

WiMAX 概論

經歷多年的發展還有不確定性，一個可互通的無線寬頻標準化解決方案終於誕生了。經由產業界聯合組成的「全球微波存取互通介面標準」(Worldwide Interoperability for Microwave Access; WiMAX)聯盟，已經開始對寬頻無線產品進行互通性和符合標準進行認證。WiMAX 是基於 IEEE 802.16 任務群組所發展針對無線都會區域網路的標準，而現在這個標準也被 IEEE 和 ETSI HIPERMAN 組織所採用。在這一章中，我們針對這個新興的 WiMAX 寬頻無線解決方案，呈現了一個精確的技術概論。而這一章的目的，就是在我們做更進一步的細節探討之前，提供一個大方向的摘要。

這一章開始，我們先綜合 IEEE 802.16 任務群組的活動，還有它與 WiMAX 的關係。接著，我們討論 WiMAX 其特別顯著的特性，還有大致的討論一下 WiMAX 的實體層和 MAC 層的特徵。在服務方面的討論中，包括了品質服務、安全性和行動性，還有提出了一個網路架構作為參考。而我們在本章最後，針對 WiMAX 的預估效能做了一個簡短的討論。

2.1 IEEE 802.16 和 WiMAX 的背景

IEEE 802.16 任務群組在 1988 年所成立的，其目的是發展無線寬頻的空中介面標準。這個群組一開始著重發展於點對多點直視性，運作在

10GHz–66GHz 毫米波的頻帶的無線寬頻系統，其後來產生的標準就是完成在 2001 年 12 月，最原始的 802.16 標準。這個標準是基於單載波的「實體」(Physical; PHY)層，和具突衝的「分時多工」(Time Division Multiplexed; TDM)的 MAC 層。其中很多採用來處理無線傳輸中 MAC 層的概念，則是從已普及的 Cable Modem 標準-「纜線數據服務介面規格」(Data Over Cable Service Interface Specification; DOCSIS)中來的。

IEEE 802.16 任務群組接著公佈了這個標準的修訂版-802.16a，其中包括在 2GHz–11GHz 頻帶上的 NLOS 應用，還有其實體層使用「正交分頻多工」(Orthogonal Frequency Division Multiplexing; OFDM)技術。而在 MAC 層中，亦增加了支援「正交分頻多重存取」(Orthogonal Frequency Division Multiple Access; OFDMA)技術。更進一步的修訂版則完成在 2004 年，這個新的標準則稱作 IEEE 802.16-2004，不但取代了之前所公佈的版本，而且還成為第一個 WiMAX 的解決方案的基礎。這些早期的 WiMAX 解決方案基於 IEEE 802.16-2004，以用在定點的應用上為其目標，之後將這個稱作「定點式 WiMAX」(Fixed WiMAX)[1]。

在 2005 年 12 月，這個 IEEE 任務群組完成和通過了 IEEE 802.16e-2005，這個可以視為 IEEE 802.16-2004 標準的增訂版本，其中增加了行動性的支援。而這個 IEEE 802.16e-2005 則是 WiMAX 解決方案中為遊牧式和行動式的應用服務，其通常被稱作是「行動式 WiMAX」(Mobile WiMAX) [2]。

表 2.1 是一些 IEEE 802.16 標準基本特點的摘要。要注意的是，這些標準提供給在規劃設計上各式各樣不同的基本選項。例如，多種實體層的選擇如下：基於單載波的實體層，稱作「無線都會網路—單載波」(WirelessMAN-SCa)；基於 OFDM 的實體層，稱作「無線都會網路—OFDM」(WirelessMAN-OFDM)；而以 OFDMA 為實體層，稱作「無線都會網路—OFDMA」(WirelessMAN-OFDMA)。同樣地，MAC 層的架構、雙工和運作頻帶等也有很多不同的選擇。這些標準用來發展適合於各式各樣的應用和不同的佈建方案，因而提供了系統研發人員在規劃設計上的多種選擇。IEEE 802.16 的標準，與其說是單一的互通標準，實際上則是「一套標準」的集合。

表 2.1：IEEE 802.16 標準基本特點

	802.16	802.16-2004	802.16e-2005
狀態	2001 年 12 月完成	2004 年 6 月完成	2005 年 12 月完成
頻帶	10GHz-66GHz	2GHz-11GHz	定點式在 2GHz-11GHz; 行動式在 2GHz-6GHz
應用	定點直視性	定點非直視性	定點和行動的非直視性
MAC 架構	點對多點、網狀	點對多點、網狀	點對多點、網狀
傳輸方法	僅有單載波	單載波、256 OFDM 或 是 2,048 OFDM	單載波、256 OFDM 或是可 擴充式 OFDM 包括 128、 512、1,024 或是 2,048 次載 波
調變	QPSK、16 QAM、 64 QAM	QPSK、16 QAM、 64 QAM	QPSK、16 QAM、 64 QAM
略估數據 傳輸速率	32Mbps-134.4Mbps	1Mbps-75Mbps	1Mbps-75Mbps
多工	突衝 TDM/TDMA	突衝 TDM/TDMA/ OFDMA	突衝 TDM/TDMA/ OFDMA
雙工	TDD 和 FDD	TDD 和 FDD	TDD 和 FDD
通道頻寬	20MHz、25MHz、 28MHz	1.75MHz、3.5MHz、 7MHz、14MHz、 1.25MHz、5MHz、 10MHz、15MHz、 8.75MHz	1.75MHz、3.5MHz、7MHz、 14MHz、1.25MHz、5MHz、 10MHz、15MHz、8.75MHz
指定的空 中介面	WirelessMAN-SC	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN ¹	WirelessMAN-SCa WirelessMAN-OFDM WirelessMAN-OFDMA WirelessHUMAN1
WiMAX 的實作	無	256 - OFDM 的定點式 WiMAX	可擴充 OFDMA 的行動 WiMAX

而互通性的實際理由是，這個標準範圍需要縮小，並且需要定義較少的設計選擇給實作上來採用。WiMAX 聯盟為此目的已經定義的一些「系統描述」(System Profile)和「憑證內容」(Certification Profile)。WiMAX 聯

