4-1 所示，BER、MTU 和有效頻寬使用率的關係。

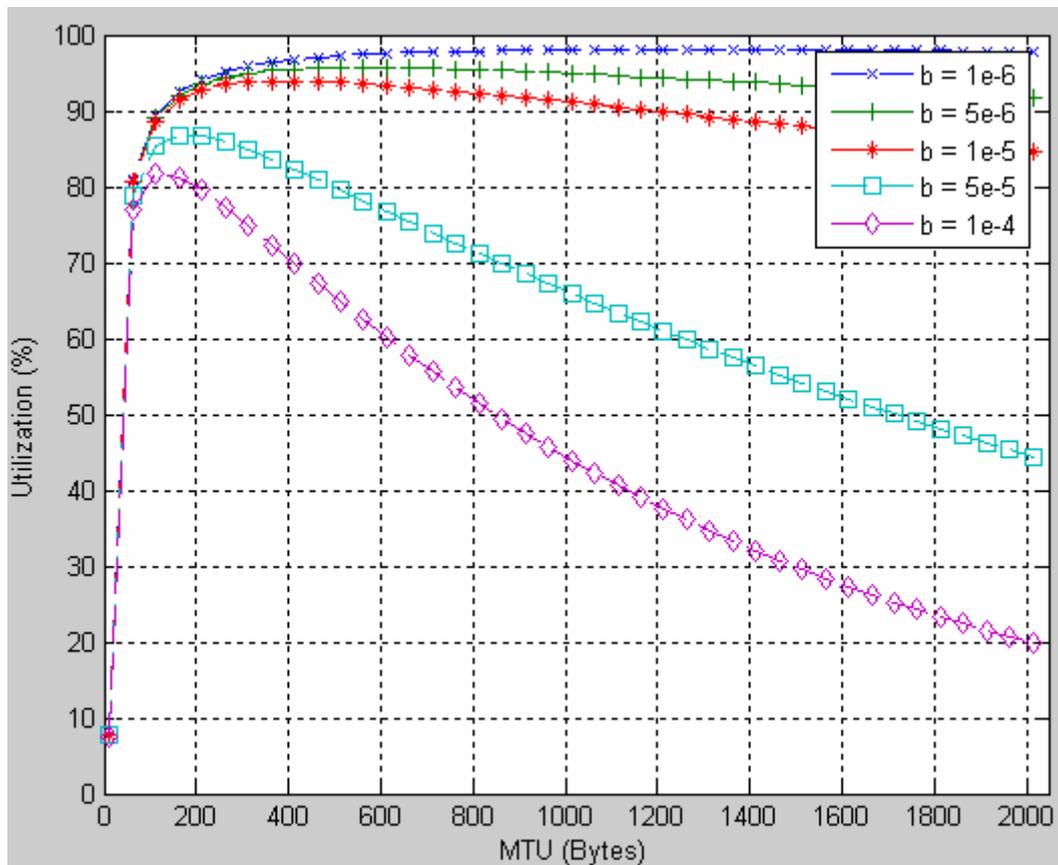


圖 4-1 個別 BER 在不同的 MTU 下的頻寬使用率

圖 4-2 為不同的 BER 下，能得到最佳頻寬使用率的最佳 MTU 表示圖。

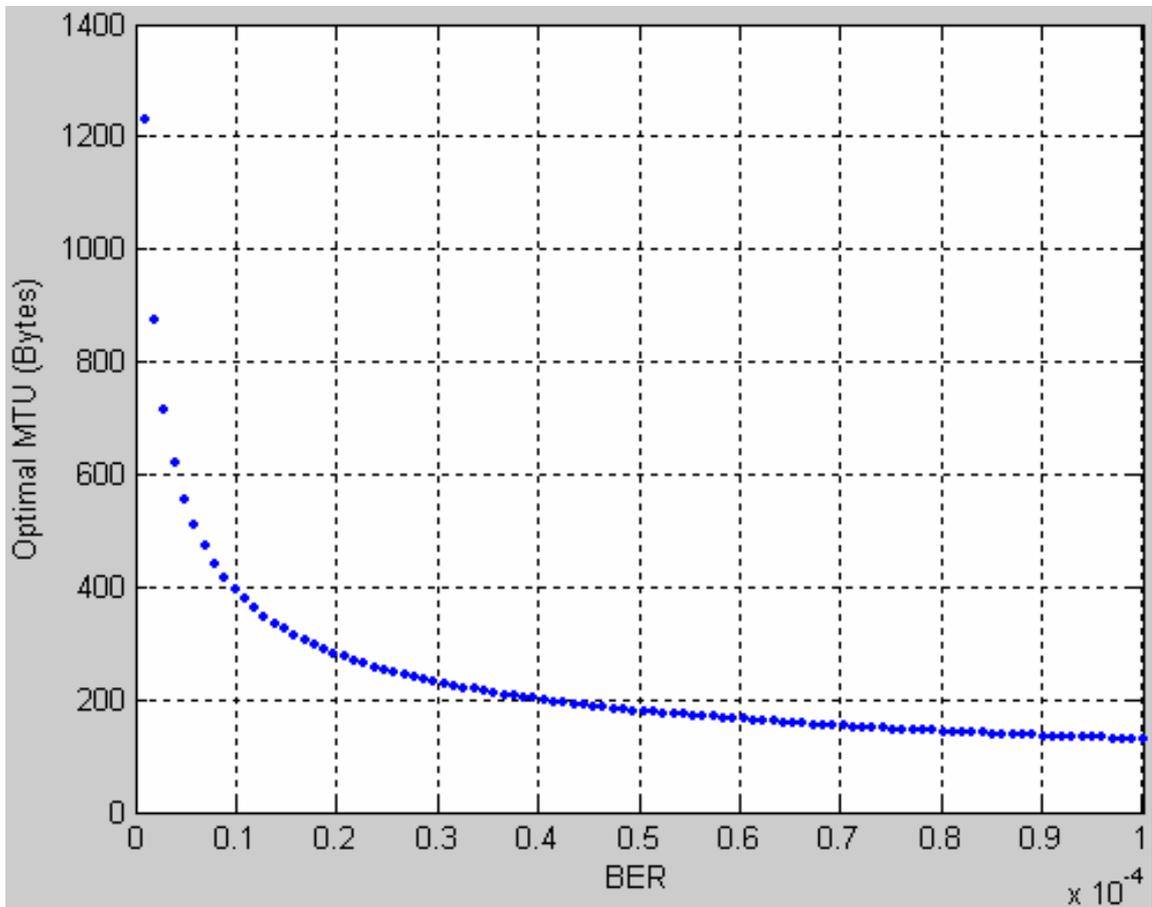


圖 4-2 最佳 MTU

圖 4-3 為 BER 由  $10^{-6}$  變為  $10^{-4}$ ，使用固定 MTU 及本論文提出的動態調整成最佳 MTU 機制的比較圖，我們用“--◇--”表示 MTU 固定為 128bytes 的線狀圖，“--x--”為 MTU 固定為 2047bytes 的線狀圖，“--+-”為動態調整成最佳 MTU 機制的線狀圖。當 BER 為  $10^{-6}$ ，動態調整 MTU 為 1231bytes，有最好的有效頻寬使用率。當 SS 收到 BS 傳來新的 BER report，根據 report 指示 BER 變為  $10^{-4}$  時，SS 會動態調整到最佳的 MTU (1231 bytes)，且 SS 依然維持在最好的有效頻寬使用率。由圖 4-3 可表

