

Appunti per il corso di Telecomunicazioni Wireless

# Long Term Evolution

Introduzione

**Ing. Elena Guzzon**

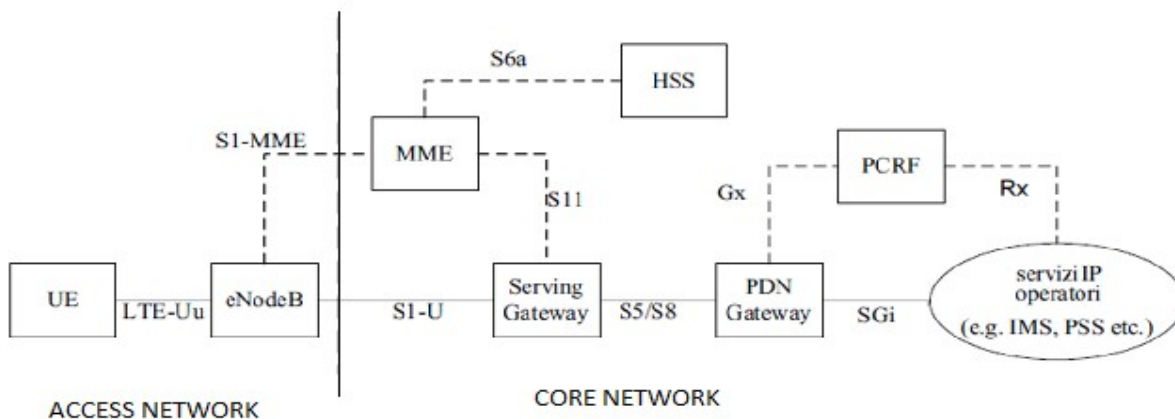
**a.a 2011/2012**

# 1. INTRODUZIONE

Long Term Evolution (LTE) è l'evoluzione dei sistemi di telecomunicazioni di terza generazione ed è sviluppata per rispondere alle nuove e sempre più sfidanti richieste del mercato delle telecomunicazioni. Infatti, lo sviluppo di sempre nuovi servizi a valore aggiunto e la diffusione di dispositivi mobili evoluti (smarthpone, tablet etc.) ha rivoluzionato il concetto stesso di cellulare. Non più terminale dedicato solo alle chiamate vocali, ma un dispositivo in grado di fornire una vasta gamma di servizi aggiuntivi. Per soddisfare le continue e sempre più sfidanti richieste degli utenti sono indispensabili architetture e protocolli di rete evoluti in grado di sfruttare al meglio le banda di frequenze disponibili per la comunicazione. LTE si presenta come una valida soluzione attraverso la realizzazione di un rete efficiente e dai costi contenuti. LTE è in grado di supportare alti data-rate con picchi di 75Mbit/s in uplink e 300Mbit/s in downlink e con una larghezza di banda scalabile da 1,25MHz a 20MHz. In contrasto con i modelli a connessione di circuito caratteristici delle reti precedenti, in cui le comunicazioni dati a pacchetto venivano trattati da nodi dedicati, LTE è stata progettata per supportare unicamente servizi a connessione di pacchetto. Tutti i dati, anche quelli voce, viaggiano su protocolli TCP/IP e la connessione tra il terminale mobile e le reti esterne è di tipo IP. L'unificazione di tutti i protocolli di rete è una delle maggiori innovazioni introdotte da LTE che permette di ridurre costi e latenze.

LTE Fornisce agli utenti connessioni con diverse qualità di servizio (QoS). A ciascun flusso informativo è associata una specifica classe di QoS e il flusso IP con la sua specifica classe costituisce un *bearer*. La rete è in grado di gestire contemporaneamente più bearers di uno stesso utente: ad esempio durante una comunicazione vocale (VoiP), un utente potrebbe accedere ad sito web, o scaricare un file tramite il protocollo FTP. I pacchetti FTP saranno associati classe best-effort mentre quelli relativi alla chiamata VoiP avranno bisogno di una QoS più elevata. La rete è strutturata in modo da gestire efficacemente le diverse QoS garantendo al tempo stesso sicurezza e privacy degli utenti e delle loro informazioni.

Più specificatamente, l'acronimo LTE indica lo standard della nuova rete di accesso evoluzione della rete di accesso UTRAN delle reti 3G. Lo standard per la Core Network (CN) è descritto dal System Architecture Evolution (SAE) ed è definito con lo scopo preciso di supportare i servizi offerti dalla rete di accesso LTE. SAE e LTE sono quindi due aspetti della stessa evoluzione verso le reti cosiddette di quarta generazione, che nel loro insieme costituiscono il sistema Evolved Packet System (EPS). La figura sottostante illustra lo schema dell'architettura di rete, la differenza principale rispetto alle reti precedenti è rappresentata dalla rete di accesso, che è costituita da un unico elemento, l'evolved NodeB (eNodeB), che include tutte le funzionalità che in UMTS erano caratteristiche del nodeB e del RNC.



**Figura 1.** Architettura di rete ESP.

## 2. ARCHITETTURA DI RETE

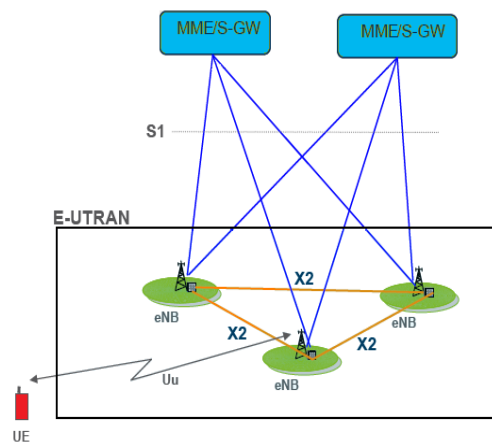
LTE ha una architettura di rete semplificata rispetto a quella delle rete UMTS. La rete di accesso è costituita da un unico elemento, il cosiddetto evolved *Node B* (eNB), che include tutte quelle funzionalità che in UMTS erano gestite separatamente dal Node B e Radio Network Controll (RNC). In LTE tutti i dati anche quelli voce viaggiano su protocolli a pacchetto e proprio per questo motivo la core network è una struttura unificata senza alcuna distinzione tra dominio a pacchetto e dominio a circuito. Inoltre, tutti i nodi di rete sono interconnessi tramite interfacce standardizzate in modo da consentire l'interoperabilità tra hardware realizzato con tecnologie diverse.

