XXX

XXX

XXX

XXX

WiMAX

Autore: XXX

Docente: XXX

Anno accademico 2007 - 2008

14 aprile 2008

Indice

1 Sommario **1**

2 Introduzione **2**

3 Analisi tecnica **4**

3.1 Architettura di rete 4

3.2 Caratteristiche tecniche 6

3.2.1 Il livello fisico 7

3.2.2 Il livello MAC 10

3.3 Prestazioni 14

3.4 Il futuro del WiMAX e la situazione italiana 15

Capitolo 1

Sommario

In questa trattazione si analizza la tecnologia *WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)*, presentata al pubblico nell'aprile 2002 con la pubblicazioe dello standard *IEEE 802.16*. Vengono in particolare messi in evidenza gli aspetti tecnici allegando, quando possibile, delle critiche e considerazioni sulle scelte fatte in fase di progettazione. Nel dettaglio gli argomenti trattati riguardano l'architettura di rete, i livelli fisico e *MAC* ed una breve analisi sulle prestazioni, sulle tecnologie concorrenti e sulla situazione italiana.

Capitolo 2

Introduzione

Lo sviluppo del WiMAX si evolve attraverso varie fasi: la prima è la costituzione nell'anno 2001 del *WiMAX forum*, un consorzio formato da oltre 400 aziende con lo scopo di promuovere e certificare la compatibilità e l'interoperabilità dei sistemi basati sullo standard *IEEE 802.16*, a sua volta definito a partire dal 1999 per la formalizzazione delle specifiche delle *Metropolitan Area Networks (MAN)* wireless a banda larga.
L'unione di realtà industriali di alta rilevanza ha permesso di rendere fin da subito compatibili gli standard 802.16 e l'europeo *HiperMAN*, tanto che qualsiasi prodotto certificato dal WiMAX forum li rispetta entrambi. Grazie ad un ente di codesto tipo la tecnologia ha avuto uno sviluppo assai rapido: in cinque anni si sono susseguiti sei differenti versioni, ognuna identificata da una lettera. L'ultima risale al 22 gennaio del 2006 ed è denominata *IEEE 802.16f* la quale introduce alcune nuove funzionalità alla versione a cui in questa trattazione faremo riferimento, la *IEEE 802.16e*, che costituisce un passaggio molto importante poiché per prima introduce il concetto di *mobile WiMAX* estendendo quindi lo standard al mondo mobile.
Elenchiamo brevemente gli aspetti essenziali della tecnologia, premettendo che i concetti saranno ripresi ed ampliati più avanti. Attraverso il WiMAX è possibile fornire accesso a banda larga senza fili in aree rurali e metropolitane, garantendo agli utenti alti livelli qualitativi del servizio ed un adeguato livello di sicurezza. L'alto throughput (del quale si discuterà nel paragrafo (3.3)) permette di

Figura 2.1: Il logo del WiMAX forum

Figura 2.2: Il logo WiMAX

usufruire di una grande varietà di contenuti, mentre la capacità di copertura nell'ordine dei chilometri consente di offrire accesso alla rete in aree molto vaste (anche se in esse sono presenti ostacoli che creano ostruzione per il segnale); infine la capacità di creare connessioni in ambienti mobili ha come sbocco naturale una serie di applicazioni di alta rilevanza tecnica e commerciale ponendo il WiMAX in diretta concorrenza con altri sistemi come l'*UMTS*.
Tutti questi elementi non potevano che stimolare quello che è stato ed è tuttora un rapido sviluppo della tecnologia. Dagli elementi forniti si può già dedurre come gli aspetti applicativi siano molteplici e tutti di enorme interesse: essi verranno elencati ed argomentati nel seguito della trattazione attraverso l'analisi tecnica.

Capitolo 3

Analisi tecnica

3.1 Architettura di rete

La figura (3.1) rappresenta lo schema di base della rete WiMAX in ambienti mobili, definita nello standard IEEE 802.16e: ad essa ci riferiamo poiché attraverso tale architettura è possibile offrire servizi anche a postazioni fisse. Da notare che una rete di tipo *end-to-end* consente di ridurre notevolmente i costi grazie alla possibilità di utilizzare un *network core* univoco senza tener conto delle classiche tecnologie a circuito (si lavora esclusivamente a pacchetto), tra l'altro notoriamente meno soggette ad incrementi prestazionali nel tempo.

Scorrendo l'immagine da sinistra verso destra si nota come la rete sia costituita da vari macroelementi, approfonditi nella figura (3.2), il primo dei quali prende il nome di *Mobile Station (MSs)*: a questo blocco fanno riferimento tutti i terminali fissi o mobili che sfruttano i servizi offerti dalla rete; nel primo caso le postazioni fisse (denominate nello specifico *Terminal Equipment*) sono collegate ad una *Subscriber Station* che ne inoltra il traffico.

