



Università degli Studi di Padova

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Tesi di Laurea

LTE: Caratteristiche della Rete di Accesso

Laureando

Davide Sartori

474290-TC

Relatore

Prof. Roberto Corvaja

Anno Accademico 2011/2012

ai miei genitori

Ringraziamenti

A conclusione di questo breve lavoro di tesi, è doveroso porre i miei più sentiti ringraziamenti alle persone che ho avuto modo di conoscere e che mi hanno aiutato a crescere dal punto di vista intellettuale ma soprattutto dal punto di vista umano. È difficile in poche righe ricordare tutte le persone che, a vario titolo, hanno contribuito a rendere migliore e meno faticoso questo lungo periodo.

Un ringraziamento va innanzitutto a mia madre e mio padre, che, con il loro incrollabile sostegno morale ed economico, mi hanno permesso di raggiungere questo importante traguardo. Un grazie sincero a mio fratello Simone per la pazienza e i costanti buoni consigli. Un grazie di cuore a tutto il *Clan Sartori* per l'affetto dimostratomi in tutti questi anni. Un particolare ringraziamento va poi agli amici di sempre per il sostegno e l'affetto mai mancato, alla Co.Ca. e in generale a tutti gli scout insieme ai quali ho trascorso innumerevoli avventure, ai *Deckers* molto più di un semplice gruppo, ai miei compagni di studio e a tutti coloro che involontariamente, non sono stati menzionati. Desidero infine ringraziare il prof. Roberto Corvaja, relatore di questa tesi, per la grande disponibilità e cortesia dimostratemi, e per tutto l'aiuto fornito durante la stesura.

Sommario

Le moderne tecnologie di comunicazione mobili sono in continua evoluzione. La richiesta da parte di un mercato sempre più esigente richiede una maggior efficienza e capacità di fornire ad utenti e operatori svariati servizi a banda larga. Viene così naturale vedere in *Long Term Evolution* (LTE) il futuro delle tecniche di trasmissione, grazie alle sue elevate prestazioni ed una convergenza verso una rete *packet-oriented, all-IP*. Lo scopo della tesi è quello di analizzare LTE partendo da alcune considerazioni generali di sistema. Inizialmente verranno esposte le architettura di rete dei sistemi UMTS *Release 6* ed LTE *Release 8* soffermandosi maggiormente sulle principali differenze nella rete di accesso. Successivamente si descrivono le varie caratteristiche che compongono lo strato fisico e le diverse tecniche utilizzate. Infine si vuole lasciare al lettore una panoramica sulle migliorie introdotte da LTE nelle prestazioni.

Indice

Sommario	v
Indice	vi
1 Introduzione	1
2 Architettura	5
2.1 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) - Release 7	5
2.1.1 Architettura	5
2.1.2 UTRAN	6
2.2 Long Term Evolution (LTE) - Release 8	9
2.2.1 Architettura	9
2.2.2 E-UTRAN	10
2.3 Tecniche di Modulazione	11
2.3.1 UMTS - Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)	11
2.3.2 LTE - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)	12
3 Strato Fisico	15
3.1 Tecniche di Modulazione	15
3.2 Downlink	16
3.2.1 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)	17
3.2.2 Struttura del frame	17
3.2.3 Struttura dello slot	18
3.3 Uplink	20
3.3.1 Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA).	21

3.3.2	Struttura dello slot	23
3.4	Multiple Input Multiple Output (MIMO) e Maximal Ratio Combining (MRC)	25
4	Prestazioni	31
4.1	Bit rate	31
4.2	Categorie di Terminali	34
4.3	Latenza	35
4.4	Efficienza Spettrale	37
5	Conclusioni	41
	Bibliografia	43

Capitolo 1

Introduzione

Il progetto *Long Term Evolution* (LTE) della tecnologia mobile promosso da *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) è nato nel Novembre del 2004 e si è concentrato sul rafforzamento della *Universal Terrestrial Radio Access* (UTRA) e sull'ottimizzazione dell'architettura dell'accesso radio di *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS).

L'LTE è basato su *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) a differenza della tecnologia attuale che si basa su *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA) un passaggio per certi versi simile a quello fatto da *Global System for Mobile Communications* (GSM) ad appunto l'UMTS. In quest'ultimo caso, si trattava di cambiare completamente la base della tecnologia passando da *Time Division Multiple Access* (TDMA), divenuta ormai primitiva, a WCDMA. Negli anni a seguire sono stati effettuati vari aggiornamenti come *High-Speed Downlink Packet Access* (HSDPA), *High-Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) con un notevole aumento della banda di *downlink* e *uplink* disponibile, da cui si è poi passati a *High-Speed Packet Access Plus* (HSPA+) con prestazioni elevate ma non ancora sufficienti. Successivamente si arriva al nuovo sistema LTE, rispettando così le specifiche dettate dall'*International Telecommunication Union* (ITU) per i sistemi ITU-*Advanced*, che entrerà a pieno titolo tra i sistemi 4G solo nella sua versione *Advanced*. Possiamo vedere le varie evoluzioni nel tempo degli standard definiti da 3GPP dalla seguente Figura 1.1.