### 2.1. User Equipment

Il terminale LTE viene denominato User Equipment (UE) come in UMTS il concetto di terminale mobile è sempre più legato a quello di un palmare con molte funzionalità integrate. L'UE è costituito da due parti: il Mobile Equipment (ME) e la universal Subscriber Identity Module (USIM). Il ME è il terminale vero e proprio che contiene l'hardware e il software che implementano le funzionalità LTE (gestione della risorse radio, della comunicazione, gestione mobilità, della sicurezza etc.). La USIM è costituita da un circuito integrato chiamato UICC che contiene tutte le informazioni relative all'utente, alla rete e ai servizi supportati. Gli UE sono classificati in 4 possibili categorie, a seconda delle loro specifiche prestazioni e capacità. Quando l'UE si connette alla rete, il eNB seleziona i parametri operativi più adatti alla comunicazione, in base alla categoria del terminale stesso.

### 2.2. Rete di accesso

La rete di accesso LTE (detta anche E-UTRAN) è costituita unicamente da eNB connessi tra loro tramite l'interfaccia X2. Ogni eNB è poi connesso alla CN attraverso l'interfaccia S1.



**Figura 2.** Architettura della rete di accesso.

La rete di accesso E-UTRAN gestisce tutte le operazioni relative alla trasmissione dei segnali sul canale radio e che possono riassunte nelle quattro seguenti funzionalità principali:

1. **Radio Resource Management:** si occupa di tutte le funzioni relative alla gestione dei bearers quali gestione delle risorse radio, controllo della mobilità, scheduling e allocazione dinamica delle risorse.
2. **Header compression:** questa funzione si occupa di comprimere l'intestazione dei pacchetti IP in modo ridurre quanto più possibile il traffico di segnalazione. Questa funzione è molto importante soprattutto per i pacchetti di piccole dimensioni, come ad esempio i pacchetti VoIP.
3. **Security:** Tutti i dati trasmessi sul canale radio sono opportunamente criptati e la gestione della sicurezza prevede non solo la cifratura dei dati ma anche la muta autenticazione di utente e rete e il controllo di integrità delle unità informative.
4. **Connectivity to the EPC:** questa funzione si occupa di gestire i messaggi di segnalazione verso i nodi delle CN, in particolare verso il MME e verso il S-GW.

L'eNB svolge tutte quelle operazioni, che in UMTS prevedevano la collaborazione tra NB e RNC. Si occupa quindi di modulazione/demodulazione, misure di qualità sul canale radio, controllo di potenza, ma anche di gestione della chiamata, controllo del carico di cella, e gestione delle procedure di handover. La struttura semplificata della rete di accesso LTE, riduce l'interazione tra gli strati della pila protocollare, diminuendo la latenza e la quantità di dati di segnalazione. Tuttavia, la mancanza di un elemento centrale di controllo aumenta la probabilità di errori e ne rende più problematica la gestione. Inoltre, proprio a causa dell'assenza del RNC, LTE non supporta meccanismi di handover efficienti come il soft/softer handover, caratteristici di UMTS. Quando il terminale si sposta da una cella da un'altra gestite da due diversi eNB, sono necessari meccanismi di protezione dei dati durante l'handover.

Per una maggiore flessibilità, uno stesso eNB può essere connesso a più MME/S-GW, che possono gestire più efficacemente il traffico degli UE serviti dall'eNB in esame.

## 2.3. Core Network

La Core Network si occupa del trasferimento dei dati e verso le reti a pacchetto esterne. I principali nodi logici che la costituiscono sono:

- **Home Subscriber Server (HSS):** le sue funzionalità sono essenzialmente quelle dell'HLR nelle reti UTRAN. Si tratta di un database di tutte le informazioni utili per gestire un utente mobile. In particolare la corrispondenza tra le identità temporanee assegnata all'UE e l'identità dell'utente stesso, il profilo di QoS sottoscritto, le reti PDN a cui si può connettere e l'identità della MME presso cui è registrato. L'HSS include anche l'Authentication Center (AuC) che si occupa di generare le chiavi per la cifratura dei dati e per la mutua autenticazione dell'utente e della rete.
- **Serving Gateway (S-GW):** si tratta del nodo di interfaccia con la rete di accesso E-UTRAN e con le altre reti 3GPP (i.e. UMTS/GPRS). Si occupa della gestione della mobilità di un terminale mobile che si sposta da un eNodeB ad un altro. Inoltre, memorizza i pacchetti di un UE nello stato idle e gestisce il download dei pacchetti durante le operazioni di paging necessarie per ristabilire una connessione tra UE e CN.
- **PDN Gateway (P-GW):** si occupa della allocazione degli indirizzi IP agli UE e della gestione dei flussi informativi, sulla base specifiche di QoS e sulle informazioni fornite dal PCRF. Inoltre, svolge le funzione di interfaccia con con le reti a pacchetto esterno (non 3GPP).
- **Mobility Management Entity (MME):** è il principale nodo di controllo della core network. Gestisce la segnalazione tra UE e CN e si occupa della procedure di instaurazione della connessione per un terminale che si connette per la prima volta alla rete. Inoltre tiene traccia delle posizione del terminale mobile, gestisce le operazioni di paging e si occupa dell'assegnazione delle identità temporanee ai singoli UE.
- **Policy Control and Charging Rules Function (PCRF):** il PCRF è il nodo responsabile del controllo delle QoS. Gestisce l'assegnazione dei flussi dati alle diverse classi e decide come il Policy Control Enforcement Function (PCEF) che risiede nel P-GW dovrà gestire i flussi dati rispettando gli accordi sottoscritti con gli utenti.

### 3. STRATO FISICO

Lo strato fisico è stato studiato per supportare:

- Larghezza di banda scalabile dai 1.25 MHz fino a 20 MHz,
- Data-rate con picchi variabili, in funzione della banda stessa: 1 fino a 100 Mb/s in donwlink e 75 Mb/s in uplnk a 20Mhz di banda
- Configurazioni multi antenna sia in ricezione che in trasmissione
- Elevato supporto alla mobilità (garantita fino ai 15 km/h, con alte prestazioni dai 15 ai 120 km/h, comunque funzionale fino ai 350 km/h)
- Elevati livelli di qualità del servizio
- Latenze ridotte (inferiori ai 100 ms per il passaggio dallo stato idle allo stato active, ed inferiori ai 5 ms per piccoli pacchetti IP)
- Elevata efficienza spettrale (numero di bit/s trasmessi per ogni Hz impiegato) 3 volte superiore alla più evoluta versione dell'UMTS, ovvero l'HSPA
- velocità di trasferimento dati in download fino a 100 Mbps
- velocità di trasferimento dati in upload fino a 50 Mbps
- supporto di almeno 200 utenti per cella con allocazioni di oltre 5 MHz di banda

Allo scopo di soddisfare queste requisiti, LTE fa uso di due nuovi schemi di accesso al mezzo, entrambi basati su una divisione della banda disponibile in un insieme di sottoportanti ortogonali: la *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)* per la tratta di downlink e la *Single Carrier - Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)* per quella di uplink. Prima di descrivere queste due tecniche di multiplazione è opportuno richiamare brevemente le strategie già utilizzate nelle precedenti reti di telecomunicazioni.