All'interno del secondo blocco troviamo l'*Access Service network (ASN)* che include diversi componenti: innanzi tutto le *Base Station* che al solito hanno il compito di coprire una determinata area raccogliendo il traffico da tutti i terminali presenti; essa è tipicamente costituita da antenne omnidirezionali e può essere collegata anche a delle *Repeater Station (RS)* che hanno l'unica prerogativa

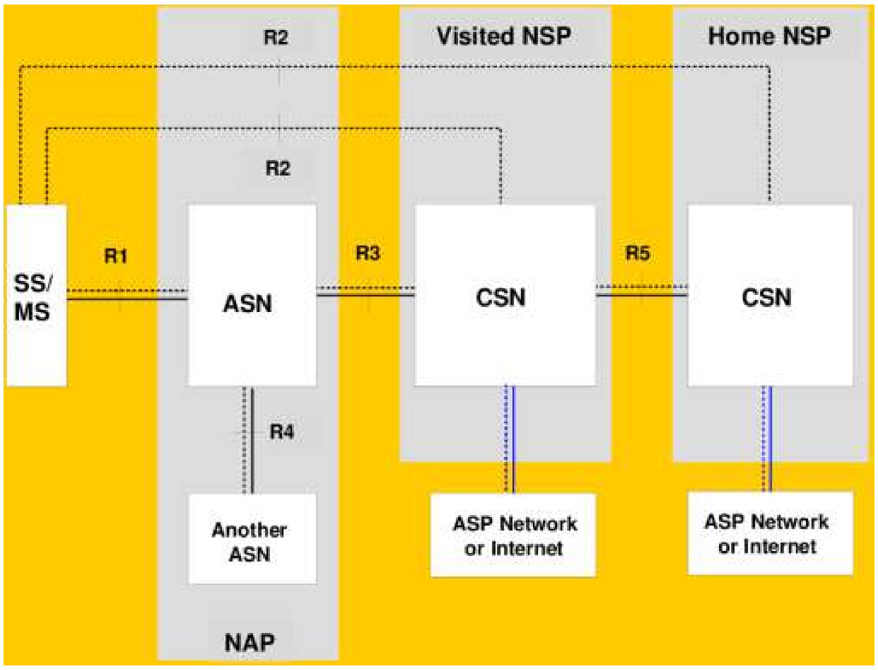

Figura 3.1: Architettura della rete WiMAX mobile end-to-emd

di ripetere e rigenerare le trame al fine di raggiungere utenze poste a distanze più elevate. L'*ASN-Gateway* è un componente caratteristico dell'IEEE 802.16e e del mondo mobile: esso connette fra loro diverse base station ed è a sua volta interfacciato con una serie di elementi della *Connectivity Service Network (CSN)* come *AAA-proxy/server*, router e database dei clienti. Il suo fine consiste nel gestire la mobilità degli utenti fornendo, in modo indipendente da essa, i servizi fondamentali quali la gestione di autenticazione, autorizzazioni ed account (AAA) ed in generale tutte quelle funzionalità di rete (scelte dal provider) necessarie per garantire la connettività ai clienti, mantenendo lo stesso indirizzo IP.

La progettazione dell'architettura inoltre consente di condividere una singola *NSP (Network Service Provider)* tra diverse ASN (e viceversa) e gli stessi terminali (siano mobili o fissi) possono accedere ad una specifica NSP dopo una fase di *discovery*; grande attenzione è anche stata posta all'interoperabilità tra i prodotti di diverse aziende ed operatori del settore (aspetto fondamentale per lo sviluppo della tecnologia), rendendo aperte le specifiche dei diversi protocolli di comunicazione tra le varie aree dell'architettura; ciò rimane valido anche per le caratteristiche fisiche di ogni singolo

