

Femtocell per sistemi cellulari di nuova generazione

Sommario

1	Reti femtocell	3
1.1	Introduzione	3
1.2	Introduzione alle reti cellulari	4
1.2.1	Copertura a celle	6
1.2.2	Gestione della mobilità	6
1.2.3	Riuso delle frequenze	8
1.3	Che cosa sono le femtocell.....	10
1.3.1	Motivi per cui si sono introdotte le tecnologie femtocell.....	10
1.3.2	Enti di standardizzazione che stanno sviluppando le tecnologie femtocell.....	13
1.4	Problematiche legate all'installazione delle reti femtocells	13
1.4.1	Management dell'interferenza: compatibilità e pianificazione della rete femtocell.....	14
1.4.2	Controllo d'accesso	16
1.4.3	Handout, handin e handover	17
2	Soluzioni adottate dagli standard UMTS,WiMAX e LTE	19
2.1	UMTS.....	19
2.1.1	Architettura di rete.....	19
2.1.2	Impatto delle Femtocell sull'architettura di rete UMTS	23
2.1.3	Interfaccia aria e rete d'accesso.....	25
2.1.4	Management dell'interferenza	27
2.1.5	Controllo d'accesso	28
2.1.6	Handover tra femtocells e macrocells nelle reti UMTS.....	30
2.2	LTE	34
2.2.1	Architettura di rete.....	35
2.2.2	Interfaccia aria.....	37
2.2.3	Procedure di base per ottenere un indirizzo IP nella rete LTE	39
2.2.4	Gestione dell'interferenza: autonomous component carrier selection per reti LTE	40
2.2.5	Gestione della mobilità per femtocell nella rete LTE	45
2.2.6	Gestione adattiva del livello di potenza per femtocell	47
2.3	WiMAX.....	50
2.3.1	Architettura di rete.....	51

2.3.2	Schema di gestione per l'handover assistito dalla rete per femtocell WiMAX.....	52
2.3.3	Controllo d'accesso per reti femtocell WiMAX	56
Capitolo 3	60
3	Confronto tra gli standard UMTS, LTE e WiMAX.....	60
3.1	Introduzione	60
3.2	Passaggio dalla tecnologia 3G alla 4G	61
3.3	Le Femtocell nella tecnologia 4G	63
4	Reference	64

Capitolo 1

Reti femtocell

1.1 Introduzione

La telefonia mobile è ormai una tecnologia consolidata a livello mondiale e il suo sviluppo nella qualità e quantità di servizi offerti agli utenti ha già portato attraverso quattro generazioni di sistemi cellulari in meno di trent'anni: era infatti il 1983 quando fu messo in commercio il primo telefono cellulare. Le richieste e le aspettative dei clienti hanno seguito l'avanzamento tecnologico dei tempi e uno degli aspetti che negli ultimi anni ha influenzato maggiormente lo sviluppo in questo campo, soprattutto nell'ultimo decennio, è senz'altro il successo di internet e il suo inserimento nella società contemporanea, portando a nuove frontiere della telefonia mobile.

In questa tesi si analizza l'introduzione delle femtocell, strettamente connesse al vasto utilizzo di internet, le quali porteranno ad avere una connessione a banda larga quasi in ogni casa: è infatti questa connessione che le femtocell sfruttano per fornire un servizio telefonico e di accesso ad internet ad alta velocità dal telefono cellulare dell'utente finale e consentire, tra gli altri vantaggi, un considerevole risparmio economico ai gestori di rete. La commercializzazione delle femtocell, tuttavia, è condizionata dal modo in cui esse potranno adattarsi e inserirsi negli standard attuali e futuri di telefonia cellulare e per questa ragione diversi enti e organizzazioni stanno lavorando.

Nella tesi saranno affrontate le soluzioni e le problematiche incontrate nello sviluppo delle femtocell per inserirsi nel principale sistema cellulare utilizzato a livello europeo, l'Universal Mobile Telecommunications System (UMTS), e nei due più importanti sistemi di comunicazione mobile di nuova generazione: il Long Term Evolution (LTE) e il Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX). Infine si cercherà di fornire un confronto tra le diverse soluzioni, analizzando i motivi dell'introduzione di una nuova generazione di sistemi cellulari e come le femtocell si inseriscono e modificano questo cambiamento.

1.2 Introduzione alle reti cellulari

La rete cellulare è una rete di telecomunicazioni wireless, che consente la radiocomunicazione tra terminali mobili sparsi su un territorio, in cui la copertura geografica è realizzata con una tassellazione a celle: porzioni di area geografica che unite ricoprono perfettamente una zona. Una rete cellulare fornisce la copertura tramite le base-station (BS) collegate in rete tra di loro e normalmente con altre reti (es. telefonia fissa e internet); le BS fungono da trasmettitore, ricevitore e unità di controllo, ognuna delle quali trasmette, con una potenza adeguata alla copertura della cella, dando la possibilità agli utenti che si trovano entro il suo raggio di copertura di comunicare (figura 1); se gli utenti, infatti, non si trovano in quella zona, ricevono un segnale con qualità scadente, inadatto a sostenere una comunicazione, mentre

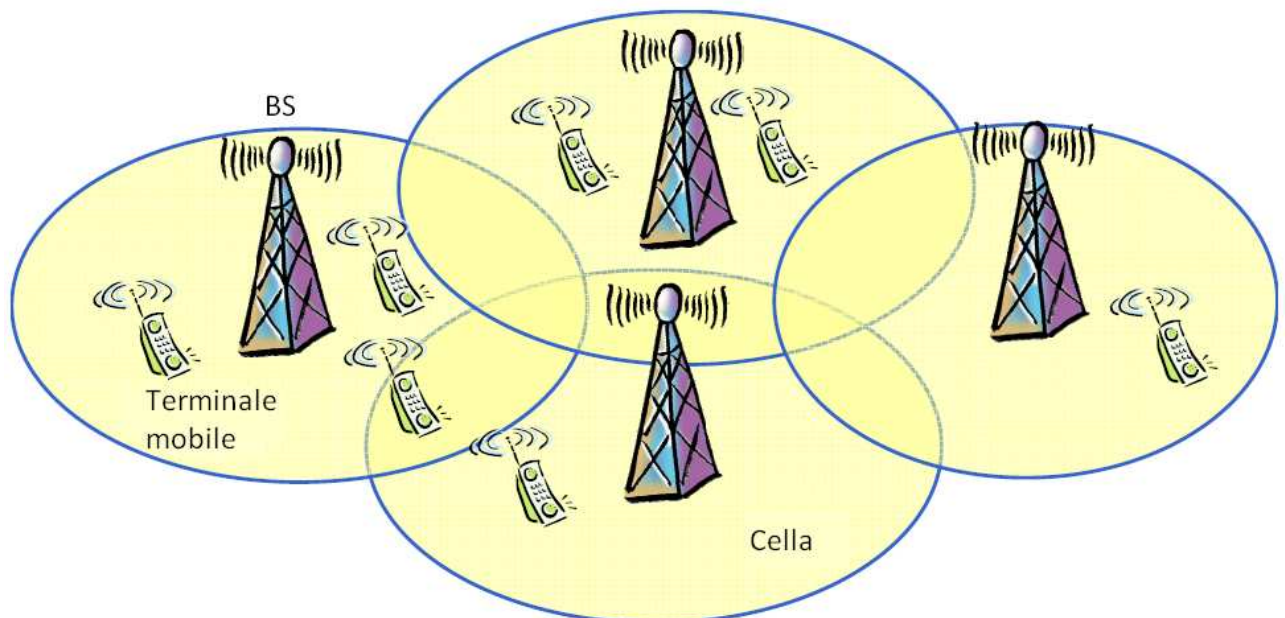


Figura 1: Rappresentazione della copertura a celle per la telefonia mobile

dentro il raggio di copertura la BS trasmette un segnale di qualità buona o ottima (a seconda della distanza fra utente e stazione). Un utente che vuole ricevere il servizio deve selezionare preliminarmente un operatore telefonico stipulando un contratto di abbonamento con esso; quindi il terminale dell'utente rimane in costante ascolto dell'ambiente radio della rete (almeno) dell'operatore selezionato; in particolare, il terminale identifica e demodula i segnali emessi con continuità dalle BS allo scopo di "scoprire" l'infrastruttura di copertura presente e quindi seleziona la BS candidata per tentare un accesso

iniziale, sulla base di criteri di ottimalità dal punto di vista radio, effettuando misure sulla qualità del segnale ricevuto.

Si possono sempre individuare due stati dal punto di vista del terminale utente:

- **Stato attivo:** vengono assegnate delle risorse trasmissive che gli permettono la comunicazione con l'infrastruttura fissa di rete allo scopo di trasferire informazione, di utente o di controllo, dal terminale alla BS e/o dalla BS al terminale;
- **Stato inattivo:** pur essendo acceso, nessuna risorsa di trasferimento è assegnata al terminale che comunque è in grado di ascoltare le informazioni diffuse dalla rete.

Le BS vengono collegate via cavo tra di esse e ad altri nodi, detti nodi d'accesso, e da questi sono collegate alla rete dorsale (core network) della rete cellulare, che consta di un insieme di nodi di commutazione interconnessi, aventi funzioni di indirizzamento, instradamento, tariffazione e controllo della qualità del servizio.

Inizialmente (anni '70) le regioni di copertura erano molto grandi (raggio di alcuni km) e si utilizzava, per una sola stazione, l'intero spettro delle frequenze.

Oggi, invece, le stazioni coprono aree più piccole quindi, a differenza di prima, le antenne erogano una potenza minore. Inoltre celle vicine usano di solito frequenze diverse per evitare interferenze mentre le celle sufficientemente distanti possono utilizzare le stesse frequenze.

I tre principi fondamentali su cui si basa una buona progettazione e gestione di reti cellulari sono:

- copertura a celle
- gestione della mobilità
- riuso delle frequenze.

1.2.1 Copertura a celle

Il territorio viene tassellato interamente con celle: la copertura, idealmente, deve essere presente su tutta l'area e senza sovrapposizioni di celle. Poiché in origine le stazioni base disponevano di antenne isotropiche, le celle risultavano avere forma circolare che non garantiva una perfetta copertura totale senza sovrapposizioni o spazi scoperti.

Per ottenere una tassellazione totale di una superficie piana le celle possono avere forma di:

- quadrati
- triangoli equilateri
- esagoni.

Il poligono che garantisce la copertura totale di una superficie piana, approssimando meglio un cerchio è l'esagono, quindi, fra i tre disponibili, viene usato questo poligono per approssimare una copertura a celle sul territorio; inoltre, se la BS è posta al centro, questa soluzione garantisce che sia equidistanziata da tutte le BS delle celle vicine.

Nella realtà le celle non sono ovviamente perfettamente regolari ma vengono assunte tali per l'analisi sistematica della copertura di rete; la loro forma e dimensione dipende, infatti, da diversi fattori:

- potenza delle antenne
- guadagno di antenna
- morfologia del territorio
- condizioni di propagazione.

1.2.2 Gestione della mobilità

La mobilità è l'elemento caratterizzante le reti cellulari; per la sua realizzazione occorrono alcune procedure:

- roaming
- location updating

- paging
- handover.

Roaming

Il roaming è la possibilità di rintracciare l'utente con terminale acceso all'interno della rete; per le reti cellulari la localizzazione avviene su base Location Area (LA) cioè su un insieme di celle che rappresenta la granularità con cui la rete individua la posizione dell'utente. Ogni LA infatti ha un identificativo specifico e la posizione di ogni utente è memorizzata su un database, in termini di LA, e aggiornata ogni volta in cui l'utente esca dall'LA. Questo termine assume, in ambito di telefonia cellulare, anche altri significati: per esempio, indica anche il supporto al transito dell'utente tra reti mobili possedute da altri operatori o può indicare il transito tra reti di due nazioni.

Location Updating

Questa procedura permette di aggiornare la rete cellulare sulla posizione dell'utente. Nella LA ogni BS diffonde in broadcast il Location Area Identifier (LAI); se un utente riceve un LAI diverso da quello memorizzato informa la rete del suo spostamento richiedendo un location updating per aggiornare la sua nuova posizione.

Paging

Dato che l'interfaccia radio è condivisa tra tutti i terminali utente, occorrono canali di segnalazione comuni per notificare a un terminale la presenza di traffico entrante ad esso destinato. Su uno di essi la rete invia un messaggio di paging in tutte le celle della LA per segnalare il traffico in entrata all'utente destinatario.

Più è grande un LA e meno spesso gli utenti si sposteranno quindi il location updating verrà attivato raramente; tuttavia occorrerà molto più tempo per identificare un utente destinatario di una chiamata.

Handover

La prerogativa importante di una rete cellulare è quella per cui gli utenti, spostandosi di cella in cella, non

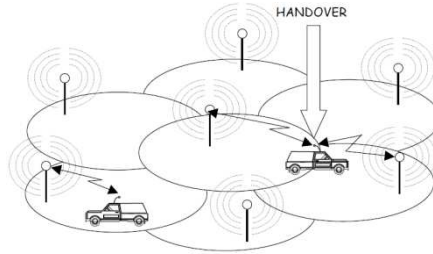


Figura 2: Handover tra due celle

perdano una comunicazione in atto.

Questa procedura consente il trasferimento di una chiamata in corso da una cella ad una cella adiacente nel caso in cui l'utente compia tale spostamento (figura 2). L'handover necessita di:

- meccanismi di rivelazione della qualità e caratteristiche delle risorse radio assegnate,
- meccanismi decisionali per definire quale BS è opportuno selezionare di volta in volta come BS "servente",
- meccanismi di rilascio e ri-assegnazione delle risorse radio passando dalla BS attuale alla nuova BS.

1.2.3 Riutilizzo delle frequenze

Avendo a disposizione un numero limitato di risorse radio si cerca di:

- assicurare la copertura del territorio,
- servire un numero elevato di utenti.

Lo spettro delle frequenze viene diviso in un numero N di canali e per ognuno di essi si definisce una frequenza portante.

Gli N canali vengono a loro volta partizionati in cluster; un cluster è l'insieme delle celle (G) adiacenti che usano tutto lo spettro di frequenze, ovvero tutti gli N canali. Per la copertura del territorio si usano più cluster, nei quali le celle che utilizzano le medesime frequenze, dette celle co-canale, sono disposte a una distanza tale che non interferiscano fra loro mentre le celle adiacenti utilizzano frequenze diverse: a parità

di superficie della cella, se si analizza la distanza delle celle co-canale, maggiore sarà questa distanza, minore sarà l'interferenza prodotta fra di esse migliorando la qualità delle comunicazioni.

Se si indica con K la partizione descritta, che indica il numero di canali assegnati a ogni cluster si ha

$$K = \frac{N}{G} \quad (1)$$

Indicando con M il numero di cluster presenti nell'area, il numero totale di canali utilizzabili può essere considerato come una misura della capacità del sistema cellulare in quella zona:

$$C = M \cdot G \cdot K \Rightarrow C = M \cdot G \cdot \frac{N}{G} \Rightarrow C = M \cdot N \quad (2)$$

Se si riduce il numero G di celle per cluster, mantenendo costante la superficie di ogni cella, un numero maggiore di cluster saranno necessari per coprire una data area, e, insieme alla capacità, crescerà anche il costo di gestione della rete. Un valore piccolo di G indica al tempo stesso che le celle co-canale sono più vicine fra loro e che quindi il sistema è più soggetto a interferenza e la qualità del servizio è peggiore.

Il trade off della rete sarà perciò tra qualità, capacità e costi di gestione.

Due tecniche di progetto permettono di aumentare la capacità riducendo l'interferenza:

- **Splitting:** consiste nel sostituire le grandi celle con un certo numero di celle più piccole. La scarsità delle risorse radio rende necessario riusare più volte le stesse frequenze per soddisfare i requisiti di capacità di traffico e in questo senso celle più piccole semplificano il progetto dal punto di vista dell'interferenza.

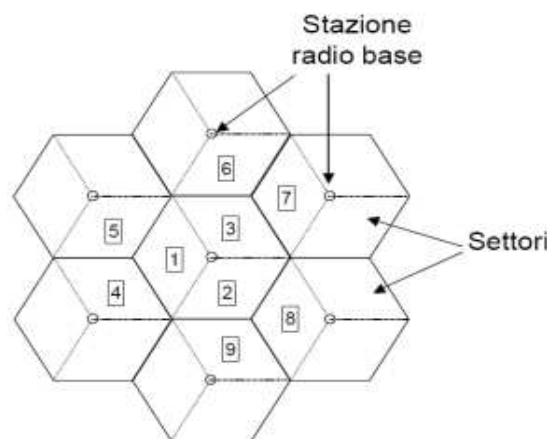


Figura 3: Sectoring delle celle

- **Sectoring:** La cella viene divisa in settori con l'installazione di antenne direttive (figura 3), dove ognuna utilizza frequenze le stesse; la configurazione tipica viene chiamata tri-cellulare perché prevede tre settori per cella: i settori vengono creati con tre antenne direttive a 120°. L'uso di antenne direttive causa però interferenza, anche elevata, ma solo nella direzione di propagazione privilegiata; si può ridurre tale disturbo inclinando le antenne verso il basso di qualche grado (operazione di tilt).

1.3 Che cosa sono le femtocell

Le femtocell sono delle mini-celle create per migliorare l'efficienza della rete in termini di copertura, capacità e qualità garantendo anche una spesa ridotta per farlo [1]. Una maniera certa per incrementare la capacità di un collegamento radio è di mettere vicini tra loro il ricevitore e il trasmettitore: riducendo la distanza, diminuisce l'attenuazione, si aumenta il rapporto segnale-rumore (SNR) e dunque per il teorema di Shannon aumenta la capacità. Le femtocells rendono questo possibile introducendo una BS, chiamata femtocell access point (FAP), installata dall'utente finale all'interno del proprio edificio, capace di trasmettere con bassa potenza trasmissiva (anche meno di 100mW), permettendo ai terminali utenti presenti nella sua cella di collegarsi alla rete dell'operatore tramite una connessione broadband a internet (come può essere quella Digital Subscriber Lines (DSL) di figura 4).