1. **Frequency Division Multiple Access (FDMA):** si tratta della delle strategia utilizzata nelle reti di prima generazione (i.e TACS). Ad ogni utente è associata una specifica porzione della banda disponibile e tutti gli utenti trasmettono contemporaneamente occupando sotto-bande diverse.
2. **Time Division Multiple Access (TDMA):** si tratta della strategia utilizzata nelle reti di seconda generazione (i.e GSM). L'allocazione delle risorse è nel dominio del tempo: ad ogni utente è associato un *time slot*, durante il quale può trasmettere i suoi dati. Tutti gli utenti condividono la stessa banda, trasmettendo in tempi diversi in modo da non interferire gli uni con altri.

3. **Code Division Multiple Access (CDMA):** si tratta della moltiplicazione introdotta nelle reti di terza generazione, come UMTS, e rappresenta una evoluzione rispetto alle soluzioni adottate nelle reti precedenti. Infatti, sia la FDMA che la TDMA suddividono le risorse disponibili allocandole in maniera statica ai singoli utenti, senza tener conto delle loro effettive esigenze o dello stato di traffico e congestione della rete. Al contrario nella CDMA tutti gli utenti possono trasmettere contemporaneamente, su tutta la banda disponibile. Ad ogni utente è associato un codice identificativo (*codici di spreading*) univoco e la separabilità dei singoli segnali in ricezione è garantita dall'uso di codici ortogonali.

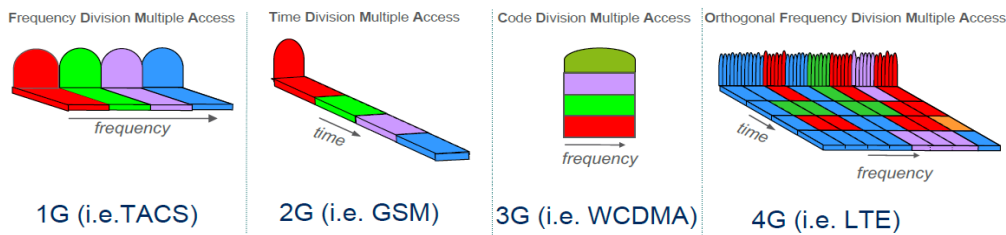


Figure.3 Le principali tecniche di moltiplicazione delle reti di telecomunicazioni.

### 3.1. Moltiplicazione OFDMA

La tecnica di accesso al mezzo implementata in LTE è la Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA) che rappresenta essenzialmente una evoluzione multi-utente della modulazione Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM).

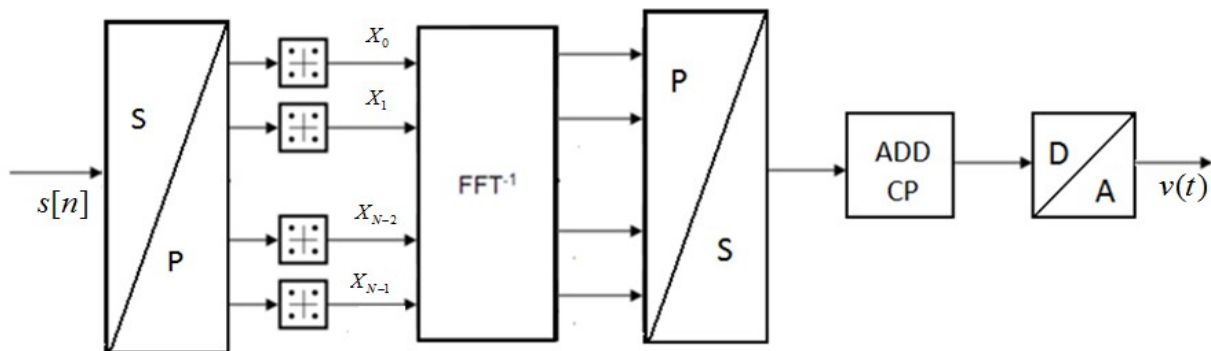


Figura 4. Modulazione OFMD.

Nello schema della modulazione OFDM (fig. 4), il flusso dati da trasmettere viene suddiviso in  $N$  sotto-flussi, ciascuno dei quali è dapprima modulato individualmente (tipicamente QPSK, 16QAM o 64QAM). I simboli modulati sono trasmessi in parallelo mediante un insieme di sotto-portanti ortogonali, attraverso un blocco di Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT) che può essere realizzato efficientemente mediante l'utilizzo di algoritmi veloci di Fast Fourier Transform (IFFT). L'ortogonalità delle sotto-portanti permette, non solo la separazione dei singoli flussi in ricezione, ma garantisce anche una maggior robustezza ai fenomeni di mutua interferenza tra i flussi stessi.

Successivamente i blocchi di dati sono nuovamente convertiti in un flusso seriale a cui viene aggiunto un prefisso ciclico (CP). Lo scopo del prefisso ciclico è quello di mitigare gli effetti della interferenza inter-simbolica.

Il segnale OFDM è espresso come:

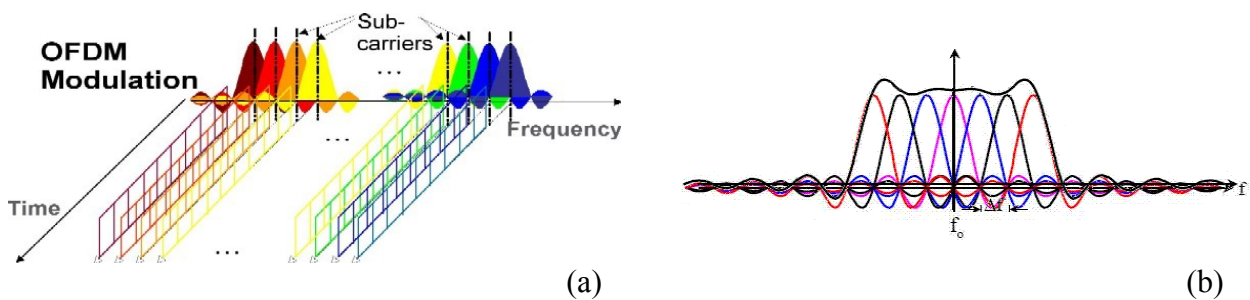
$$v(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi k f t / T} \quad 0 \leq t < T \quad (1)$$

dove gli  $\{X_k\}$  sono i simboli da trasmettere sulle  $N$  sotto-portanti,  $T$  è la lunghezza del simbolo OFDM. Le sotto-portanti sono spaziate di  $1/T$  ed è proprio questa proprietà che le rende ortogonali tra loro. Infatti, come noto dalla teoria dei segnali:

$$\frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi k_1 t / T} (e^{j2\pi k_2 t / T})^* dt = \frac{1}{T} \int_0^T e^{j2\pi (k_1 - k_2) t / T} dt = \delta_{k_1 k_2} \quad (2)$$

dove  $\delta_{k_1 k_2} = \begin{cases} 1, & k_1 = k_2 \\ 0 & k_1 \neq k_2 \end{cases} \quad (3)$