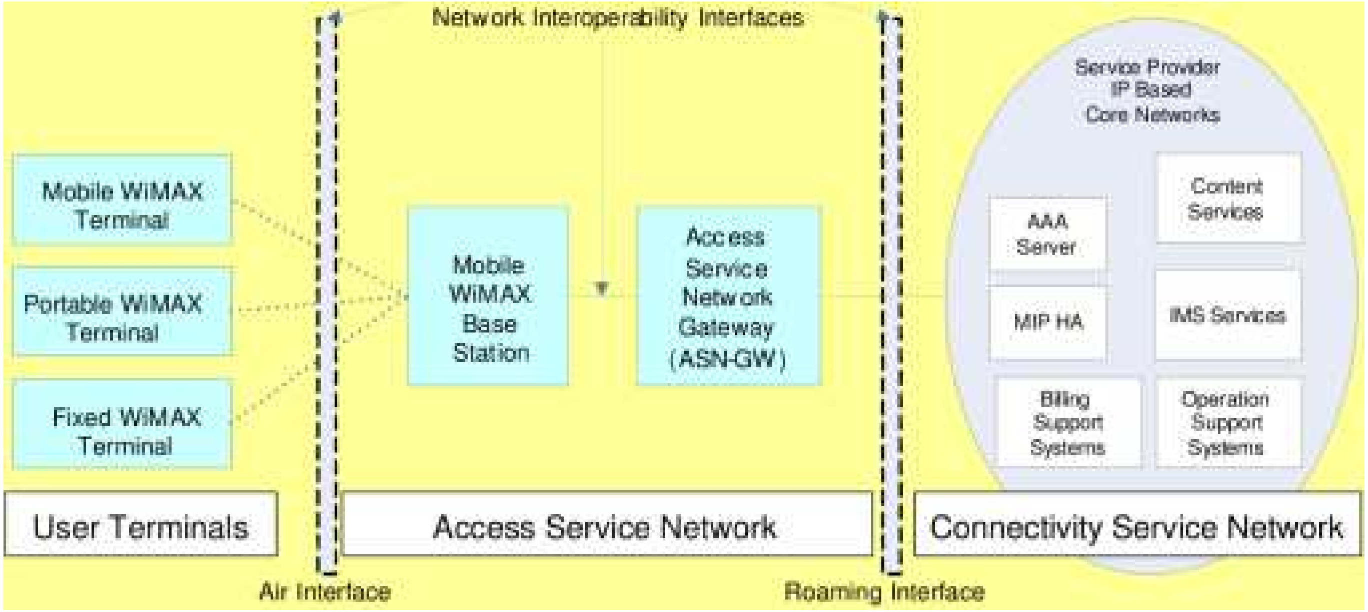

Figura 3.2: La rete in dettaglio

dispositivo di rete, affinché ogni produttore possa implementare come meglio crede le varie funzionalità mantenendo la compatibilità con altri prodotti. Oltre all'interoperabilità si è lavorato molto anche dal punto di vista della sicurezza, nel cui ambito si sono utilizzate tutte quelle funzionalità offerte dal protocollo IP sul quale la rete end-to-end si basa; ad esse sono state aggiunte delle nuove caratteristiche soprattutto dal lato dell'autenticazione di un terminale mobile con la rete, oltre alla possibilità di usare delle *VPN (Virtual Private Network)* a livello di utenza e ad algoritmi e codifiche specializzate nel garantire l'integrità e la protezione dei dati. L'*handover* è ovviamente gestito durante la mobilità (anche a velocità piuttosto sostenute) degli utenti ma anche tra lo stesso Wimax e altre tecnolgie quali *WiFi* e *DSL*, nonché tra le distinte versioni (4 e 6 nello specifico) del protocollo IP.

3.2 Caratteristiche tecniche

Nel WiMAX abbiamo una architettura di protocollo divisa in due livelli, fisico e *MAC*, le parti restanti del modello non sono state definite dall'*IEEE* nello standard: il tutto è stato fatto ancora una volta a favore della interoperabilità, lasciando la definizione delle specifiche per i livelli superiori ad enti indipendenti come il *WiMAX Forum's Network Working Group.*

3.2.1 Il livello fisico

Il livello fisico (e più in generale tutto il modello protocollare implementato) devono far fronte a quelli che sono i problemi relativi all'ambiente molto eterogeneo in cui la tecnologia viene utilizzata: ci stiamo riferendo ad un situazione di operatività caratterizzata da un accentuato *multi-path fading* e in cui molto spesso non è presente una *LOS (Line Of Sight)* tra le antenne; in contemporanea è necessario limitare al massimo la potenza di trasmissione, per aumentare l'efficienza energetica ed evitare problemi alla salute.

Il livello fisico implementa una modulazione di tipo *OFDMA (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access)* per massimizzare l'efficienza nell'allocazione delle risorse di canale disponibili (il tutto in combinazione con le tecnologie tipiche del MAC layer). Attraverso essa è possibile eliminare totalmente le interferenze inter-simboliche (*ISI*) mediante l'introduzione di prefissi ciclici a patto di incrementare l'*overhead*, conseguenza, quest'ultima, ben ripagata da una migliore efficienza nell'utilizzo del canale. L'OFDMA nel particolare costituisce una generalizzazione della modulazione *OFDM*, introducendo la possibilità di condividere lo stesso canale tra diversi utenti sia in *downlink* che in *uplink* e incrementandome la robustezza nei confronti delle interferenze e del *fading*, tipiche di un ambiente NLOS; a seconda della tipologia di servizio offerto e in accordo con le politiche di *Quality Of Service (QOS)* definite a MAC layer, a ciascun utente possono essere assegnate differenti frequenze portanti (denominate *sub-carriers*, il cui range totale varia da 2 a 11 GHz nel caso *NLOS* e sono spaziate di 10,94 KHz) sulle quali trasmettere i propri dati. Altre frequenze sono specifiche e sono destinate a scopi di sincronizzazione e di stima del canale.