Questa tecnologia si discosta dall'usuale copertura cellulare estesa (basata sulle macrocells), fornendo una copertura limitata a una decina di metri, finalizzata a un'eccellente copertura indoor degli edifici che consenta agli utenti un'alta qualità del servizio.

1.3.1 Motivi per cui si sono introdotte le tecnologie femtocell

I motivi per cui si sono sviluppate le femtocells sono legati ad alcuni problemi dei sistemi basati sulle macrocells come:

- La forte attenuazione e deteriorazione del segnale, dovuta alle alte frequenze solitamente usate nei sistemi di terza generazione (3G), quando il segnale raggiunge l'interno degli edifici. Le ultime

statistiche indicano però che il 50% delle chiamate e il 70% del traffico dati (data service) saranno effettuare indoor nei prossimi anni [2].

- Una delle fondamentali caratteristiche della Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA), il protocollo di trasmissione usato dai sistemi 3G, è che l'effettiva capacità della cella è limitata dall'interferenza.
- Il reale servizio di 3G, che richiede una grande larghezza di banda, è utilizzabile solo dagli utenti che si trovano vicino alla BS (per avere una buona qualità del segnale) e se il numero di utenti simultanei è piccolo (per avere bassa interferenza a livello della cella); tutto questo è però irrealizzabile, se si vuole soddisfare ogni utente, per via dei costi di installazione e di mantenimento delle macrocell e

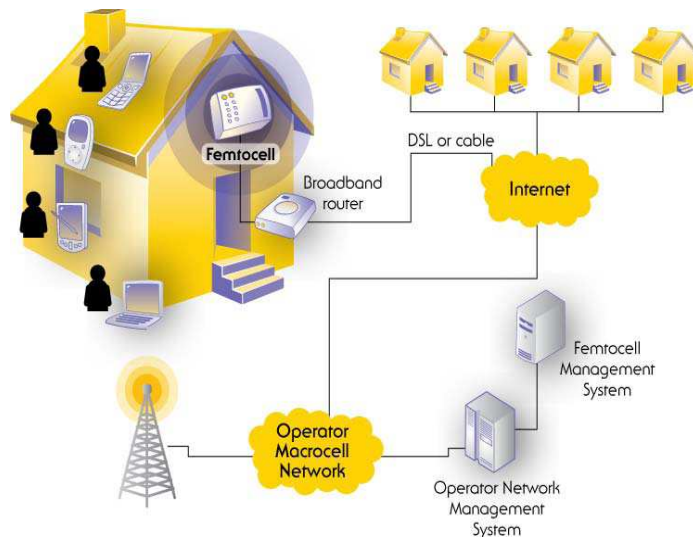


Figura 4: Schema base per la rete femtocell

perciò, in realtà, si ha una situazione in cui l'effettivo data rate nella macrocell è solo una frazione del massimo data rate teorico che dovrebbe essere offerta nei servizi 3G.

La soluzione a questi problemi dovrebbe soddisfare due requisiti: una buona qualità del segnale indoor e un basso numero di utenti simultanei per ogni cella, entrambe qualità che le femtocell possiedono, portando il servizio ai veri standard 3G.

I vantaggi dell'introduzione delle femtocell sono molteplici sia dal punto di vista degli operatori telefonici sia dal punto di vista degli utenti finali:

- *Gli utenti* avendo un servizio dedicato hanno una migliore copertura e qualità indoor, sia per il servizio voce sia per il traffico dati: il primo diventa comparabile per qualità a quello del telefono fisso e per questa ragione si guarda alle femtocells come la tecnologia in grado di sostituirlo. La bassa copertura indoor causa infatti insoddisfazione tra gli utenti che preferiscono mantenere il telefono fisso per le chiamate da casa mentre le femtocell vogliono incoraggiare a utilizzare la telefonia cellulare in qualunque ambiente. Al tempo stesso il traffico dati è molto maggiore in quanto, a disposizione di pochi utenti, è offerta una grande larghezza di banda capace di fornire ai clienti servizi e applicazioni innovative come possono essere l'Instant Messaging, video on demand, mobile TV interattiva, giochi interattivi o comunque in generale tutti i servizi offerti dal mobile internet. Inoltre la loro installazione introduce un forte risparmio di potenza, una riduzione di interferenza elettromagnetica e un risparmio energetico, dovuti alla bassa potenza trasmessa dalle BS delle femtocell.
- *Gli operatori* di rete invece possono allargare la copertura offerta sul territorio dove questa è scarsa o assente, introducendo le economiche femtocell, pagate per averle e mantenute dall'utente finale, in alternativa alla costosa installazione di una nuova macrocell; gli studi hanno appurato che una tipica macrocell urbana, negli Stati Uniti, costa più di 1000 dollari per affitto della postazione per la trasmissione del segnale, oltre alle spese per l'elettricità. L'adozione delle femtocell porterebbe le spese di gestione dai 60.000 dollari annui delle macrocell agli appena 200 dollari annui delle femtocell [3]. Inoltre quest'ultime dirottano parte del traffico radio, che usualmente si ha verso le BS delle macrocell, sui FAP e quindi sul cavo telefonico già esistente in ogni casa. Infatti con l'incredibile aumento del traffico dati richiesto dai cellulari che hanno l'accesso internet gli operatori telefonici hanno bisogno continuamente di incrementare la capacità dei loro accessi radio alle reti e le femtocell soddisfano questa necessità con una spesa ridotta da parte dell'operatore che risparmia in questo modo sia sul costo di gestione sia sul capitale da investire per l'allargamento della rete [4].

1.3.2 Enti di standardizzazione che stanno sviluppando le tecnologie femtocell

Le caratteristiche delle femtocell, tra la fine del 2007 e l'inizio del 2008, hanno catturato l'attenzione dei maggiori operatori telefonici del mondo che negli ultimi anni hanno spinto per sviluppare la tecnologia e renderla pronta alla distribuzione di massa, arrivando a sviluppare femtocell di terza generazione [5]. Al momento a livello europeo è ancora scarsa la presenza sul mercato di questo prodotto ma le stime dicono che per il 2012 intorno ai 70 milioni di FAP saranno installate nel mondo, servendo più di 150 milioni di clienti [6].

Insieme alla straordinaria evoluzione tecnologica delle femtocell si è portato avanti un continuo progresso sul fronte della standardizzazione dei prodotti, operate da enti di standardizzazione come il Third Generation Partnership Project (3GPP [7]), che sviluppa gli standard per sistemi WCDMA, e la 3GPP2 [8] che sviluppa gli standard per sistemi cdma2000, senza i quali le femtocell non sarebbero mai progredite e accettate nel mercato; c'è da annoverare inoltre l'impegno in questo campo di un'altra organizzazione: la WiMAX Forum [9], che si è impegnata nella standardizzazione delle femtocell nell'ambito dello standard WiMAX. L'ultima organizzazione non di standardizzazione da annoverare che si è impegnata a contribuire ai progetti di standardizzazione, promuovendo l'adozione delle femtocells su larga scala, è il Femto Forum [10]: questo conta più di 120 membri tra venditori hardware, software e operatori cellulari che sono promotori dello sviluppo della tecnologia femtocell affiancando spesso gli enti preposti alla standardizzazione.

1.4 Problematiche legate all'installazione delle reti femtocells

Accanto ai vantaggi ci sono state delle problematiche che si sono dovute affrontare per introdurre le femtocell nella rete preesistente delle macrocell: l'interferenza nelle sue diverse forme è senza dubbio la maggiore sfida tecnica che si è dovuto risolvere per rendere possibile la larga distribuzione delle femtocell [11]. Infatti a differenza delle reti coperte dalle macrocell, le femtocell sono installate dall'utente finale che potrebbe non avere nessuna conoscenza riguardo al posizionamento di un'antenna o alla configurazione di

un sistema. In questo scenario le femtocell non possono essere posizionate secondo una determinata organizzazione, come invece avviene per le BS delle macrocell, e probabilmente verranno posizionate in luoghi già coperti da una macrocell, creando in questo modo dell'interferenza con essa; non è quindi data una particolare attenzione agli aspetti di interferenza con le celle adiacenti, macro o femto che siano.

Un altro aspetto che si deve analizzare è l'utilizzo delle risorse della femtocell: è necessario stabilire un controllo d'accesso per preservare le risorse per gli utenti che hanno pagato per averle, bloccando l'accesso agli altri utenti, anche se questi sono sotto la copertura della femtocell e ricevono un segnale migliore da essa.

Terzo aspetto da considerare è la garanzia del servizio per un utente in movimento che sta passando da una femtocell a una macrocell (handout), da una macrocell a una femtocell (handin) o da una femtocell a una adiacente (handover): le femtocell devono permettere al terminale utente di accorgersi quando è sotto la copertura fornita dal FAP e usufruire delle sue risorse per tutto il tempo in cui vi resta; mentre deve segnalare alla macrocell adiacente (o sovrastante) o alle femtocell adiacenti lo spostamento dell'utente nel caso in cui stia uscendo da essa [12].

Tutti questi aspetti infine devono conciliarsi con l'intento della tecnologia di espandersi sul mercato su larga scala a livello mondiale ad un prezzo competitivo con le attuali tecnologie radio: ciò implica che le femtocell devono risolvere questi problemi ma per farlo non devono introdurre nella sua struttura componenti e soluzioni che la sfavorirebbero sul mercato.

1.4.1 Management dell'interferenza: compatibilità e pianificazione della rete femtocell

Le due tipologie di interferenza che si possono incontrare installando una femtocell sono:

- **Interferenza tra macrocell e femtocell:** le femtocell possono causare interferenza, sia sul canale di uplink sia downlink, dovuta alla necessità dell'introduzione del controllo d'accesso. Per esempio una femtocell installata vicino a una finestra di un edificio può causare interferenza sul canale downlink di un terminale situato al di fuori dell'edificio che è servito da una macrocell.

- **Interferenza tra femtocell:** le femtocell possono crearsi interferenza a vicenda a causa dell'installazione non pianificata. Per esempio in un condominio una femtocell installata vicino a un muro separatorio tra due appartamenti può causare interferenza alla femtocell dell'appartamento adiacente. In questo caso la femtocell con il segnale più potente potrebbe non servire entrambi gli utenti per via del controllo d'accesso e quindi il terminale dell'utente che possiede la femtocell col segnale meno potente continuerebbe a provare inutilmente a collegarsi all'altra femtocell.

Dal momento che la copertura delle frequenze radio non è manualmente ottimizzate dagli operatori cellulari, in quanto l'installazione è operata singolarmente da ogni utente finale la pianificazione della rete è assente; l'interferenza delle frequenze radio perciò non è gestita da particolari metodi per la sua attenuazione, e per questo motivo è necessario che le femtocell siano in grado di autoconfigurarsi, settando dei parametri per minimizzare l'interferenza fra celle adiacenti in maniera indipendente da femtocell a femtocell.

Inoltre la parte dello spettro assegnato agli operatori è limitato, perciò macrocell e femtocell dovranno condividere almeno una frequenza per migliorare l'efficienza dello spettro in uso. Senza uno spettro assegnato unicamente alle femtocell, quest'ultime potrebbero infatti soffrire di seri problemi di interferenza. Si danno tre possibili soluzioni al problema:

- assegnare frequenze diverse a femtocell e macrocell;

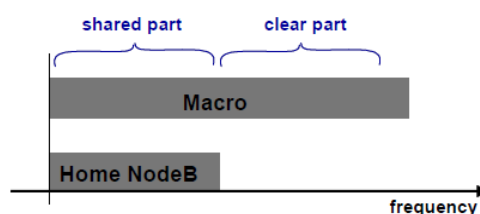


Figura 5: Semi-condivisione delle frequenze tra macrocell e femtocell

- assegnare alle macrocell l'intero spettro delle frequenze e concedere di utilizzare alle femtocell solo una parte di esse (figura 5);

- condividere lo stesso spettro di frequenze tra macrocell e femtocell: questo avviene, ad esempio, grazie a tecniche di modulazione che permettono a due flussi di dati di essere trasmessi sulle stesse frequenze senza che si crei mutua interferenza.

1.4.2 Controllo d'accesso

Per proteggere l'uso di risorse limitate le femtocell devono essere configurate in modi differenti per permettere o impedire l'accesso a determinati utenti; in questo senso vengono proposte tre soluzioni d'accesso:

- Open: tutti possono usufruire del servizio offerto dalla femtocell; solitamente utilizzato quando un operatore installa una femtocell per sopperire a un "buco di copertura"
- Closed: solo gli utenti riconosciuti come "autorizzati" dalla femtocell possono accedere al servizio permettendo a tutti in ogni caso di accedere al servizio nel caso si effettuino chiamate verso i numeri di emergenza.
- Hybrid: i terminali che non vengono riconosciuti come "autorizzati" possono utilizzare solo una parte delle risorse della femtocell, mentre la maggior parte di esse è dedicata agli utenti autorizzati.

È stato dimostrato che l'accesso "Open" incrementa la capacità complessiva della rete e dal punto di vista dell'interferenza fa sì che la femtocell non crei interferenza con i servizi degli altri utenti in quanto chiunque si può connettere e usufruire del servizio, togliendo anche parte del traffico dalla rete macrocell; d'altro canto aumenta il numero di handout e segnalazione ed è visto come un problema dal punto di vista degli utenti, che hanno pagato per averlo, essendoci la possibilità che trovino occupati tutti i canali di comunicazione da utenti esterni. Per queste ragioni la miglior soluzione per l'utente sarebbe l'installazione nelle case della soluzione d'accesso "Closed", anche se in questo modo la femtocell verrà sentita come un'interferenza dagli utenti nelle vicinanze che utilizzano la copertura offerta dalla macrocell, peggiorando la loro qualità del segnale. Gli operatori d'altro canto spingono per l'accesso "Hybrid", proponendo agli

utenti autorizzati di telefonare gratis da casa e assicurando la maggior parte delle risorse ad essi, tariffando invece gli utenti che utilizzano la copertura offerta da essa ma che non sono tra questi.

1.4.3 Handout, handin e handover

Un tratto fondamentale di una rete cellulare è quella di fornire un servizio wireless a terminali in movimento sotto la copertura di una cella; come nella rete macrocell un terminale che passa da una

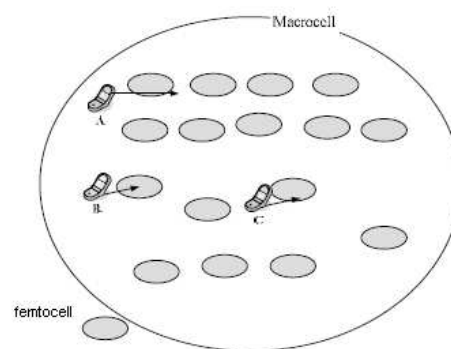


Figura 6: Handover tra femtocell e macrocell

macrocell a un'altra deve essere in grado di mantenere la comunicazione in atto, allo stesso modo, introducendo nella rete preesistente le femtocell, si deve garantire lo stesso servizio (figura 6); in altre parole le varie celle della rete devono riconoscere e segnalare:

- handout: passaggio di un terminale utente da una femtocell a una macrocell
- handin: passaggio di un terminale utente da una macrocell a una femtocell
- handover: passaggio di un terminale utente da una femtocell a una femtocell.

Per questo motivo sono dedicati alcuni canali esclusivamente per questi passaggi di copertura: ad esempio su C canali nella cella, H canali sono riservati all'handover (o in generale a qualsiasi passaggio di competenza) e assegnati all'utente che sta cambiando cella, e i rimanenti C-H canali sono condivisi tra handover e nuove chiamate. Se nessun canale tra i C-H è libero la chiamata viene bloccata; per gestire al meglio il problema è necessario conoscere l'effettiva situazione di ogni cella, cosa possibile in una rete

pianificata, ma impossibile per una rete di femtocell. Per questo motivo sono implementati metodi di adattamento dinamico del numero di canali e dello spettro di frequenze assegnate alla femtocell.

Capitolo 2

2 Soluzioni adottate dagli standard UMTS, WiMAX e LTE

2.1 UMTS

L'UMTS è uno standard di terza generazione promosso dal 3GPP il cui progetto fa parte dello standard IMT-2000, promosso dall'Unione Internazionale Telecomunicazioni (ITU).

2.1.1 Architettura di rete

L'architettura generale del sistema UMTS è composta da tre parti fondamentali (figura 7):

- la Core Network
- la rete di accesso radio UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN)
- i terminali mobili utente.

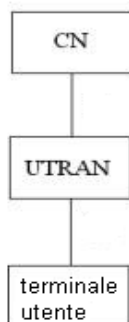


Figura 7: Schema a blocchi della rete UMTS

La Core Network è costituita da tutte le entità fisiche che forniscono funzioni di rete e servizi di telecomunicazioni, come la localizzazione e l'identificazione degli utenti, l'istradamento della comunicazione e la gestione della mobilità. La Core Network si divide poi in due domini: a commutazione di circuito e a commutazione di pacchetto.

Una delle principali caratteristiche delle reti 3G è infatti di poter supportare servizi sia a commutazione di circuito sia a commutazione di pacchetto grazie all'architettura duale della rete. La parte a commutazione

di circuito è stata specificamente organizzata per il traffico voce e le video chiamate, mentre la parte a commutazione di pacchetto è predisposta per i servizi internet.

Come conseguenza del fatto che gli utenti possono spostarsi liberamente in una rete mobile, è richiesto un database per tenere traccia della posizione corrente degli utenti e dei relativi dati ad essi associati: funzione che è assolta dal Home Location Register (HLR).

Per quando riguarda la commutazione di circuito, per cominciare una chiamata il terminale utente contatta il Mobile Service Center (MSC), questo utilizza il numero del telefono di destinazione per richiedere all'HLR la posizione del telefono di destinazione e, ottenuta l'informazione, la chiamata viene inoltrata al telefono di destinazione. Questo è un processo di segnalazione. Il MSC è spesso diviso in più MSC call server che gestiscono la segnalazione e in gateway che sono responsabili dell'inoltro del traffico voce, mentre i vari MSC sono riuniti sotto il controllo di un gateway MSC (GMSC) che crea il collegamento con la rete telefonica pubblica: la Public Switched Telephone Network (PSTN).