Distribuendo i dati in frequenza su  $N$  sotto-portanti si ottiene un “*allargamento*” (fig.5) dei dati in frequenza che rende il segnale più robusto al rumore sul canale e ai fenomeni di multipath che sono molto comuni in ambienti urbani e indoor



**Figura 5.** Suddivisione in sottoportanti (a) e spettro della modulazione OFDM (b)

Nella *multiplazione* OFDMA, ad ogni utente è associato, per un determinato intervallo di tempo, un sottoinsieme delle sotto-portanti in cui viene suddivisa la banda disponibile. Lo schema di riferimento è ancora quello della modulazione OFDM in cui però le sotto-portanti non sono più assegnate a blocchi di dati distinti dello stesso utente, ma ad utenti diversi. Tale assegnazione non è statica ma varia dinamicamente nel tempo, a seconda delle esigenze degli utenti e dello stato della rete.

Uno degli svantaggi principali nell’uso di questa modulazione è l’elevato *peak-to-average ratio* (PAR), definito come il rapporto tra il fattore il picco e il valore root-mean-square. Un segnale con un PAR elevato, per essere ricevuto correttamente, richiede l’uso amplificatori di potenza con elevata linearità, che aumentano i costi dei ricevitori.



Proprio per questo motivo la strategia di moltiplicazione adottata in uplink è una versione modificata dalla OFDMA che verrà descritta nel paragrafo successivo.

### 3.2. Moltiplicazione SC-FDMA

La SC-FDMA è la strategia di accesso al mezzo utilizzata nella tratta di uplink ed è molto simile alla OFDMA. La banda disponibile è suddivisa in una serie di sotto-portanti ortogonali tra loro, che non sono più trasmesse in parallelo, come nella OFDMA, ma sequenzialmente (fig.5). Lo schema di riferimento per la moltiplicazione SC-FDMA è illustrato nella figura 6 dove sono evidenziate anche le differenze rispetto alla moltiplicazione OFDMA. Questo tipo di soluzione consente di ridurre considerevolmente le fluttuazioni del segnale involuppo trasmesso, determinando un valore del PAR più basso rispetto a quello riscontrato nei segnali OFDMA. Tuttavia, il segnale SC-FDMA alla stazione radio-base è spesso affetto da interferenza intersimbolica e per far fronte a questo problema occorre impiegare sistemi di equalizzazione adattativi nel dominio della frequenza.

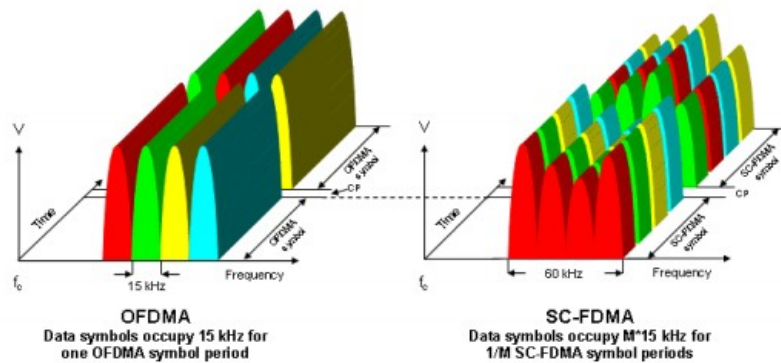


Figura 6. Confronto tra OFDMA e SC-FDMA

Mentre in OFDMA ogni sotto-portante è modulata indipendentemente dalle altre, nella modulazione SC-FDMA, il segnale trasmesso sulle singole sotto-portanti è una combinazione di tutti i simboli trasmessi allo stesso istante.

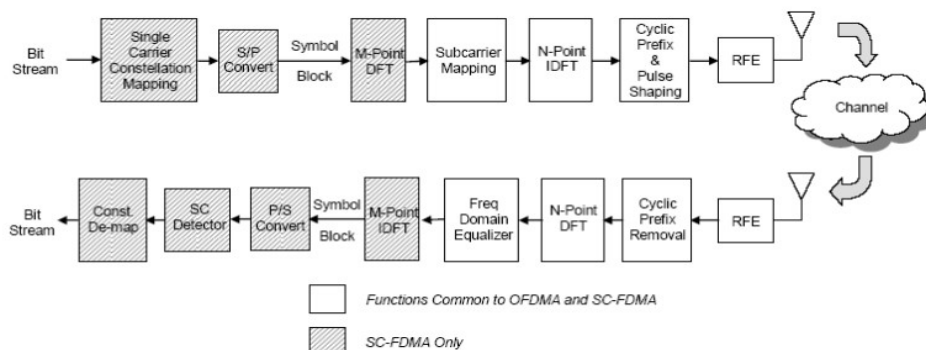
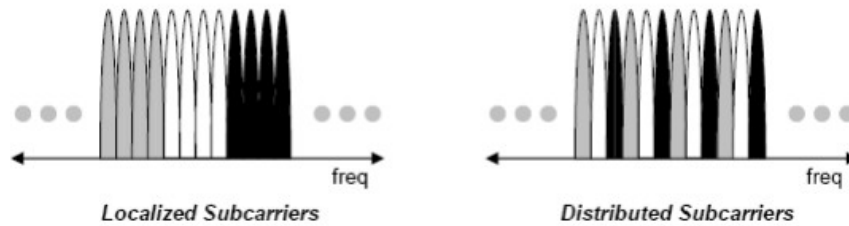


Figura 7. Schema della moltiplicazione SC-FDMA

Il flusso di ingresso (relativo ad un singolo utente) è suddiviso in blocchi di lunghezza  $M$ , ciascuno dei quali è modulato singolarmente con modulazione QPSK, 16QAM o 64QAM. I dati sono dapprima mappati nel dominio della frequenza, attraverso una  $FFT$  su  $M$  punti e successivamente