示出，動態調整成最佳MTU機制可使SS常維持在最好的有效頻寬使用率<sup>1</sup>。

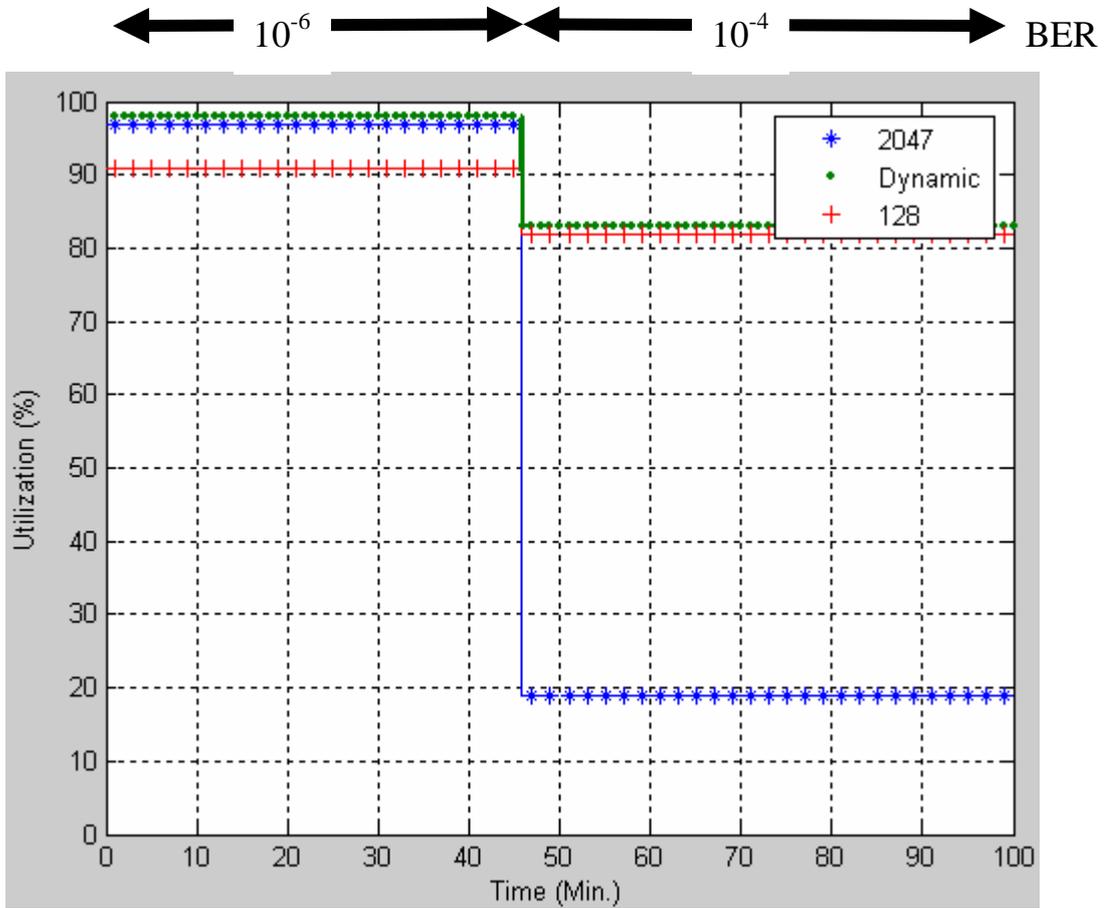


圖 4-3 變動 BER 的有效頻寬頻寬使用率

<sup>1</sup>當BER由  $10^{-6}$ 變為  $10^{-4}$ ，BS必須經過一段時間的收集，才能將正確的BER回報給SS，在BS回報之前，SS未能調到最佳的MTU，因此在這段時間SS無法維持在最好的有效頻寬使用率。而BER的收集不在本論文的討論範圍，故圖 4-3 將BS收集BER這段期間給於省略。

## 第五章結論與未來工作

### 5.1 結論

無線傳輸愈來愈普及，人們對它的期待也就愈來愈大，期望它能傳的又遠、又快、又穩。然而，面對此項艱辛任務的人，便是每位研發無線技術的人員。對他們而言，每一項技術的瓶頸，都是一種挑戰，也是一種機會。突破了技術瓶頸，便是多了一項可讓人們生活更便利，為企業帶來商機的機會。

本論文提出的方法，為 IEEE 802.16e 系統根據當時測出的 BER，動態調整成最佳 MTU，以期待當錯誤產生時，能夠丟棄較少的資料，並且保有最佳的頻寬使用率。而當 MTU 變小時，傳送相同資料的 Overhead 可能會增加，這會造成原本要在此 Frame 傳送出的資料，出現延遲的問題，此點，本論文也提出解決的一個方法，用以去除因修改 MTU 所造成的延遲。



### 5.2 未來工作

現行的無線網路技術應用，有其物理上的限制，若要使傳輸速度加快，就需要另外新的技術。但在此同時，現行的網路頻寬，是否能真的有效利用，也許也是一個值得令人深思的方向。

本論文提出利用偵測 BER 動態調整成最佳 MTU，進而提高有效頻寬使用率，但除了論文中提到的方法，我們也可用其他方法改善有效頻寬使用率，例如 SS 用最適當的調變技術[18][19]、SS 動態選擇最佳的 BS[20]或系統支援 HARQ 等，有很多方法都能將有限的頻寬做最佳的利用，而他們正等著我們去發掘。

論文中提到，因為動態調整成最佳 MTU，造成了資料延遲傳送的問題，我們在第三章提出了解決方法。但是，因為 IEEE 802.16e 並不能每次都精

準的要到所需的頻寬 (例如臨時增加的 Bandwidth Request header 或是被優先權較高的 Connection 搶走頻寬)，這都會造成資料延遲傳送，因此，好的 Scheduler[21][22][23]機制將是 IEEE 802.16e 一個重要的議題。

論文中提到動態修改 MTU 的方法，能有效提高頻寬使用率，但除此之外，利用動態修改 MTU 的法，我們也可以提出另外一個新的想法，那就是當 SS 要更換到較高效率的調變技術 (modulation) 的同時，我們可以利用動態修改 MTU 的方法，先將 MTU 變小，減少資料的損壞率，經過一段時間評估，若更新的調變技術不適合現在環境，則變回原來的調變技術，反之，若更新的調變技術適合現在環境，我們再將 MTU 修改到最佳值，這可使 SS 更快速的變換到較佳的調變技術。