A loro volta le sub-carriers sono divise in gruppi (in ogni gruppo ci sono 48 frequenze riservate ai dati), ciascuno corripondente ad ognuno dei *sub-channel*: questi ultimi possono essere in numero di 2, 8, 16 o 32 a seconda della bandwidth del canale di sistema (rispettivamente di 1,25, 5, 10 o 20 MHz): la possibilità di utilizzare un variegato numero di bandwidth è una peculiarità dell'*S-OFDMA*, (OFD-

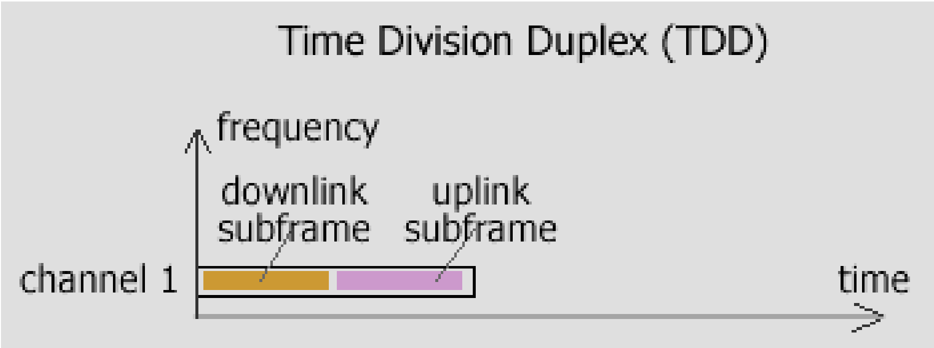

Figura 3.3: Tecnica di multiplazione TDD

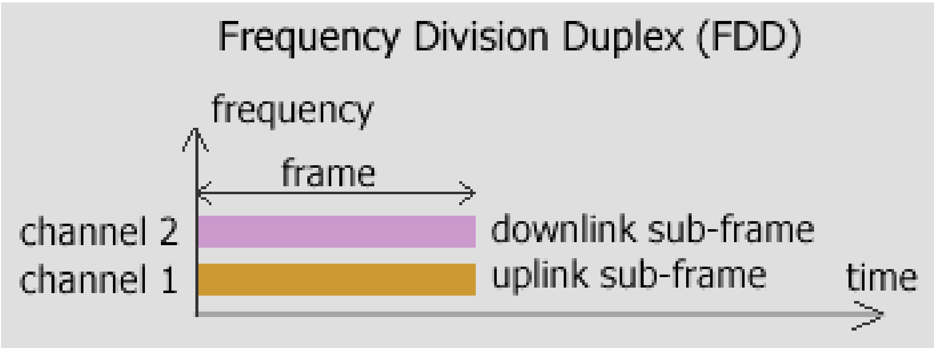

Figura 3.4: Tecnica di multiplazione FDD

MA scalabile), ottenuta agendo sulla trasformata di Fourier (utilizzata in tutte le tecnoche OFDM per selezionare la corretta frequenza) permettendo una maggiore flessibilità a seconda dello spettro di frequenze a disposizione.

Poiché nel WiMAX terminali e base station possono dialogare fra loro sia in uplink che in downlink, è necessario prevedere un metodo a livello fisico per far convivere all'interno dello stesso canale entrambe le direzioni di comunicazione: inizialmente, nella prima release dello standard, l'unica tecnica supportata era la *TDD (Time Division Duplex)* ma successivamente proprio con l'IEEE 802.16e ad essa si è affiancata la *FDD (Frequency Division Duplex)*; le figure 3.3 e 3.4 li espletano in modo piuttosto intuitivo: mentre nel primo caso le trasmissioni in uplink e in downlink condividono la medesima frequenza ma sono separate nel tempo nell'FDD la situazione è opposta e il ruolo discriminatorio viene assunto dalla frequenza.

Uno svantaggio piuttosto rilevante di quest'ultimo metodo consiste che in entrambi i versi la bandwidth deve essere necessariamente uguale, mentre nel TDD la gestione di un traffico asimmetrico (spesso presente nell'ambito di utilizzo del WiMAX) nelle due direzioni risulta più efficiente, richiedendo (fattori questi ultimi molto importanti) un solo canale e una complessità minore di realizzazione che si traduce in costi inferiori. L'introduzione della modalità FDD è stata dovuta al fatto che in alcuni paesi la regolamentazione dell'utilizzo dello spettro di frequenza rende impossibile l'utilizzo di una multiplazione nel tempo.

A livello fisico vengono inoltre implementate le modulazioni di tipo *QPSK*, *16QAM* e *64QAM* (quest'ultima opzionale in uplink) utilizzati con codici *CC (Convolutional Code)* o *CTC (Convolutional Turbo Code)* a rate variabile tra 1/2 e 5/6 scelto dallo *scheduler* della base station in risposta alle condizioni ambientali (a loro volta determinate tramite un canale dedicato con il terminale denominato *Channel Quality Indicator, CQI*); oltre alla qualità del canale nella scelta della modulazione si valutano altri due fattori fondamentali quali la distanza tra antenna trasmettente e ricevente e la relativa visibilità. La tecnica implementata per la gestione degli errori di canale è un *HARQ* ottenuto mediante uno *Stop & wait* multicanale in cui uno viene espressamente riservato agli *ACK/NACK*; sempre per quanto concerne l'HARQ è possibile incrementare la robustezza della trasmissione sia mediante *Chase Combining* sia, opzionalmente, con il più complesso *Incremental Redundancy*.