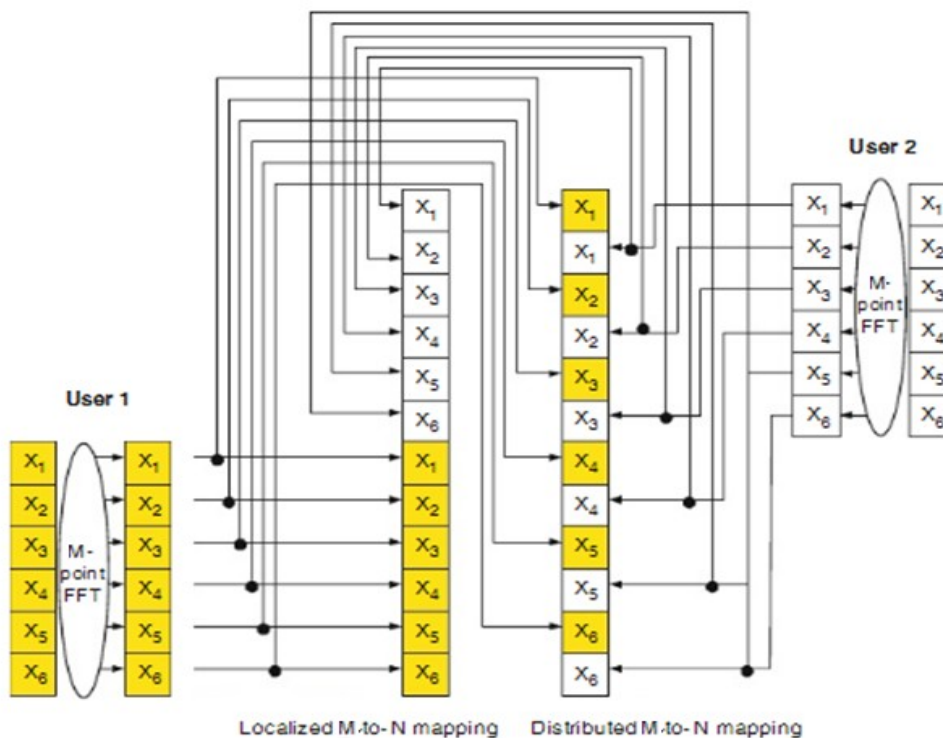
riportati nel dominio del tempo, per la trasmissione sul canale, attraverso una *IFFT* calcolata su  $N > M$  punti. Il risultato complessivo di questa operazione è quello distribuire il contenuto informativo su una banda di frequenze più ampia (operazione simile allo *spreading* nella moltiplicazione CDMA).

L'assegnazione delle sotto-portanti ai singoli utenti è gestita dal blocco di *sub-carrier mapping*. Vi sono due possibili strategie per l'allocazione delle sotto-portanti in SC-FDMA (fig.7): il SC-FDMA localizzato (LFDMA) ed il SC-FDMA distribuito (IFDMA).



**Figura 8.** Mapping delle sotto-portanti in SC-FDMA

In entrambi i casi al blocco di dati dopo la FFT vengono aggiunti  $N-M$  zeri (zero-padding) che sono lasciati liberi per le trasmissioni degli altri utenti. La figura sottostante (fig.8) illustra il caso di due soli utenti. Il flusso dati in ingresso è suddiviso in blocchi di dimensione  $M=6$  (FFT calcolata su  $M=6$  punti) e i dati sono mappati su  $N=12$  (IFFT calcolata su  $N=12$ ) sotto-portanti. Il mapping in frequenza è realizzato aggiungendo  $N-M=6$  zeri che quelli sono relativi alle sotto-portanti occupate dall'altro utente.



**Figura 9.** Esempio di allocazione di sub-carring mapping.  $Q=2$  utenti  $M=6$ ,  $N=12$

La figura sottostante mostra l'allocazione delle sotto-portanti per il primo utente nelle due modalità.



Figura 10. Esempio di allocazione di sub-carring LFDMA (a) e IFDMA (b)

Nell'approccio *LFDMA* ad ogni utente è assegnato un insieme di  $M$  sotto-portanti adiacenti (fig 11) e il mapping è realizzato aggiungendo  $(N-M)/2$  prima e dopo il gruppo di sotto-portanti assegnato. L'effetto complessivo è quello di trasmettere su una banda ampia ma localizzata

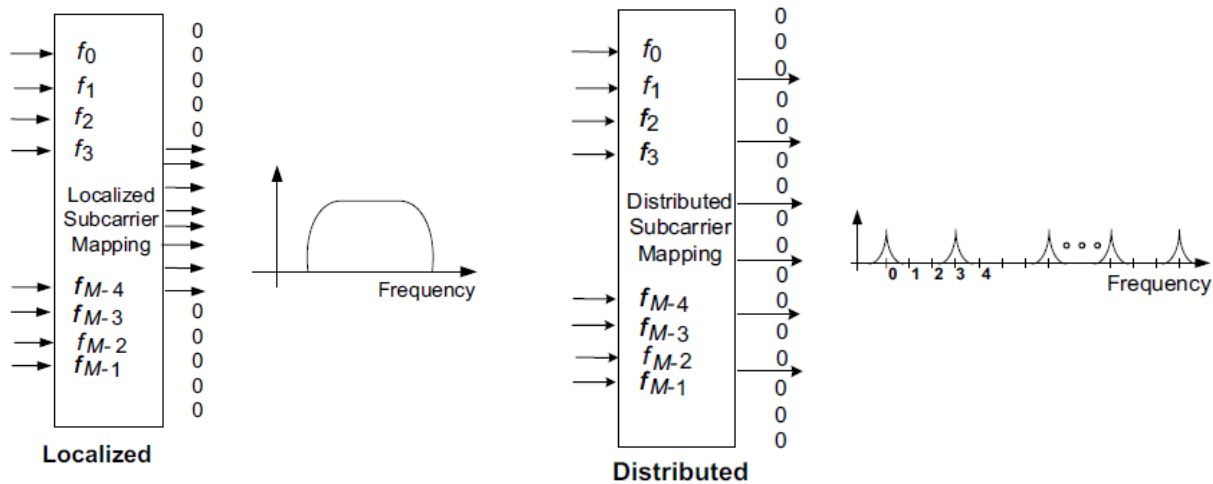


Figura 11. SC-FDMA localizzato (a) SC-FDMA Distribuito. (b)

L'approccio alternativo è il SC-FDMA distribuito di cui, una possibile realizzazione, è quella denominata Interleaved FDMA (*IFDMA*). In questo caso le  $M$  sotto-portanti assegnate a ciascun utente sono poste distanza prefissata le une dalle altre e sono intervallate con quelle assegnate ad altri utenti. La separazione tra le sotto-portanti degli utenti è realizzata aggiungendo tanti zeri quanti sono gli utenti che trasmettono contemporaneamente. La IFDMA è più immune agli errori di trasmissione, poiché l'informazione da trasmettere viene effettivamente distribuita su tutta la banda disponibile (fig.11 b)

La SC-FDMA, in particolare nella sua versione IFDMA, è molto simile alla operazione di spreading CMDA infatti il risultato finale è quello di distribuire ("spreading") la sequenza originale su una banda più ampia. Il fattore di espansione è definito dal numero di utenti che possono trasmettere contemporaneamente  $Q=N/M$ . Il vantaggio principale nell'uso della SC-FDMA è rappresentato dalla possibilità di ricorrere ad operazioni di FFT/IFFT, che sono algoritmi veloci, di facile implementazione e dai costi contenuti.