¹ 「無線高速免執照都會網路」(Wireless High-speed Unlicensed MAN; WirelessHUMAN)與 OFDM-PHY(實體層)相似，但是其是在免執照頻帶上做動態頻率選擇。

盟從 IEEE 802.16-2004，或 IEEE 802.16e-2005 的標準中選出一些功能特性來組成這個系統描述，其中定義了必要功能的需求組合，和選項的實體及 MAC 層的功能。要注意的是，WiMAX 的系統描述所列出特別的必要或選項的功能需求，可能與原來在 IEEE 中的標準不同。目前，WiMAX 聯盟有兩個不同的系統描述，一個是基於「IEEE 802.16-2004，OFDM PHY」的標準，稱作「定點式系統描述」，而另一個是基於「IEEE 802.16e-2005 可擴充 OFDMA PHY」，稱作「行動式系統描述」。而「憑證內容」則是用來定義系統描述的詳細例子，像是明訂出運作的頻率、通道的頻寬和雙工的模式等。而 WiMAX 的設備則是依據這個特定的憑證內容來給予認證。

WiMAX 聯盟更進一步定義了 5 種定點式的憑證內容，和 14 種行動式憑證內容(見表 2.2)。而到目前為止，已經有 2 個針對設備作認證的定點式 WiMAX 憑證內容定案了。憑證內容是使用了定點式系統描述，其定義 3.5GHz 系統運作在 3.5GHz 的通道上，其實體層是基於 IEEE 802.16-2004 OFDM，和 MAC 層使用點對多點。其中一個是使用了分頻雙工(FDD)而另一個是分時雙工(TDD)。

表 2.2：定點和行動 WiMAX 最初的憑證內容

頻帶編號	頻帶	通道頻寬	OFDM FFT 的大小	雙工	注意事項
定點式 WiMAX 憑證內容					
1	3.5GHz	3.5MHz	256	FDD	產品已通過認證
		3.5MHz	256	TDD	
		7MHz	256	FDD	
		7MHz	256	TDD	
2	5.8GHz	10MHz	256	TDD	
行動式 WiMAX 憑證內容					
1	2.3GHz-2.4GHz	5MHz	512	TDD	行動裝置(MS)必須支援兩種頻寬
		10MHz	1,024	TDD	
		8.75MHz	1,024	TDD	

頻帶編號	頻帶	通道頻寬	OFDM FFT 的大小	雙工	注意事項
2	2.305GHz-2.320GHz、 2.345GHz-2.360GHz	3.5MHz	512	TDD	
		5MHz	512	TDD	
		10MHz	1,024	TDD	
3	2.496GHz-2.69GHz	5MHz	512	TDD	行動裝置(MS)必須支援兩種頻寬
		10MHz	1,024	TDD	
4	3.3GHz-3.4GHz	5MHz	512	TDD	
		7MHz	1,024	TDD	
		10MHz	1,024	TDD	
5	3.4GHz-3.8GHz, 3.4GHz-3.6GHz, 3.6GHz-3.8GHz	5MHz	512	TDD	
		7MHz	1,024	TDD	
		10MHz	1,024	TDD	

隨著 IEEE 802.16e-2005 標準的完成，在 WiMAX 群組內的興趣，已經快速的將重心移往發展和認證基於新的標準的行動式 WiMAX²系統描述。所有的行動式 WiMAX 憑證內容都是使用可擴充 OFDMA 作為其實體層，而至少在一開始，所有行動性的憑證內容將會使用點對多點的 MAC 應用。另外也要注意的，現在所有的行動性憑證內容都只有基於分時雙工(TDD)。雖然分時雙工通常比較受到偏重，未來分頻雙工(FDD)可能也會應法規上的要求，而與某些頻帶配對使用。

在這一章的後半段，我們會把焦點集中於 WiMAX 本身。我們只討論 IEEE 802.16 家族的標準，而這些標準可能會對目前和未來 WiMAX 的憑證有很大的影響。應該注意的是，IEEE 802.16e-2004 和 IEEE 802.16-2005 的標準規格侷限在空中介面的控制層面(Control Plane)和資料層面(Data Plane)的部分，一些網路管理方面的定義則包括在 IEEE 802.16g 裏面。針對完整端對端的系統部份，當中特別有關行動性的內容，和多個額外端對端服務管理的方面都還需要明文訂定。這個任務正由 WiMAX 聯盟的「網路工作小組」(Network Working Group; NWG)所執行當中，而這個小組正

² 雖然僅提到行動式 WiMAX，實際上包括了定點式、遊牧式和行動式的使用方案。

在發展端對端的服務架構，和填補其他還有遺缺的部份。我們會在 2.6 小節中討論端對端的架構。

2.2 WiMAX 的獨特功能

WiMAX 的無線寬頻解決方案，無論是在佈建的選擇上，提供了一系列豐富且具彈性功能組合，還有可提供各種不同可能服務。以下是那些比較具獨特的功能：

以 OFDM 為基礎的實體層：WiMAX 的實體層(PHY)是利用正交分頻多工，一種對付多重路徑問題十分有效的方法，並且使得 WiMAX 可以在非直視性的條件下，仍可運作。OFDM 現在已是在寬頻無線網路中，公認的一種可以減輕多重路徑問題的方法。在第 4 章中會對 OFDM 有更詳細的概論。

非常高的峰值傳輸速率：WiMAX 可以支援非常高的峰值傳輸速率，事實上，當運作在一個 20MHz³寬的頻譜上，其實體層的峰值傳輸速率甚至可以高達 74Mbps。以一般以正常情況來說，使用一個 10MHz 寬的頻譜，且使用下行對上行比為 3:1 的分時雙工的方法，其實體層的峰值傳輸速率大約可達到下行和上行分別 25Mbps 和 6.7Mbps。而這些實體層的峰值傳輸速率，基本上是使用 64QAM 的調變，加上 5/6 的錯誤修正編碼比率來達成的。在非常良好的訊號條件下，更高的峰值傳輸速率，可以再藉由多重天線，和空間多工處理來進一步達成。