In parallelo alla core network basata sulla comunicazione a commutazione di circuito, esiste, supportata da una diversa infrastruttura, la core network basata sulla comunicazione a commutazione di pacchetto che permette di accedere ai servizi Internet. L'UMTS core network a commutazione di pacchetto, come la parte a commutazione di circuito, è stata adattata allo standard dalla precedente soluzione GSM con poche modifiche; questa è la ragione per cui il nodo gateway dell'accesso radio alla rete è ancora chiamato Service General Packet Radio Service (GPRS) Support Node (SGSN). GPRS è il nome del servizio a commutazione di pacchetto introdotto per le reti GSM. Come il MSC, l'SGSN è responsabile della gestione della registrazione e della mobilità degli utenti: tiene traccia degli spostamenti degli utenti registrati e cambia il percorso dei pacchetti IP che arrivano dalla core network se il destinatario compie uno spostamento. L'SGSN è connesso agli RNC e, tramite canali di segnalazione, con HLR della rete per ottenere informazioni sull'utente relative alla registrazione, per la rete a commutazione di pacchetto. Inoltre è connesso anche al Gateway GPRS Support Nodes (GGSN) il quale a sua volta è connesso alla rete Internet. La principale funzione del GGSN è di nascondere la mobilità degli utenti delle reti cellulari ai router di Internet: nella rete Internet i router possiedono una tabella di indirizzi di router statici adiacenti per

inoltrare i pacchetti, mentre nelle reti cellulari, dove gli utenti si muovono in diverse celle di copertura, è impensabile un database contenente indirizzi IP statici visto che questi ultimi sono cambiati ad ogni passaggio del terminale utente sotto la gestione di un altro RNC. In questo modo la rete Internet inoltra i pacchetti al GGSN, il quale in seguito gestisce il traffico dati fino all'utente finale. E' infatti il GGSN che assegna un indirizzo IP agli utenti registrati: durante la richiesta dell'instaurazione della connessione, lo SGSN verifica la validità della richiesta dell'utente con le informazioni ricavate dall'HLR e quindi richiede a sua volta l'assegnazione di un indirizzo IP da parte del GGSN.

Le ragioni per cui la rete 3G contiene una core network separata per inoltrare i pacchetti dati con la commutazione di pacchetto è che se l'approccio a commutazione di circuito è valido per traffico voce e video chiamate con richieste di banda e ritardo costanti, le prestazioni peggiorano di molto per una connessione a internet dove il traffico è trasportato in pacchetti. Inoltre spesso i pacchetti dati sono scambiati da più di due terminali simultaneamente al contrario di quello che avviene con una rete a commutazione di circuito.

E' desiderabile per i servizi internet avere a disposizione più larghezza di banda possibile quando è necessario inviare o ricevere pacchetti dalla rete e rilasciare l'utilizzo della stessa banda ad altri utenti se non si sta trasferendo nessun pacchetto. Anche questo aspetto non è supportato dalla rete a commutazione di circuito, la quale offre un canale con una larghezza di banda fissa tra due terminali quando si instaura la connessione.

La rete consente sia la commutazione di circuito che la commutazione di pacchetto e la scelta di una delle due dipende dalla connessione richiesta: l'UMTS supporta simultaneamente la connessione a commutazione di circuito e di pacchetto consentendo di chiamare mentre si è collegati a internet e trasferendo pacchetti dati.

La rete di accesso UTRAN è composta invece da tutte quelle entità che gestiscono l'accesso delle comunicazioni d'utente alle risorse della core network e consiste essenzialmente di due componenti principali: le base station (chiamate NodeB negli standard 3GPP) e il Radio Network Controller (RNC).

- **Base station:** comunicano con il terminale utente attraverso un canale radio che è detto usualmente “air interface” e danno copertura di rete ad un’area circolare, in città con raggio di circa 1Km, dipendente ad ogni modo dalla densità di popolazione e dalla larghezza di banda richiesta nella zona. Ogni BS è gestita da un RNC locale, a cui è collegata, e che gestisce un centinaio di esse.
- **RNC:** è responsabile dei seguenti aspetti di gestione e controllo:
 1. gestire connessione radio,
 2. selezionare la massima larghezza di banda da assegnare a un utente, in base alla capacità radio disponibile in quel momento,
 3. gestire le mobilità degli utenti,
 4. garantire la qualità del servizio richiesti,
 5. controllare il sovraccarico nella rete e nell’interfaccia radio, cioè quando gli utenti che vogliono comunicare sono maggiori delle risorse disponibili per farlo. In questo caso l’RNC blocca le nuove richieste di connessione per impedire che si interrompano le connessioni in atto.

Gli RNC sono connessi tramite i nodi gateway alla core network e controllano le BS presenti in zona; i gateway a loro volta sono collegati agli MSC che si occupano della parte della rete a commutazione di circuito, controllando quindi traffico voce, video chiamate e inoltro di SMS. Le grandi reti cellulari hanno diversi MSC responsabili ognuno di una zona geografica e tutti gli RNC di quella zona sono connessi allo stesso MSC. Quest’ultimo è addetto alla gestione di tutti gli utenti e l’instaurazione dei canali a commutazione di circuito per le chiamate in uscita e in entrata. Quando un terminale utente richiede l’instaurazione di una chiamata vocale, l’RNC inoltra la richiesta all’MSC che controlla se all’utente è permesso fare una chiamata in uscita e, in caso affermativo, permette all’RNC di stabilire la connessione. Contemporaneamente l’MSC informa l’utente destinatario della chiamata, della richiesta di connessione oppure, se l’utente di destinazione si trova in una diversa area geografica o una diversa rete, instaura una connessione all’MSC locale. Nel caso il destinatario della chiamata non sia un terminale utente mobile, si

instaura una connessione a commutazione di circuito con un gateway MSC che in base al numero telefonico della chiamata inoltra la chiamata a un telefono fisso o mobile esterno alla rete. Per permettere agli MSC di gestire gli utenti della rete e avvertirli delle chiamate in entrata, i terminali utenti devono registrarsi con l'MSC quando essi sono accesi. I telefoni mobili, a questo scopo, mandano all'MSC il loro International Mobile Subscriber Identity (IMSI), che è salvato all'interno della carta Subscriber Identity Module (SIM), presente all'interno di ogni terminale utente. Se l'IMSI non è riconosciuto dal database Visitor Location Register (VLR) dell'MSC da una precedente richiesta di registrazione, l'HLR richiede le informazioni di autenticazione per verificare la validità della richiesta e stabilire una connessione criptata per lo scambio di messaggi di segnalazione.

2.1.2 Impatto delle Femtocell sull'architettura di rete UMTS

Con l'introduzione delle reti femtocell si lascia inalterata l'architettura della core network ma si introduce nella rete d'accesso un nuovo tipo di BS, il FAP, (chiamato Home Node B (HNB) nello standard 3GPP) che necessita di un collegamento con la core network attraverso la rete IP dell'Internet Server Provider (ISP) al quale è collegato. A questo scopo ci sono due tipi di soluzioni per l'integrazione di quest'ultimi alla core network:

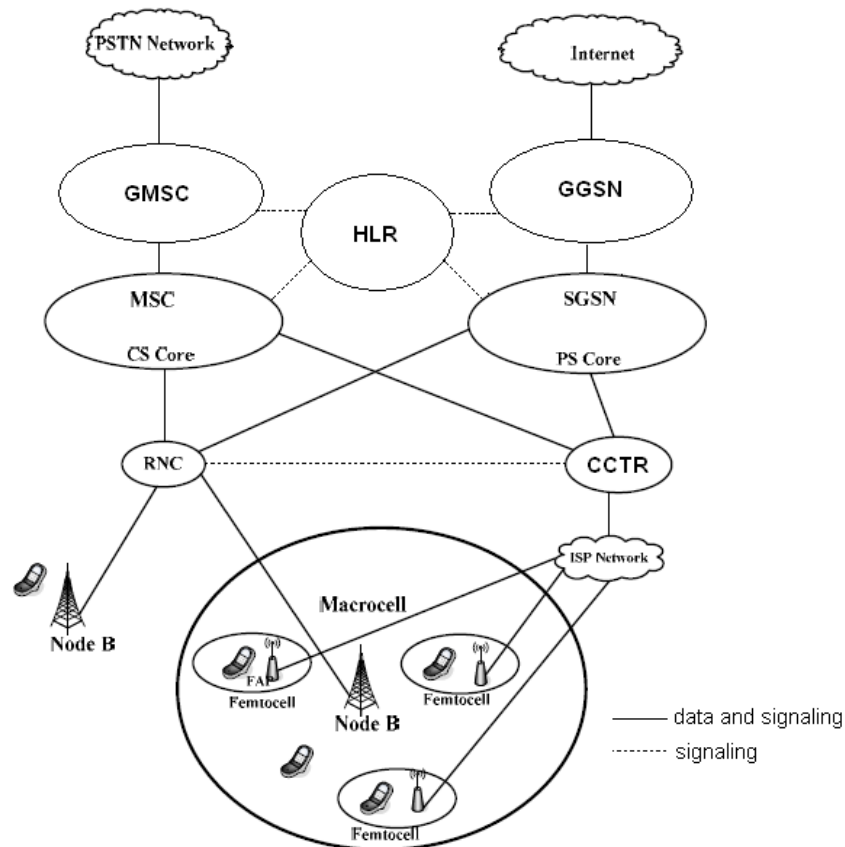


Figura 8: Schema della rete UMTS con l'introduzione delle femtocell

1. Il primo approccio è l'utilizzo di una versione modificata dell'RNC utilizzato nella rete UTRAN: l'RNC*, in grado di gestire il traffico di un grande numero di BS sul territorio dovuto all'introduzione delle femtocell su larga scala.
2. Il secondo approccio che si può utilizzare è l'integrazione dell'HNB tramite il concentrator (CCTR) che permette il collegamento alla core network senza dover apportare cambiamenti all'RNC esistente (figura 8). Il CCTR è composto da un femto gateway (FGW) che gestisce anche centinaia di comunicazioni provenienti da più FAP e da un Femtocell Management System (FMS) che gestisce il traffico dalla rete verso i FAP e viceversa. Il traffico proveniente dai FAP è inoltre smistato a seconda del tipo (a commutazione di circuito o di pacchetto) dal CCTR verso l'SGSN se si tratta di traffico dati mentre è indirizzato all'MSC se si tratta di traffico vocale o video chiamate.

2.1.3 Interfaccia aria e rete d'accesso

Per l'UMTS è stato scelto uno schema di trasmissione per l'interfaccia aria chiamato Code Division Multiple

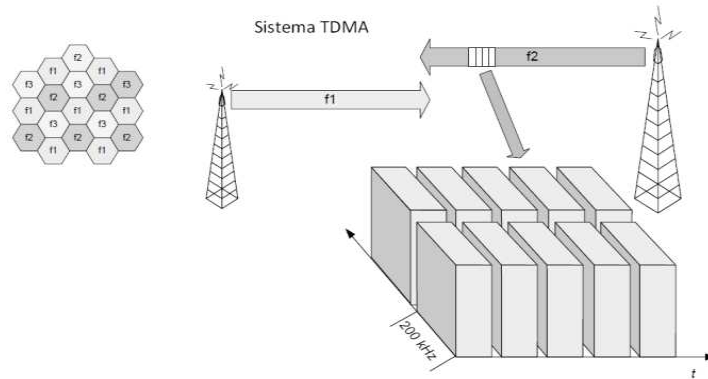


Figura 10: Rappresentazione del sistema TDMA

Access (CDMA) nel quale agli utenti viene assegnato un codice individuale invece che una frequenza. A differenza delle tecniche Frequency Division Multiple Access (FDMA) e Time Division Multiple Access (TDMA) (figura 9) che utilizzano canali stretti e separati per ciascuna comunicazione, il CDMA trasmette informazioni su un canale molto largo che viene utilizzato simultaneamente da più utenti: usa infatti una larghezza di banda di 5MHz del canale a banda larga CDMA (Wideband CDMA) (figura 10) al posto dei 200KHz del canale GSM. Inoltre si distacca dal precedente standard, che assegnava timeslot agli utenti, per la possibilità per gli utenti di comunicare simultaneamente con la BS usando ognuno un diverso codice: ogni bit di informazione da trasmettere è codificato in una parola di codice, i cui bit costituenti vengono chiamati "chip". I codici usati dai diversi terminali sono tutti matematicamente ortogonali fra loro e conosciuti dalla BS, che perciò è in grado di separare le trasmissioni simultanee di più terminali applicando

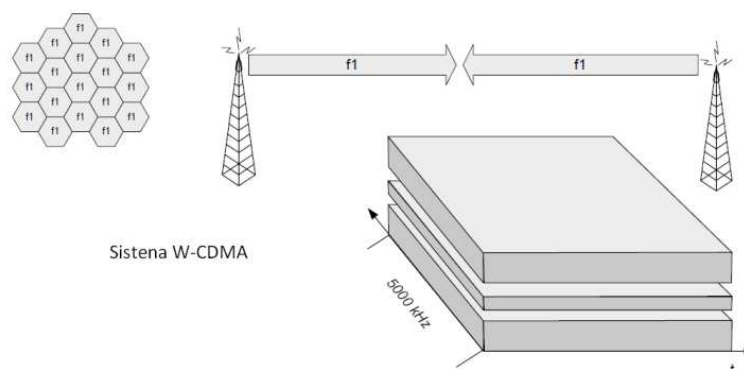


Figura 9: Rappresentazione del sistema W-CDMA

l'algoritmo di decodifica.

Il canale radio è separato in un numero di canali indipendenti e l'accesso è controllato dalla rete che può eventualmente bloccarlo in situazioni di sovraccarico. I principali canali che si instaurano e sono trasmessi simultaneamente in uplink e downlink sono:

- **Primary Common Control Physical Channel (P-CCPC):** il canale porta un segnale broadcast che è monitorato da tutti i terminali mobili mentre non hanno ancora instaurato una connessione attiva alla rete. Trasmette, per esempio, informazioni sull'identità della cella, in che modo si accede alla rete, che codice è usato per gli altri canali nella cella, che codice è usato nelle celle adiacenti.
- **Secondary Common Control Physical Channel (S-CCPCH):** il canale è costituito da più canali logici che assolvono a diverse funzioni come: trasmettere il messaggio di paging, trasmettere i messaggi SMS e consegnare pacchetti IP.
- **Physical Random Access Channel (PRACH):** questo canale esiste solo nella direzione di uplink ed è l'unico canale in cui al terminale mobile è concesso di trasmettere senza aver ricevuto un permesso esplicito dalla rete. La sua funzione è di consentire agli utenti di richiedere l'instaurazione di una chiamata vocale o la trasmissione di pacchetti dati, rispondere ai messaggi di paging e di mandare messaggi SMS.
- **Dedicated Physical Data e Control Channel (DPDCH, DPCCH):** una volta che l'utente ha contattato la rete attraverso il PRACH, la rete decide di instaurare una connessione completa con il terminale mobile: in caso di una chiamata vocale, la rete assegna una connessione dedicata e un corrispondente codice da utilizzare per la trasmissione.

Per preservare la potenza e assegnare le risorse al terminale mobile solo quando è necessario, la connessione alla rete può essere in uno dei seguenti stati di Radio Resource Control (RRC state):

- **Idle state:** i terminali mobili che non stanno comunicando attivamente con la rete si trovano in questo stato; in ogni caso controllano periodicamente il canale di paging per le eventuali chiamate vocali o video in entrata e per la ricezione di messaggi SMS.

- **Cell Forward Access Channel (Cell-FACH) state:** se il terminale mobile vuole contattare la rete si sposta in questo stato nel quale manda i suoi messaggi di controllo attraverso il PRACH e la rete risponde sul FACH contenuto nel S-CCPH.

La potenza richiesta in questo stato è superiore in quanto il terminale mobile necessita di monitorare il canale di downlink per la ricezione dei messaggi di controllo da parte della rete.

- **Cell Dedicated Channel (Cell-DCH) state:** una volta che la rete ha deciso di instaurare una connessione vocale o dati con il terminale mobile, quest'ultimo è istruito ad usare il canale dedicato e passa perciò in questo stato.

2.1.4 Management dell'interferenza

L'interferenza è un fenomeno che limita la capacità del sistema e la qualità dei canali di comunicazione: l'aumento di capacità, infatti, è sempre legato al trade-off tra interferenza, qualità e capacità stessa. Per questa ragione sono necessarie tecniche di gestione per minimizzare l'interferenza [13].

Due importanti aspetti che le femtocell e i terminali utenti devono gestire sono:

- **Potenza del segnale dei FAP:** se i FAP trasmettono un segnale con potenza eccessivamente alta, l'area coperta dalle femtocell sarà larga e gli utenti non appartenenti al CSG avranno una perdita di qualità del servizio in prossimità delle femtocell. Se invece i FAP trasmettono un segnale troppo debole, l'area coperta dalle femtocell sarà troppo piccola per offrire un servizio vantaggioso agli utenti del CSG.
- **Potenza del segnale dei terminali utenti:** i terminali solitamente trasmettono verso le BS ad una potenza elevata che sarebbe eccessiva e causerebbe interferenza nelle reti femtocell: per questa ragione si deve fissare un tetto massimo della potenza della trasmissione per non creare interferenza in un'eventuale handover dell'utente verso una femtocell.

Una soluzione al primo aspetto è, per esempio, di assegnare alle femtocell vicine diverse portanti per mitigare i problemi di interferenza. Per raggiungere questo risultato una portante può essere assegnata come "preferenziale" e durante l'autocalibrazione del FAP sceglierla se non vengono riscontrati problemi di

interferenza; al contrario, se questi vengono rilevati, si opera su una portante secondaria, designata per la femtocell.

Quando invece una femtocell e una macrocell utilizzano la stessa portante, questo causa interferenza e un abbassamento della qualità del servizio: una soluzione ovvia è di utilizzare per le femtocell portanti non utilizzate dalle macrocell; soluzione che però non è funzionale dal punto di vista dell'efficienza dell'utilizzo dello spettro delle frequenze, soprattutto per operatori che gestiscono un numero limitato di portanti, per cui è preferibile farle condividere da femtocell e macrocell.

