

Tutorial sulle tecnologie WiMAX

WiTech • Giugno 2006

www.witech.it



 AZIENDA SPINOFF
DELL'UNIVERSITÀ DI PISA



WITECH

WiTech, Spin-off dell'Università di Pisa, opera nel settore delle tecnologie broadband wireless, quali 802.11, WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), 802.20, UMTS (Universal Mobile Telecommunication System) / WCDMA (Wideband Code Division Multiple Access), HSDPA (High Speed Downlink Packet Access), IMT (International Mobile Telecommunications) -2000, EV-DO (Evolution Data Only), e, grazie al proprio team di professionisti, fornisce servizi ingegneristici ad elevato valore aggiunto.

Si presenta come supporto ideale degli operatori e delle nuove start-up che vogliono entrare nel mondo del broadband wireless, perché è in grado di espletare tutte le fasi operative necessarie per le attività di un WISP (Wireless Internet Service Provider), dalla redazione del business plan al deployment della rete. Svolge attività di consulenza tecnico-economica: infatti, con l'ausilio del planning tool TEABWA™ (Technical and Economic Analysis for Broadband Wireless Access) è in grado di realizzare una dettagliata analisi sia tecnica sia economica delle tecnologie BWA (Broadband Wireless Access). È impegnata in molteplici attività di ricerca per lo sviluppo di soluzioni innovative, quali la piattaforma WROP™ (Wireless Radius Operator Platform), il NOC (Network Operator Center) Multi Livello per un sistema di AAA (Authentication, Authorization and Accounting) per tecnologie broadband wireless.

Per ulteriori informazioni puoi visitare il nostro sito www.witech.it o contattarci a info@witech.it o al +39 050 754 720.

Copyright © 2006 - WiTech. Tutti i diritti sono riservati a norma di legge e a norma delle convenzioni internazionali. Nessuna parte di questo report può essere copiata, fotocopiata, duplicata in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo, o ridistribuita senza l'autorizzazione scritta di WiTech. Ogni cura è posta nella raccolta e nella verifica della documentazione contenuta in questo report; tuttavia WiTech non si assume alcuna responsabilità derivante dall'utilizzo della stessa. Nomi e marchi delle compagnie e dei prodotti citati nel report sono generalmente depositati o registrati dai rispettivi proprietari.



INDICE

Prefazione	4
Introduzione	4
802.16 e WiMAX	5
Le tecnologie 802.16.....	5
Come lavorano le tecnologie 802.16	6
Bande di frequenza	6
Tecnica di Trasmissione e Protocollo di Accesso.....	7
Formato di Duplexing	11
Handoff e Roaming	12
Funzionalità opzionali.....	12
Il WiMAX Forum.....	13
Le tecnologie WiMAX e le tecnologie 802.16	13
I profili di sistema e i profili di certificazione del WiMAX Forum.....	14
Il processo di certificazione del WiMAX Forum.....	15
I primi prodotti WiMAX Forum Certified™	16
Network Reference Model WiMAX.....	17
Prestazioni e copertura	18
La sperimentazione WiMAX in italia	23
La Fondazione Ugo Bordoni	23
L'attività di sperimentazione.....	23
Conclusioni	26
Acronimi	27
Bibliografia	29



Prefazione

Il mondo delle telecomunicazioni sta assistendo ad uno sconvolgimento della logica di mercato: se fino ad oggi le tecnologie wired, quali la DSL (Digital Subscriber Line) e la fibra ottica, hanno ricoperto un ruolo leader nel settore del broadband, le tecnologie WiMAX, basate sullo standard IEEE 802.16, si stanno imponendo come una valida alternativa in quanto promettono di rivoluzionare le comunicazioni dati, voce e video offrendo una maggiore flessibilità nell'accesso e minori investimenti.

Questo tutorial presenta un'accurata analisi tecnica delle tecnologie WiMAX al fine di comprendere meglio quali sono le reali potenzialità di tali soluzioni. Dapprima si descrive in maniera chiara e concisa il PHY (Physical) Layer delle tecnologie 802.16; in seguito si introducono le tecnologie WiMAX e i primi prodotti "WiMAX Certified™".

Introduzione

Le tecnologie WiMAX sono tecnologie per l'accesso wireless a banda larga basate sullo standard IEEE 802.16.

Esse possono essere utilizzate sia per il backhauling, ossia per estendere la connettività broadband della backbone alle zone limitrofe, sia per l'ultimo miglio, ovvero per offrire servizi broadband agli utenti sia residenziali sia business locati nell'area geografica coperta in modalità d'accesso fissa, nomadica, portatile e mobile.

Possono, inoltre, operare sia in bande licenziate sia in bande non licenziate: il deployment nelle bande licenziate è indicato per coprire aree dense e competitive, ove l'interferenza rappresenta il maggior problema da risolvere; il deployment nelle bande non licenziate, invece, è indicato per coprire aree ristrette per limitare l'interferenza e l'investimento iniziale.

Un vantaggio rilevante delle tecnologie WiMAX è la maggiore flessibilità nel deployment dell'infrastruttura di rete, grazie alla possibilità di definire l'ampiezza del canale, la tipologie del duplexing, le tecniche di trasmissione.



802.16 e WiMAX

Le tecnologie 802.16

Le tecnologie 802.16 si basano sullo standard IEEE 802.16.

La prima versione dello standard IEEE 802.16, ratificata nel 2001 e concepita per applicazioni FBWA, supporta trasmissioni in scenari LOS (Line Of Sight) nel range delle bande licenziate da 10 a 66 GHz e non consente né la portabilità né la mobilità.

La successiva versione IEEE 802.16-2004 opera nella banda 2-11 GHz anche in scenari NLOS e con accesso nomade, consentendo l'utilizzo di SU indoor; supporta, inoltre, come opzione la sottocanalizzazione in up link [2].

Infine la versione IEEE 802.16e, approvata il 7 Dicembre 2005, include le precedenti versioni dello standard e aggiunge alcune funzionalità, quali l'handoff e il power saving, per supportare l'accesso portatile e mobile, il MIMO, l'AAS e gli STC, per migliorare le prestazioni del sistema. Per poter meglio supportare la mobilità, inoltre, è implementata una nuova tecnica di trasmissione, la SOFDMA (Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access), che, però, non è compatibile né con la modulazione OFDM né con la modulazione OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) [3].

La Tabella 1 riassume le principali caratteristiche tecniche delle tecnologie 802.16, basate sia sulla versione 802.16-2004 sia sulla versione 802.16e. Per ogni tecnologia, è indicato il range frequenziale e lo scenario operativo, la velocità di trasmissione in corrispondenza di una determinata canalizzazione, la tecnica di trasmissione supportata, il protocollo d'accesso multiplo, il formato del duplexing, le possibili ampiezze di banda del canale e l'efficienza spettrale del sistema. Una descrizione dettagliata di tali parametri è fornita nel seguito.

Come si evince dalla Tabella 1, le tecnologie 802.16 consentono una maggiore flessibilità di deployment, in quanto possono operare in diverse bande frequenziali e con una diversa canalizzazione secondo la disponibilità dello spettro, supportano differenti tecniche di trasmissione in funzione del tipo d'accesso e dello scenario, possono lavorare sia in TDD sia in FDD (Frequency Division Duplexing) in relazione al range frequenziale in cui operano e al tipo di servizio da offrire.