Nella figura (3.5) possiamo osservare la composizione di un subframe a livello fisico in downlink con multiplazione nel tempo: esistono due parti principali corrispondenti ai controlli (*preamble* e *maps*) e ai dati trasmessi. Il preambolo contiene delle informazioni per quanto concerne la sincronizzazione tra diversi frame, mentre di mappe ne esistono di due tipologie, una per il downlink l'altra per la direzione opposta di trasmissione: nel primo caso essa contiene la posizione iniziale della sequenza di dati, per l'uplink invece fornisce informazioni al terminale per una corretta allocazione della banda disponibile. I dati sono modulati con le possibilità elencate in precedenza ed in ordine crescente di complessità di demodulazione in maniera che un MS possa ignorare da un certo punto in poi i bit che non è in grado di interpretare.

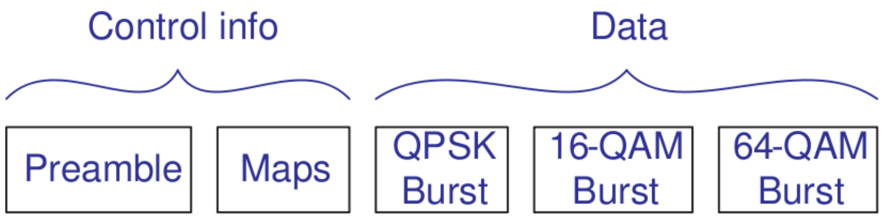

Figura 3.5: Un subframe downlink con multiplazione TDD

3.2.2 Il livello MAC

Il livello MAC è di tipo *connection-oriented* e nello specifico si possono identificare due tipi di connessioni, *management* e *data transport* (usata per il flusso dati dell'utente); le prime a loro volta possono essere divise in *basic* (stabilita quando il terminale si aggancia alla rete ed utilizzata per messaggi brevi ed urgenti), *primarie* (analoga alla basic ma tollerante ai ritardi) e *secondarie* (per pacchetti IP legati a funzionalità quali *DHCP* o *TFP*).

L'accesso alla rete di un nuovo utente avviene dapprima mediante una ricerca sequenziale su tutto il range delle frequenze del corretto canale di downlink da parte del terminale: una volta determinato si ottengono, utilizzando i pacchetti a livello fisico (nella parte Map), le proprietà del canale in termini di probabilità di errore e data rate; successivamente, sempre utilizzando connessioni di tipo management, si effettua la sincronizzazione della MS con la BS nonché una negoziazione della potenza di trasmissione più adeguata al fine di diminuire al massimo gli sprechi energetici. Il passo finale consiste nel portare a termini i processi di autorizzazione, autenticazione e scambio di chiavi tra terminale e Base Station.

Come possiamo vedere dalla figura (3.6) il MAC è caratterizzato dalla presenza in esso di tre sottolivelli distinti: *Privacy*, *Common Part (CPS)* e *Service Specific Convergence (CS)*; ad ognuno di essi è demandata una ben precisa attività.

Cominciando dal basso analizziamo il Privacy sublayer: come facilmente intuibile dal nome, questo livello si preoccupa di tutti quegli aspetti legati alla sicurezza come la gestione delle autenticazioni, lo scambio sicuro delle chiavi di accesso e la crittografia. Introduciamo il concetto di *Security Association (SA)* come un'entità condivisa tra gli attori della connessione contenente i parametri