支援可變動的頻寬和傳輸速率：WiMAX 具有一個可以變動的實體層架構，其可以隨可得通道頻寬的大小，而輕鬆地調整其傳輸速率。這種可變動性是由 OFDMA 模式所支援的，其中「快速傅利葉轉換」(Fast Fourier Transform; FFT)數值的大小，就是基於可得通道頻寬的多寡來進行調整的。比方說，一個 WiMAX 的系統可能因通道頻寬為 1.25MHz、5MHz、或者是 10MHz，而分別使用 128-、512-或者是 1048-位元不同的 FFT。這

³ 最初 WiMAX 並沒有包括 20MHz 的支援，而文中的 74Mbps 則是上行/下行實驗層的傳輸速率的合併值。

種動態的調整，可能發生在當用戶漫遊在不同的網路間時，在不同的網路下就可能分配不同的頻寬。

可適性調變及編碼(Adaptive Modulation and Coding; AMC)：WiMAX 支援了多種的調變和「向前糾錯」(Forward Error Correction; FEC)的編碼方法，而且可以因通道條件的不同，而以不同用戶和不同訊框(Frame)為基礎來進行調整的一種方法。因此，AMC 是一個相當有效率的機制，其在因時間而變動的通道條件下，充份極大化其傳輸速率。基本上對這個機制採用了最高等級的調變和編碼方法，並且可以在接收器端上的信噪比及干擾比率中加以支援，如此一來，每個用戶在其各自的連線中可以得到很高的傳輸速率。AMC 會在第 6 章中再行討論。

鏈結層重傳機制：對於那些需要強大可靠性的連線，WiMAX 在鏈結層支援了「自動重傳請求」(Automatic Retransmission reQuests(ARQ)。具 ARQ 能力的連線則要求了接收器端在每次收到一個封包都要回應，如果對某個封包沒有回應，則被視為遺失而重新傳送。WiMAX 也以選擇是否支援混合式 ARQ，這是一個 FEC 和 ARQ 的有效綜合體。

支援分時雙工(TDD)和分頻雙工(FDD)：IEEE 802.16-2004 和 IEEE 802.16e-2005 都支援分時雙工和分頻雙工，另外也支援半雙工的 FDD，其適合低成本系統的建設。大部分實際建設上會偏愛採用 TDD，因為其有下列的優點：(1)可以彈性選擇上行對下行的數據傳輸速率的比例；(2)能夠善用通道的可逆性；(3)可以用來建立不成對的頻譜；和(4)相對較不複雜的接收器的設計。所有最初的 WiMAX 的憑證內容都是基於 TDD，除了在 3.5GHz 頻帶上的兩個定點式 WiMAX 憑證內容。

正交分頻多重存取(Orthogonal Frequency Division Multiple Access; OFDMA)：行動式 WiMAX 採用了 OFDM 當作多重存取的技術，因為如此，不同的用戶可以分配其不同組合的 OFDM 調音。如同在第 6 章中的討論，OFDMA 促進了頻率分集和多用戶分集的利用，而大大的增進了系統的容量。

動態彈性分配每位用戶的資源：上行和下行兩路的資源分配都是由基地台中的排程機制所控制。當使用突衝(Burst)的分時多工(TDM)的方法

時，系統的容量是由所有用戶依照其不同的需求所共同分享。而當使用 OFDMA-PHY 模式時，多工是由頻率的部份所額外達成的，以靠著分配了不同的 OFDM 次載波組合給不同的用戶。當使用「先進式天線系統」(Advanced Antenna System; AAS)這個選項時，資源也可用空間領域來作分配。在標準中允許了頻寬資源以時間、頻率和空間的方式來分配，並且以一種彈性的機制來達成以個別訊框來進行資源分配。

先進式天線技術的支援：WiMAX 的解決方案有很多深植實體層的設計，所以可以使用像「波束合成」(Beamforming)、「空時碼」(Space-time coding)和「空間多工」(Spatial multiplexing)處理等多重天線的技術。利用在發射器和(或)接收器上佈建多重天線，這些方法都可以用來增加整個的系統容量和頻譜效益。在第 5 章中呈現了多種多重天線技術更詳細的概論。

品質服務的支援：WiMAX 的 MAC 層是一個「連線導向」(connection-oriented)的架構，其用以支援各式各樣的應用，也包括了語音和多媒體的服務。系統提供了固定傳輸速率、變動傳輸速率、即時、非即時資料、還有「實際可傳送之最大速率」(best-effort)資料訊務等支援。WiMAX 的 MAC 層是設計來支援大量的用戶，而且每個用戶終端又可以有多個連線且都有不同的 QoS 需求。

完善的安全性：WiMAX 支援了功能強大的加密機制，其使用了「新一代加密標準」(Advanced Encryption Standard; AES)，還有完善的隱私權保護和金鑰管理協定。系統亦提供了一個基於「可擴充式驗證協定」(Extensible Authentication Protocol; EAP)且非常有彈性的認證架構，其允許用戶使用不同驗證身份的方法，包括了使用者名稱/密碼、數位憑證、和智慧晶片卡。

行動性的支援：行動式 WiMAX 的系統變種有一種機制，來支援安全且無縫隙的交遞，提供了像 VoIP 這種具容許延遲和完全具有行動性的應用服務。系統也內建支援省電機制，使得手持的用戶裝置電池壽命可以延續較長。另外實體層的增強包括了更頻繁的通道估測、上行鏈路的次訊息通道化和電源控制，都是特別用來支援行動應用服務。

基於 IP 的架構：WiMAX 聯盟定義了一個供作參考的網路架構，其是以全 IP 平台為基礎。所有端對端的服務是在 IP 的架構下所提供，就是所有端對端間的傳輸、QoS、對話連線管理、安全性和行動性是靠著 IP 相關的協議所達成。倚賴 IP 可以使 WiMAX 可以享受 IP 處理不斷下降的成本，使 WiMAX 可以容易與其他網路整合，還有多加利用現存豐富的 IP 應用程式的研發生態。