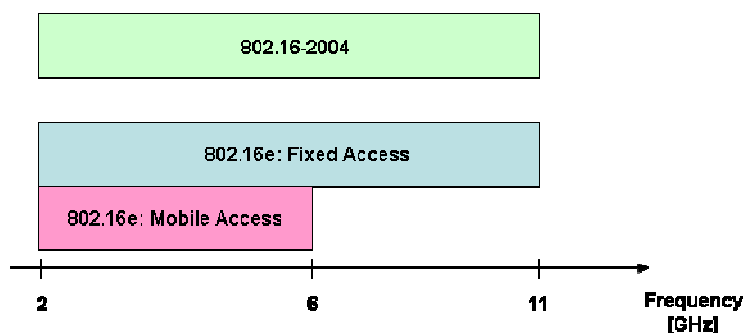
Tabella 1 – Principali caratteristiche delle tecnologie 802.16

	802.16-2004	802.16e
Approvato	Giugno 2004	Dicembre 2005
Banda	2 – 11 GHz	2 – 11 GHz per l'accesso fisso 2 – 6 GHz per l'accesso mobile
Scenario operativo	LOS/NLOS	LOS/NLOS
Velocità di trasmissione	75 Mbps in 20 MHz	75 Mbps in 20 MHz per l'accesso fisso 15 Mbps in 5MHz per l'accesso mobile
Tecnica di trasmissione	OFDM (256 sottoportanti), OFDMA (2048 sottoportanti)	OFDM, OFDMA, SOFDMA
Accesso multiplo	TDMA, OFDMA	TDMA, SOFDMA
Formato del duplexing	TDD/FDD	TDD/FDD
Ampiezza di banda del canale	Variabile tra 1.25 MHz e 20 MHz	Variabile tra 1.25 MHz e 20 MHz
Efficienza spettrale	3.75 bps/Hz in 20 MHz	3.75 bps/Hz in 20 MHz per l'accesso fisso 3 bps/Hz in 5MHz per l'accesso mobile
Compatibilità con 802.16-2004		No, se si usa la modulazione SOFDMA

Come lavorano le tecnologie 802.16

Bande di frequenza

Come indicato nella Tabella 1 e nella Figura 1, le tecnologie 802.16, basate sulla versione 802.16-2004, operano nel range frequenziale tra 2 GHz e 11 GHz; le tecnologie 802.16, basate sulla versione 802.16e, invece, operano nel range frequenziale compreso tra i 2 GHz e gli 11 GHz nel caso di accesso fisso e nel range frequenziale tra 2 GHz e 6 GHz nel caso di accesso mobile.



Source: WiTech

Figura 1 – Range frequenziale per applicazioni 802.16

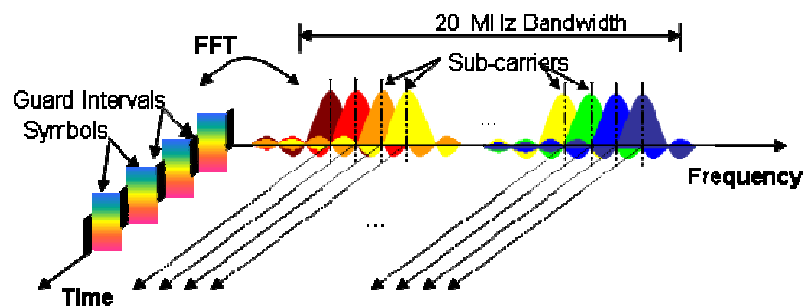
Tecnica di Trasmissione e Protocollo di Accesso

La tecnologia 802.16-2004 supporta due diverse tecniche di modulazione/accesso multiplo, come specificato in [2]:

- **OFDM con TDMA (Time Division Multiple Access)**

La modulazione **OFDM** è una trasmissione multiportante: il segnale è suddiviso in più sottocanali a banda stretta trasmessi simultaneamente su diverse sottoportanti, il cui numero definisce la dimensione del simbolo OFDM, ossia della FFT (Fast Fourier Transform). Come mostrato in Figura 2, tali sottocanali sono parzialmente sovrapposti ma ortogonali in modo da ridurre l'interferenza tra canali adiacenti e massimizzare l'efficienza spettrale. La modulazione OFDM introduce principalmente due vantaggi. In primo luogo, poiché i sottocanali sono a banda stretta, essa consente di operare anche in ambienti Near NLOS, ove il percorso diretto tra trasmettitore e ricevitore è parzialmente occupato dalla presenza di ostacoli come alberi, edifici, montagne, colline e altre strutture o oggetti naturali o artificiali, riducendo così il problema del multipath. In secondo luogo, essa offre un maggior controllo delle richieste di potenza dell'utente e una maggiore flessibilità per l'accesso degli utenti [5].

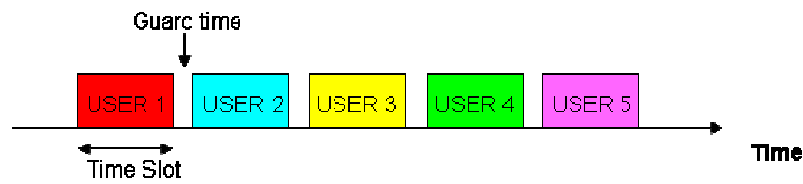
Nella tecnologia 802.16-2004, il simbolo OFDM è costituito da 256 sottoportanti di cui 8 sono pilota, 192 dati e 56 virtuali.



Source: WiTech

Figura 2 – Rappresentazione temporale-frequenziale dell'OFDM

- Nel **TDMA** l'accesso al canale radio è tipicamente diviso in time slot assegnati a utenti diversi: ciascun utente trasmette esclusivamente durante il time slot che gli è stato assegnato, con la modulazione OFDM, e utilizza l'intera banda del canale [4]. Affinchè vengano limitati i problemi di interferenza tra utenti che trasmettono in time slot consecutivi, è necessario avere una sincronizzazione perfetta e considerare un intervallo di guardia durante il quale nessuno può trasmettere, come mostrato in Figura 3.



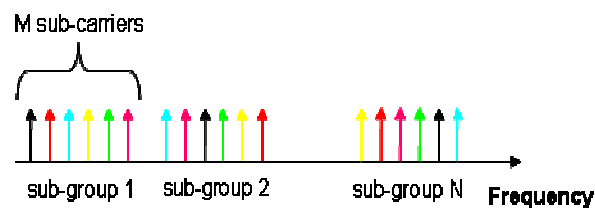
Source: WiTech

Figura 3 – Schema del TDMA

L'approccio OFDM/TDMA ha il vantaggio di ridurre la complessità ed i costi dei dispositivi, ma ha lo svantaggio di non supportare un numero elevato di utenti, per poter contenere i ritardi tra due trasmissioni consecutive relative allo stesso utente [6].

▪ OFDMA con TDMA

- L'**OFDMA** ha lo stesso principio di funzionamento della FDMA (Frequency Division Multiple Access), in quanto le sottoportanti sono assegnate ad utenti differenti in funzione delle condizioni del canale e della domanda di capacità, come mostrato nella Figura 4; però, a differenza della FDMA, essa consente di limitare l'interferenza tra gli utenti grazie all'ortogonalità tra le sottoportanti [4]. Le sottoportanti, escluse le virtuali, sono divise in sottogruppi, il cui numero varia a seconda il caso si consideri il down link o l'up link, e in ciascun sottogruppo le sottoportanti appartengono a sottocanali differenti. Poiché ciascun sottocanale ha una sola sottoportante per ogni sottogruppo, il numero totale di sottoportanti di un sottocanale è proprio pari al numero di sottogruppi. Per ottenere una diversità frequenziale e, quindi, una maggiore immunità al multipath, l'allocazione delle sottoportanti relative a ciascun sottocanale avviene mediante un processo pseudo-casuale. Nella tecnologia 802.16-2004 il numero totale di sottoportanti è 2048, il numero di sottocanali è 32 e il numero di sottogruppi è 48 in down link e 53 in up link.



Source: WiTech

Figura 4 – Schema della OFDMA

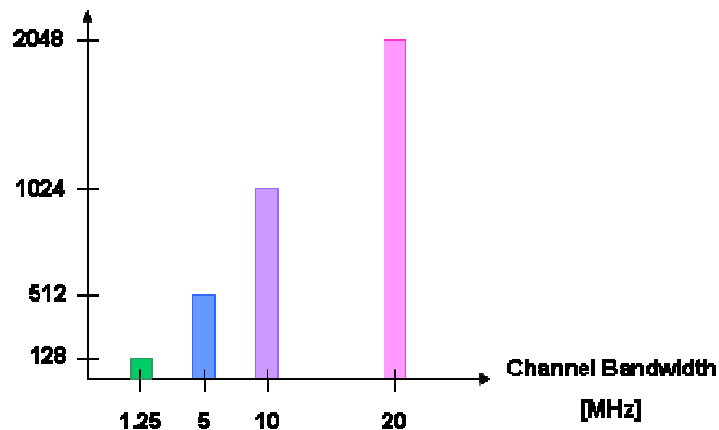
- **TDMA**: l'accesso multiplo è esteso anche alla dimensione temporale, in quanto l'utente può trasmettere esclusivamente nel time slot che gli è stato assegnato e può usare solo le sottoportanti assegnate.