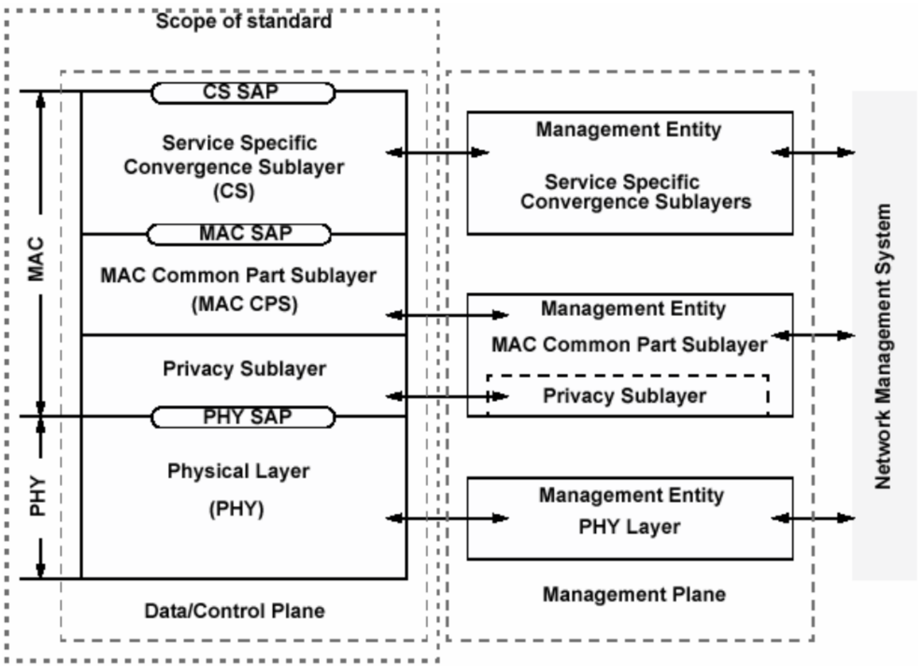

Figura 3.6: Sottolivelli MAC

di sicurezza (come le chiavi) e l'algoritmo di crittografia utilizzato: essa è sempre presente almeno nella connessione di tipo data transport. Esistono diversi tipi di SA: la *primaria*, condivisa tra BS e MS (ed univoca per ciascuna di queste ultime), ha il compito di gestire una connessione di tipo management secondaria; la SA *statica* è invece generata dalla Base Station all'atto della connessione con un terminale, ne esiste una per ogni tipologia di servizio richiesto dall'utente alla rete e viene distrutta nel momento in cui il servizio stesso è stato completamente erogato. Passando allo scambio delle chiavi di accesso, ogni terminale ha a disposizione una propria *chiave pubblica (PK)* che viene utilizzata per produrre nella BS la *chiave di autorizzazione (AK)* la quale ha una vita limitata (mediamente sette giorni) e che la MS può decodificare utilizzando la propria chiave pubblica: a questo punto mediante la AK per essa sarà possibile derivare tutto un altro insieme di chiavi come la *KEK* o la *HMAK*.

A livello MAC una singola *PDU* è composta da tre parti: l'header di 48 bit, il payload (di dimensione massima di 2 MB e corrispondente ai flussi di tipo management o data transport) e un *CRC* di 4 byte opzionale; all'header non viene applicato alcun algoritmo di crittografia, che invece può essere

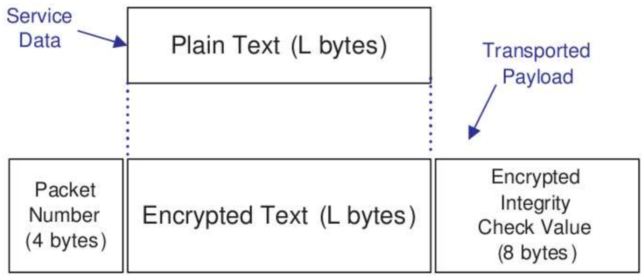

Figura 3.7: Il payload a livello MAC

utilizzato per il payload (di cui nella figura (3.7) viene fornita la struttura), in tal caso ciò viene esplicitamente segnalato mediante un flag nell'header. Ciascun payload (e di conseguenza il PDU ad esso associato) è innanzi tutto identificato da un valore numerico univoco per ogni canale, di uplink o downlink; il contenuto effettivo (*Plain text*) del messaggio viene crittografato mediante gli algoritmi *AES* o *DES*.

Il Common Part è il sottolivello immediatamente sovrastante al Privacy Sublayer: esso si occupa dell'allocazione della banda, della creazione e della manutenzione delle connessioni, fornendo allo stesso tempo le funzioni essenziali di accesso al sistema. Oltre alla modalità opzionale *mesh* che costituisce un caso particolare, nel WiMAX i collegamenti sono di tipo punto-multipunto, con una Base Station centrale che controlla più terminali ed è l'unico ente abilitato a trasmettere nel canale di downlink (nella direzione opposta il canale come abbiamo trattato in precedenza è condiviso tra tutti i terminali allocati ad una stazione base); la connessione non deve tuttavia intendersi come il semplice collegamento tra i due elementi in gioco, ma va riferita allo specifico servizio di cui l'utente usufruisce: a tal proposito a ciascun servizio (quindi connessione) viene assegnato un identificatore da 16 bit oltre a specifici parametri legati al *QOS* quali latenza, throughput e *jitter*. A loro volta i terminali ovviamente saranno abilitati a ricevere e trasmettere contenuti solo se sono riconosciuti dalla Base station cosa che avviene mediante il certificato *X.509* che identifica univocamente ciascun utente da tutti gli altri che condividono la medesima area di copertura.

Il Convergence è il sottolivello più in alto nello stack WiMAX e questo si riflette nelle sue funzionalità: infatti mediante esso è possibile raccogliere e classificare le unità dati provenienti dai livelli immediatamente superiori (oltre che ricevere le *CS PDU* inviate dal corrispettivo livello CS di un

QoS Category	**Applications**	**QoS Specifications**
Unsolicted Grant Service	VoIP	Maximum Sustained Rate, Maximum Latency Tolerance, Jitter Tolerance
Real Tima Polling Service	Streaming audio e video	Minimmum Reserved Rate, Maximum Sustained Rate, Maximum Latency Tolerance, Traffic Priority
Extended Real Tima Polling Service	Voice with activity detection (VoIP)	Minimmum Reserved Rate, Maximum Sustained Rate, Maximum Latency Tolerance, Jitter Tolerance, Traffic Priority
Non Real Tima Polling Service	File Transfer protocol (FTP)	Minimmum Reserved Rate, Maximum Sustained Rate, Traffic Priority
Best Effort Service	Data transfer, Web browsing	Maximum Sustained Rate, Traffic Priority