## 參考文獻

- [1] IEEE Std IEEE 802.16™-2004 , IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.
- [2] IEEE Std IEEE 802.16™-2004/Cor 1-2005 , IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems -Corrigendum.
- [3] IEEE Std IEEE 802.16e™-2005 , IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.
- [4] C. Eklund, R. Marks and K. Stanwood, "IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access," IEEE Communications Magazine, Jun. 2002.
- [5] I. Tardy and O. Grondalen, "On the role of future high-frequency BFWA systems in broadband communication networks," IEEE Commun. Mag., vol. 43, Page(s): 138-144, Feb. 2005.
- [6] Ariton E. Xjafa, Shantanu kangude, and Xiaolin Lu, "MAC Performance of IEEE 802.16,".
- [7] Shamik Sengupta, Mainak Chatterjee, Samrat Ganguly, and Rauf Izmailov, "Exploiting MAC Flexibility in WiMAX for Media Streaming", Proceeding of IEEE International Symposium on a World of Wireless Mobile and Multimedia Network (WoQMoM'05), 0-7695-2342-0/05.
- [8] Hyung-Deug Bae, Nam-Hoon Park, "Network architectures for packet classification in wireless mobile network," Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th, Volume 7, Page(s): 4965 - 4968 , Sept. 2004.
- [9] D. Cho, J. Song, M. Kim, and K. Han, "Performance analysis of the IEEE 802.16 wireless metropolitan area network," in Proc. IEEE Distributed Frameworks for Multimedia Applications (DFMA2005), Page(s): 130-136. , Feb.2005.
- [10] H. Wang; W. Li; D.P. Agrawal; "Dynamic admission control and QoS for 802.16 wireless MAN," Wireless Telecommunications Symposium, 2005, 28-30, Page(s): 60 - 66, April 2005.
- [11] Seung-Eun Hong, Oh-Hyeong Kwon, "Considerations for VoIP Services in IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems," Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd, Volume 3, Page(s): 1226 - 1230, 2006.
- [12] Howon Lee, Taesoo Kwon, Dong-Ho Cho, "An efficient uplink scheduling algorithm for VoIP services in IEEE 802.16 BWA systems," Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th, Volume 5, Page(s): 3070 - 3074, Sept. 2004.
- [13] B. Bhandari, R. Kumar, and S. Maskara, "Uplink performance of the IEEE 802.16 medium access control (MAC) layer protocol," in Proc. IEEE Personal Wireless Communications (ICPWC2005), Page(s): 5-8, Jan. 2005.
- [14] GuoSong Chu, Deng Wang, Shunliang Mei, "A QoS architecture for the MAC protocol of IEEE 802.16 BWA system," Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions, IEEE 2002 International Conference on, Volume 1, Page(s): 435 - 439, July 2002.

- [15] Nal Woon Sung, Nam Hun Park, "Hardware/Software Codesign of TDMA MAC applied to IEEE 802.16 Subscriber Station ,".
- [16] Christian Hoymann, "Analysis and performance evaluation of the OFDM-based metropolitan area network IEEE 802.16," *Computer Networks*, Vol. 49, Page(s): 341-363, 2005.
- [17] Qingwen Liu, Xin Wang, and Georgios B. Giannakis, "A Cross-Layer Scheduling Algorithm With QoS Support in Wireless Networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 55, No. 3, Page(s): 839-847, May 2006.
- [18] Xiaoxin Qiu; K. Chawla, "On the performance of adaptive modulation in cellular systems", *Communications, IEEE Transactions on*, Volume 47, Issue 6, Page(s): 884 - 895 , June 1999.
- [19] M. Settembre, M. Puleri, S. Garritano, P. Testa, R. Albanese, M. Mancini , V. Lo Curto, "Performance analysis of an efficient packet-based IEEE 802.16 MAC supporting adaptive modulation and coding," *Computer Networks*, 2006 International Symposium on, Page(s): 11 - 16, June 2006.
- [20] M. Einhaus, O. Klein, "Performance Evaluation of a Basic OFDMA Scheduling Algorithm for Packet Data Transmissions," *Computers and Communications*, 2006. ISCC '06. Proceedings. 11th IEEE Symposium on, Page(s):695 - 702, June 2006.
- [21] K. Wongthavarawat and A. Ganz, "IEEE 802.16 based last mile broadband wireless military networks with quality of service support," in *Proc.IEEE Military Communications Conference (MILCOM2003)*, vol. 2, Page(s): 779-784, Oct. 2003.
- [22] M. Hawa and D. Petr, "Quality of service scheduling in cable and broadband wireless access systems," in *Proc. IEEE 10th International Workshop on Quality of Service (IWQoS2002)*, Page(s): 247-255, May 2002.
- [23] E. Hossain and V. Bhargava, "Link-level traffic scheduling for providing predictive QoS in wireless multimedia networks," *IEEE Trans. Multimedia*, vol. 6, Page(s): 199-217, Feb. 2004.