L'approccio OFDMA/TDMA permette di supportare un maggior numero di utenti con ritardo minore rispetto all'approccio OFDM/TDMA. Grazie alla sottocanalizzazione introdotta dalla modulazione

OFDMA, inoltre, si ha una gestione più efficiente delle risorse, in funzione delle esigenze degli utenti e delle condizioni del canale. In particolar modo, in up link la sottocanalizzazione consente sia di ridurre la massima potenza trasmessa da ciascun utente, poichè può trasmettere solo nel sottocanale assegnato, sia di allocare la potenza all'utente a seconda le condizioni del canale, ossia un livello elevato di potenza è allocato agli utenti più svantaggiati (posti ad una distanza maggiore dalla BS oppure dotati di SU indoor).

Il principale neo dell'approccio OFDMA/TDMA sono i costi elevati dei dispositivi dovuti ad una maggiore complessità realizzativa.

La tecnologia 802.16e, in aggiunta alle tecniche di trasmissione/accesso multiplo previste per la tecnologia 802.16-2004, introduce la Scalable OFDMA (SOFDMA), che consente di supportare meglio l'accesso mobile, con ottime prestazioni in diversi scenari operativi [3]. La modulazione SOFDMA è una variante della modulazione OFDMA: essa, infatti, implementa tutte le funzionalità della modulazione OFDMA e aggiunge la scalabilità, in quanto il numero delle sottoportanti non è costante, come nel caso della OFDMA, ma varia a seconda dell'ampiezza di banda del canale considerato, in modo tale da mantenere costante la spaziatura tra le sottoportanti stesse [1], [7], come illustrato nella Figura 5. Questo da un lato consente di migliorare l'efficienza spettrale nei canali con una elevata ampiezza di banda, poichè si ha un numero di sottoportanti maggiore; dall'altro lato permette di ridurre i costi dei dispositivi nel caso di deployment in canali con una piccola ampiezza di banda, in quanto il numero di sottoportanti è minore. E' bene osservare che le modulazioni OFDMA e SOFDMA non sono compatibili e, quindi, due terminali, uno basato sulla modulazione OFDMA e l'altro sulla SOFDMA, non possono comunicare tra loro.



Source: WiTech

Figura 5 – Schema della SOFDMA

La Tabella 2, [8], e la Tabella 3, [9], indicano le velocità di trasmissione supportate dalla OFDM, con 256 sottoportanti, e dalla OFDMA, con 2048 sottoportanti, al variare dell'ampiezza di banda del canale, della modulazione e del rate del codice. In entrambi i casi, si è considerato un rapporto di guardia, definito come il rapporto tra l'intervallo di guardia e l'intervallo utile, pari a 1/32.

Tabella 2 – Velocità di trasmissione supportate dalla OFDM con 256 sottoportanti

Ampiezza di banda del canale [MHz]	Velocità di trasmissione [Mbps]					
	QPSK LOW (1/2)	QPSK HIGH (3/4)	16 QAM LOW (1/2)	16 QAM HIGH (3/4)	64 QAM LOW (2/3)	64 QAM HIGH (3/4)
3.5	2.08	4.37	5.82	8.73	11.88	13.09
7.0	4.15	8.73	11.64	17.45	23.75	26.18
10.0	8.31	12.47	16.63	24.94	33.25	37.40

Tabella 3 – Velocità di trasmissione supportate dalla OFDMA con 2048 sottoportanti

Ampiezza di banda del canale [MHz]	Velocità di trasmissione [Mbps]					
	QPSK LOW (1/2)	QPSK HIGH (3/4)	16 QAM LOW (1/2)	16 QAM HIGH (3/4)	64 QAM LOW (2/3)	64 QAM HIGH (3/4)
3.5	2.91	4.36	5.82	8.73	11.64	13.09
7.0	5.82	8.73	11.64	17.45	23.27	26.18
10.0	8.38	12.57	16.76	25.13	33.51	37.70

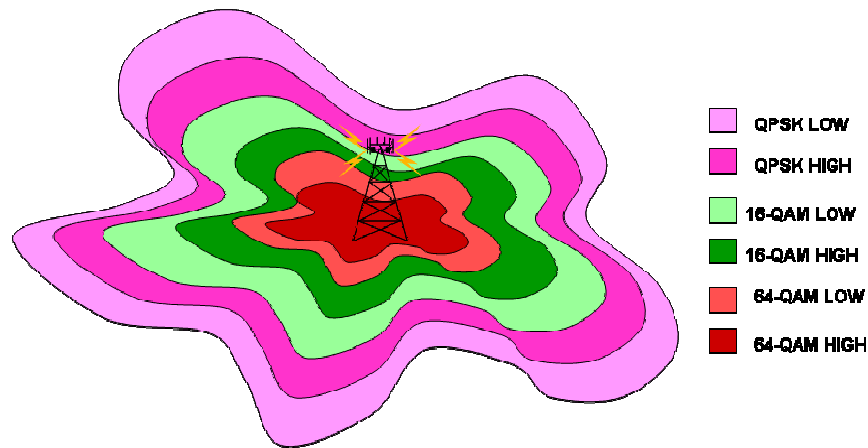
Come si evince dalla Tabella 2 e dalla Tabella 3, la velocità di trasmissione aumenta all'aumentare dell'ampiezza del canale o del livello della modulazione, ovvero fissata la canalizzazione, a modulazioni di ordine maggiore corrispondono data rate più elevati; mentre fissata la modulazione, ad ampiezze di banda maggiori corrispondono data rate più elevati.

Si prenda in esame il caso della tecnica di trasmissione OFDM (Tabella 2): considerata un'ampiezza di banda di 7 MHz, alla modulazione High 64QAM corrisponde una velocità di trasmissione di 26.18 Mbps, mentre alla Low QPSK corrisponde una velocità di trasmissione di 4.15 Mbps. Se, invece, si considera la modulazione Low QPSK, alla canalizzazione di 3.5 MHz corrisponde un data rate di 2.08 Mbps mentre alla canalizzazione di 7 MHz corrisponde un data rate di 4.15 Mbps.

Tutte le tecnologie 802.16 utilizzano l'AMC (Adaptive Modulation and Coding). Questa funzionalità permette di migliorare le prestazioni, ottimizzando sia il throughput sia il range di copertura. L'AMC, infatti, prevede una scelta dinamica della modulazione e del rate del codice per ogni utente, a seconda delle condizioni del link radio. Quando il livello del segnale ricevuto è basso, come nel caso di utenti molto distanti dalla BS, il sistema sceglie automaticamente una modulazione più robusta ma meno efficiente in termini di capacità (ad esempio la QPSK Low), in modo da mantenere la probabilità di errore pari al target fissato. Quando invece il livello del segnale ricevuto è elevato, sono scelte modulazioni di ordine maggiore (come la 64QAM High) senza aumentare la probabilità di errore.

La Figura 6 descrive il concetto di AMC in presenza di shadowing. Lo shadowing tiene conto della distribuzione casuale degli ostacoli tra il trasmettitore e il ricevitore e, dunque, due punti posti ad una stessa distanza dal trasmettitore sperimentano un differente canale di propagazione. Di qui, la forma irregolare delle zone di copertura relative alle diverse modulazioni. È bene osservare che se, invece, non si tiene conto dello shadowing, le zone di copertura relative alle diverse modulazioni altro non sono che dei cerchi concentrici.





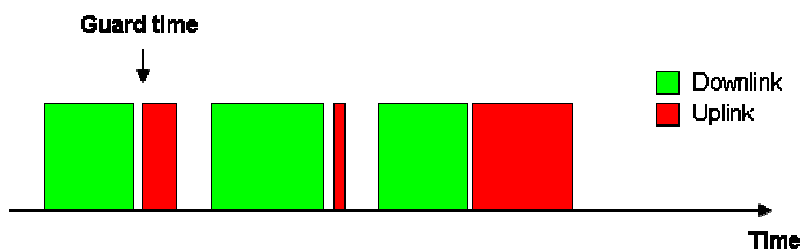
Source: WiTech

Figura 6 – AMC in presenza di shadowing

Formato di Duplexing

Le tecnologie 802.16 supportano sia il TDD sia il FDD, consentendo una maggiore flessibilità nel deployment di rete.