Da quanto detto fin ora, si evince come in LTE le risorse disponibili, sia in uplink che in downlink, sono gestite secondo una struttura a griglia tempo-frequenza ben determinata (fig.11). In particolare, nel dominio del tempo, i dati sono organizzati in trame, della durata di 10ms. Ciascuna trama consiste in 10 sotto-trame (1ms) ciascuna delle quali contiene due time slot (0.5ms). Ogni slot comprende un numero di simboli OFDM che dipende dalla lunghezza del prefisso ciclico 7 simboli nel caso di prefisso ciclico normale e 6 nel caso di prefisso ciclico esteso. Ogni slot è costruito da 12 sotto-portanti spaziate di 15Hz che nel loro insieme sono indicate come Resource Block (RB).

La più piccola unità nel dominio della frequenza è il Resource Element (RE) che consiste in una sotto-portante per la durata di un simbolo OFDM. Un RB è quindi costituito da 84 RE (prefisso ciclico normale) o 72 RE (prefisso ciclico esteso)

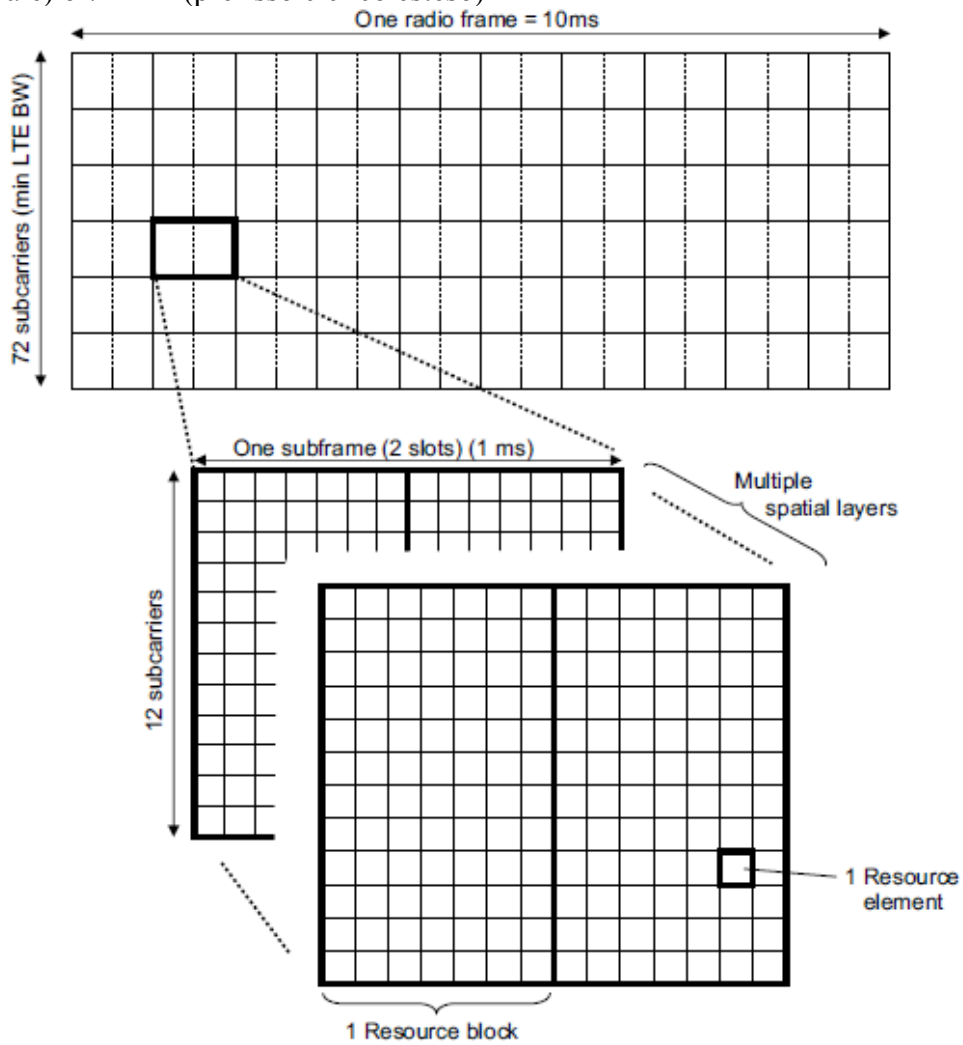


Figura 12. Assegnazione delle risorse disponibili in tempo e in frequenze.

## 4. QUALITY OF SERVICE E BEARERS

LTE Fornisce agli utenti connessioni con diverse qualità di servizio (QoS, Quality of Service). A ciascun flusso informativo è associata una specifica classe di QoS e il flusso IP con la sua specifica classe costituisce un *bearer*. I bearers possono essere classificati in due categorie principali, sulla base del livello di QoS che forniscono:

- **Minimum guaranteed bit rate (GBR):** questi bearers hanno risorse dedicate durante tutta la durata della trasmissione. Sono quindi dedicati a flussi informativi ad elevata priorità come quelli voce (VoIP). Garantiscono alti data rate, ritardi contenuti e tassi d'errore contenuti. Per default GBR garantisce un bit rate minimo, ma in alcuni casi è possibile stabilire anche un bit rate massimo Maximum Bit Rate (MBR).
- **Non-GBR:** questi bearers possono essere utilizzati per applicazioni che non richiedono bit-rate particolarmente elevati, come ad esempio web browsing o trasferimenti FTP. Non ci sono risorse allocate per questi bearers.