Tabella 3.1: Politiche di QOS per le varie applicazioni

altro terminale della rete) assegnando loro un identificatore *CID* corrispondente ad uno specifico servizio e connessione. Il Convergence Sublayer assume una grande importanza anche perché permette la commutazione tra i due protocolli di rete *ATM (Asyncronus Transfer Mode)*, in cui l'unità di trasmissione, detta *cella*, è a lunghezza fissa, e a pacchetto: questo si è reso necessario visto che gran parte dei livelli superiori al MAC lavorano a circuito (che ha incontrato un grosso successo nelle reti telefoniche); la commutazione avviene convertendo ogni singola *cella* nel corrispondente frame di livello MAC. Oltre alle funzionalità appena descritte il Convergence si occupa anche della definizione delle politiche di QOS associate ad ogni servizio sia in uplink che in downlink ed eventualmente variate dinamicamente mediante dei messaggi di livello MAC: nella tabella allegata si elencano le varie politiche intraprese a seconda della tipologia di connessione offerta all'utente; in essa è anche possibile notare come in effetti il WiMAX consenta di offrire ai terminali la fruizione di un ampio numero di servizi: voce, audio (musica o conversazioni telefoniche VoIP) e navigazione web richiedono ovviamente delle caratteristiche di trasmissione completamente differenti fra loro a cui è necessario adeguarsi in maniera dinamica.

Antenna	Link	Sector throughput	Spectral efficiency
SIMO	DL	8,80 Mbps	1,19 bps/Hz
SIMO	UL	1,38 Mbps	0,53 bps/Hz
MIMO	DL	13,60 Mbps	1,84 bps/Hz
MIMO	UL	1,83 Mbps	0,70 bps/Hz

Tabella 3.2: Mobile Wimax performance

3.3 Prestazioni

I test condotti dal WiMAX forum hanno evidenziato che in ambito mobile con traffico *Full buffer* il sistema riesce a garantire alti throughput ed un'ottima efficienza spettrale. I test sono riferiti ad un canale con bandwidth di 10 MHz a frequenza operativa di 2,5 GHz, distanza tra le Base station di 2,8 Km e distanza minima tra esse e i terminali (disposti ad altezza di 1,5 m) di 32 metri. La multiplazione è di tipo TDD mentre si contano 30 utenti per cella, 10 per ognuno dei tre settori; inoltre la ripartizione del traffico tra downlink ed uplink è in rapporto di 3:1. Le prove sono state ripetute anche con configurazione *MIMO (multiple-input and multiple-output)*, ovvero con l'uso di antenne multiple sia al ricevitore che al trasmettitore. Si può notare immediatamente come anche nel WiMAX l'utilizzo di apparecchi MIMO consenta un incremento notevole della velocità di trasmissione e dell'efficienza spettrale (per la quale abbiamo un guadagno di oltre il 50% in downlink): il miglioramento di quest'ultimo parametro si riflette nel throughput superiore alla soglia dei 10 Mbps, consentendo agli utenti di usufruire di servizi che richiedono grandi trasferimenti di dati come lo streaming video.

La situazione non sembra tuttavia così rosea ed è comunque in via di definizione (cosa naturale dato che la tecnologia è ancora recente), visto il gran numero di esperimenti e dichiarazioni che si susseguono tra gli sviluppatori dello standard, le imprese e i provider. Recente è il caso di *Buzz Broadband*, primo operatore australiano, il cui CEO Gart Freeman ha affermato che il principale problema del WiMAX all'atto pratico risulta essere l'ampia escursione di throughput tra il caso ottimale e il caso peggiore in cui non si ha visibilità ottica tra antenne: la copertura in quest'ultima situazione non si estende oltre i due chilometri, con forti cali di prestazioni già a 400 metri nel caso di ambienti indoor, con latenze oltre il secondo; questo, secondo il provider, sarebbe dovuto alle frequenze che oltre i 3 GHz (ricordiamo che sono variabili a seconda del paese di riferimento) non permettono di passare le pareti di un edificio senza alterare il segnale oltre i limiti più ragionevoli.