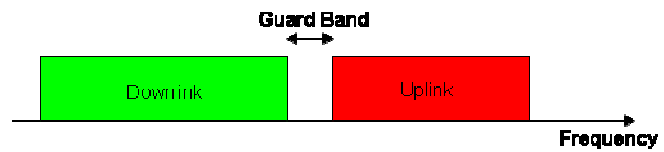
Nel TDD la tratta in down link (riferita alla comunicazione tra BS e SU) e quella in up link (riferita alla comunicazione tra SU e BS) operano nella stessa banda frequenziale in differenti tempi di connessione, alternando la trasmissione dei frame di down link e di up link, come è illustrato in Figura 7. Poiché tale alternanza è molto rapida, si ha la percezione che il canale sia attivo sia in up link che in down link allo stesso istante. Per quanto detto in precedenza, il TDD è indicato per i servizi che hanno un volume di traffico di tipo asimmetrico nelle due diverse tratte, come ad esempio l'accesso ad internet [4].



Source: WiTech

Figura 7 – Schema del TDD

Nel FDD i segnali in down link e in up link sono trasmessi simultaneamente su due canali frequenziali differenti, come mostrato in Figura 8, e questo determina un uso inefficiente delle risorse, qualora il traffico sia asimmetrico, poiché gli spettri down link e up link sono inutilizzati per molto tempo.



Source: WiTech

Figura 8 – Schema del FDD

È doveroso, a questo punto, evidenziare le differenze tra il TDD e il FDD. Mentre il TDD è più indicato nel caso di traffico asimmetrico (accesso ad internet), negli scenari ove non è disponibile una coppia di canali oppure nel deployment in bande non licenziate; il FDD, invece, è più opportuno nel caso di traffico simmetrico (VoIP) o nel caso di deployment in bande licenziate che richiedono esplicitamente un suo utilizzo. Ne consegue, dunque, che il FDD è una soluzione più costosa rispetto al TDD, sia per i dispositivi più complessi sia per i costi di licenza [10].

Handoff e Roaming

Al fine di garantire la continuità delle applicazioni negli scenari mobili, la versione 802.16e implementa l'handoff. Con il termine "handoff" si designa il processo di commutazione da una BS ad un'altra di una chiamata in corso o di una sessione dati, quando l'utente è in movimento. Questo meccanismo può essere sia soft sia hard. Nel primo caso la connessione alla "vecchia" BS è interrotta soltanto dopo aver stabilito la connessione con la "nuova" BS (make-before-break); nel secondo caso, invece, la connessione alla "vecchia" BS è interrotta prima di avere stabilito la connessione con la "nuova" BS (break-before-make). Poiché l'handoff soft riduce la latenza, esso è più indicato per servizi real time, come il VoIP, mentre l'handoff hard è più idoneo per servizi non real time, quali i servizi dati.

Una ulteriore funzionalità che le tecnologie 802.16 possono supportare è il roaming, che consente ad un utente di connettersi alla rete di un operatore diverso da quello con cui ha sottoscritto l'abbonamento, come avviene nelle reti cellulari.

Funzionalità opzionali

Le tecnologie 802.16, sia 802.16-2004 che 802.16e, supportano alcune funzionalità opzionali, quali gli **STC** e l'**AAS**:

- **Space Time Code (STC)**: l'informazione è codificata da più antenne in trasmissione sia nella dimensione spaziale sia nella dimensione temporale in modo da ottenere un guadagno di diversità e di codifica rispetto ad un sistema che utilizza una sola antenna [11].
- **Adaptive Antenna System (AAS)**: grazie alla combinazione tra un array di antenne e la capacità di processare segnali digitali, l'AAS può automaticamente cambiare la direzione del fascio di radiazione a seconda dell'ambiente in modo da minimizzare dinamicamente l'interferenza, massimizzare la ricezione del segnale voluto e migliorare la gestione della potenza del sistema e dell'allocazione spettrale.

La tecnologia 802.16e, inoltre, supporta anche il **MIMO**. Nei sistemi MIMO sia il trasmettitore che il ricevitore sono equipaggiati con più antenne per migliorare la QoS ed aumentare il throughput [12].



È bene osservare che le funzionalità descritte da un lato permettono di aumentare le prestazioni di un sistema in termini di qualità del servizio e di throughput, ma dall'altro lato determinano una maggiore complessità del sistema e, quindi, costi più elevati.

Il WiMAX Forum

Il WiMAX Forum è un'organizzazione senza scopo di lucro, fondata nel Giugno del 2001, e conta attualmente più di 350 membri, inclusi produttori, operatori e system integrator come Alcatel, Alvarion, Aperto Networks, Cisco Systems, Motorola, Siemens Mobile, Telecom Italia, Telabria e la stessa WiTech [13].

Il WiMAX Forum ha l'obiettivo di promuovere e certificare la compatibilità e l'interoperabilità dei dispositivi basati sullo standard IEEE 802.16 con programmi di test e certificazione.

Il WiMAX Forum costa di sette gruppi di lavoro, ognuno dei quali si focalizza su diversi aspetti:

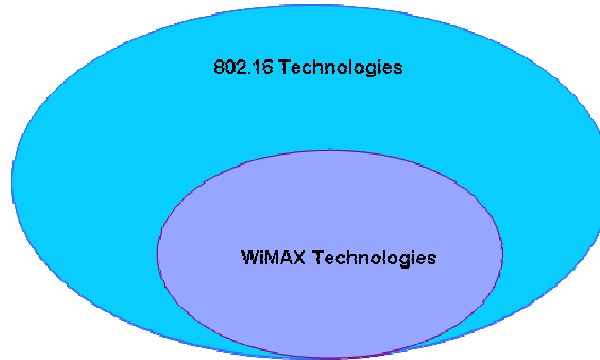
- **Technical Working Group** – È in contatto con gli enti di standardizzazione; individua le infrastrutture per il programma di certificazione; promuove la conformità e l'interoperabilità dei prodotti WiMAX; definisce i profili dei sistemi (Resp: Gordon Antonello, Wi-Lan).
- **Certification Working Group** – Gestisce il programma di certificazione e le relazioni con i laboratori di test (Resp: Aditya Agrawal, Beceem).
- **Marketing Working Group** – Promuove il WiMAX ed il programma di certificazione del Forum; delinea la strategia del Forum; illustra al mercato le potenzialità del BWA e del WiMAX (Resp: Mohammed Shakouri, Alvarion).
- **Service Provider Working Group** – Gestisce un forum in cui gli operatori e i vendor si confrontano sui requisiti che i prodotti WiMAX devono soddisfare; delinea i possibili business case; opera per definire le specifiche che dovranno essere introdotte nelle future versioni dello standard 802.16 (Resp: Dean Chang, Aperto Networks).
- **Regulatory Working Group** – Lavora con gli enti regolatori delle telecomunicazioni, con le istituzioni regionali e modiali, per definire l'allocazione dello spettro per le applicazioni WiMAX a livello mondiale (Resp: Tim Hewitt, BT).
- **Network Working Group** – Definisce le specifiche di più alto livello (ad esempio relative al Layer 2); delinea il modello di riferimento per l'architettura in funzione delle requisiti individuati dal Service Provider Working Group (Resp: Prakash Iyer, Intel).
- **Application Working Group** – Identifica e promuove le applicazioni più consone alle tecnologie WiMAX e sviluppa le soluzioni pratiche più idonee a tali applicazioni (Resp: Tom Tofigh, AT&T).

Le tecnologie WiMAX e le tecnologie 802.16

Le tecnologie WiMAX sono definite dal WiMAX Forum, il quale, sulle specifiche tecniche dello standard IEEE 802.16, indica quali sono le bande frequenziali in cui si può operare, le possibili canalizzazioni, il formato di duplexing da adottare e la tecnica di trasmissione da utilizzare. La differenza principale tra le tecnologie 802.16 e le tecnologie WiMAX è che le prime implementano tutte le



funzionalità previste dallo standard ma non garantiscono la compatibilità tra apparati di differenti produttori; le seconde, invece, implementano solo alcune funzionalità dello standard, per poter meglio garantire l'interoperabilità tra i diversi dispositivi, e dunque, possono essere considerate come un sottoinsieme delle prime.



Source: WiTech

Figura 9 – Tecnologie WiMAX e 802.16

Come già detto in precedenza, il WiMAX Forum definisce le tecnologie WiMAX e, in particolar modo, esso specifica i profili di sistema, ossia l'insieme di requisiti che un sistema WiMAX deve soddisfare, e, per ogni profilo di sistema, i profili di certificazione.