QCI	RESOURCE TYPE	PRIORITY	PACKET DELAY BUDGET (MS)	PACKET ERROR LOSS RATE	EXAMPLE SERVICES
1	GBR	2	100	10 <sup>-2</sup>	Conversational voice
2	GBR	4	150	10 <sup>-3</sup>	Conversational video (live streaming)
3	GBR	5	300	10 <sup>-6</sup>	Non-conversational video (buffered streaming)
4	GBR	3	50	10 <sup>-3</sup>	Real-time gaming
5	Non-GBR	1	100	10 <sup>-6</sup>	IMS signaling
6	Non-GBR	7	100	10 <sup>-3</sup>	Voice, video (live streaming), interactive gaming
7	Non-GBR	6	300	10 <sup>-6</sup>	Video (buffered streaming)
8	Non-GBR	8	300	10 <sup>-6</sup>	TCP-based (for example, WWW, e-mail, chat, FTP, p2p file sharing, progressive video and others)
9	Non-GBR	9	300	10 <sup>-6</sup>	

**Tabella 1.** Le nove classi di QCI

Ogni bearer è descritto due parametri: *QoS Class Identifier* (QCI) e *Allocation and Retention Priority* (ARP). Ogni QCI è caratterizzato da: un livello di priorità, un ritardo e un massimo tasso di perdita di pacchetti accettabile. Vi sono nove possibili QCI standardizzati in LTE (tabella 1) che permettono di rendere uniforme la gestione del traffico tra i vari operatori. Il parametro ARP è utilizzato per la gestione della procedure di accesso nel caso di congestioni della cella e influisce sulla priorità con cui vengono instaurate le connessioni dei vari utenti. Tuttavia una volta che la connessione è stata instaurata, questo parametro non ha alcuna influenza su come la rete gestisce il flusso informativo ad esso associato.

## 5. MOBILITÀ E HANDOVER

Un terminale mobile all'interno della rete LTE può trovarsi in tre stati: *detached*, *idle*, *active*. (fig.13).

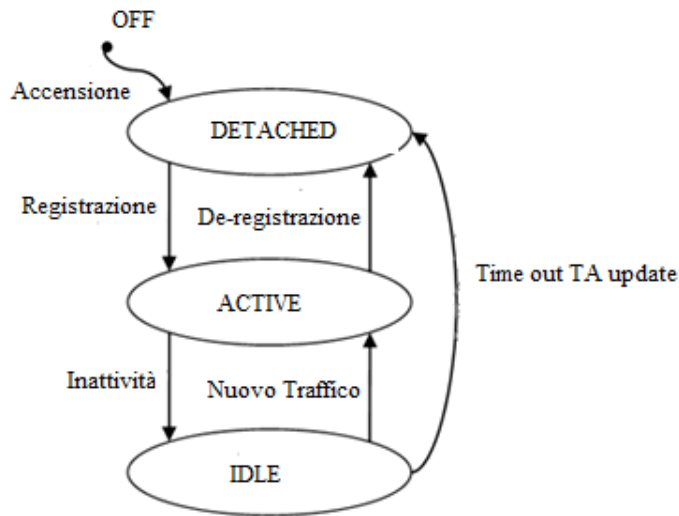


Figura 13. Stati possibili di un terminale mobile LTE.

Quando l'UE viene acceso, dopo essere stato spento, si trova nello stato *detached*: è attivo ma non è ancora non ancora connesso alla rete. In questa fase si instaurano tutte le operazioni necessarie alla registrazione presso un eNB, al termine delle quali l'UE passa nello stato *active*. Infine, se l'UE non trasmette e non riceve dati per un determinato istante di tempo, si porta automaticamente nello stato *idle*. La posizione di un terminale nello stato idle è nota alla rete con la granularità di una Tracking Area (TA). Una TA è un insieme di celle (e di eNB) gestite dallo stesso MME/S-GW. Tramite operazioni di paging su tutte le celle nella TA, è possibile avvisare l'UE di una eventuale chiamata in arrivo. In tal caso l'UE si porta automaticamente nello stato active, la sua posizione è nota con la granularità di una cella ed si verificano handovers.

In LTE ci sono due tipi di handovers: (Intra-pool) X2-Handover e (Inter-pool) S1-Handover. A causa della mancanza del nodo RNC, l'unico handover possibile è quello di tipo "hard" in cui si verifica una breve interruzione della connessione attiva (*detech time*). Per questo motivo, sono stati introdotti dei meccanismi di buffer e forwarding dei dati che limitano le perdite di dati utente durante il periodo di interruzione della connessione.

### 5.1. Intra-Poll Handover

Intra-pool (o X2) Handover si riferisce al caso in cui un terminale si sposta da un eNB ad un altro, gestiti sempre dallo stesso MMG, ovvero all'interno della stessa TA (anche detta *pool area*). L'handover avviene attraverso l'interfaccia X2 tra il *serving eNB*, presso cui è attualmente registrato il terminale mobile, e il *target eNB* di destinazione. Questi due eNB sono gli unici nodi di rete coinvolti nel processo e l'MME è informato della nuova posizione dell'UE solo al termine della procedura. La comunicazione diretta tra i due eNB rende l'handover rapido e veloce riducendo

contestualmente l'impiego di risorse. I passi principali sono mostrati nella fig.14. Il terminale mobile esegue una serie di misure sul canale radio e invia un *measurement report* al source eNB, il quale, sulla base delle misure stesse, decide se iniziare o meno un handover. In caso affermativo invia un messaggio di HO REQUEST ad un target eNB in cui trasmette tutte le informazioni necessarie al passaggio di consegna. Il target eNB risponde con un messaggio di HO REQUEST ACK in cui fornisce tutte le informazioni necessarie al UE per l'instaurazione della nuova connessione radio. Il source eNB inoltra questo messaggio al terminale mobile tramite un HO COMMAND. Questo conclude la fase di preparazione ed inizia l'handover vero e proprio. In questa fase il terminale mobile non ha alcuna connessione attiva: non è più connesso al source eNB, ma non si è ancora registrato presso il target eNB. L'UE informa il target eNB, con un HANDOVER CONFIRM, che l'handover è stato concluso con successo. Da questo momento in poi il target eNB inoltra all'UE i messaggi che aveva precedentemente ricevuto dalla source eNB, durante la fase di detach. La gestione dei dati utente in questa fase dipende dalla strategia di protezione dei dati selezionata (*seamless* o *lossless handover*). Parallelamente il source eNB invia un messaggio di PATCH SWITCH REQUEST al MME/S-GW, in seguito al quale il quest'ultimo aggiorna la nuova posizione del terminale mobile, ed esegue il patch switch. Da questo momento in poi i pacchetti in arrivo verranno inviati direttamente al target eNB. L'MME/S-GW conferma il path switching con un messaggio di PATH SWITCH ACK, alla ricezione del quale il target eNB invia il messaggio di RELEASE RESOURCE al source eNB che può rilasciare la connessione attiva ed eliminare le unità informative relative che all'UE che restano memorizzate fino alla fine dell'handover in caso di eventuali fallimenti (fig. 14).