2.3 WiMAX 的實體層

WiMAX 的實體層，是基於「正交分頻多工」(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)。OFDM 是一種傳輸的選擇方法，它使得高速的數據、視訊、和多媒體通訊得以實現。除了 WiMAX 之外，OFDM 也被其他不同的商用寬頻系統所採用，包括了 DSL、Wi-Fi、「手持式數位視訊廣播」(Digital Video Broadcast-Handheld; DVB-H)和 MediaFLO。OFDM 是用一種精緻而又有效率的方法，其可在非直視性或多重路徑無線電波的環境下，來達成的高速數據傳輸速率。在這一節，我們涵蓋了基本的 OFDM，和提供了 WiMAX 實體層一個概要。在第 8 章中則會有更多有關 WiMAX PHY 的討論。

2.3.1 OFDM 的基本原理

OFDM 是屬於一個稱作「多載波調變」(Multicarrier Modulation)的傳輸方法的家族的一員，其基本的概念是把一個高速傳輸速率的數據串流，切割成許多平行且較低速的傳輸速率串流，並且把每一個次串流調變到不同的載波上一通常稱作次載波(Subcarrier)或調音(Tone)。多載波調變的方法消除了符碼間干擾，或把符碼間干擾(ISI)減低至最小。因為它使符碼的時間變得夠長，所以通道導致的延遲變得只是符碼時間的一小部份(一般小於 10%)而已，其中延遲展延(Delay Spread)是一個測量無線通道的好方法⁴。因此，在高速數據傳輸速率的系統中，其符碼時間較小，正是與數據傳輸速率成反比，因將其資料串流分割成許多平行的串流以增加每個串流的符碼時間，以致於延遲展延只是符碼時間的一小部份而已。

⁴ 符碼時間會在第 3 章中討論。

在多載波調變中，OFDM 是其中一種具有頻譜效益的版本，之中其次載波是經過特別的選擇，所以他們在符碼時間中互相之間都呈正交。如此一來，就不用另外使用不重疊的次載波通道來消除載波間的干擾。挑選的第一個次載波頻率，要是符碼週期中的一個整數周波，並且要設定相鄰的次載波之間的時間隔(次載波的頻寬)使其 $B_{SC} = B/L$ ，其中 B 是「標稱頻寬」(Nominal Bandwidth；等於數據傳輸速率)，而 L 是次載波的數量，最後確定所有的調音在符碼週期間都是互相呈正交。這個顯示 OFDM 的訊號是與一次的數據順序區塊(Data Sequence Block)所分出來的 L 數的「反轉離散傅利葉轉換」(Inverse Discrete Fourier Transform；IDFT)相等。這使得實作 OFDM 極為容易，只要在發射器和接收器上分別以離散時間使用「反轉快速傅利葉轉換」(IFFT)和「快速傅利葉轉換」(FFT)就可以了⁵。

為了要完全消除 ISI，「保護區間」(Guard Interval)會被用在 OFDM 的符碼之間。藉由使用保護區間大於預期多重路徑的延遲展延，則 ISI 可以完全消除。但是，加入一個保護區間就是意謂著功率的浪費和降低頻寬的效益，而功率浪費的多寡則是看 OFDM 符碼的保護時間部份有多長而定。因此，愈大的符碼週期(在一定的數據傳輸速率下，就是需要愈多的次載波)，不但損失較少的功率，且比較具頻寬效益。在 OFDM 中 FFT 大小的設計，應該小心的在多重路徑的保護、都普勒位移、和設計成本和複雜度之間來作選擇和權衡。在一定的頻寬下，選擇一個大的 FFT 數值可以減少次載波的時間隔和增加符碼時間，這個也比較容易保護對抗多重路徑的延遲展延。然而，由於在行動應用中的都普勒展延，減少次載波的時間隔也會使系統較容易遭受載波間的干擾。所以在 OFDM 的設計中需要謹慎的權衡延遲展延和都普勒展延的相競影響。在第 4 章提供了 OFDM 更詳細嚴謹的探討。

2.3.2 OFDM 的贊成與反對

OFDM 與其他同樣是高速傳輸解決方案，相較之下有著下列優點。

- **降低計算複雜度：**OFDM 可以容易的使用 FFT/IFFT 來實作，增加的數據傳輸速率或是頻寬，其所需的處理能力只比線性增加了一

⁵ 快速傅利葉轉換(FFT)是一種很有效率計算出「離散傅利葉轉換」(Discrete Fourier Transform; DFT)的方法。

點而已。OFDM 的計算複雜度可以 $O(B \log BT_m)$ 表示，其中 B 表示頻寬，而 T_m 則是延遲展延。這個複雜度遠低於那些標準的以等化為基礎的系統，其複雜度為 $O(B^2 T_m)$ 。

- **在過度延遲下減緩效能降低的速度：**OFDM 系統即使遭遇延遲展延超過了預設的數值，也只會逐步緩慢地降低其效能。較大的編碼和較的少數量的群集(constellation)則可以對延遲展延的情形，提供較健全的反饋比率。換句話說，OFDM 非常適用於可適性調變及編碼中，其允許系統在有限的通道條件下，還可以表現最好。相較下，當單載波系統遭遇到延遲展延超過了等化器上的數值，由於錯誤增值(Error Propagation)而急速下降低其效能。
- **頻率分集の利用：**OFDM 對頻率領域中次載波間使用了編碼和交錯(interleaving)的技巧，用以對抗當部份傳輸頻譜遭受嚴重的衰退，而導致的突衝錯誤，其優異性不言而喻。實際上，WiMAX 定義了次載波排列，可以讓系統來加以利用。
- **使用多重存取方法：**OFDM 可以當作多重存取的方法來使用，其中不同的調音可以分割給多個用戶。而這個就是行動式 WiMAX 中所使用的 OFDMA，這個方法也提供能力，來給予通道分配一個良好的粒度(Granularity)。在時間變化變項相對緩慢的通道中，這個可能可以相當大程度的增強系統容量，根據不同次載波的信噪比率，每個用戶的數據傳輸速率則會自動調適。
- **對抗窄頻和干擾的優異能力：**OFDM 有對抗窄頻和干擾相對優異的能力，因為干擾影響的只是次載次中的很小部份。
- **適合於互相密合解調：**在 OFDM 中相對容易來進行試探性的通道估測，因其較具省電效能所以特別適合「互相密合解調」(Coherent Demodulation)的方案。