Ad oggi esiste un solo profilo di sistema, il 802.16-2004 WiMAX, basato sulla versione 802.16-2004, che utilizza solo la modulazione OFDM con 256 sottoportanti, ed è ottimizzato per un accesso fisso o nomade. Un secondo profilo di sistema, il 802.16e WiMAX, che dovrebbe essere delineato entro i prossimi mesi, sarà basato sulla versione 802.16e, con la tecnica di trasmissione SOFDMA, e sarà ottimizzato per un accesso portatile e mobile.

I profili di sistema e i profili di certificazione del WiMAX Forum

I primi profili di certificazione relativi alla versione 802.16-2004 WiMAX sono indicati nella Tabella 4. Le bande frequenziali in cui tali profili operano sono la banda licenziata dei 3.5 GHz, tipica per uno scenario europeo, e la banda non licenziata dei 5.8 GHz, per applicazioni statunitensi. Mentre nella banda dei 3.5 GHz sono supportate diverse canalizzazioni in ciascuna delle quali si può operare sia con il TDD sia con il FDD; nella banda dei 5.8 GHz è supportata una sola canalizzazione e il solo TDD.

Tabella 4 – Profili della prima fase del processo di certificazione del WiMAX Forum

Frequenza [GHz]	Spettro	Formato del Duplexing	Ampiezza di banda del canale [MHz]
3.4 – 3.6	Licenziato	TDD	3.5
3.4 – 3.6	Licenziato	FDD	3.5
3.4 – 3.6	Licenziato	TDD	7
3.4 – 3.6	Licenziato	FDD	7
5.725 – 5.85	Non licenziato	TDD	10

I profili basati sulla versione 802.16e WiMAX non sono stati ancora definiti; probabilmente essi opereranno sulle bande dei 2.3 GHz e dei 2.5 GHz, ma non si esclude il caso che possano essere introdotte ulteriori frequenze se la domanda del mercato per tale tipologia di dispositivi è elevata.

È bene osservare che le versioni 802.16-2004 e 802.16e WiMAX non sono tra loro compatibili perché operano su bande frequenziali e con tecniche di trasmissione differenti. Inoltre anche i profili di certificazione relativi a ciascuna versione possono non essere tra loro compatibili se operano su bande frequenziali differenti, ad esempio un dispositivo che lavora nella banda dei 3.5 GHz non può comunicare con un dispositivo che lavora nella banda dei 5.8 GHz.

Il processo di certificazione del WiMAX Forum

Il processo di certificazione del WiMAX Forum assicura che un dispositivo sia conforme ai requisiti del profilo di sistema, in tal caso esso è identificato con l'etichetta "WiMAX Forum Certified™", e che gli apparati di produttori differenti sia interoperabili nella stessa infrastruttura di rete, garantendo una maggiore flessibilità realizzativa nella scelta del Vendor. Come ben si può supporre, tale processo di certificazione porterà ad una maggiore competitività, con la conseguente diminuzione dei costi e la rapida crescita del broadband wireless nel mondo.

Il processo di certificazione WiMAX può iniziare solo se vi è un numero minimo di dispositivi: in particolare sono necessari per ogni profilo di certificazione almeno tre apparati di tre produttori differenti nel caso del profilo di sistema 802.16-2004 WiMAX e quattro apparati nel caso del profilo di sistema 802.16e WiMAX.

Gli step operativi che costituiscono il processo di certificazione del WiMAX Forum sono illustrati nella Figura 10.

Il produttore seleziona l'appropriato profilo di certificazione e i moduli opzionali, se disponibili nel caso in cui voglia certificare delle caratteristiche opzionali. È opportuno che il produttore effettui dei selftest (sono un sottoinsieme dei test relativi al processo di certificazione) e partecipi ai plugfests (sono degli eventi indipendenti dal processo di certificazione durante i quali i produttori possono testare l'interoperabilità dei prodotti in uno spazio aperto) per verificare se il proprio dispositivo è pronto per il processo di certificazione.

Una volta che il prodotto è stato registrato, i laboratori di test effettuano i test di conformità; se tali test non vengono superati, è necessario ricominciare il processo di certificazione daccapo.

Superati i test di conformità, i laboratori di test realizzano i test di interoperabilità. Se anche tali test sono superati, il prodotto in esame diventa "WiMAX Forum Certified™", altrimenti il processo di certificazione deve ricominciare nuovamente.



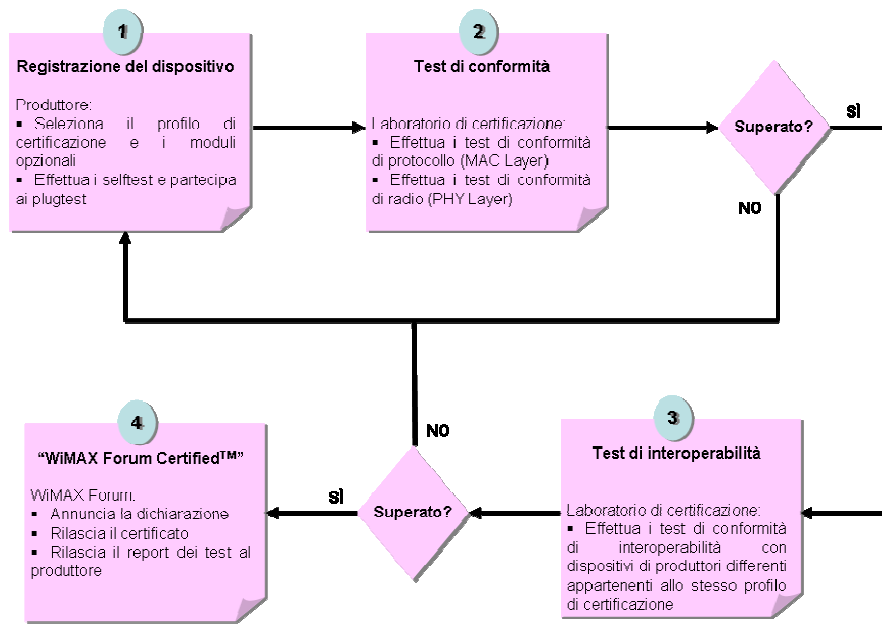


Figura 10 – Step operativi del processo di certificazione del WiMAX Forum

I primi prodotti WiMAX Forum Certified™

Per quanto concerne i prodotti WiMAX Forum Certified™, i primi apparati 802.16-2004 WiMAX sono stati presentati a partire dal 19 Gennaio 2006 e operano tutti sulla banda dei 3.5 GHz con una canalizzazione di 3.5 MHz sia in modalità TDD sia in modalità FDD.

▪ **Profilo: 3.5 GHz, 3.5 MHz, TDD**

- PacketMAX 5000 Base Station di Aperto Network;
- RedMAX AN-100U Base Station di Redline Communications;
- RedMAX Subscriber Unit di Redline Communications;
- SQN1010-RD SoC (System on Chip) Subscriber Unit solution di SEQUANS Communications;
- SQN2010-RD SoC Base Station solution di SEQUANS Communications;
- miniMAX Reference Kit Subscriber Unit solution di Wavesat;
- YSEMAX Base Station di Selex Communications;
- YSEMAX Subscriber Unit di Selex Communications;
- Tsunami MP16 3500 Base Station di Proxim Wireless Corporation.

▪ **Profilo: 3.5 GHz, 3.5 MHz, FDD**

- MacroMAX Base Station di Airspan;
- EasyST Subscriber Unit di Airspan;



- ProST Subscriber Unit di Airspan;
- ExcelMax Base Station di Axxcelera;
- ExcelMax Full Duplex FDD (FD-FDD) CPE di Axxcelera;
- SQN1010-RD SoC Subscriber Unit solution di SEQUANS Communications;
- WayMAX@vantage Base Station di Siemens;
- Gigaset SE461 WiMAX Subscriber Unit di Siemens;
- SSU5000 Symmetry Subscriber Unit di SR Telecom;
- Symmetry Base Station di SR Telecom;
- miniMAX Reference Kit Subscriber Unit solution di Wavesat.

mentre i primi apparati 802.16e WiMAX sono attesi per il primo quadrimestre del 2007.

Network Reference Model WiMAX

Al fine di garantire l'interoperabilità dell'interfaccia radio, l'interoperabilità inter-vendor inter-network per il roaming, le reti di accesso multi-vendor e il billing inter-company, il WiMAX Forum e, in particolar modo, il Network Working Group e il Service Provider Working Group si stanno adoperando nella definizione di un NRM (Network Reference Model) per le interfacce inter-network aperte, in quanto lo standard IEEE 802.16 ha stabilito solo il PHY Layer e il MAC Layer [14].