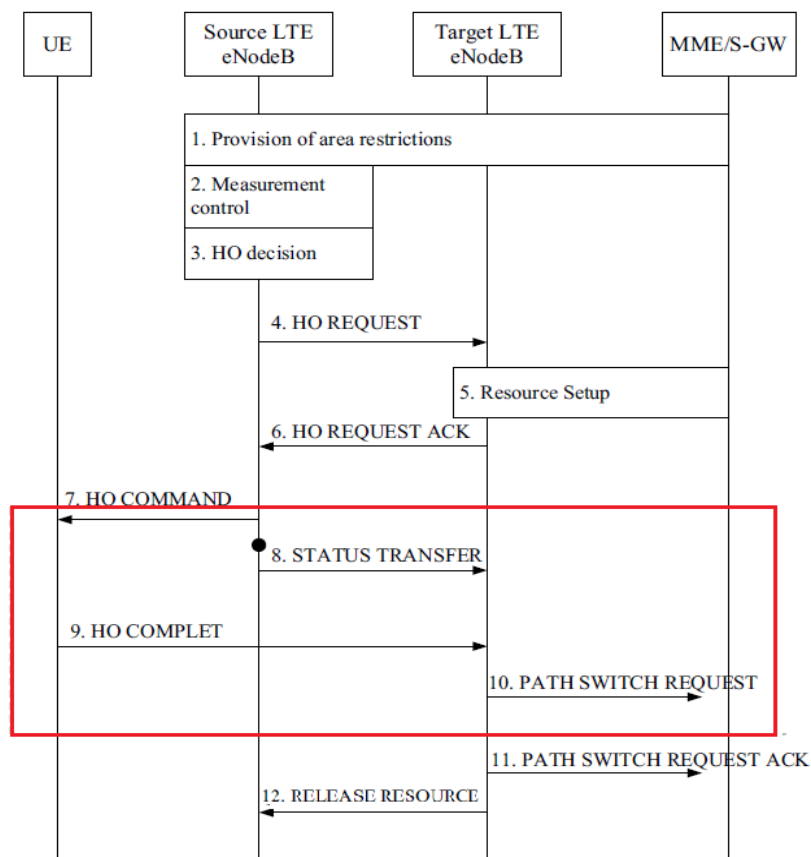


Figura 14. X2-handover

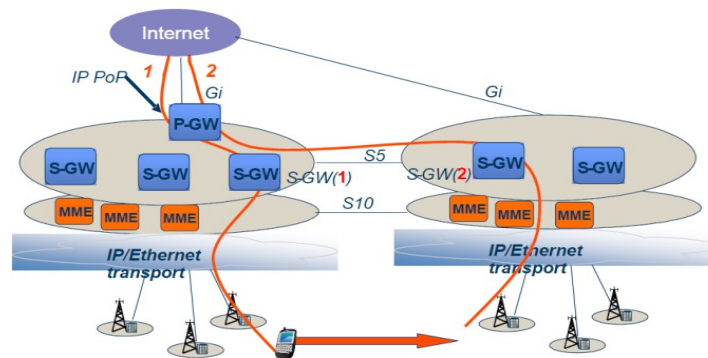
La QoS che sperimentata l'utente durante l'handover dipende dal tempo di detach, dalla quantità di pacchetti persi e dal ritardo con cui vengono ricevuti i pacchetti inoltrati dal source al target eNB. Con riferimento al QoS sono possibili due tipi di handover *seamless* o *lossles*, che vengono selezionati dalla rete nella fase di preparazione dell'handover.

- Il *seamless handover* è quello selezionato dalla rete per gestire servizi la cui classe di QoS è particolarmente sensibile ai ritardi. Nel messaggio di HANDOVER REQUEST, il source eNB richiede al target eNB di stabilire un tunnel per l'inoltro dei pacchetti in downlink e in uplink relativi al UE stesso. Il target eNodeB nel messaggio di Handover REQUEST ACK, specifica la porta di destinazione del tunnel, ovvero la porta presso cui il source eNB dovrà inoltrare i dati. Il target eNB inoltra al UE, prima i dati ricevuti nel tunnel, e solo successivamente, le nuove unità informative ricevute dalla rete. I pacchetti che il source eNodeB ha inviato al UE e che non sono stati ricevuti correttamente andranno definitivamente persi.
- Il *lossless handover* è la soluzione scelta dalla rete per gestire i servizi non real-time, in cui non tanto fondamentale contenere i ritardi di trasmissione, quanto piuttosto garantire un basso tasso di errori e ridurre quanto possibile le perdite di pacchetti. All'instaurazione del tunnel, i pacchetti che il source eNodeB ha inviato all'UE ma per i quali non ha ancora ricevuto l'ACK di corretta ricezione, sono comunque inoltrati anche verso il target eNB, per una eventuale ritrasmissione. Un numero di sequenza permette di riordinare i pacchetti ricevuti, individuare quali sono i pacchetti persi, e scartare quelli eventualmente ricevuti due volte: potrebbe accadere infatti che l'ACK di corretta ricezione, arrivi dopo la ritrasmissione del pacchetto interessato, generando due repliche dello stesso pacchetto al target eNodeB. Il lossless handover permette di ottimizzare la (ri)trasmissione delle unità informative: l'UE comunica al target eNB quali pacchetti sono stati ricevuti correttamente in modo da evitare inutili ritrasmissioni (*downlink selective transmission*). Similmente il target eNB può richiedere al source eNB l'invio, attraverso un tunnel GTP dedicato, solo dei pacchetti di uplink ricevuti fuori sequenza (*uplink selective transmission*).

## 5.2. S-2 Handover

L'handover tramite l'interfaccia S1 è quello si verifica quando il terminale si sposta da una pool area o TA ad un'altra (fig.15). La procedura è molto simile a quella dell'hard handover inter RNC di UMTS, la differenza principale è nelle messaggio STATUS TRANSFER che permette di rendere il tipo di handover (S1 o X1) trasparente al UE, e nella presenza di una serie di messaggi aggiuntivi per il passaggio di consegna tra i due MME.





**Figura 15** S2-handover

L'Handover in LTE è di tipo “hard” nel senso che si verifica una breve interruzione del connessione durante il passaggio da un eNB ad un altro. Tuttavia i meccanismi di inoltro dei dati che sono stati descritti riducono le perdite e mascherano l'effetto della brusca interruzione di servizio sperimentata dal terminale mobile. La scelta dell'hard handover, motivata principalmente dall'assenza di nodo di controllo permette di velocizzare questa operazione limitando contestualmente il traffico di segnalazione. Tale politica si inserisce nella logica con cui è stata sviluppata LTE, ovvero quella di una rete semplificata e dai costi contenuti.

### 5.3. Multiple Preparation

La Multiple Preparation è una procedura introdotta per velocizzare l'esecuzione di handover su un altro eNB in caso di fallimento sul primo target eNB. Questa operazione permette al source eNB di iniziare le procedura di handover con una molteplicità di possibili target eNodeB. In questo modo, nel caso la connessione con il target eNB prescelto fallisca, la connessione con un altro eNB sarà più rapida. Quando l'handover è concluso il messaggio di RELEASE RESOURCE viene inviato a tutti i nodi coinvolti nella multiple preparation.