儘管有上述的優點，OFDM 技術也面臨了一些挑戰。首先問題來自於 OFDM 訊號在高峰值數據傳輸速率比率下，會引起非線性和片段的扭曲，這會導致沒有效率的功率消耗，而必須設法解決。其次，OFDM 的訊號較容易受「相位雜訊」(Phase Noise)和「頻率散射」(Frequency Dispersion)的影響，所以在設計上也要設法減輕這個問題，因為這個對於精確的頻率

同步也非常重要。在第 4 章中有很好的概述，其針對了許多克服這些挑戰的解決方案。

2.3.3 WiMAX 中 OFDM 的相關參數

如同之前所述，定點式和行動式的 WiMAX 之間對於 OFDM 實體層的實作上有些許的不同。定點式 WiMAX 是基於 IEEE 802.16-2004 的標準，使用了 256 FFT 的 OFDM 實體層。而行動式 WiMAX 則是基於 IEEE802.16e-2005⁶ 的標準，使用了可擴充 OFDMA 的實體層。在行動式 WiMAX 中，它的 FFT 值可以在 128 位元到 2,048 位元之間變動。

表 2.3 中顯示了 OFDM-PHY 和 OFDMA-PHY 的相關參數。在這個表中只呈現一小部份有可能用來實際佈建的參數，而不是將所有可能的參數都列進來。

表 2.3：WiMAX 中使用的 OFDM 參數

參數	定點式 WiMAX OFDM-PHY	行動式 WiMAX OFDMA-PHY ⁷			
		128	512	1,024	2,048
FFT 大小	256	128	512	1,024	2,048
使用數據次載波的數量 ⁸	192	72	360	720	1,440
前導次載波數量	8	12	60	120	240
空/保護頻帶次載波數量	56	44	92	184	368
循環字首或保護時間(Tg/Tb)		1/12、1/16、1/8、1/4			
超取樣率(Fs/BW)	視頻寬而定: 256 的 OFDM 為 7/6 · 1.75MHz 的倍數為 8/7，另外 1.25MHz、1.5MHz、2MHz 或 2.75MHz 的倍數則為 28/25。				
通道頻寬(MHz)	3.5	1.25	5	10	20
次載波頻率間隔(KHz)	15.625	10.94			

⁶ 雖然可擴充 OFDMA 方法在這裏是指行動 WiMAX，它也可以用來使用在定點式，遊牧式和行動式的應用。

⁷ 粗體的數值對應到行動式 WiMAX 中最初的系統描述。

⁸ 行動式 WiMAX 中所列出的次載波分配是針對「部份使用次載波」(Partial Usage of Subcarrier; PUSC)中的下行鏈路而言。

參數	定點式 WiMAX OFDM-PHY	行動式 WiMAX OFDMA-PHY ⁷
有效符碼時間(μ s)	64	91.4
保護時間假設為 12.5% (μ s)	8	11.4
OFDM 符碼時間長度(μ s)	72	102.9
在 5ms 訊框中 OFDM 符碼的數量	69	48.0

定點式 WiMAX 中的 OFDM-PHY: 在這個版本中的 FFT 數值是固定在 256 個，其中 192 個次載波用來傳送資料，8 個前導次載波用來作為通道估測和同步的目的，而剩下的次載波則用來當作保護頻帶⁹。因其 FFT 是固定的，所以其次載波的間隔會因通道頻寬而變動。當使用較大的頻寬，則其次載波間隔也會增大，而且其符碼時間則相對減少。而符碼時間的減少意謂著必須分配較長的保護時間來克服延遲展延的問題。如表 2.3 所示，WiMAX 允許很大的保護時間的範圍，以供系統規劃設計師在頻譜效益和延遲展延的穩固性之間，做出適當的斟酌考量。為了使延遲展延的穩固性最大化，使用 25% 的保護時間，在 3.5MHz 通道上運作的可以容忍高達 16μ s 的延遲展延，而在 7MHz 通道上可高達 8μ s。為了相對有益於多重路徑通道，而額外的保護時間大約會減少 3% 左右。

行動式 WiMAX 中的 OFDMA-PHY: 在行動式 WiMAX 中，其 FFT 可以在 128 到 2,048 之間變動。這裏，當可得的頻寬增加，FFT 的值也會增加，而每個次載波間隔還是維持在 10.94KHz。如此一來，OFDM 的符碼時間(基本資源單位)長度還是維持固定不變，因此調整這個數值將不會對上面的階層有太大的影響。而這個可調整的設計也可以使成本維持較為低廉。當運作在定點式和行動式混合的環境下，選擇 10.94KHz 的次載波間隔，可以在滿足延遲展延和都普勒展延的需求之間達到非常好的平衡。當運作在 3.5GHz 頻帶上，這個次載波間隔可以支援延遲展延數值高達 20μ s，還可支援車行速度可高達 125 kmph。使用 10.94KHz 的次載波間隔則意指頻道頻寬在 1.25MHz、5MHz、10MHz 和 20MHz 時，其 FFT 數值則分別為 128、512、1,024 和 2,048。然而，應該注意的是行動式寬頻中，也可以包括了其他的頻帶寬度的憑證內容。例如說，一個與 WiBro 相容的憑證內