2.1.5 Controllo d'accesso

Un terminale utente cerca una nuova cella di copertura se il segnale che riceve dalla BS è sotto una certa soglia di qualità. Perciò in certi scenari in cui sono installate macrocell e femtocell, quest'ultime potrebbero non essere mai ricercate da un terminale utente se il segnale che riceve è sopra la soglia [14]. Per assicurare che le femtocell vengano trovate, una soluzione può essere di configurare la rete in modo tale

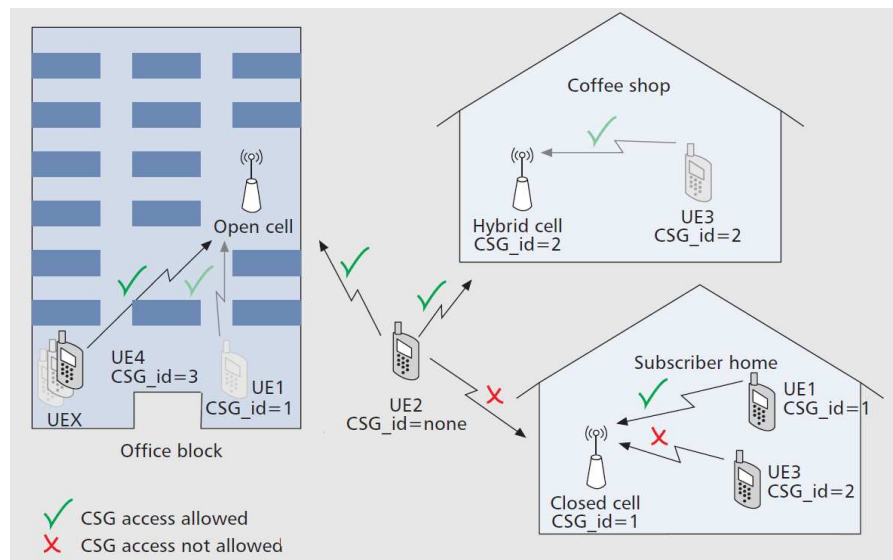


Figura 11: Tre tipi di controllo d'accesso per le femtocell

che vengano costantemente cercate dai terminali, con lo svantaggio della grande riduzione del tempo di vita della batteria. In ogni caso una volta che un terminale utente riesce ad individuare una possibile femtocell, non è detto che sia autorizzato ad usufruire dei suoi servizi, specialmente se il proprietario del HNB si aspetta che possano accederci solo un prefissato gruppo di utenti. Una soluzione in questo caso è permettere al terminale utente di verificare se gli è concesso l'uso della femtocell, cosa che spesso non accade, e questo comporterebbe un consistente aumento dei messaggi di segnalazione tra terminale e HNB con conseguente spreco di banda. Il 3GPP ha introdotto il concetto di closed subscriber group (CSG) che consente agli utenti compresi in questo gruppo di accedere ai servizi di una specifica femtocell: il FAP trasmette in broadcast il proprio "CSG identity" e gli utenti controllano la corrispondenza con quello salvato nel terminale, se c'è questa corrispondenza allora il terminale utente si connette con la femtocell [15].

Ci sono tre modi di controllo d'accesso in cui una femtocell può operare (figura 11):

- Open mode: ogni terminale utente può usufruire della copertura offerta dalla femtocell e ad ognuno è fornita la stessa qualità del servizio.
- Closed mode: solamente gli utenti con il "CSG identity" adeguato può connettersi alla femtocell (chiamata in questo caso anche cella CSG) mentre agli altri utenti è permesso solamente di effettuare chiamate di emergenza nel caso non sia presente nessun altro tipo di copertura di rete.
- Hybrid mode: questo tipo di accesso è simile al closed mode ad eccezione del fatto che anche terminali che non rientrano nel CSG possono connettersi alla femtocell e utilizzare alcuni servizi. In ogni modo gli

Access mode	CSG indicator	CSG ID (absent/present in system information)
	UMTS	
Closed (CSG cell)	Present	Present
Open	Absent	Absent
Hybrid	Absent	Present

Tabella 1: Coppie di CSG indicator e CSG ID nei tre modi d'accesso per le femtocell

utenti iscritti nel CSG godono di servizi preferenziali sia in termini di qualità sia in termini di costo: una chiamata di un utente non registrato potrebbe essere rifiutata in favore di una proveniente da un membro del CSG, costringendo l'altro utente a connettersi con un'altra cella.

Dal momento che sono possibili tre possibili modi d'accesso, il terminale utente non è in grado di identificare quale dei tre è utilizzato da una femtocell solamente dal "CSG identity" perché anche l'hybrid mode ne possiede uno e questo crea un'indeterminazione dell'informazione. Per questa ragione è stato aggiunto un ulteriore "CSG indicator" che consiste in un indicatore booleano che rivela se il modo d'accesso della femtocell è open o closed, ai terminali in ascolto. La tabella 1 mostra le informazioni trasmesse dalle femtocell nei tre modi d'accesso.

Un utente che è iscritto a una o più CSG si aspetta di essere collegato alla femtocell di competenza quando è nelle sue vicinanze per sfruttare i benefici della qualità e del costo della chiamata: per questa ragione sono state sviluppate tecniche di ricerca delle celle CSG sia automatiche sia manuali. La seconda strategia è molto più efficiente dal punto di vista del consumo della batteria in quanto ricerca le femtocell solo sotto un preciso comando dell'utente tramite un'applicazione sul terminale.

2.1.6 Handover tra femtocells e macrocells nelle reti UMTS

Come sottolineato più volte un aspetto importante nelle reti cellulari è gestire la mobilità degli utenti. Nello stato Cell-DCH, la BS controlla la connessione dell'interfaccia aria verso e dal terminale mobile e regola la potenza di trasmissione della BS stessa e del terminale mobile 1500 volte al secondo. Questo nei sistemi CDMA è necessario in quanto le trasmissioni di tutti i terminali mobili devono essere ricevute dalla BS con lo stesso livello di potenza indipendentemente dalla distanza da essa. A questo scopo la rete ordina ai terminali mobili di incrementare, diminuire o mantenere costante la potenza di trasmissione in base alle informazioni ricavate dalla qualità del segnale ricevuto in uplink dagli utenti.

Quando un utente si muove, uscendo dall'area coperta da una BS, se un DCH è instaurato, il RNC garantisce che la connessione al terminale mobile sia trasferita sotto il controllo di un'altra cella opportuna. Nella rete UMTS basata sul CDMA ci sono due tipi di handover:

- **Hard handover:** quando la rete trova una cella più adeguata per la copertura di rete del terminale mobile, prepara la nuova cella per l'utente, dopodiché comunica al terminale di passare sotto la gestione della nuova cella; il terminale interrompe la comunicazione con la cella attuale e utilizza i parametri di handover inviatigli in precedenza dalla rete, contenenti anche il codice da utilizzare, per instaurare la connessione. In questo tipo di handover perciò il terminale interrompe la connessione prima di instaurarne un'altra.
- **Soft handover:** si sfrutta per questa procedura il fatto che le celle vicine trasmettono alla stessa frequenza e quindi il terminale mobile può effettuare una connessione con una nuova cella ancora prima di interrompere quella in atto con la cella attuale. Il terminale entra nello stato di soft handover quando la rete gli trasmette le informazioni di controllo per comunicargli di ascoltare più di un codice sul canale di downlink.

Con l'introduzione nella rete di un grande numero di piccole celle nelle stesse zone coperte già dalle macrocell, l'operazione di handover risulta di gestione più complessa anche se fondamentale per l'affermazione della tecnologia. La procedura di handover è costituita essenzialmente da due fasi: una fase di preparazione all'handover e una fase di esecuzione dell'handover. Nella prima fase vengono individuate le possibili femtocell a cui connettersi, verificato il modo d'accesso e scelta la migliore, mentre nella seconda avviene l'effettivo il passaggio di copertura.

L'handover dalla macrocell alla femtocell è sicuramente il più complesso in quanto il terminale deve scegliere tra molte femtocell candidate a cui connettersi e a questo scopo la BS coordina l'handover del terminale tra macrocell e femtocell scambiando informazioni con i vari FAP in zona, creando in questo modo una lista dei FAP nella sua area di copertura.

Al contrario il passaggio dalla femtocell alla macrocell da parte dell'utente è meno complessa in quanto esiste un'unica macrocell a cui può connettersi e in questo caso la procedura è gestita dal CCTR che comunica con la BS locale.

Un serio problema dell'introduzione nella rete delle femtocell è il frequente e non necessario handover

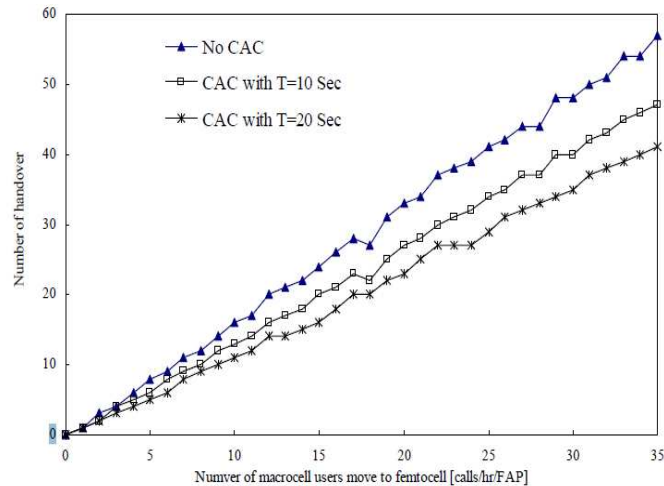


Figura 12: Grafico del numero di handover su utenti che si muovono verso la femtocell

quando un terminale mobile, che si sta muovendo velocemente, entra ed esce dalla femtocell in breve tempo. Questo passaggio crea due handover inutili dalla macrocella alla femtocell e, subito dopo, dalla femtocell alla macrocella riducendo in questo modo la qualità del servizio e la capacità del sistema. Per queste ragioni è stato proposto [16] un meccanismo di Call Admission Control (CAC) per l'accesso in hybrid

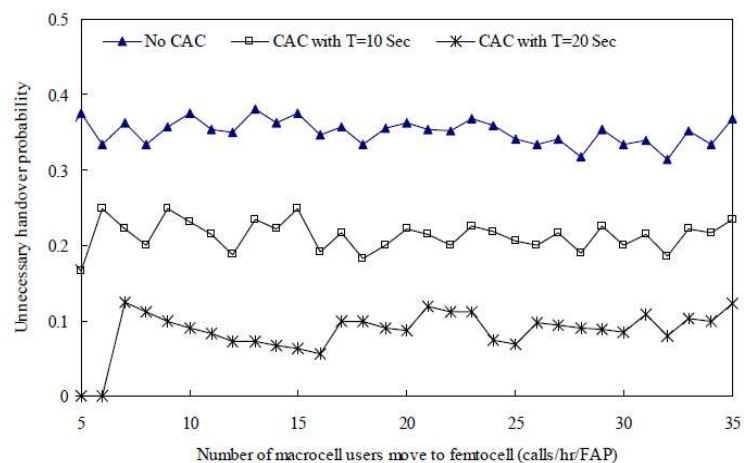


Figura 13: Grafico della probabilità di handover non necessario su utenti che si muovono verso la femtocell

mode, considerato il più flessibile fra i tre modi d'accesso. Il meccanismo di CAC proposto prende in considerazione il tempo di permanenza nella cella: se il segnale ricevuto dal terminale è più alto di una

Forma della cella femtocell	Circolare
Raggio di copertura della cella femtocell	10 m
Velocità media del terminale utente attraverso la femtocell	0.9 km/hr
Durata media della chiamata dopo l'handover tra macrocell e femtocell	90 sec
Durata della chiamata e della velocità del terminale utente	Distribuzione esponenziale
Numero di FAP nella macrocell	100

Tabella 2: Parametri utilizzati nella simulazione

certa soglia di qualità, il CCTR controlla se questo è nel CSG; in caso affermativo permette l'handover all'utente, in caso negativo il terminale deve permanere nella femtocell per un certo intervallo di tempo T prima di poter effettuare l'handover in modo da ridurre gli handover inutili. La tabella 2 mostra i parametri utilizzati per l'analisi delle prestazioni del meccanismo proposto. La figura 12 mostra invece il numero di handover dalla macrocell alla femtocell per differenti soluzioni di intervalli di tempo T; l'analisi mostra una significativa riduzione degli handover all'aumentare dell'intervallo T. La figura 13 mostra la probabilità per questo scenario di incorrere in un handover inutile; la figura mostra che senza il meccanismo di CAC ci sono circa il 38% di handover non necessari e che il numero si riduce al 19% se si adotta l'intervallo T=10s e addirittura 8% se T=20s.

2.2 LTE

Il concetto di LTE è stato discusso in dettaglio per la prima volta nel 2004 durante una conferenza a Toronto sull'evoluzione della rete d'accesso radio (Radio Access Network Evolution Workshop) dopo la quale 3GPP avviò uno studio per sviluppare l'attuale UTRAN in modo da ottenere per quest'ultima una tecnologia che consentisse un'alta velocità di trasferimento dati, un basso ritardo di consegna dei pacchetti e un accesso radio rivolto all'utilizzo di pacchetti per la trasmissione dati. Lo studio si proponeva di sviluppare le specifiche per rendere possibile l'utilizzo di internet sui terminali mobili con prestazioni simili a quelle ottenute con un PC.

La standardizzazione dell'LTE è stata completata dal 3GPP all'inizio del 2008 e la prima disponibilità di apparati per le reti di nuova generazione è stata introdotta alla fine del 2009 con l'obiettivo di promuovere l'uso della banda larga in mobilità, sfruttando l'esperienza e gli investimenti effettuati per le reti 3G ed anticipando i tempi rispetto alla disponibilità degli standard di quarta generazione 4G, i cui propositi sono di raggiungere velocità di connessione wireless anche superiori ad 1 Gbps.

L'LTE è parte integrante dello standard UMTS, ma prevede numerose modifiche e migliorie fra cui:

- Maggiore velocità di trasferimento dati in download;
- Maggiore velocità di trasferimento dati in upload;
- Velocità di trasferimento dati al bordo della cella da 2 a 3 volte superiori all'UMTS
- Efficienza spettrale (ovvero numero di bit/s trasmessi per ogni Hz di banda) 3 volte superiore alla più evoluta versione dell'UMTS;
- Utilizzo della modulazione Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) per il downlink e Single-Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) per l'uplink (al posto del W-CDMA dell'UMTS);

2.2.1 Architettura di rete

In confronto all'architettura di rete UMTS, l'architettura della rete LTE è meno complessa: il RNC, per esempio, è stato tolto e le sue funzioni sono state spartite dalla BS e dal gateway verso la core network. Per differenziarle dai NodeB dell'UTRAN, le BS della rete LTE vengono chiamate enhanced NodeB (eNB) e formano l'E-UTRAN, provvedendo alla gestione del traffico sull'interfaccia aerea e della qualità del servizio, non essendoci più un componente supervisore per la rete d'accesso. In aggiunta sono proprio gli eNB i responsabili per la procedura di handover per i terminali attivi e a questo scopo essi direttamente comunicano con gli altri eNB per scambiarsi le informazioni inerenti al processo. A differenza delle reti UMTS però, la rete LTE opera solo hard handover, in quanto il terminale utente comunica solo con una BS per volta, ed è totalmente basata nella rete d'accesso sul trasporto col protocollo IP.

Il gateway tra la rete d'accesso e la core network è separata in due componenti logiche: il Serving Gateway (S-GW) e la Mobility Management Entity (MME). Non essendoci più gli RNC che controllavano più BS, in questa architettura ogni eNB è collegato a più S-GW e MME per volta e insieme svolgono il compito svolto dal SGSN nella core network UMTS.

L'MME è il livello di pianificazione responsabile dei seguenti aspetti:

- mobilità degli utenti e gestione del segnale. Questo include compiti come l'autenticazione, instaurazione della connessione radio e supporto per l'handover tra gli eNB e tra eNB e diverse tipologie di reti (GSM, UMTS,...);
- tracking della locazione per terminali utenti in idle mode;
- selezione di un gateway verso internet quando un utente chiede l'instaurazione di una connessione, la quale avviene con l'assegnazione di un indirizzo IP al terminale dalla rete.

L'S-GW è responsabile dell'inoltro dei pacchetti IP, già spediti in pacchetti anche sull'interfaccia aerea, tra il terminale mobile e la rete Internet.

Come nel precedente sistema, un gateway tra la core network e Internet nasconde la mobilità degli utenti da quest'ultimo e nella rete LTE è chiamato Packet Data Network Gateway (PDN-GW) e assolve agli stessi

compiti del GGSN della rete UMTS, con l'aggiunta che è anche responsabile dell'assegnazione degli indirizzi IP agli utenti che vogliono collegarsi a Internet e alla rete IP dell'operatore. Un altro componente derivante dalla rete UMTS che assolve i compiti del HLR, è L' Home Subscriber Server (HSS).

Molte reti LTE sono state installate in luoghi dove sono presenti già altre reti più diffuse come quella GSM o UMTS, ed è essenziale per questa ragione che un utente si muova da un'architettura di rete ad un'altra senza problemi. Quando un terminale utente sta uscendo da una rete LTE per entrare in una UMTS, il terminale utente comunica che è stata trovata una rete UMTS all'eNB e da questo l'informazione viene comunicata all'MME che contatta il SGSN responsabile e richiede la procedura di handover. Una volta che la rete UMTS è stata preparata per l'handover, l'MME manda i comandi per la procedura al terminale utente tramite il eNB.

Una grande innovazione dello standard LTE è che ogni servizio è basato sulla commutazione di pacchetto; sparisce la parte a commutazione di circuito della core network UMTS e con LTE la procedura di connessione alla rete da parte dell'utente fornisce direttamente un indirizzo IP al terminale.