3.4 Il futuro del WiMAX e la situazione italiana

Sembra ancora presto per dire con esattezza cosa possa avvenire in futuro, quello che è certo è che il WiMAX non è solo ma esistono una multitudine di tecnologie già consolidate o in sviluppo che possono limitarne la diffusione. Tra le prime si ricorda il *WiFi* che potrebbe essere una alternativa in ambito indoor (anche per quanto descritto nel paragrafo precedente) ma ovviamente paga in termini di throughput e copertura delle celle. Per il mobile la sfida potrebbe essere con l'UMTS (e la successiva quarta generazione) che ha il vantaggio di essere in parte retrocompatibile con i dispositivi di rete già esistenti e soprattutto di essere già stato oggetto di forti investimenti da parte delle aziende. Altre tecnologie in sviluppo sono l'*802.11p* e l'*802.20 (mo-fi)*, indicati ancora all'ambito mobile, ma in questo caso risulta veramente molto difficile fare delle previsioni.
In Italia il WiMAX è stato oggetto di un'asta pubblica partita l'11 ottobre 2007 e terminata il 27 febbraio 2008: le licenze disponibili (che consentono al provider l'esclusiva di fornire la connettività entro uno specifico territorio nelle frequenze comprese tra 3,4 e 3,6 GHz) sono state assegnate per un investimento di circa 135 milioni di euro, posizionando il nostro paese al primo posto in Europa (la Francia, seconda, si assesta a 125 milioni); nonostante la cifra record, rimangono tuttavia delle perplessità per la mancanza di alcuni importanti attori del mondo delle telecomunicazioni, come Vodafone, che possono alimentare più di un dubbio sulla reale competitività del mercato della tecnologia. Competitività commerciale che, inevitabilmente, decreterà le sorti del WiMAX.

Elenco delle figure

2.1 Il logo del WiMAX forum 3

2.2 Il logo WiMAX 3

3.1 Architettura della rete WiMAX mobile end-to-emd 5

3.2 La rete in dettaglio 6

3.3 Tecnica di multiplazione TDD 8

3.4 Tecnica di multiplazione FDD 8

3.5 Un subframe downlink con multiplazione TDD 10

3.6 Sottolivelli MAC 11

3.7 Il payload a livello MAC 12

Elenco delle tabelle

3.1 Politiche di QOS per le varie applicazioni 13
3.2 Mobile Wimax performance 14

Bibliografia

[1] N. Benvenuto, G. Cherubini, *Algorithms for communications systems and their applications*, Wiley, 2004.

[2] M. Rossi, *Appunti e slide del corso di "Sistemi e reti wireless"*, 2008;
`http://www.dei.unipd.it/~rossi/teaching.html`
(ultima consultazione: 06/IV/2008).

[3] Alvarion Ltd., *Introducing WiMAX the next broadband wireless revolution*, Alvarion Ltd., 2004;
`http://www.wimax-industry.com/wp/papers/alvarion_Wimax_wp.pdf`
(ultima consultazione: 20/III/2008).

[4] K. Dietze, T. Hicks, G. Leon, *WiMAX system performance studies*, EOX wireless, 2006;
`http://www.edx.com/files/WiMaxPaperv1.pdf`
(ultima consultazione: 20/III/2008).

[5] K. Dietze, T. Hicks, *WiMAX uplink and downlink design considerations*, EOX wireless, 2006;
`http://www.edx.com/files/wimax_paper_2v4-1.pdf`
(ultima consultazione: 20/III/2008).

[6] Michel Barbeau, *WiMAX/802.16 Threat Analysis*, 2005;
`http://www.scs.carleton.ca/~barbeau/Publications/2005/iq2-barbeau.pdf`
(ultima consultazione: 03/IV/2008).

[7] J. Iyer, *Wimax – Evolution and Focus Areas. A End to End Network Perspective*, Cisco Systems;
`http://www.calccit.org/`
(ultima consultazione: 04/IV/2008).

[8] P. Nicoletti, *802.16 WiMAX*, Studio Reti s.a.s, 2006;
`http://www.netscire.it/CourseMaterial/WiMAX_I_C.pdf`
(ultima consultazione: 04/IV/2008).

[9] WiMAX forum, *Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation*, WiMAX forum, 2006;
`http://www.wimaxforum.org/technology/downloads/`
(ultima consultazione: 04/IV/2008).

[10] S. Omerovic, *WiMAX Overview*, Faculty of Electrical Engineering University of Ljubljana Slovenia, 2006;
http://www.lkn.fe.uni-lj.si/publikacije/Seminarji_06/mobilne/s_omerovic.pdf
(ultima consultazione: 03/IV/2008).

[11] T. Lundmark, *WiMAX - a sneak preview*, Tietonator corporation, 2005;
http://proj.sunet.se/
(ultima consultazione: 03/IV/2008).

[12] A. R. Usmani, *WhyMax*, Wateen Telecom;
http://abdul.usmani.googlepages.com/USM-WhyMAX.pdf
(ultima consultazione: 20/III/2008).

[13] Aricent, *Enabling Mobility in WiMAX Networks*, Aricent, 2006;
http://www.wimax.com/research/whitepapers/WiMAX_07Nov06.pdf
(ultima consultazione: 19/III/2008).

[14] Tom's hardware guide Italia, *WiMax a rischio flop;*
http://www.tomshw.it/news.php?newsid=13482
(ultima consultazione: 11/IV/2008).

[15] Ministero delle comunicazioni, *Gara Wi-Max: Incasso Record, oltre 136 milioni di Euro (+176%);*
http://www.comunicazioni.it/ministero/ufficio_stampa/comunicati_stampa/pagina179.html
(ultima consultazione: 11/IV/2008).