⁹ 因為 FFT 的大小只可以相等於 $2n$ 的數值，虛擬的次載波可以用來填充在使用中的次載波的左右兩邊。

容則會包括使用 8.75MHz 的通道頻寬，和 1,024 的 FFT。而這樣一來，很明顯的需要一個不同的次載波間隔，所以將不會有相同可擴充的特性。

2.3.4 OFDMA 的次通道化

這些可得的次載波可以進一步再分成幾個次載波群組，又可稱作「次通道」(Subchannel)。定點式的 WiMAX 基於 OFDM-PHY，則允許在上行鏈路中作有限度的次通道化組合。在標準中定義了 16 個次通道，也就是可以用來指配給用戶台(SS)在上行鏈路中 1、2、4、8 和或全部的次通道。在定點式 WiMAX 中的上行鏈路次通道化，允許用戶台只用一小部份(最小為 1/16)的基地台所分配的頻寬來進行傳輸。如此一來改善了「鏈路預算」(Link Budget)，其用來增加範圍內的系統效能和/或可以延長用戶台的電池壽命。一個 1/16 的次通道化的係數，則可以提供 12dB 的鏈路預算的改進。

然而，基於 OFDMA-PHY 的行動式 WiMAX 則允許上行和下行鏈路的次通道化，所以次通道成了基地台分配資源時，最小的頻率資源單位。因此，不同的次通道可能分配給不同的用戶當作一種多重存取的機制。這種類型的多重存取的方法就稱作「正交分頻多重存取」(Orthogonal Frequency Division Multiple Access; OFDMA)，而這也是使行動式 WiMAX PHY 出色的技術。

次通道可能由接連的次載波，或是近似隨機分佈在這個頻帶內的任何次載波所組成。次通道是由分散的次載波所組成，進一步也提供了頻率的分集，而對行動性的應用特別有幫助。WiMAX 基於不同分佈的載波，定義了一些對上行和下行鏈路的次通道化方法。一個是稱作「部份使用次載波」(Partial Usage of Subcarrier; PUSC)，這個是在行動式 WiMAX 的建設中必須要包括的要件之一。最初 WiMAX 的憑證內容定義了當運作 PUSC 在一個 5MHz 的頻寬條件下，分別有 15 和 17 個次通道給下行和上行鏈路來使用。

這個基於連續次載波的 WiMAX 次通道化方法，稱作頻帶的「可適性調變及編碼」(Adaptive Modulation and Coding; AMC)。雖然，如此一來會失去頻率分集的優點，但是頻帶的 AMC 使系統規劃設計師可以利用用戶分集，其依據用戶回應的頻率而分配給予其次通道。藉著使用多用戶分

集，且同時系統可以提供每個用戶一個可以強大其 SINR 接收的次通道。就可以給整個系統提升相當大程度的效能。一般來說，連續的次通道比較適合定點式和較低行動性的應用。

2.3.5 槽和訊框的架構

WiMAX 的實體層也要負責空中介面中槽(Slot)的分配和訊框的組成(Framing)。「槽」是最小的時間-頻率資源，其是 WiMAX 系統用來分配給特定的鏈結。每個槽包含了一個次通道，其中可能有一個、二個或三個 OFDM 符碼，視其使用的次通道化的方法而定。一連串的槽，其分配給一個特定用戶稱作該用戶的「資料區域」(Data Region)。排程機制則可以用來分配資料區域給不同用戶，依據需要、QoS 的需求和通道的條件。

圖 2.1 表示了一個運作在 TDD 中的 OFDMA 和 OFDM 的訊框(Frame)，其訊框又可分為兩種次訊框(Subframe):一個下行的訊框緊跟著一個上行的訊框而其中有一小段的保護區間。這個下行對上行的次訊框比率可以從 3:1 到 1:1 不等，以支援不同的訊務情況。WiMAX 也支援分頻雙工(FDD)，其中的訊框結構不變，但是下行和上行則同時經由不同的載波傳送。現在則有些定點式的 WiMAX 系統，也選擇使用 FDD。不過大部份的 WiMAX 的建設，因為 TDD 有眾多優點，所以還是比較可能採用 TDD 的模式。TDD 除了允許更具彈性的上下行鏈路之間的頻寬分享，不需要成對的頻譜，且其中的「可逆通道」(Reciprocal Channel)可以用來進行空間資料處理，還有比較簡單的接收器的設計。而 TDD 比較不利的是，其必須在多個基地台之間進行同步，以確保一個免於干擾的環境。然而，在法規上偏好成對頻帶分配，可能會強迫電信業者得佈建 FDD 模式的 WiMAX。

如同圖 2.1 中所示，下行鏈路中的次訊框開始是一個「下行前置碼」(Downlink Preamble)，其由實體層的一些程序所使用，如時間和頻率的同步，還有初始的通道估測等用途。下行前置碼接下來是一個「訊框控制表頭」(Frame Control Header; FCH)，其提供了訊框的組態資訊，如 MAP 訊息長度，調變和編碼的方法和可用的次載波等資訊。多個用戶則分配在同一個訊框的資料區域內，而這些分配則清楚標明為上行和下行 MAP 訊息(DL-MAP 和 UL-MAP)，然後跟著下行次訊框中的 FCH 之後廣播出去。MAP 訊息則包括了每個用戶的突衝設定(Burst Profile)，其定義了鏈路中的調變

和編碼方法。因為 MAP 中包含了重要的資訊，以供系統能隨時找到每個用戶，所以這些資訊通常會由非常可靠的鏈路所傳送出去，像是具有 1/2 編碼比率和重複碼的 BPSK。雖然，MAP 訊息是一種很講究的方法，由基地台以每個訊框的方式，通知其所有分配的用戶和其突衝設定。但是，特別是在有大量的用戶，傳送著很小的封包(如 VoIP)，而每個封包都又需要作特別的分配設定，這一來則非常大的程度增加了額外的傳輸。為了減輕這個額外傳輸的問題，行動式 WiMAX 系統可以有選擇性的使用多種次 MAP 訊息，其用來以較高速率地傳送專用的控制訊息給不同用戶，並基於用戶個別的 SINR 情況。而廣播 MAP 訊息也可能加以壓縮以增加效率。