Il NRM WiMAX è basato su una piattaforma All-IP, ossia vi è un unico core network per offrire servizi dati, voce e video, con la conseguente riduzione dei costi.

Il NRM WiMAX è illustrato nella Figura 11. Esso è costituito dalle seguenti entità logiche: il dispositivo utente, ossia una SU o una MSU (Mobile Subscriber Unit); l'ASN (Access Service Network) e il CSN (Connectivity Service Network), ed identifica chiaramente i punti di riferimento per l'interconnessione tra le entità logiche, ovvero R1 - R5. Ciascuna entità logica rappresenta un gruppo di entità funzionali, ciascuna delle quali può essere realizzata in un singolo dispositivo fisico o può essere distribuita in più dispositivi fisici, a seconda della scelta di implementazione fatta.



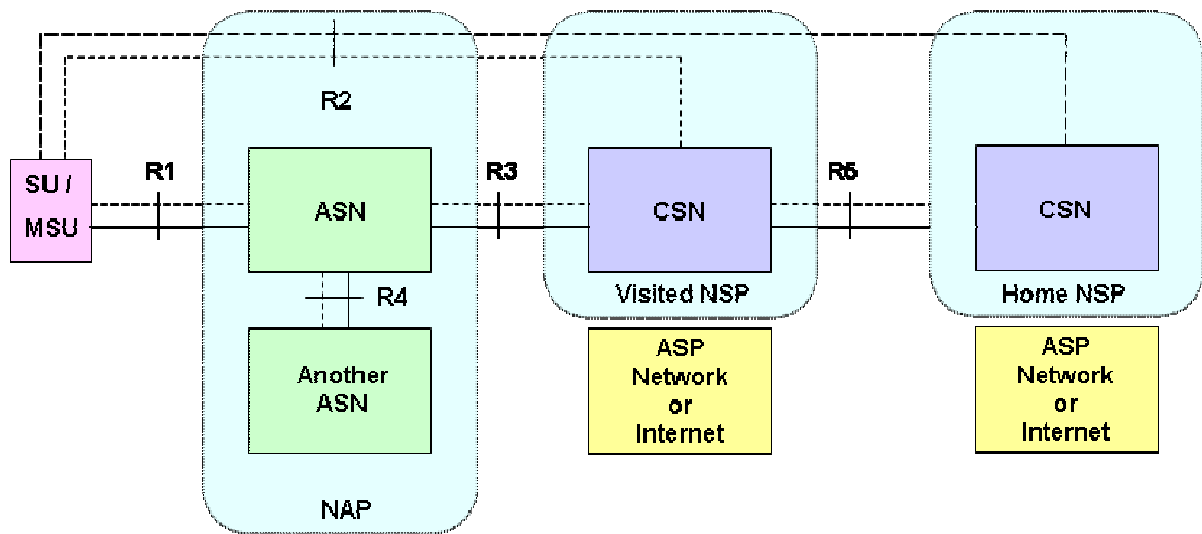


Figura 11 – NRM WiMAX

La SU è il dispositivo utente fisso mentre la MSU è il dispositivo utente mobile.

L'ASN comprende le funzionalità per stabilire la connettività a livello radio e ai livelli 2 e 3 (solo di base, quali le funzionalità di proxy) con i dispositivi utente fissi e mobili. Uno o più ASN costituiscono il NAP (Network Access Provider), il quale fornisce l'infrastruttura d'accesso radio a uno o più SP.

Il CSN comprende tutte le funzioni di rete a livello 3, per esempio l'assegnazione degli indirizzi IP, il AAA (Authentication, Authorization and Accounting) proxy o server, il controllo dell'accesso, la mobilità e il roaming.

Prestazioni e copertura

Le prestazioni e la copertura delle tecnologie WiMAX sono state valutate mediante il Tool TEABWA™. Esso è basato sull'omonimo Modello Ingegneristico TEABWA™ di proprietà intellettuale di WiTech. Tale tool consente di effettuare una dettagliata analisi sia tecnico sia economica delle tecnologie BWA (Broadband Wireless Access) in modalità di accesso fissa, nomade, portatile e mobile. Il modello complessivo può essere suddiviso in due sotto-modelli: il modello tecnico e il modello economico.

- Il **modello tecnico** si prefigge l'obiettivo di definire il layout di cella, mediante i modelli di path loss, e di dimensionare l'infrastruttura di rete, attraverso la pianificazione della copertura, della frequenza e della capacità.
- Il **modello economico** ha il principale obiettivo di stimare sia i CAPEX sia gli OPEX, per poter correttamente valutare le opportunità di business che la tecnologia in esame offre al service provider, considerando alcuni indicatori finanziari quali il NPV e il PBP.

L'analisi delle prestazioni e della copertura si focalizza sul profilo di certificazione 802.16-2004 WiMAX che opera nella banda dei 3.5 GHz con una canalizzazione di 7 MHz.

L'architettura di rete presa in esame è mostrata nella Figura 12: ogni BS è connessa alla backbone e fornisce servizi broadband a tutti gli utenti locati all'interno dell'area di copertura attraverso dispositivi utente (SU) sia di tipo indoor sia di tipo outdoor. Le SU indoor sono più adatte alle utenze residenziali, poiché possono essere installate dagli stessi utenti e sono più economiche; tuttavia, a causa della visibilità NLOS con la BS, supportano dei range di copertura minori. Le SU outdoor, invece, sono più adatte alle utenze business perché garantiscono prestazioni migliori, operando anche in scenari LOS, ma sono più costose e richiedono, spesso, un servizio di installazione.

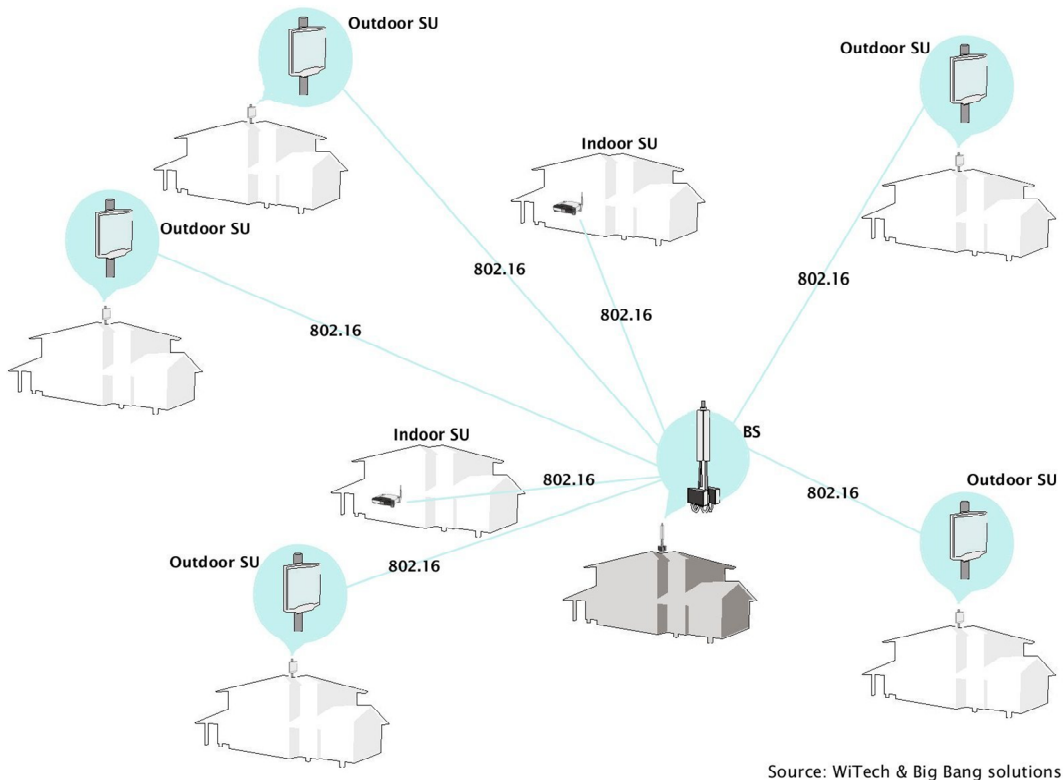


Figura 12 – Esempio di rete 802.16-2004 WiMAX

I parametri che sono analizzati sono i seguenti:

- Raggio di copertura relativo ad ogni modulazione supportata dalle tecnologie 802.16-2004 WiMAX (OFDM con 256 sottoportanti e rapporto di guardia pari a 1/32);
- Raggio di copertura medio che ottimizza la copertura;
- Raggio di copertura medio che ottimizza la capacità.

a partire dall'analisi del Link Budget relativo al down link.