Con l'introduzione delle femtocell si introduce nell'architettura di rete un nuovo elemento: l'Home eNB

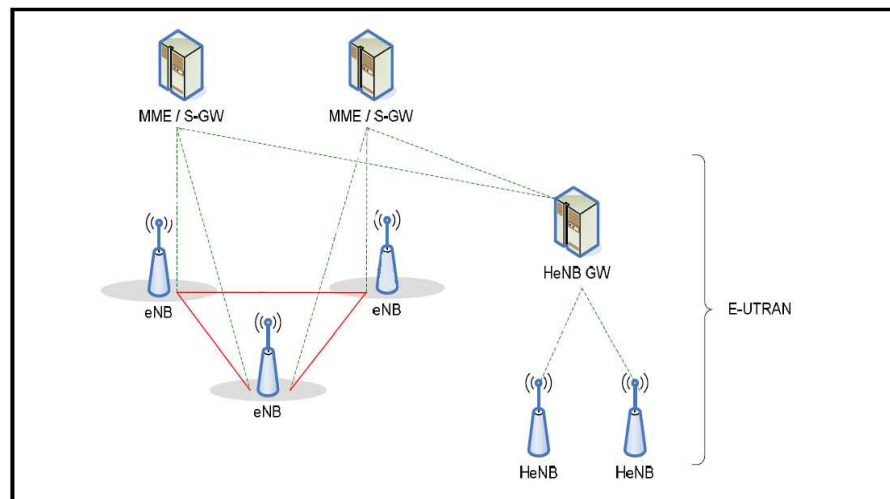


Figura 14: Architettura della rete LTE con l'introduzione dei eNB

(HeNB), che si collega all'MME e al S-GW, dell'attuale rete, tramite un HeNB Gateway (HeNB GW) (figura 14). Per integrare i nuovi HeNB con la rete macrocell, quest'ultimi devono apparire all'MME e al S-GW come dei normali eNB e a questo scopo anche le funzionalità dei HeNB devono essere le stesse dei eNB.

2.2.2 Interfaccia aria

La maggiore innovazione di LTE rispetto all'attuale standard UMTS è l'utilizzo della modulazione OFDMA per il downlink e la SC-FDMA, una tecnologia affine alla OFDM, per l'uplink. Queste tecniche consentono di gestire il sistema con larghezze di banda del canale da 1,25 MHz a 20 MHz per il canale uplink. Lo schema utilizza anche 512, 1024 o addirittura più portanti per la trasmissione di bit in parallelo, facendo risultare la velocità trasmissiva di ogni canale molto minore rispetto al data rate complessivo del sistema.

Nei sistemi basati sull'OFDM, la banda disponibile viene suddivisa in tante sottobande, trasmettendo i dati su flussi paralleli. I dati trasmessi su ciascuna sottobanda vengono poi modulati, attraverso una delle modulazioni numeriche possibili (QPSK, QAM, 64QAM, ecc.), in base alla qualità del segnale ricevuto. L'impiego della tecnica OFDM nei sistemi di comunicazione ha consentito di ridurre fortemente le criticità che si determinavano quando, per raggiungere data rate in trasmissione più elevati, l'unica soluzione possibile sembrava quella di aumentare il symbol rate.

In pratica ogni simbolo OFDM risulta essere una combinazione lineare dei segnali presenti su ciascuna sottoportante, ad un certo istante, e poiché i dati sono trasmessi in parallelo, piuttosto che in serie, i simboli OFDM sono generalmente molto più lunghi dei simboli trasmessi su sistemi single carrier con un equivalente data rate.

Due ulteriori peculiarità dei sistemi di trasmissione basati sulla tecnica OFDM sono:

- ciascun simbolo OFDM trasmesso è preceduto da un prefisso ciclico (CP), ovvero da una breve replica della parte finale del segnale ottenuto dalla somma dei simboli su ciascuna sottobanda. Questa caratteristica permette di ridurre sensibilmente l'effetto prodotto dall'Intersymbol Interference (ISI) ovvero dell'effetto determinato dalla sovrapposizione di repliche del segnale (echi) in ricezione;

- le sottobande in cui viene suddivisa l'intera banda sono ortogonali l'una all'altra, ovvero la distanza viene scelta in modo che la risposta impulsiva della carrier di ciascun canale abbia un massimo laddove la risposta impulsiva delle carrier dei canali adiacenti hanno invece un valore nullo. Ciò determina, idealmente, un'assenza di interferenza da canale adiacente (ICI).

Un'altra caratteristica importante dei sistemi che impiegano la tecnica OFDM è che la modulazione e demodulazione sono effettuate attraverso semplici trasformate e antitrasformate di Fourier (FFT). Nello specifico, con una FFT inversa (IFFT) in trasmissione, si modulano i simboli associati alle singole sottoportanti il segnale da trasmettere, con una FFT in ricezione, si ottiene dal segnale ricevuto i campioni ad esso associati in corrispondenza delle varie sottoportanti.

L'OFDMA è una tecnica di accesso multiplo, basata sulla modulazione OFDM, che consiste nell'assegnare a ciascun utente un sottoinsieme delle sottoportanti in cui viene suddivisa la banda disponibile per un determinato intervallo di tempo. Proprio per questa ragione a volte si usa dire che l'OFDMA può essere considerata una tecnica in cui vengono combinate la modulazione OFDM e l'accesso TDMA e FDMA (figura 15).

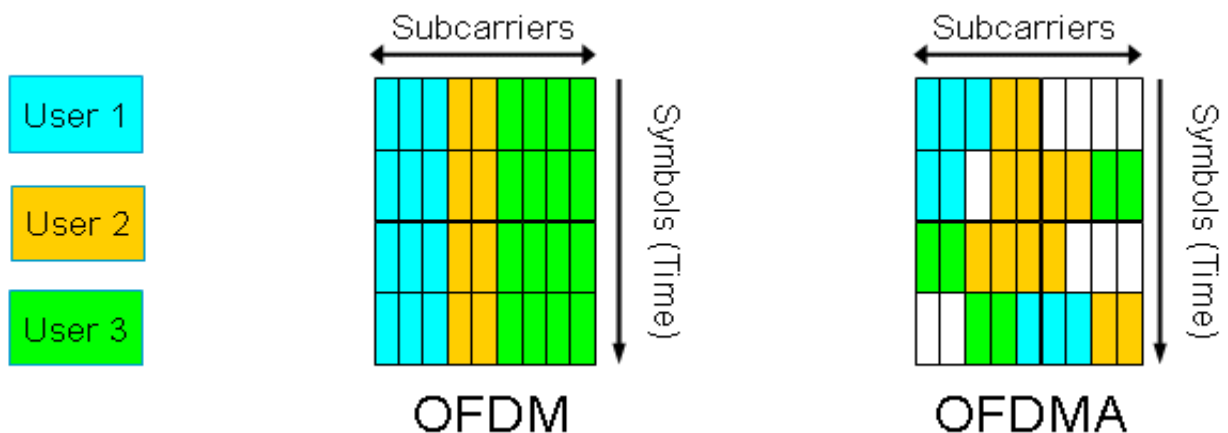


Figura 15: Schema della modulazione OFDMA e della tecnica OFDM

La OFDMA utilizza al massimo 2048 portanti distanziate di 15 kHz e con il segnale OFDM è possibile scegliere tre tipi di modulazione:

1. **QPSK (= 4QAM)**: 2 bits per simbolo.

2. **16QAM** : 4 bits per simbolo.
3. **64QAM** : 6 bits per simbolo.

Questa viene scelta in base al rapporto segnale/rumore: la QPSK non richiede un alto rapporto ma non è capace di inviare i dati a grande velocità; solo quando si ha un buon rapporto SNR si può utilizzare una modulazione con più bit per simbolo.

Per quanto riguarda il canale uplink è usata una forma modificata della OFDMA: l'SC-FDMA che ha le caratteristiche di un segnale a singola portante.

2.2.3 Procedure di base per ottenere un indirizzo IP nella rete LTE

Connettersi alla rete e ottenere un indirizzo IP è una procedura coincidente nelle reti LTE, in quanto è offerto da questo standard un servizio basato sul protocollo IP e non avrebbe senso quindi, come nel caso delle reti UMTS o GSM, connettersi alla rete senza richiedere anche un indirizzo IP.

Il primo passo, dopo che il terminale utente è stato acceso, è di trovare tutte le reti disponibili per la connessione, e per questo motivo procede con una scansione su tutte le frequenze consentite per cercare il segnale di sincronizzazione downlink che nel caso delle reti LTE è posto a intervalli regolari nei canali utilizzati dal sistema. Solitamente il terminale comincia la ricerca dal canale che ha utilizzato per ultimo prima di essere spento e una volta che il segnale è stato trovato e decodificato, il terminale utente è in grado di leggere le informazioni di sistema diffuse dalla rete e decidere se connettersi con essa. Dopo averla scelta, il terminale prova a stabilire un contatto con la rete mandando, sul Random Access Channel, un breve messaggio, che è formato solamente da 5 bit scelti arbitrariamente per minimizzare la probabilità di collisione con gli altri messaggi provenienti da altri terminali che si vogliono connettere. Quando la rete riceve il messaggio, spedisce a sua volta un Random Access Response, formato dagli stessi bit inviatigli dal terminale e gli assegna un Cell-Radio Network Temporary Identifier (C-RNTI) che utilizza per identificarlo. Da questo momento la connessione fisica alla rete è effettuata in quanto, in aggiunta, la rete ha inviato al terminale le informazioni del canale che deve utilizzare per le trasmissioni in uplink, sul quale manda subito

il messaggio di richiesta di connessione alla rete. Quando l'eNB riceve il messaggio, lo inoltra all'MME il quale analizza il numero identificativo dell'IMSI e se non è conosciuto lo inoltra a sua volta all'HSS per richiedere le informazioni di autenticazione; a questo punto il terminale e la rete si scambiano una chiave privata che è salvata sia nella SIM sia nel centro di autenticazione, che è parte dell'HSS. Finito questo processo di autenticazione, l'MME richiede un indirizzo IP per l'utente al PDN-GW tramite il S-GW con un messaggio Create Bearer Request; quando il PDN-GW riceve il messaggio, sceglie un indirizzo IP tra quelli disponibili e lo invia, ancora tramite il S-GW, all'MME. Quest'ultimo lo inoltra all'eNB con un messaggio Attach Accept, che a sua volta lo comunica al terminale; infine il terminale risponde con un messaggio Attach Complete il quale è inoltrato all'MME. Da questo momento il terminale può comunicare con Internet o con la rete IP dell'operatore.

Nonostante i molteplici messaggi inviati tra i componenti della rete e il terminale nel processo, risultano in ogni caso in numero minore, e quindi più funzionali, rispetto al numero utilizzato nelle reti UMTS e GSM per la stessa procedura di connessione; escludendo il tempo di scansione delle frequenze e di lettura delle informazioni diffuse dalla rete sui canali broadcast, che dipendono dal terminale utente utilizzato, il resto della procedura impiega, infatti, solo qualche centinaio di millisecondi.

2.2.4 Gestione dell'interferenza: autonomous component carrier selection per reti LTE

L'installazione su larga scala delle femtocell ha sottolineato sempre di più la necessità di una tecnica di gestione dell'interferenza da parte del HeNB che la renda autonoma dal controllo centralizzato della rete. In questa tecnica ogni HeNB raccoglie informazioni sull'ambiente circostante e le usa per il processo decisionale. In questo paragrafo presentiamo una simulazione su una rete costituita da femtocell e macrocell, che dimostra che una tecnica di gestione dell'interferenza chiamata "autonomous component carrier selection" (ACCS), attuabile per le reti LTE, fornisce ottime prestazioni di gestione dell'interferenza.

La larghezza di banda dell'LTE è di 100MHz, separata in cinque componenti portanti con larghezza di banda di 20 MHz ognuno; assumiamo che queste informazioni siano conosciute da tutte le HeNB e che ogni eNB abbia sempre una componente portante attiva, denominata Primary Component Carrier (PCC). Una seconda componente portante, denominata secondary component carrier (SCC), è scelta dinamicamente

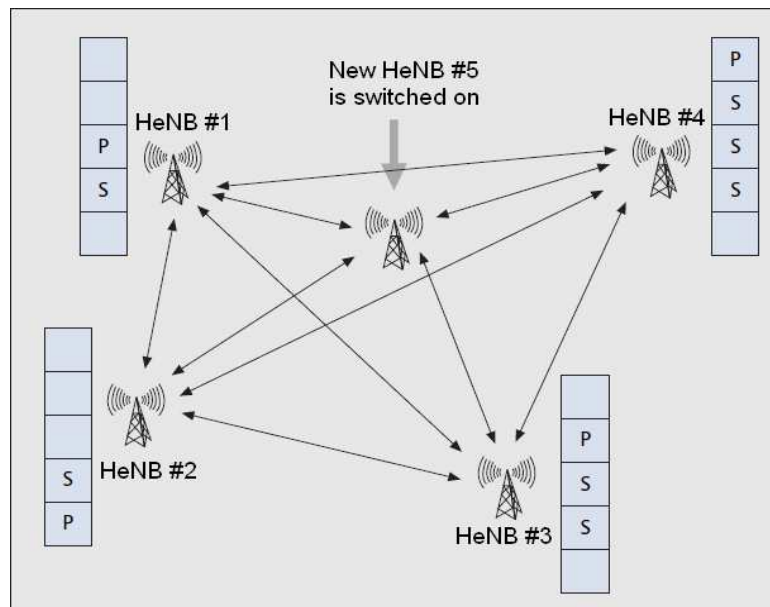


Figura 16: Schema di una rete femtocell e dell'allocazione delle componenti portanti PCC e SCC

per mantenere alta la qualità della ricezione e trasmissione, quando la prima portante è affetta da interferenze dovute a celle adiacenti, mentre tutte le componenti non scelte vengono considerate mute e non utilizzate dalla cella. Tre premesse fondamentali per la tecnica sono:

- priorità della PCC sulla SCC: la PCC non può essere risSelectedionata da altre basi;
- quando il traffico offerto per un eNB richiede più larghezza di banda, una cella può aumentare la sua capacità allocando anche la SCC;
- a un eNB è concesso di allocare la SCC se questo non arreca eccessiva interferenza alle celle circostanti.

Assumiamo inoltre che le allocazioni delle PCC e delle SCC siano segnalate tra i HeNB periodicamente e comunque ogni volta che le allocazioni cambiano, in modo tale che gli HeNB adiacenti sappiano quali componenti portanti siano già occupate e salvino l'informazione in una Radio Resource Allocation Table (RRAT).

Con riferimento alla figura 16, consideriamo quattro HeNB già funzionanti e un nuovo HeNB che si è appena acceso e deve scegliere una PCC avendo a disposizione, oltre alla RRAT, un'approssimazione del path loss tra gli eNB adiacenti: il path loss è l'attenuazione della densità di potenza di un'onda elettromagnetica quando si propaga nello spazio e quindi per stimarlo ogni HeNB si basa sulla potenza del segnale ricevuto proveniente dagli altri nodi. Da queste informazioni il nuovo HeNB può formare una matrice per la selezione della PCC, come illustrato in figura 17, dove i nodi sono disposti in base al path loss percepito dal nuovo eNB. Solo i nodi sotto una certa soglia di path loss sono considerati rilevanti, mentre gli altri non sono presi in considerazione per la scelta, in quanto non creano interferenza sufficiente per disturbare la ricezione e la trasmissione del nuovo nodo. Sulla base di questa matrice è proposta la seguente procedura [17]:

1. se c'è una riga nella matrice con nessuna selezione, la corrispondente componente portante è

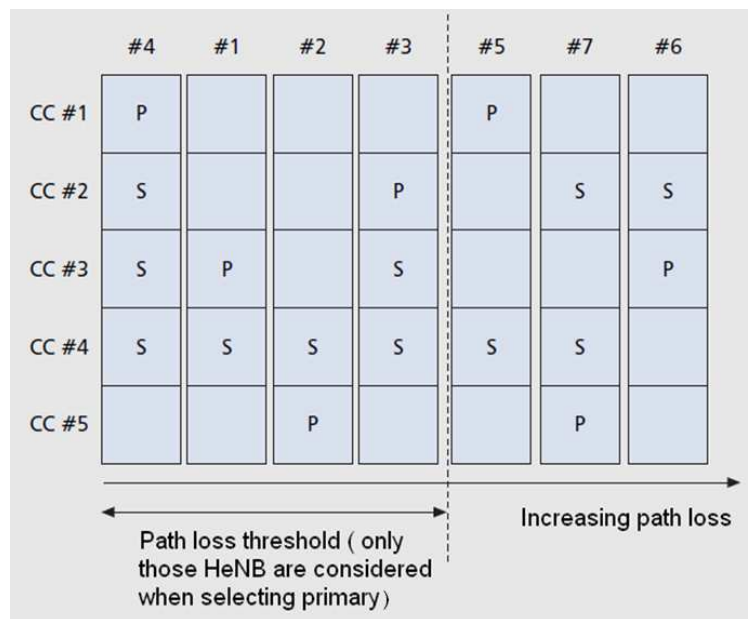


Figura 17: Matrice per la scelta delle componenti portanti PCC e SCC

scelta e allocata per l'HeNB in caso di necessità, se questa scelta è compatibile con le condizioni di interferenza dell'ambiente.

Si sono analizzati in seguito i potenziali benefici della tecnica con una simulazione di sistema operante con una frequenza portante a 3,4 GHz, una larghezza di banda di 100 MHz e una potenza trasmittiva massima di 200 mW (23 dBm) per ogni HeNB, raggiungibile solo se tutte le componenti portanti sono impegnate. Viene utilizzato lo scenario di figura 18: quattro residenze distanziate di 5 metri tra di loro con quattro appartamenti per ognuna di 100 metri quadrati; gli HeNB sono rappresentati come pallini colorati e disposti arbitrariamente negli appartamenti; si assume infine per semplicità che tutti i nodi e i terminali utenti abbiano sempre dati da trasmettere e che lo facciano uno alla volta. Durante la simulazione si assumono path loss e posizione degli HeNB costanti e il modo d'accesso è considerato quello che prevede il CSG.