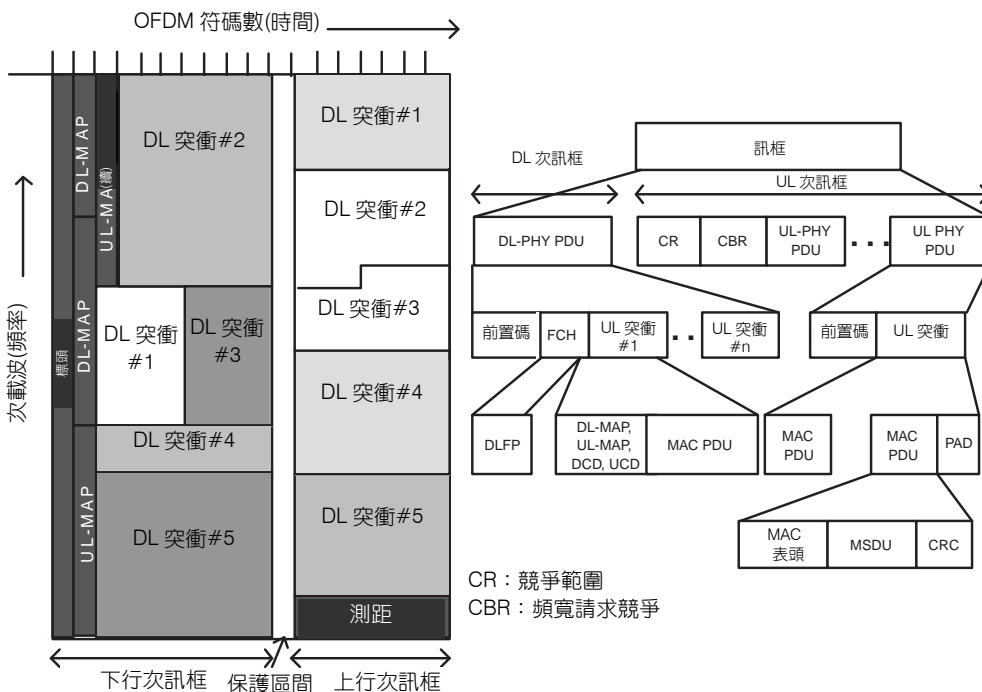


圖 2.1：行動式 WiMAX 中 TDD 的訊框結構

就以多個用戶和其封包是如何以多工的方式置入在單一個訊框中來說，WiMAX 可以說是十分的具有彈性。就單一個下行訊框中，可能包含了多種不同大小和種類的突衝，其用來傳送資料給數個用戶。每個訊框的大小也從 2ms 到 20ms 不一，而且每個突衝可以包含由上層所傳來多個連

接在一起的固定或不定的封包或封包片段。不過話說回來，至少從一開始，WiMAX 設備將只可以支援 5ms 的訊框。

而上行次訊框是由數個不同用戶的上行突衝所組成的。一部份的上行次訊框特別撥出來給不同目的且具競爭性質的存取方法所使用。這種次訊框主要是用來當作一種測距通道，當一開始進入網路時，還有之後定期地執行閉鎖迴路的頻率、時間和功率調整。這個測距通道也可以用來讓用戶台(SS)或行動台(MS)¹⁰ 做上行頻寬的請求。還有，實際可傳送之最大速率(Best-effort)的資料，可能會由這種具競爭性質的通道來傳送，特別是當要傳送的資料太少了而不特別請求一個專用通道。除了測距通道和訊務突衝之外，上行的次訊框還額外有一個「通道品質指示通道」(Channel-Quality Indicator Channe; CQICH)用來讓用戶台回應通道品質的資訊，其可以讓基地台的排程機制所加以利用。另一個回應(Acknowledgment; ACK)通道則用來給用戶台確認下行鏈路的回應封包。

為了處理時間的變異，WiMAX 中有一個選項其支援了更頻繁的前置碼重複。在上行鏈路中，一個短的前置碼，稱作中置碼(midambles)，其可能用在 8、16 或 32 符碼之後；而在下行鏈路中，一個短的前置碼能插入每個突衝的開始部份。據估計，每 10 個符碼加入一個中置碼，則具有 150kmph 的行動能力。

2.3.6 WiMAX 中的可適性調變和編碼

WiMAX 支援多種調變和編碼的方法，並且允許以每個連線中的每個突衝而進行改變的方法。而使用「通道品質反饋指示」(Channel Quality Feedback Indicator)，用戶行動台可提供給基地台有關下行鏈路通道品質的反饋。至於上行方向，基地台可以由所接受到的訊號來估測其通道品質。如此一來，基地台中排程機制可以將一個用戶上下行鏈路的通道品質列入考慮，而分配該用戶一種調變和編碼的方法，相對於其可得的信噪比率而達成最高的傳輸流量。可適性調變和編碼相當大程度的增加了整個系統容

¹⁰ 行動式 WiMAX 的用戶終端的稱作行動台(MS)，而定點式 WiMAX 的則稱作用戶台(SS)。之後，為了簡化，我們用 MS 來表示兩者。

量，且其允許即時對每個連線在傳輸流量和品質之間作出動態調整。這個議題則在第 6 章中有更詳盡的探討。

表 2.4 列中了 WiMAX 所支援的各種調變和編碼方法，在定點式和行動式 WiMAX 的下行鏈路中有 QPSK、16QAM 和 64QAM 三種必備的方法，而 64QAM 則為上行鏈路中的可選方法。其中使用「迴旋碼」(Convolutional Code)的 FEC 編碼則為必備功能。而迴旋碼又加入了 OFDM-PHY 下行鏈路中的「外部里德-所羅門編碼」(Outer Reed-Solomon Code)。在標準中也支援了「渦輪碼」(Turbo Code)和不同編碼比率的「低密度同位檢查碼」(Low-Density Parity Check; LDPC)為其選項。在 WiMAX 中的有關突衝的憑證內容就有總共高達 52 種調變和編碼方法的組合，而更多的有關突衝的憑證內容的細節將包括在第 8 章中。