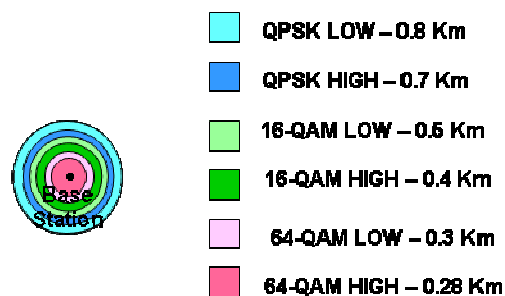
Le configurazioni della BS e della SU sia indoor sia outdoor sono riportate rispettivamente nella Tabella 5:

Tabella 5 – Caratteristiche della BS e della SU per la tecnologia 802.16-2004 WiMAX nella banda dei 3.5 GHz

Caratteristiche della BS	
Guadagno d'antenna	17 dBi
Massima potenza al connettore	22 dBm
Perdite in trasmissione	2 dB
EIRP	37 dBm
Numero di Settori	3
Caratteristiche della SU indoor	
Guadagno Antenna	11 dBi
Caratteristiche della SU outdoor	
Guadagno Antenna	18 dBi

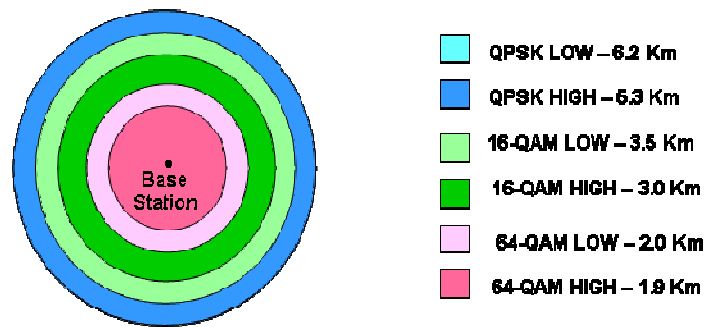
Come si evince dalla precedente tabella, le configurazioni delle SU non dipendono dalla banda presa in considerazione; ciò che varia, invece, è la configurazione della BS e, in particolare, la potenza al connettore d'antenna per rispettare i vincoli sul massimo EIRP.

Il primo parametro valutato è il raggio di copertura. Esso è definito come la massima distanza alla quale possono essere collocate la BS e la SU in modo da soddisfare i requisiti di bit rate previsti dallo standard, in corrispondenza di una particolare modulazione. Come mostrato nella Figura 13 e nella Figura 14, le prestazioni in termini di copertura del 802.16-2004 WiMAX con SU indoor risultano peggiori di quelle del 802.16-2004 WiMAX con SU outdoor, a causa del differente link budget. La SU indoor, infatti, è equipaggiata con un'antenna omnidirezionale con un guadagno di 11 dBi in visibilità NLOS con la BS; la SU outdoor, invece, è provvista di un'antenna direzionale avente un guadagno di 18 dBi in visibilità LOS con la BS.



Source: WiTech

Figura 13 – Raggio di copertura per la tecnologia 802.16-2004 WiMAX nella banda dei 3.5 GHz con SU indoor

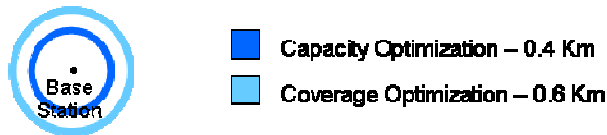


Source: WiTech

Figura 14 – Raggio di copertura per la tecnologia 802.16-2004 WiMAX nella banda dei 3.5 GHz con SU outdoor

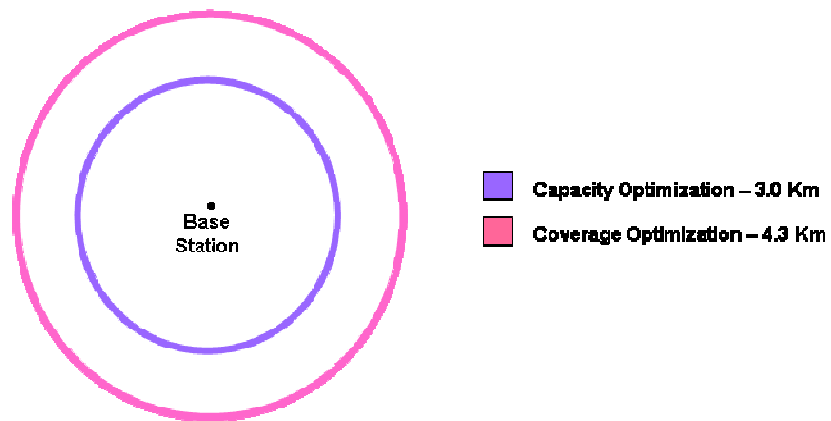
Gli altri due parametri che sono valutati sono il raggio medio che ottimizza la copertura e il raggio medio che ottimizza la capacità. Il raggio medio, in genere, è definito come una somma pesata dei vari raggi di copertura relativi alle modulazioni supportate dalla tecnologia in esame e dipende dal principio di ottimizzazione che si vuole adottare: ottimizzare la capacità oppure ottimizzare la copertura.

La Figura 15 e la Figura 16 mostrano il raggio medio nel caso in cui venga ottimizzata la copertura o la capacità per le tecnologie 802.16-2004 WiMAX, sia con SU indoor sia con SU outdoor. Come si poteva ben prevedere, in ogni applicazione il raggio medio che ottimizza la capacità è minore del raggio medio che ottimizza la copertura e, più in dettaglio, alle SU indoor è associato un raggio medio minore di quello associato a SU outdoor.



Source: WiTech

Figura 15 – Raggio medio della tecnologia 802.16-2004 WiMAX nella banda dei 3.5 GHz con SU indoor



Source: WiTech

Figura 16 – Raggio medio della tecnologia 802.16-2004 WiMAX nella banda dei 3.5 GHz con SU outdoor

La sperimentazione WiMAX in Italia

La Fondazione Ugo Bordoni

La Fondazione Ugo Bordoni è stata costituita nel 2000 e, con la legge 16 gennaio 2003 n.3, è stata riconosciuta come istituzione privata di alta cultura. Essa coadiuva operativamente il Ministero delle Comunicazioni in problematiche di carattere tecnico, economico, finanziario, gestionale, normativo e regolatorio, e collabora con enti pubblici e privati. È, inoltre, impegnata in molte attività di ricerca a breve e lungo termine, di studio e di consulenza nei settori delle Tecnologie delle Comunicazioni e dell'Informazione.

I progetti nei quali è coinvolta spaziano nei campi più avanzati delle telecomunicazioni, dalla sicurezza di Internet al digitale terrestre, dai sistemi radio a basso impatto ambientale alle nuove tecnologie per l'accesso al web mediante dispositivi wireless. Tra i progetti più interessanti si annoverano il coordinamento della sperimentazione WiMAX e della transizione al digitale terrestre e la rete di monitoraggio dei campi elettromagnetici.

Relativamente al coordinamento della sperimentazione WiMAX, la FUB, con l'Ufficio 3° della Direzione Generale Pianificazione e Gestione dello Spettro Radio del MINCOM, ha costituito un gruppo di lavoro coordinato dall'ing. Troisi con assistenza tecnica dell'ing. Di Zenobio, il cui scopo è quello di gestire la sperimentazione WiMAX.

L'attività di sperimentazione

La sperimentazione WiMAX è iniziata il primo luglio del 2005 e si prefigge come obiettivo quello di capire quali siano le effettive potenzialità ed i limiti della tecnologia WiMAX in condizioni ambientali differenti e quali siano le reali possibilità di sviluppo.

La sola banda designata ai fini della sperimentazione è la banda licenziata dei 3.4 – 3.6 GHz, la quale è attribuita al Ministero della Difesa che la usa per il servizio fisso e di radiolocalizzazione, servizi svolti mediante apparati trasportabili e, quindi, non è facile prevedere la coesistenza di WiMAX con le applicazioni della Difesa.