La figura 19 illustra i risultati: il fattore di attività sull'asse delle ascisse indica la densità degli HeNB e allo stesso tempo il numero di HeNB attivi; per esempio un fattore di attività del 25% indica che 4 dei 16 HeNB sono attivi. L'asse delle ordinate indica invece il throughput (cioè la capacità di trasmissione effettivamente utilizzata) normalizzato medio del downlink della femtocell mentre la dimensione della bolla è proporzionale al throughput normalizzato dell'utente nella femtocell. Tutti i valori sono normalizzati rispetto al throughput riscontrato quando l'intero spettro delle frequenze utilizzabile è usato da tutte le

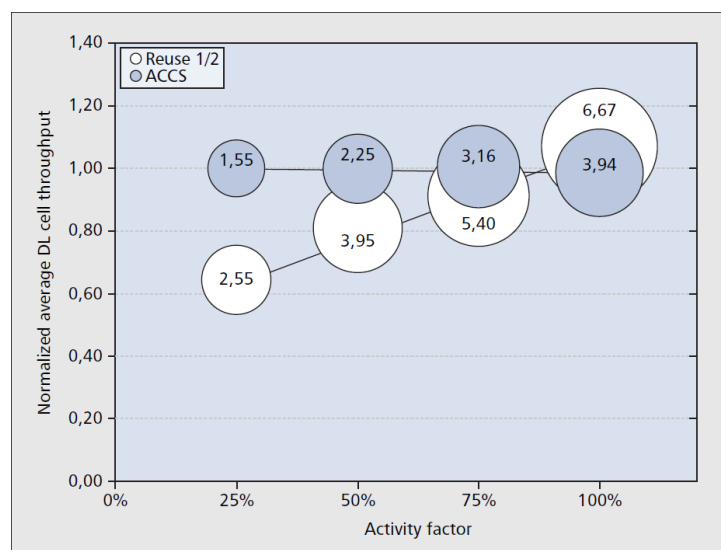


Figura 19: Grafico delle prestazioni del ACCS

femtocell insieme (riuso delle frequenze 1/1). Nella figura vengono anche mostrati i risultati che si ottengono con una tecnica di riuso delle frequenze 1/2. I risultati dimostrano che l'ACCS rende quasi insensibile il throughput al fattore di attività, risultando quasi quattro volte superiore al throughput registrato con un riuso delle frequenze 1/1 quando tutti i 16 HeNB sono attivi.

2.2.5 Gestione della mobilità per femtocell nella rete LTE

Le femtocell operano nello spettro delle frequenze gestite dagli operatori telefonici e devono perciò dividerle con le macrocell già esistenti nel territorio, allocando nel migliore dei modi le frequenze utilizzate per mitigare al massimo l'interferenza. Migliaia di femtocell installate nella stessa area di una macrocell creano una grande lista di celle adiacenti e di problemi di interferenza da risolvere, creando la necessità di una nuova procedura di handover per migliorare le prestazioni sia delle reti femtocell, sia delle macrocell. Nelle reti LTE l'handover tra due eNB è controllato dai nodi stessi, senza chiedere l'intervento dell'MME, traendo le informazioni utili direttamente dal terminale utente in movimento: l'eNB di arrivo prepara le risorse radio prima di accettare il nuovo utente e, dopo che l'handover ha avuto successo, indica all'eNB di partenza di rilasciare le risorse e di mandare un messaggio di notifica dell'avvenuto handover all'MME e questo lo comunica anche all'S-GW.

A differenza di questa architettura di rete, i HeNB non possono comunicare tra loro e un componente aggiuntivo (HeNB GW) li separa dal diretto collegamento con la core network; all'HeNB è assegnato un normale eNB ID (un identificativo unico nella rete) in modo tale che venga identificato dall'MME come un altro eNB; a sua volta l'HeNB GW traccia una lista privata degli HeNB sotto la sua gestione assegnando un HeNB ID ad ognuno. Inoltre è associato dall'MME agli HeNB e agli HeNB GW un Tracking Area Code (TAC) unico e questo viene comunicato agli eNB circostanti in modo che sappiano riconoscere una femtocell in fase di handover. Le tre situazioni possibili nelle procedure di handover sono:

- **Handover tra macrocell e femtocell:** l'eNB riconosce che la cella di arrivo è un HeNB e invia un messaggio di richiesta di handover all'MME, il quale lo inoltra all'HeNB GW interessato che informa l'HeNB di arrivo.
- **Handover da una femtocell a una macrocell:** l'HeNB GW riceve il messaggio di richiesta della procedura dall'HeNB di partenza e inoltra la richiesta all'MME, il quale comunica al eNB di arrivo dell'handover.
- **Handover tra due femtocell;** ci sono due approcci utilizzabili:
 1. Il primo metodo sposta la gestione della mobilità e la decisione dell'handover sull'HeNB GW non introducendo l'MME e il S-GW nel processo. Quando l'HeNB GW riceve la richiesta dell'handover dal HeNB, controlla l'identificativo del nodo e se la cella è sotto il suo controllo, gestisce l'handover senza nessun inoltro ai livelli superiori della rete.
 2. Nel secondo metodo la conferma della richiesta di handover e la decisione del rilascio delle risorse è lasciato nelle funzioni dell'MME; in questo metodo l'HeNB GW semplicemente inoltra la richiesta tra HeNB e MME. Il vantaggio di questo metodo è quello di essere di basso impatto sulla struttura dello standard LTE.

I terminali utenti che si muovono ad alta velocità attraverso le femtocell causano handover non necessari che abbassano le prestazioni della rete con un abbassamento della capacità di sistema. Come conseguenza dell'area ristretta coperta dalle femtocell può essere non necessario fare l'handover per questi utenti, soprattutto se stanno usufruendo di un servizio non in tempo reale. In [18] è proposto un algoritmo che effettua l'handover in funzione della velocità con cui si sta muovendo il terminale e distingue perciò tre casi:

1. **Terminale a bassa velocità:** da 0 a 15 Km/h; l'utente è fermo o in cammino.
2. **Terminale a media velocità:** da 15 a 30 Km/h; l'utente sta procedendo su una bicicletta, per esempio.
3. **Terminale ad alta velocità:** sopra i 30 Km/h; l'utente sta viaggiando in automobile.

L'algoritmo oltre che alla velocità dell'utente tiene anche in considerazione il tipo di servizio in cui è impegnato: un utente che sta usufruendo di un servizio "real-time" deve essere in grado di mantenere la qualità del servizio evitando inutili handover, mentre un utente che non sta usufruendo di questo tipo di servizio sarà meno influenzato e disturbato dagli handover anche se non necessari. Lo pseudo codice seguente rappresenta l'"algoritmo velocità e qualità di servizio" (SQ algorithm) possibile grazie alle informazioni scambiate tra terminale utente e MME o HeNB GW:

```
1. INITIALIZATION
2. Calculate V
3. IF V>30kmph
    NO handover
4. ELSE IF V>15kmph
    IF REAL-TIME
        NEED handover
    ELSE IF NON-REAL-TIME
        NO handover
5. ELSE
    NEED handover
RETURN
```

Le analisi fatte sul numero di handover non necessari su sistemi che implementano questo tipo di algoritmo hanno dimostrato un netto miglioramento rispetto ai sistemi che non lo impiegano; è stato riscontrato perciò un conseguente miglioramento della qualità del servizio che supera gli svantaggi introdotti dal ritardo introdotto dal crescente overhead dovuto alla maggiore complessità della procedura di handover introdotta.

2.2.6 Gestione adattiva del livello di potenza per femtocell

Una gestione adattiva della potenza trasmissiva dei FAP è un ottimo modo per limitare l'interferenza causata da esse alle reti macrocell quando le stazioni si trovano ad usufruire tutte delle stesse frequenze di utilizzo. I due più comuni schemi di gestione del livello di potenza sono:

- **A potenza fissa:** è lo schema base per la potenza trasmissiva; viene preconfigurato e deciso senza alcuna conoscenza riguardo l'ambiente in cui verrà installata la femtocell. Il suo vantaggio è la

semplicità di implementazione e il risparmio di costi per la tecnologia adattiva, mentre gli svantaggi risiedono nella difficoltà della femtocell di integrarsi con la rete macrocell preesistente, causando anche molta interferenza ad essa. Inoltre la potenza fissata è troppo bassa, la copertura della femtocell sarà piccola e fortemente disturbata dalla macrocell, al contrario se sarà troppo alta, la femtocell creerà molta interferenza alla macrocell.

- **Basata sulla potenza del canale downlink ricevuta dalla BS della macrocell:** lo schema si basa sulla potenza del co-canale di downlink ricevuta dalla macrocell che trasmette con maggiore potenza; il FAP della femtocell misura questa potenza e adatta la potenza trasmissiva in base a questa informazione. Con questo schema le femtocell poste vicine alle BS delle macrocell hanno un miglioramento nella qualità del segnale in quanto la potenza trasmissiva è abbastanza elevata ma non così tanto da creare molta interferenza alla macrocell. Uno svantaggio di questo schema è che, anche in questo caso, parte da una potenza trasmissiva di base fissa, che è introdotta per compensare l'eventuale attenuazione dovuta ai muri degli edifici, e da questa si adatta all'ambiente esterno non risultando del tutto adattabile per via, per esempio, delle diverse strutture dei muri. Se questa potenza fissa fosse alta e l'attenuazione dei muri bassa, si avrebbe un'interferenza inutilmente alta causata alla macrocell; al contrario se la potenza fissa fosse bassa e l'attenuazione dei muri alta, l'area di copertura della femtocell non sarebbe sufficiente per coprire adeguatamente l'edificio.

In [19] si introduce uno schema adattivo del livello di potenza basato sul livello di potenza ricevuta in downlink dalla macrocell e sul livello di potenza riscontrato in uplink dai terminale utenti in zona che usufruiscono della copertura della macrocell. Lo schema si propone di mitigare l'interferenza causata alla macrocell e mantenere una buona copertura indoor della femtocell.

La femtocell imposta questa potenza come segue:

$$P_{tx} = \text{MEDIAN}(P_m + P_{offset} + KL_E, P_{tx-upp}, P_{tx-low}) \quad (3)$$

La funzione MEDIAN() restituisce la media fra gli argomenti. P_m [dBm] è la potenza ricevuta dalla macrocell più vicina misurata dalla BS della femtocell, che include quindi anche l'attenuazione dovuta ai muri.

P_{tx-upp} e P_{tx-low} [dB] è il limite massimo e minimo della potenza trasmessa dalla BS femtocell; la prima è impostata per limitare l'interferenza con la macrocell e la seconda per mantenere un minimo di potenza affinché la femtocell sia rintracciabile dai terminali utenti. P_{offset} è la potenza prefissata di base che compensa l'attenuazione in spazio libero e che esclude quindi quella causata dai muri. K è un fattore positivo variabile e L_E [dB] è il valore stimato dell'attenuazione causata dai muri, supposta stimata idealmente. La relazione dei parametri dell'equazione (3) è mostrata in figura 20.

La BS della femtocell è supposta al centro della casa e la BS della macrocell vicina al muro esterno della casa. Se $K=1$ la potenza ricevuta dalla BS della femtocell è pressoché uguale a quella che si ha se fosse situata appena fuori il muro esterno. Se $K=2$ invece la potenza riscontrata è vicina a quella che si riceve molto vicino alla BS della macrocell.

L_E può essere calcolato come segue:

$$L_E = \frac{1}{2}(P_{txf} - P_{rxf} - L_a) \quad (4)$$

P_{txf} [dBm] è la potenza di trasmissione in uplink dei terminali utenti calcolata dalla BS della femtocell. P_{rxf} [dBm] è la potenza ricevuta dai terminali utenti dalla BS della femtocell. L_a [dB] è l'attenuazione della propagazione in spazio aperto tra il terminale utente e la BS della femtocell.

Questo schema risolve il problema della seconda soluzione di potenza di trasmissione adattiva: infatti in questo caso se l'attenuazione dovuta ai muri è alta, la potenza trasmittiva si adatta e aumenta, mentre se

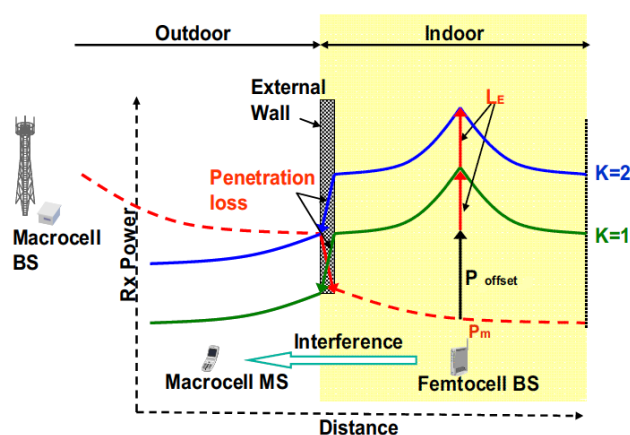


Figura 20: Grafico della potenza ricevuta in funzione della distanza e dell'attenuazione causata dai muri

l'attenuazione dovuta ai muri è bassa, la potenza si abbassa ed è mitigata l'interferenza con la macrocell.

2.3 WiMAX

Il WiMAX è un sistema basato sullo standard dell'interfaccia aerea 802.16 dell'IEEE che condivide molte proprietà di base del LTE [20]: per esempio usa la stessa interfaccia aerea OFDMA.

Di seguito vengono elencate alcune tra le caratteristiche principali di WiMAX che lo rendono competitivo nella nuova generazione della telefonia:

- **sicurezza:** WiMAX implementa diverse tecniche di crittografia, sicurezza ed autenticazione contro intrusioni da parte di terzi;
- **qualità del servizio (QoS):** WiMAX supporta 5 tipologie di qualità del servizio: Unsolicited Grant Service (UGS) per sistemi real time di dimensione fissa (es. VoIP), Real-Time Polling Service (rtPS) per sistemi real time di dimensione variabile (es. applicazioni video), Non Real-Time Polling Service (nrtPS) per flussi di dati tolleranti al ritardo, Extended Real-Time Polling Service (ErtPS) simile al rtPS per flussi real time a dimensione fissa (es. VoIP con soppressione di silenzio), Best Effort (BE) per flussi di dati dove non è richiesto livello minimo di servizio;
- **throughput:** utilizzando lo schema di modulazione IEEE 802.16 WiMAX trasporta una grande quantità di traffico con un alto livello di efficienza dello spettro e tolleranza ai segnali riflessi.
- **mobilità:** grazie allo standard 802.16 WiMAX permette connessioni in ambienti mobili fino a 120 km/h.

2.3.1 Architettura di rete

La rete d'accesso dell'architettura WiMAX è formata da tante Access Service Network (ASN), formate da più BS e un ASN gateway (ASN GW), collegati tra loro attraverso il gateway che consente inoltre un collegamento con la core network; come nella rete LTE, anche in quella WiMAX le BS sono connesse tra loro per permettere di gestire direttamente l'handover all'interno delle ASN e l'intera architettura è basata

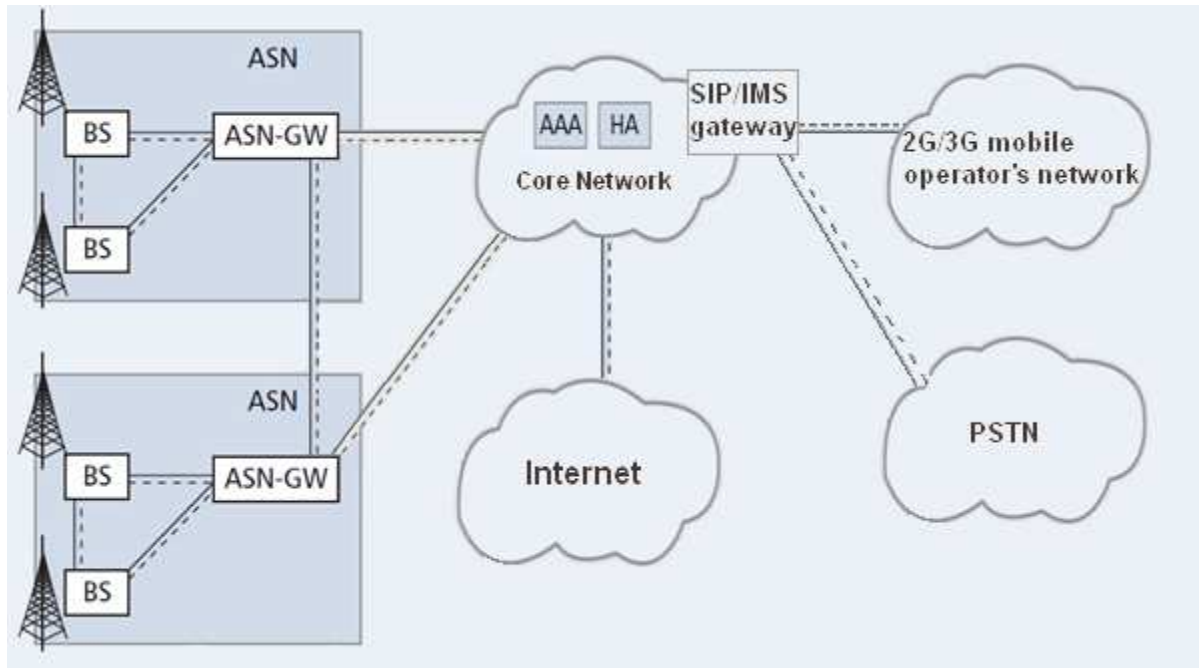


Figura 21: Architettura della rete WiMAX

sul protocollo IP. L'ASN GW ha varie funzioni come ad esempio la registrazione della posizione dei terminali, il controllo di autenticazione, il paging, l'autorizzazione alla connessione e la gestione dell'handover nel caso la procedura coinvolga due BS di due diversi ASN.

La core network è formata principalmente da due componenti: L'Authentication Authorization and accounting (AAA) a cui l'ASN GW fa riferimento per ottenere le informazioni riguardo i controlli di autenticazione, autorizzazione e account dell'utente che si vuole connettere alla rete, e L'Home Agent (HA) che gestisce gli indirizzi IP e ha il compito di indirizzare i pacchetti che giungono da internet verso l'indirizzo IP corretto. A questi due componenti si aggiunge il Session Initiation Protocol/IP Multimedia Subsystem (SIP/IMS) gateway che consente alla rete WiMAX di connettersi con le esistenti reti 2G e 3G e alla Public Switched Telephone Network (PSTN) (figura 21).