表 2.4：WiMAX 支援的調變和編碼

	下行鏈路	上行鏈路
調變	必備：BPSK、QPSK、16 QAM、64 QAM; OFDMA-PHY 選項：BPSK	必備：BPSK、QPSK、16 QAM; 選項：64 QAM
編碼	必備：1/2、2/3、3/4、5/6 比率的迴旋碼; 選項：1/2、2/3、3/4、5/6 比率的迴旋渦輪 碼; 1/2、1/3、1/6 比率的重複碼，LDPC， 和 OFDM-PHY 的 RS-Codes	必備：1/2、2/3、3/4、5/6 比率的迴旋碼; 選項：1/2、2/3、3/4、5/6 比率的迴旋渦輪 碼; 1/2、1/3、1/6 比率的重複碼和 LDPC

2.3.7 實體層的數據傳輸速率

因為 WiMAX 中的實體層十分具有彈性，數據傳輸速率效能則依運作的參數不同而改變。通道頻寬和所使用的調變和編碼的參數，則對於實體層的數據傳輸速率有很大程度影響。其他像次通道的數量、OFDM 保護時間、超取樣率等參數也同樣有相當的影響。圖 2.5 列出了在不同通道頻寬，和不一樣的調變和編碼方法下的實體層數據傳輸速率。表中所示之傳輸速率是實體層數據傳輸速率的總合，是在 TDD 中以 3:1 下行對上行頻寬比率的假設下，由一個扇形區塊中所有用戶所共享。這裡的計算是基於 5ms 的訊框大小、額外 12.5% 的 OFDM 保護區間、和 PUSC 次載波排列方法所得來的，同時又假設所有可用的 OFDM 資料符碼都可出現在用戶的訊務之中，除了當中一個符碼用來當作下行訊框中的額外消耗(Overhead)。這裡

所呈現的數據，並沒有包含在發射器或接收器上使用多重天線的空間多工處理，如果使用了的話，則可以在多重路徑的通道中，進一步增加峰值傳輸速率。

表 2.5：不同通道頻寬的實體層數據傳輸速率

通道頻寬	3.5MHz		1.25MHz		5MHz		10MHz		8.75MHz ¹¹	
PHY 模式	256 OFDM		128 OFDMA		512 OFDMA		1,024 OFDMA		1,024 OFDMA	
超取樣率	8/7		28/25		28/25		28/25		28/25	
調變和編碼比率	實體層數據傳輸速率(Kbps)									
	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL	DL	UL
BPSK,1/2	946	326	Not applicable							
QPSK,1/2	1,882	653	504	154	2,520	653	5,040	1,344	4,464	1,120
QPSK,3/4	2,822	979	756	230	3,780	979	7,560	2,016	6,696	1,680
16QAM,1/2	3,763	1,306	1,008	307	5,040	1,306	10,080	2,688	8,928	2,240
16 QAM, 3/4	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032	13,392	3,360
64 QAM,1/2	5,645	1,958	1,512	461	7,560	1,958	15,120	4,032	13,392	3,360
64 QAM, 2/3	7,526	2,611	2,016	614	10,080	2,611	20,160	5,376	17,856	4,480
64 QAM,3/4	8,467	2,938	2,268	691	11,340	2,938	22,680	6,048	20,088	5,040
64 QAM,5/6	9,408	3,264	2,520	768	12,600	3,264	25,200	6,720	22,320	5,600

2.4 MAC 層概論

WiMAX 中的 MAC 層的主要任務，是在上層的傳輸層和下面的實體層之間充作一個介面。MAC 層從上層接收到封包，這封包則稱作「MAC 服務資料單元」(MAC Service Data Unit; MSDUs)，再將其放入「MAC 協議資料單元」(MAC Protocol Data Unit; MPDUs)中後再傳送到空中。相同的在接收的部份，MAC 層則進行相反的步驟。在 IEEE 802.16-2004 和 IEEE 802.16e-2005 的標準中，MAC 的設計包括了「收斂次層」(Convergence

¹¹ 在南韓佈建的 WiBro 版本。

Sublayer)，其用來與多種不同的上層的協議，如 ATM、TDM 語音，乙太網路、IP 或甚至將來可能的協議來進行介接。由於 IP 和乙太網路主宰了整個產業，所以 WiMAX 聯盟這次決定支援 IP 和乙太網路。除此之外，亦提供了與上層之間的更佳匹配，而且收斂次層支援了簡化的 MSDU 表頭以減少上層封包的多餘資訊。

WiMAX 中的 MAC 是設計來從底層來支援非常高的峰值傳輸速率，同時也提供具有品質服務的傳輸，就像是 ATM 和 DOCSIS 網路一樣。WiMAX 的 MAC 使用了不定長度的 MPDU，還有提供了很多的彈性來允許其有效率的傳輸。例如，多個相同或不同長度的 MPDU 單元可能會被合併起來，放入一個突衝之中來減少實體層的額外損耗。同理可證，多個相同來自上層服務的 MSDU 單元，也可能被合併在一起組成單一個 MPDU 來儘可能減少 MAC 表頭的數量。相反的是，巨大的 MSDU 單元則可能進而分割成較小的 MPDU 單元，以多個訊框的方式傳送出去。

在圖 2.2 的例子中顯示了各種不同的 MAC 「封包資料單元」(Packet Data Unit; PDU)訊框。每個 MAC 訊框之前加上了一個「通用 MAC 表頭」(Generic MAC Header; GMH)，其中包含了「連線識別號碼」(Connection Identifier; CID)¹²、訊框長度、核驗 CRC 呈現位元、次表頭等，另外資料包括封包內容是否加密，如果有加密，其金鑰為何。而 MAC 的資料單元中的內容不是資料的傳送，就是管理的訊息。除了 MSDU 之外，傳送的資料內容中可能包含了頻寬的請求，或者是重傳的請求。而傳送的資料內容的類別則標示在次表頭內，這個部份是一收到就立刻處理。次表頭可分包裝次表頭(Packing Subheaders)和分割片段次表頭(Fragmentation Subheader)。WiMAX 的 MAC 也支援 ARQ，其可用來對未經分割或分割過的 MSDU 進行重傳的請求。MAC 訊框最大長度則為 1,024 位元組，由 GMH 中的 11 個位元來表示。

¹² 參見 2.4.2 小節中對連線識別號碼的定義。