Il Ministero della Difesa ha acconsentito alla sperimentazione su un numero limitato di canali e in alcune località; in particolar modo ha reso disponibili 22 canali da 7 MHz, indicati nella Tabella 1.



Tabella 1 – Frequenze autorizzate e rese disponibili

Zona	Disponibilità	Canali individuati [MHz] (3.4 – 3.5 GHz)	Canali individuati (3.5 – 3.6 GHz)
Milano	4 x 7 MHz	3426-3433 3472-3479 3479-3486 3486-3493 (16 canali da 1.75 MHz)	3526-3533 3572-3579 3579-3586 3586-3593 (16 canali da 1.75 MHz)
Roma	2 x 7 MHz	3415-3422 3424-3431 (8 canali da 1.75 MHz)	3515-3522 3524-3531 (8 canali da 1.75 MHz)
Arezzo	2 x 7 MHz	3440-3447 3447-3454 (8 canali da 1.75 MHz)	3540-3547 3547-3554 (8 canali da 1.75 MHz)
Piemonte	2 x 7 MHz	3465-3472 3472-3479 (8 canali da 1.75 MHz)	3565-3572 3572-3579 (8 canali da 1.75 MHz)
Valle d'Aosta	2 x 7 MHz	3465-3472 3472-3479 (8 canali da 1.75 MHz)	3565-3572 3572-3579 (8 canali da 1.75 MHz)
Sardegna	2 x 7 MHz	3447-3454 3454-3461 (8 canali da 1.75 MHz)	3547-3554 3554-3561 (8 canali da 1.75 MHz)
Abruzzo	2 x 7 MHz	3440-3447 3513-3520 (8 canali da 1.75 MHz)	3541-3548 3593-3600 (8 canali da 1.75 MHz)
Sicilia	2 x 7 MHz	3436-3443 3489-3496 (8 canali da 1.75 MHz)	3536-3543 3589-3596 (8 canali da 1.75 MHz)
Parma	2 x 7 MHz	3442-3449 3449-3456 (8 canali da 1.75 MHz)	3542-3549 3549-3556 (8 canali da 1.75 MHz)
Toscana	2 x 7 MHz	3480-3487 3487-3494 (8 canali da 1.75 MHz)	3568-3575 3575-3582 (8 canali da 1.75 MHz)

Al fine di limitare l'interferenza con le strumentazioni del Ministero della Difesa, inoltre, è stato fissato un valore limite della massima potenza EIRP in trasmissione pari a 36 dBm.

È bene osservare che la sperimentazione è di tipo tecnologico, ovvero i costruttori di apparati sono coinvolti in prima persona in quanto devono misurare, in campo, parametri prestazionali, quali il throughput in downlink/uplink, lo spettro del segnale ricevuto, la latenza dei pacchetti ricevuti, il rapporto SNR in downlink/uplink, la misura della sensibilità del ricevitore, il packet loss. I costruttori coinvolti nella sperimentazione sono indicati nella Tabella 2.



Tabella 2 – Costruttori autorizzati

Costruttori autorizzati
Airspan Communications Limited
Alvarion Ltd
Aperto Networks
Navini
Nera Networks
NexNet Wireless
Proxim Corporation
Redline Communications
S.I.C.E. Società Italiana Costruzioni Elettroniche
Selenia Communications S.p.A.
Siemens Mobile Communication Spa
ZTE Corporation

Le sperimentazioni autorizzate sono poco più di una cinquantina, mentre quelle attualmente in corso sono all'incirca quaranta.

I test previsti, come da specifiche della FUB, sono relativi sia al PHY Layer sia al MAC Layer: per quanto riguarda i primi, essi includono i test per la valutazione delle prestazioni del link radio, ossia della potenza ricevuta in down link e in up link, del SNR in down link e in up link e della sensibilità del ricevitore; per quanto, invece, riguarda i secondi, includono test per la valutazione del throughput sia in up link sia in down link al variare di alcuni parametri, quali il bit rate di trasmissione, la dimensione dei pacchetti trasmessi, la latenza introdotta e il jitter.

La sperimentazione sta dimostrando che la tecnologia WiMAX ha ottime prestazioni sia in ambiente urbano sia in ambiente rurale. È bene, però, osservare che i trial in atto non consentono di valutare in modo corretto e adeguato le potenzialità della tecnologia WiMAX perché gli scenari operativi riprodotti sono poco realistici.

Solo in alcuni trial, infatti, sono state fatte prove di traffico multiuser. Poiché sono state attivate contemporaneamente su uno stesso settore poche SU, non sono state simulate le reali condizioni di carico a cui la BS deve far fronte in un deployment per la rete d'accesso.

Poche, inoltre, sono le sperimentazioni con SU indoor e, quindi, il deployment indoor è quasi del tutto inesplorato.



Conclusioni

Le tecnologie WiMAX sono una valida alternativa alle tecnologie broadband trazionali, quali XDSL, cable modem e fibra ottica, in quanto permettono ad un SP di realizzare una propria infrastruttura di rete con una forte scalabilità in termini sia di investimenti sia di capacità dei servizi.

Scenari di particolare interesse sono sia le zone di non competitività tecnologica, quali le aree di Digital Divide o le aree ove la presenza delle tecnologie xDSL non è in grado di garantire le prestazioni aspettate a causa della scarsa qualità del doppino tradizionale, sia le zone di competitività monopolizzate dalla presenza del doppino tradizionale, poiché consentono di ridurre notevolmente i costi di infrastruttura per i nuovi operatori.

Le tecnologie WiMAX permettono di garantire ottime prestazioni sia in termini di capacità, anche con carichi di cella molto elevati, sia in termini di copertura, anche se la presenza di SU indoor ne riduce fortemente le prestazioni.

Inoltre esse preservano i SP dal rischio di un investimento legato all'utilizzo di prodotti di un'unica azienda manifatturiera in quanto garantiscono l'interoperabilità sia lato BS sia lato SU per ogni profilo di certificazione.



Acronimi

AAA	Authentication, Authorization and Accounting
AAS	Adaptive Antenna System
AMC	Adaptive Modulation and Coding
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
CEPT	Conference of European Postal and Telecommunications
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
FDD	Frequency Division Duplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FFT	Fast Fourier Transform
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
LOS	Line Of Sight
MAC	Media Access Control
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PHY	Physical
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality Of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
SME	Small Medium Enterprise
SoC	System on Chip
SOFDMA	Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access
SP	Service Provider
STC	Space Time Code
SU	Subscriber Unit



TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TEABWA	Technical Economic Analysis for Broadband Wireless Access
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
VoIP	Voice over IP
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access



Bibliografia

- [1] WiMAX Forum, Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks, November 2005.
- [2] IEEE Std 802.16-2004, IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, March 2004.
- [3] IEEE P802.16e, Draft amendment to IEEE standard for local and metropolitan area networks, Part 16: air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems, amendment for physical and medium access control layers for combined fixed and mobile operation in Licensed bands.
- [4] H.R. Anderson, Fixed Broadband Wireless System Design, West Sussex John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [5] Telecom Italia Lab, A. Calcagno, E. Buracchini, La Tecnica OFDM nell'evoluzione dell'accesso radio UMTS, Febbraio 2003.
- [6] ADAPTIX technology Primer, An overview of the key technology concepts and drivers behind the ADAPTIX OFDMA/TDD™ Architecture, April 2005.
- [7] Intel, Scalable OFDMA Physical Layer in IEEE 802.16 WirelessMAN, August 2004
- [8] Intel, Avril Salter, IEEE 802.16 - WiMAX Broadband Wireless Access, August 2004.
- [9] CEFRIEL, WiMAX Technology, a reshuffle for telecom operators? La comparazione dei costi e delle performance, 1 June 2005.
- [10] Intel, Deploying License-Exempt WiMAX Solutions.
- [11] E. G. Larsson, P. Stoica, Space-time block coding for wireless communications, Cambridge University Press 2003.
- [12] Telecom Italia Lab, E. Briola, B. Melis, A. Ruscitto, Sistemi di telecomunicazione di tipo MIMO con Antenne Multiple in Trasmissione e in Ricezione, Marzo 2004.
- [13] <http://www.wimaxforum.org>
- [14] WiMAX Forum, Mobile WiMAX – Part 1: A Technical Overview and Performance Evaluation, 21 February 2006.