Nelle reti WiMAX che supportano le femtocell si introduce la sottorete femtocell chiamata femto-ASN che comprende i WiMAX FAP (WFAP) e i femto-ASN GW che controllano il traffico proveniente dal WFAP e lo indirizzano verso la core network (figura 22). I femto-ASN, a differenza degli HeNB, possono comunicare tra loro e con le BS delle macrocell e sono visti dalla core network come normali ASN con la differenza che hanno un proprio femto-AAA e una management/self-organizing network (SON) che si occupa della configurazione dei parametri delle BS delle femtocell e di ottimizzare le prestazioni, la copertura e la capacità della rete. In aggiunta alle normali funzioni dell'ASN GW, il femto-ASN GW supporta funzioni specifiche delle femtocell come il controllo d'accesso CSG, l'handover da e verso le femtocell e la gestione dell'interferenza delle femtocell.

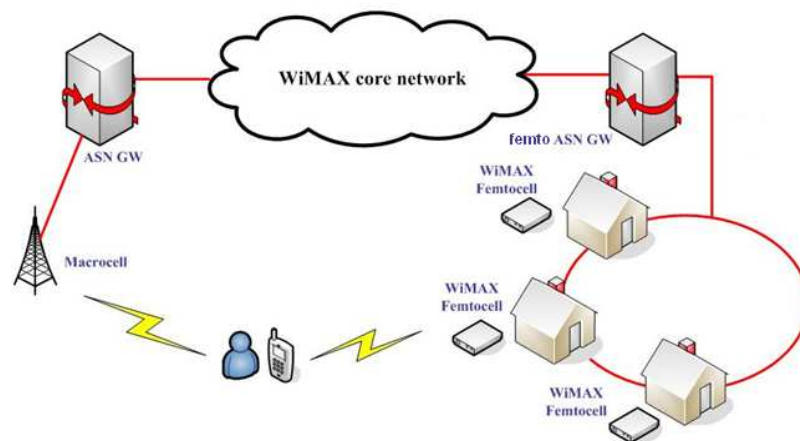


Figura 22: Architettura della rete WiMAX che supporta le femtocell

2.3.2 Schema di gestione per l'handover assistito dalla rete per femtocell WiMAX

Il grande numero di femtocell nella stessa area porterà a diversi problemi e a uno spreco di risorse radio: per esempio la scansione delle possibili BS per l'handover da parte dei terminali utenti impiegherà molto tempo rispetto all'attuale, i messaggi di controllo mandati periodicamente dalle BS serventi saranno in numero elevato e l'interferenza tra femtocell e macrocell sarà sempre più difficile da gestire. In [21] è proposto uno schema di gestione, delle BS delle femtocell assistito dalla rete che riduce il numero di operazioni di ricerca delle stazioni serventi e la grandezza dei messaggi di controllo delle BS adiacenti: lo schema proposto usa la BS della femtocell per monitorare il meccanismo e procurare al terminale utente le informazioni della BS più vicina. Nei sistemi WiMAX le BS inviano periodicamente agli utenti in zona, in

broadcast, un messaggio di controllo contenente informazioni riguardanti le BS vicine per facilitare la gestione della mobilità; questo meccanismo, con l'ingente numero di femtocell che saranno posizionate nella stessa area, porterà ad un incremento della grandezza del messaggio di controllo. Inoltre mentre il terminale utente sta ricercando le BS vicine non possono comunicare in contemporanea con la BS servente e questo porta alla necessità di un efficiente schema di gestione. Nello schema è supposto che ogni BS delle femtocell abbia un'interfaccia duale: una per comunicare con gli attuali utenti connessi con essa e l'altra per monitorare i segnali in uplink dei potenziali terminali che si vogliono connettere.

Generalmente le BS delle femtocell sono posizionate all'interno degli edifici in modo tale che possiamo considerare che i terminali utenti compiano un handover verso una femtocell solo se si trova in determinate zone che le BS conoscono grazie al meccanismo di triangolazione che gli permette di stimare la posizione di un terminale sapendo il ritardo di propagazione dell'onda elettromagnetica fra tre BS.

La figura 23 illustra la procedura dello schema proposto:

1. Quando una BS femtocell si accende manda un messaggio FEM_INF alla BS macrocell, contenente le informazioni relative alla femtocell.
2. La BS periodicamente invia in broadcast un messaggio MOB_NBR_ADV contenente solo l'elenco delle macrocell adiacenti.
3. I terminali utenti ricercano periodicamente le macrocell vicine in base al messaggio MOB_NBR_ADV in modo da sapere se il terminali stesso si è spostato.
4. Se non si è spostato richiede informazioni riguardo le femtocell adiacenti ad essa alla BS con il messaggio FEMTO_REQ.
5. La BS servente stima la posizione del terminale e invia alle BS femtocell vicine al terminale un messaggio UL_MON_REQ con la richiesta di monitorare il suo canale uplink.
6. Le femtocell che ricevono questo messaggio monitorano il canale con una delle due interfacce e riportano i risultati (la potenza del segnale ricevuto) alla BS servente con il messaggio UL_MON_RSP che indica implicitamente la distanza tra il terminale e ogni BS femtocell.

7. Basandosi su questa risposta la BS servente seleziona la BS femtocell più idonea e invia al terminale un messaggio FEMTO_RSP con le informazioni riguardo alla femtocell.
8. Il terminale in base al messaggio ricevuto ricerca la femtocell.
9. Se è possibile accedere al servizio della femtocell, il terminale utente effettua l'handover.

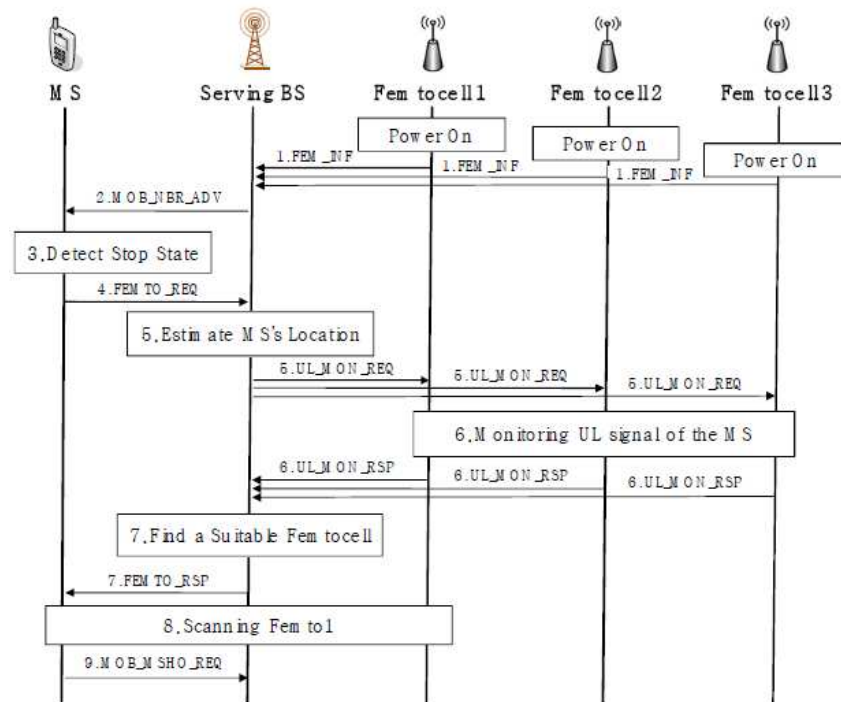


Figura 23: Illustrazione dello schema proposto per l'handover verso le femtocell

Nello schema proposto, dal momento che il messaggio MOB_NBR_ADV contiene solo le informazioni relative alle macrocell vicine, non c'è uno spreco di risorse e la ricerca delle stazioni per l'handover è ridotta al minimo.

Un confronto tra l'usuale schema usato per le reti WiMAX e quello proposto ha dimostrato i vantaggi di quest'ultimo; è stato considerato il raggio delle macrocell di 1 Km e le femtocell installate arbitrariamente nell'area coperta dalla macrocell. I terminali utenti si muovono all'interno della macrocell e richiedono informazioni sulle femtocell adiacenti in punti casuali mentre l'errore di triangolazione per localizzare i terminali ha una distribuzione uniforme fra i 100 e i 300 m. Il numero di femtocell installate nell'area ha anch'esso una distribuzione uniforme tra 25 e 200 unità mentre la differenza tra la reale posizione dei terminali e la sua stima sia una variabile gaussiana standard.

La BS servente invia un messaggio UL_MON_REQ alle 10 femtocell più vicine alla posizione stimata del terminale.

La simulazione misura anche la "hit ratio" che indica se la più vicina femtocell dalla reale posizione del terminale e la femtocell indicata dal messaggio FEMTO_RSP sono la stessa. La figura 24 mostra che minore è l'errore di triangolazione e maggiore è la "hit ratio", ma in ogni caso con lo schema il rate di successo è più dell'88% nel caso peggiore.

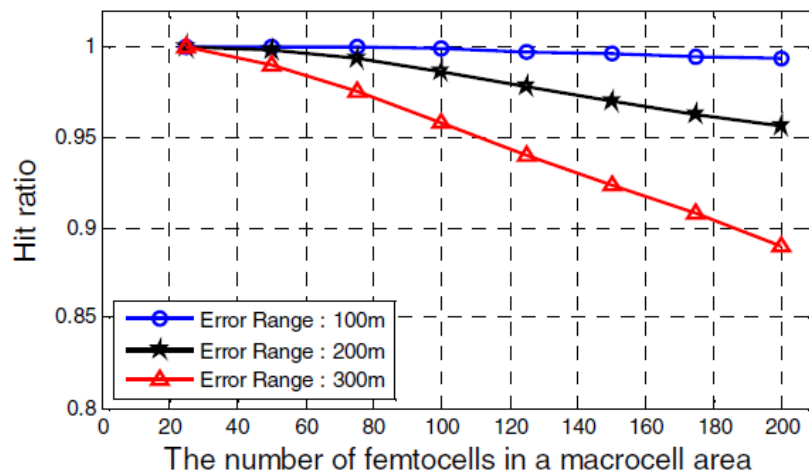


Figura 24: Grafico della hit ratio sul numero di femtocell nell'area della macrocell

La figura 25 mostra invece il numero di BS ricercate dallo schema proposto in confronto allo schema

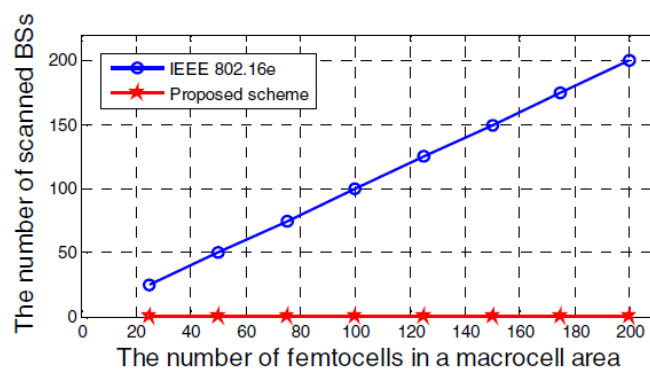


Figura 25: Grafico delle BS ricercate nei due schemi proposti all'aumentare delle femtocell nell'area della macrocell

previsto per le reti WiMAX: nello schema usuale la BS servente invia le informazioni relative a tutte le femtocell ai terminali mentre nello schema proposto vengono inviate le informazioni riguardanti solo la femtocell stimata più idonea all'handover indipendentemente dal numero di femtocell presenti sul

territorio della BS macrocell. In questo modo, quando un terminale opera un handover verso una femtocell, il messaggio di informazione riguarda solo una femtocell che il terminale dovrà cercare.

2.3.3 Controllo d'accesso per reti femtocell WiMAX

Una campagna di misure in uno scenario composto da macrocell e femtocell, per studiare le prestazioni che si hanno per l'accesso pubblico e privato alle femtocell, è stato adottato in [22] per valutare le reali prestazioni in un ambiente urbano; a questo scopo è stata scelta la città di Luton, in Inghilterra, e in particolare una sua via, nella figura 26 attorno alle coordinate (500,450), dove è stata installata un FAP per

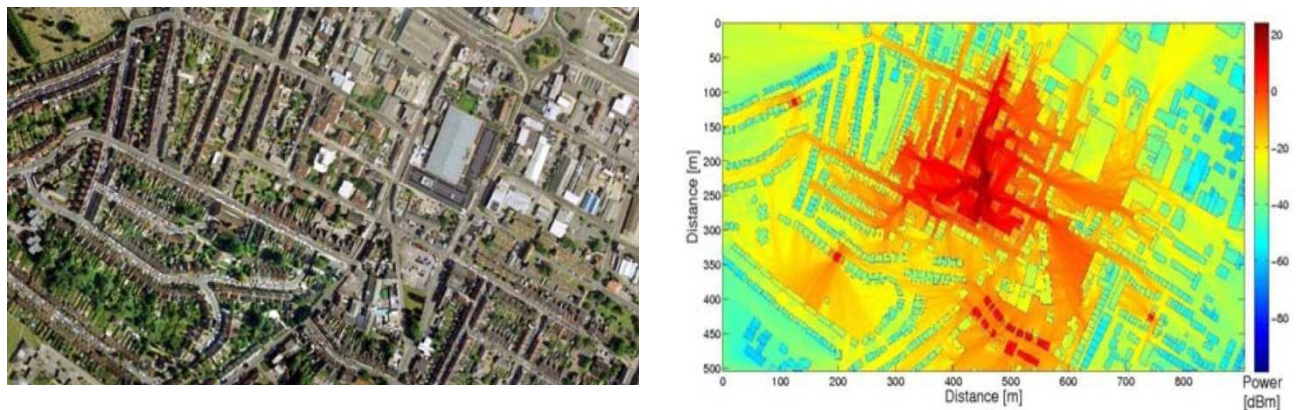


Figura 26: Fotografia aerea di una porzione della città di Luton e grafico della copertura offerta dalla macrocell e dalle femtocell

Parameter	Value	Parameter	Value
Nr of Macrocells	1	Femto Ant. Height	1 m
Nr of Femtocells	32	Femto Ant. Tilt	0
Carrier Frequency	3.5 GHz	Femto Noise Figure	4 dB
Channel Bandwidth	10 MHz	Femto Cable Loss	3 dB
DL:UL Ratio	1:1	CPE Tx Power	23 dBm
Permutation Scheme	AMC	CPE Ant. Pattern	Omni
Frame Duration	5 ms	CPE Ant. Height	1.5 m
Sub-channels	16	CPE Noise Figure	5 dB
DL symbols	19	CPE Cable Loss	0 dB
BS TX Power	43 dBm	Service	Video
BS Ant. Gain	18 dBi	Min Service TP	64.0 Kbps
BS Ant. Pattern	Omni	Max Service TP	128.0 Kbps
BS Ant. Height	30 m	Average Symbol Eff.	19.9 Kbps
BS Ant. Tilt	3	σ (Shadow Fading)	8 dB
BS Noise Figure	4 dB	Intra BS correlation	0.7
BS Cable Loss	3 dB	Inter BS correlation	0.5
Femto TX Power	10 dBm	Snapshots	100
Femto Ant. Gain	0 dBi	Path Loss Model	FDTD
Femto Ant. Pattern	Omni	Snapshots	100

Tabella 3: Parametri di simulazione

ogni edificio (figura 26).

Due utenti che usufruiscono del servizio sono stati posizionati all'interno di ogni casa, creando uno scenario pessimistico per le femtocell, mentre 10 utenti sono stati posizionali arbitrariamente in strada; le femtocell utilizzano tutte lo stesso canale della macrocell nell'area e anche questo contribuisce allo scenario peggiore della simulazione per i problemi d'interferenza. I parametri della campagna di misure sono descritti nella tabella 3.

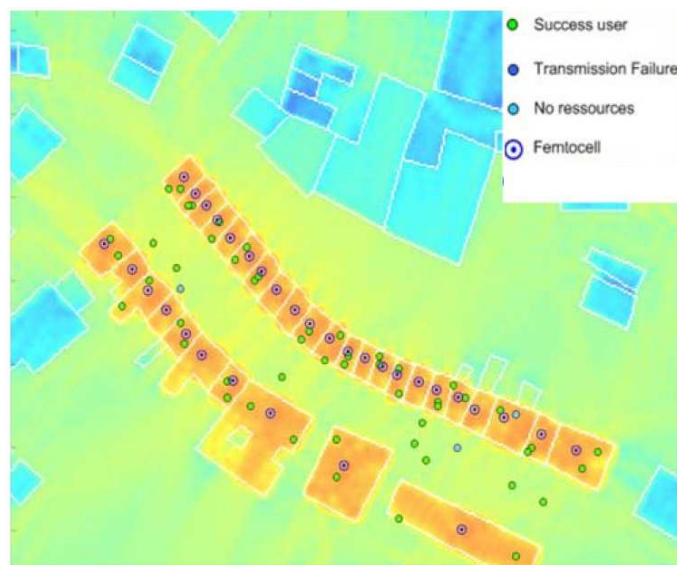


Figura 27: Scenario con accesso pubblico

I due metodi d'accesso studiati nella campagna di misure sono:

- **Accesso pubblico:** in questo tipo di accesso chiunque può accedere ai servizi della femtocell e, nello scenario affrontato, ne beneficiano gli utenti che si trovano in strada che ricevono il segnale da una

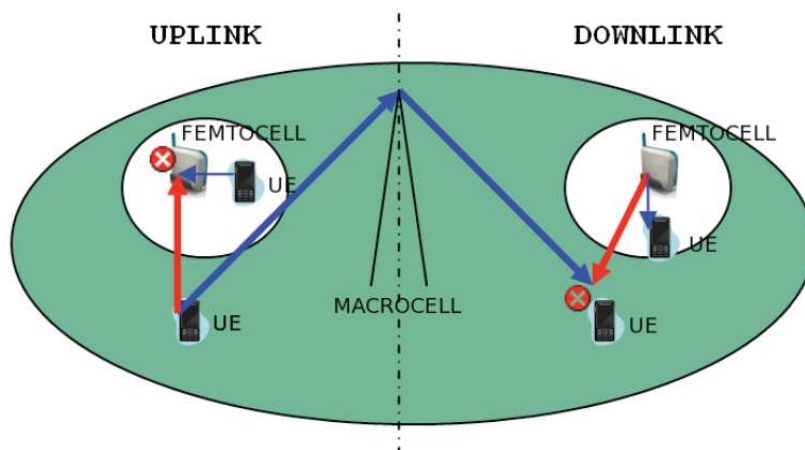


Figura 28: Disturbo del segnale di uplink e downlink

BS femtocell vicina piuttosto che dalla lontana macrocell, che anzi in questo caso diventa un'interferenza. La figura 27 mostra i benefici di questo tipo d'accesso nella campagna di misure: la maggior parte degli utenti usufruisce dei servizi con successo.

- **Accesso privato:** in ogni caso l'accesso più utilizzato è questo secondo tipo che permette di preservare le risorse offerte dalle femtocell per gli utenti che hanno pagato il FAP. Questo approccio però crea problemi di interferenza tra gli utenti connessi alla femtocell e quelli connessi alla macrocell: in un primo caso il segnale di un utente connesso a una vicina femtocell può essere corrotto per colpa della presenza di un più vicino utente connesso alla macrocell che però utilizza lo stesso slot in frequenza o nel tempo. In un secondo caso invece il segnale di un utente connesso a una lontana macrocell può essere corrotto dal segnale di un più vicino utente connesso alla femtocell che usa lo stesso slot in frequenza o nel tempo (figura 28).

Lo scenario della strada con l'accesso privato è illustrato nella figura 29: i segnali degli utenti in strada, connessi con la macrocell sono disturbati dall'interferenza dei segnali provenienti dalle femtocell vicine; è per questa ragione che in questo tipo di accesso sono richieste tecniche per ridurre l'effetto dell'interferenza come l'Adaptive Femtocell Power [23], la Dynamic Frequency Planning [24] o la Adaptive

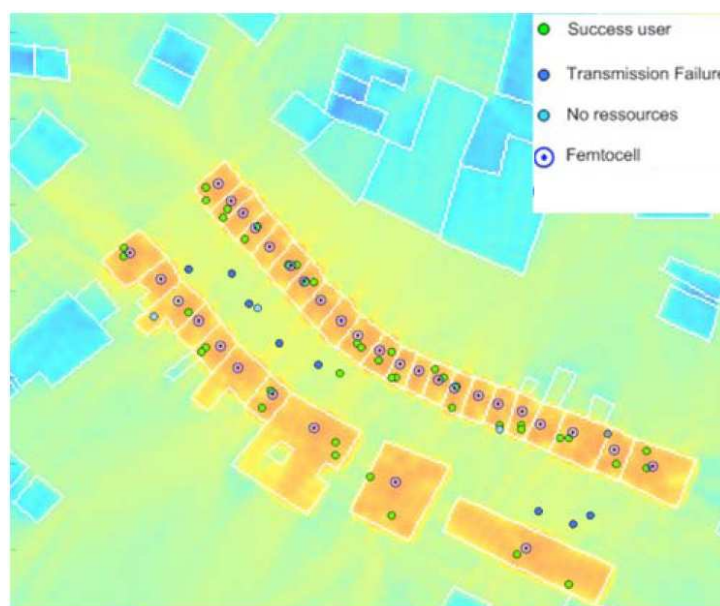


Figura 29: Scenario con accesso privato

Uplink Attenuation [25].

Infine la figura 30 mostra il grafico della distribuzione della probabilità per il throughput totale della cella per entrambi i tipi d'accesso: La figura dimostra che l'accesso privato tende a diminuire il throughput totale della cella di un valore attorno al 15% rispetto all'accesso pubblico, dovuto all'interferenza distruttiva che le femtocell causano sugli utenti connessi alla macrocell.

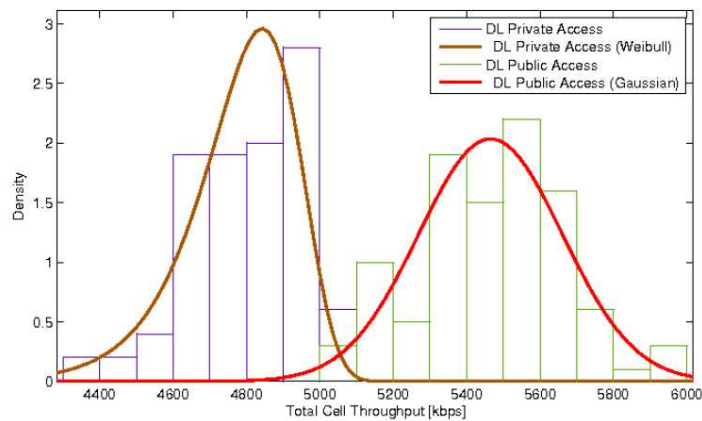


Figura 30: grafico del throughput per il canale di downlink in entrambi i metodi d'accesso

Capitolo 3

3 Confronto tra gli standard UMTS, LTE e WiMAX

3.1 Introduzione

L'incremento della domanda di accesso veloce ad internet dai terminali mobili ha creato nel settore delle telecomunicazioni l'interesse di sviluppare nuove tecnologie per offrire tale servizio con alte prestazioni e costi ridotti. L'ITU sotto il nome di "IMT Advanced" ha introdotto i requisiti perché una tecnologia possa essere definita 4G e in questa categoria le due maggiori tecnologie che si stanno contendendo il mercato della telefonia mobile sono LTE, sviluppato dal 3GPP, e il WiMAX, sviluppato dal IEEE. Se dal punto di vista tecnico le due tecnologie sono simili, dal punto di vista del mercato differiscono della fondamentale caratteristica del tempo di uscita sul mercato: da una parte infatti il WiMAX è già disponibile sul mercato ed è una scelta ottimale per i nuovi operatori di rete e per quelli che non utilizzano tecnologie 3GPP, d'altra parte LTE è ancora in fase di sviluppo ma è sicuramente la scelta più logica di sviluppo per le reti che utilizzano l'UMTS del 3GPP garantendo una continuità di standard e infrastrutture con l'attuale 3G.

La sigla IMT è volutamente ripetuta dal nome delle specifiche ITU precedenti, "IMT 2000", in quanto le tecnologie 4G continueranno ad utilizzare, almeno in Italia, lo stesso spettro di frequenze delle tecnologie 3G, per le quali si ha ormai adottato il nome di spettro IMT per indicarle; per via della grande occupazione dello spettro delle frequenze sono poche le frequenze non ancora assegnate e utilizzabili da parte delle compagnie telefoniche. Con il passaggio alla tv digitale si prospettava una buona occasione per la telefonia 4G di occupare le frequenze lasciate libere dalla tv analogica, ciò che viene chiamato "dividendo digitale" cioè quella parte di frequenze che con il passaggio alla tv digitale non vengono rioccupate dalla nuova tecnologia. In Italia però non è avvenuta come in altri paesi (Germania, Stati Uniti e India) un'asta pubblica aperta alle aziende telefoniche e le frequenze sono state riassegnate in parte ai proprietari che già le utilizzavano con la tv analogica e in parte ad altre emittenti televisive.

3.2 Passaggio dalla tecnologia 3G alla 4G

Una delle maggiori differenze tra le tecnologie 3G e 4G è l'intento con cui sono state sviluppate: le tecnologie 3G infatti sono basate sul servizio fondamentale della chiamata, come dimostra anche una parte dell'architettura di rete che adotta la commutazione di circuito, non avendo considerato internet, all'epoca dello sviluppo, un servizio indispensabile da offrire agli utenti di terminali mobili. Lo sviluppo delle tecnologie 4G, tutt'ora in atto, ha invece considerato internet come presupposto fondamentale per lo sviluppo della telefonia mobile e ha costruito le nuove tecnologie basandosi sul protocollo IP e sulla commutazione di pacchetto, eliminando tutte le componenti legate alla commutazione di circuito. Il primo requisito introdotto dall'utilizzo di internet sui terminali mobili è stato il necessario aumento della velocità di trasferimento dati per poter gestire una navigazione veloce della rete e l'introduzione di una core network totalmente basata sul protocollo IP, chiamata Evolved Packet Core (EPC).

Una scelta funzionale a questi aspetti è stata l'adozione di un nuovo schema di trasmissione nel passaggio tra la tecnologia 3G alla 4G: si passa infatti dall'UMTS, tecnologia 3G, che utilizza il CDMA e ha un rate massimo che va dai 3 ai 10 Mbps, all'LTE e al WiMAX, tecnologie 4G, che utilizzano l'OFDMA e possono raggiungere rate anche superiori ai 100Mbps.

Le innovazioni portate dalla tecnologia 4G sono comuni agli standard LTE e WiMAX e possono essere riassunte nelle seguenti:

- **Trasporto dei dati:** LTE e WiMAX introducono una rete impostata totalmente sull'utilizzo della commutazione di pacchetto, a differenza delle tecnologie 2G e 3G ancora centrate sull'utilizzo della commutazione di circuito, spostando così la priorità sul trasporto di dati anziché sui servizi voce che nelle tecnologie 4G vengono trasformati in servizi Voice over IP (VoIP).
- **Efficienza spettrale:** in conseguenza alla scarsità di risorse concesse all'utilizzo, migliorare l'efficienza spettrale è uno degli obiettivi principali e in questo senso l'OFDM è una migliore soluzione rispetto al CDMA.
- **Flessibilità dello spettro di banda:** a differenza dell'UMTS che operava su una larghezza di banda fissa di 5 MHz per il WCDMA, l'LTE e WiMAX possono utilizzare una banda variabile da 1,25 MHz

fino a 20MHz e questo permette agli operatori di rete di scegliere soluzioni ottimali a seconda della disponibilità di banda e della necessità di capacità e copertura.

- **Rate di trasmissione:** l'obiettivo delle tecnologie 4G è di poter fornire servizi ad alta definizione, ad esempio film o canali televisivi, sul canale wireless cellulare; in particolare si vuole portare il rate di trasmissione dai 3-10 Mbps dell'UMTS fino ai 50-100 Mbps dell'LTE e WiMAX.
- **Costo delle infrastrutture:** le tecnologie 4G spostano tutta la rete cellulare su servizi a commutazione di pacchetto basati sul protocollo IP eliminando la dualità commutazione di circuito-commutazione di pacchetto che caratterizzava l'UMTS; inoltre sia LTE sia WiMAX eliminano il controllo centralizzato della rete in favore di una più vasta autonomia delle BS e dei gateway.

Analizzati i punti che separano le tecnologie 3G dalle 4G, i punti invece in comune delle due architetture di rete degli standard LTE e WiMAX sono:

- **eNB e BS:** le funzioni delle BS dei due standard sono simili ed entrambe controllano l'autenticazione, l'instaurazione della connessione, allocazione delle risorse e altri aspetti che vanno sotto il nome di piano di controllo della gestione delle risorse radio; inoltre in entrambi gli standard le BS possono comunicare tra loro eliminando il bisogno di passare attraverso gli elementi della core network per effettuare l'handover.
- **MME/S-GW e ASN-GW:** le funzionalità combinate del MME e del S-GW dell'architettura LTE sono pressoché uguali a quelle svolte dal ASN-GW del WiMAX; questi elementi provvedono alla mobilità tra le BS, alle funzioni di sicurezza e di qualità di servizio e alla gestione del paging.
- **PDN-GW e HA:** anche questi due componenti delle rispettive reti hanno funzioni simili; entrambi provvedono alla mobilità tra i gateway (S-GW per LTE e ASN-GW per WiMAX).

Per quanto riguarda i canali di uplink e downlink, se il WiMAX implementa l'OFDMA in entrambe le direzioni, LTE ha scelto di utilizzarlo solo in downlink, preferendo il SC-FDMA in uplink che permette un valore medio più costante della potenza media in trasmissione; questo valore va infatti ad incidere

direttamente sui requisiti degli amplificatori di potenza e della vita della batteria e in questo senso sono migliori le prestazioni offerte da quest'ultima soluzione. L'SC-FDMA infatti riduce il parametro detto "Peak to Average Power Ratio" (PAPR) di 1-2 dB rispetto l'OFDMA richiedendo però una maggiore complessità del ricevitore della BS.

3.3 Le Femtocell nella tecnologia 4G

Uno degli intenti della tecnologia 4G è quello di rendere possibile l'accesso veloce ad internet a basso costo, ma l'alta capacità di sistema e l'alto data rate richiesti contrastano con l'abbassamento dei prezzi in quanto necessitano di maggiori spese in nuove infrastrutture e terminali più complessi. Al momento le statistiche affermano che ci sono circa mille utenti per macrocell e, storicamente, ridurre questo rapporto è un metodo per aumentare la capacità di sistema, venendo quindi incontro alla domanda del mercato. Una spesa elevata per aumentare il numero di BS sul territorio andrebbe ancora contro la politica di risparmio dei requisiti 4G ed è in questo scenario che le femtocell si inseriscono consentendo di espandere la capacità di sistema e la copertura di rete ad un prezzo ridotto; inoltre la buona condizione del segnale radio nella rete d'accesso offerta dalle femtocell è strettamente legata ad un più alto data rate che con la rete macrocell sarebbe impensabile ottenere. Anche se sono stati sviluppati degli standard sia per tecnologie 3G sia 4G, è solo con quest'ultima che le potenzialità e i vantaggi offerti dalle femtocell verranno sfruttati completamente e sarà maggiormente necessario l'apporto offerto alla rete dalla tecnologia.

La tecnologia 4G che risulterà dominante sul mercato sarà quella che fornirà l'accesso veloce ad internet al minor prezzo e anche in questo senso l'introduzione delle femtocell nelle reti cellulari sarà una componente fondamentale al raggiungimento dell'obiettivo, aspetto che nel settore delle telecomunicazioni si sta promuovendo fortemente.

4 Reference

- [1] F. M. Chiussi, D. Logothetis, I. Widjaja, D. Kataria, "Femtocells", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no 9, pp. 66-67, Settembre 2009.
- [2] , "G. Mansfield, "Femtocells in the US Market –Business Drivers and Consumer Propositions", FemtoCells Europe, ATT, London, U.K., Giugno 2008.
- [3] Presentations by ABI Research, Picochip, Airvana, IP.access, Gartner, Telefonica Espana, 2nd Int'l. Conf. Home Access Points and Femtocells.
- [4] G. Korinthios, E. Theodoropoulou, N. Marouda, I. Mesogiti, E. Nikolitsa, G. Lyberopoulos, "Early experiences and lessons learned from femtocells", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no 9, pp. 124-130, Settembre 2009.
- [5] D. Knisely, T. Yoshizawa, F. Favichia, "Standardization of femtocells in 3GPP" , IEEE Communications Magazine, vol. 47, no 9, pp. 68-75, Settembre 2009.
- [6] S. Carlaw, "IPR and the Potential Effect on Femtocell Markets," FemtoCells Europe, ABIresearch, London, UK, Giugno 2008."
- [7] <http://www.3gpp.org>,
- [8] <http://www.3gpp2.org>,
- [9] <http://www.wimaxforum.org>,
- [10] <http://www.femtoforum.org>,
- [11] V. Chandrasekhar, J. Andrews and A. Gatherer, "Femtocell networks: a survey", IEEE Communications Magazine, vol.46, no.9, pp.59-67, Settembre 2008.
- [12] S. Tekinay, B. Jabbari, "Handover and channel assignment in mobile cellular networks", IEEE Communications Magazine, vol. 29, no.11, pp. 42-46, Novembre 1991.
- [13] M. Yavuz, F. Meshkati, S. Nanda, A. Pokhariyal, N. Johnson, B. Raghathan, A. Richardson, "Interference management and performance analysis of UMTS/HSPA+ femtocells", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no 9, pp. 102-109, Settembre 2009.
- [14] A. Golaup, M. Mustapha, L.B. Patanapongpibul, "Femtocell access control strategy in UMTS and LTE", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no 9, pp. 117-123, Settembre 2009.
- [15] 3GPP TS 25.367, "Mobility Procedures for HNB".
- [16] Jin-Seok Kim, Tae-Jin Lee, Handover in UMTS Networks with Hybrid Access, ICACT , Febbraio 7-10 2010.
- [17] Luis G. U. Garcia, Klaus I. Pedersen, Preben E. Mogensen, "Autonomous Component Carrier Selection: Interference Management In Local Area Environments for LTE", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no 9, pp. 110-116, Settembre 2009.

- [18] Haijun Zhang, XiangmingWen, Bo Wang, Wei Zheng and Yong Sun, "A Novel Handover Mechanism between Femtocell and Macrocell for LTE based Networks", in proc. Communication Software and Networks, 2010. ICCSN '10.
- [19] Motoki Morita, Yasuhiko Matsunaga, Kojiro Hamabe, "Adaptive Power Level Setting of Femtocell Base Stations for Mitigating Interference with Macrocells", in proc. Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd.
- [20] R.Y. Kim, K. Jin Sam Kwak Etemad, "WiMAX femtocell: requirements, challenges, and solutions", IEEE Communications Magazine, vol. 47, no 9, pp. 84-91, Settembre 2009.
- [21] Jin-Kyu Nam, Won-Kyeong Seo, Dong-Won Kum, Jae-In Choi, and You-Ze Cho, "A Network-Assisted Femto Base Station Management Scheme in IEEE 802.16e System", in proc. IEEE CCNC 2010.
- [22] David Lopez-Pèrez, Alvaro Valcarce, Guillaume De La Roche, Enjie Liu, Jie Zhang, "Access Methods to WiMAX Femtocells: A downlink system-level case study", in proc. IEEE International Conference on Communication Systems, Novembre 2008.
- [23] Byung-Ik Jung, Jung-Min Moon, Dong-Ho Cho, "Scanning time reduction based on adaptive threshold in hierarchical cellular networks", in proc. IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 2861 - 2865, Settembre 2009.
- [24] D. Lopez-Perez, A. Juttner, Jie Zhang, "Optimisation Methods for Dynamic Frequency Planning in OFDMA Networks", in proc. The 13th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, pp. 1-28, Settembre 28-Oct. 2 2008.,
- [25] Han-Shin Jo, Cheol Mun, June Moon, Jong-Gwan Yook, "Interference mitigation using uplink power control for two-tier femtocell networks", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.8 , no. 10, pp. 4906 - 4910, Ottobre 2009.
- [26] David Lopez-Perez, Guillaume de la Roche, Alvaro Valcarce, Alpar Juttner, Jie Zhang, "Interference Avoidance and Dynamic Frequency Planning for WiMAX Femtocells Networks", in proc. IEEE International Conference on Communications Systems, Novembre 2008.