Detto questo, la tecnologia con le migliori caratteristiche atta a portare gli operatori

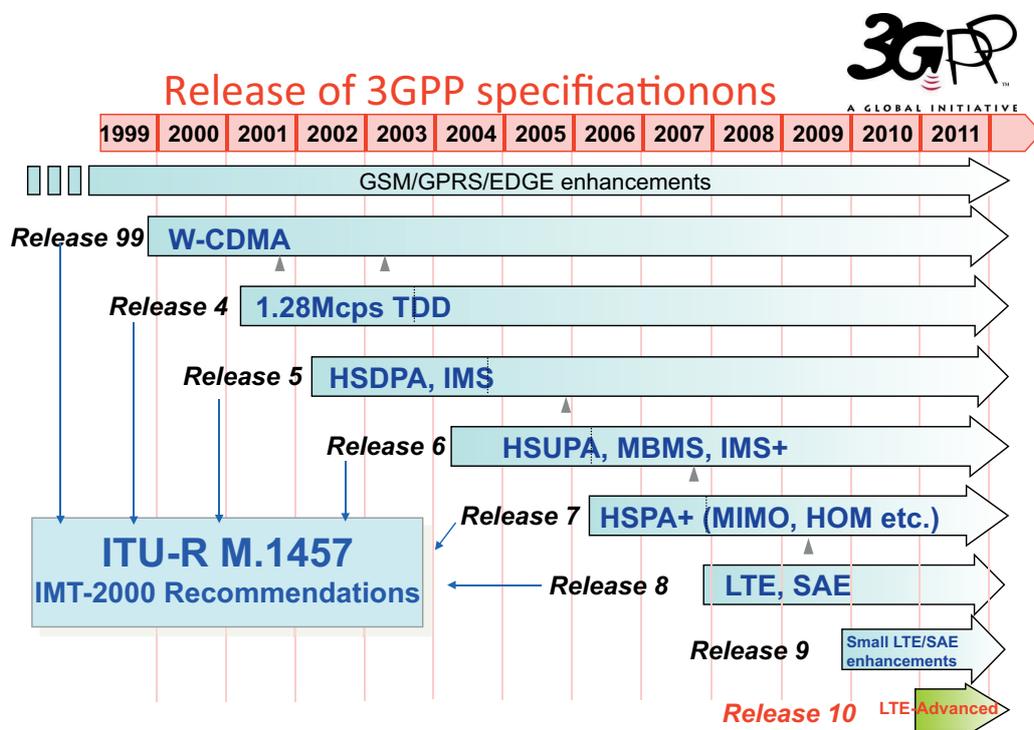


Figura 1.1: Evoluzione delle *Release* nel tempo.

mobili alla quarta generazione sembra essere quella definita come *Long Term Evolution* (LTE), o anche super 3G.

Gli obiettivi di performance per LTE sono stati definiti dall'organizzazione di normattizzazione 3GPP nel corso degli anni 2005/2006. I principali dati tecnici della nuova interfaccia radio sono i seguenti:

- aumento significativo del *bitrate* in *downlink* fino a 100 Mbit/s per una larghezza di banda di 20 MHz e aumento dell'efficienza spettrale fino a 5 bit/s/Hz con due antenne a livello di telefono cellulare (efficienza spettrale da 3 a 4 volte maggiore rispetto all'UMTS *Release* 6 con un'antenna trasmittente e due antenne riceventi);
- aumento significativo del *bitrate* in *uplink* fino a 50 Mbit/s per una larghezza di banda di 20 MHz e aumento dell'efficienza spettrale fino a 2,5 bit/s/Hz (efficienza spettrale da 2 a 3 volte maggiore rispetto all'UMTS *Release* 6 con un'antenna trasmittente e due antenne riceventi);
- larghezza di banda del canale di 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz;

- tempo di latenza inferiore a 5 ms lungo il percorso tra terminale mobile e rete fissa attraverso l'interfaccia radio;
- il *round trip time* deve essere inferiore ai 10 ms;
- utilizzo delle modalità *duplex*: *Frequency-Division Duplexing* (FDD) e *Time-Division Duplexing* (TDD);
- perfetta integrazione con i sistemi precedenti;
- velocità di trasferimento dati migliorata nei bordi delle celle;
- mobilità fino a 500 km/h (ottimizzata per 0 - 15 km/h);
- rispetto di diverse esigenze relative alla qualità di servizio (*QoS*) e in materia di mobilità;
- integrazione di antenne intelligenti *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO);
- architettura semplice, meno elementi di rete e interfacce aperte;
- consumo di energia possibilmente basso degli apparecchi terminali (grande autonomia).

Il confronto fra gli obiettivi di UMTS e LTE è mostrato in Tabella 1.1.

Requisiti	UMTS <i>Release 6</i>	LTE <i>Release 8</i>
Picco di trasferimento dati	14 Mbps DL / 5.76 Mbps UL	100 Mbps DL / 50 Mbps UL
Efficienza Spettrale (bps/Hz/cell)	0.6-0.8 DL / 0.35 UL	3-4x DL / 2-3x UL volte
5% capacità della trasmissione a pacchetto	64 kbps DL / 5 kbps UL	3-4x DL / 2-3x UL volte
<i>Throughput</i> medio utente	900 kbps DL / 150 kbps UL	3-4x DL / 2-3x UL volte
Latenza	50 ms	5 ms
Tempo di instaurazione chiamata	2 s	50 ms
Trasferimento dati in <i>broadcast</i>	384 kbps	6-8x volte
Mobilità	fino a 250 km/h	fino a 350 km/h
Supporto multi antenna	No	Sì
Larghezza di banda	5 MHz	scalabile fino a 20 MHz
<i>round trip time</i>	200 ms	inferiore a 10 ms

Tabella 1.1: Confronto tra UMTS e LTE.

Capitolo 2

Architettura

2.1 Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) - Release 7

2.1.1 Architettura

UMTS consiste in una serie di sistemi ognuno con la sua funzionalità. Negli standard gli elementi della rete sono definiti a livello logico, però questo si traduce spesso in una implementazione quasi fisica. Ciò si deve in particolar modo al fatto che ci sono parecchie interfacce aperte, dove per aperte si intende che questa è definita con un livello di dettaglio tale da permettere la compatibilità tra dispositivi realizzati da aziende diverse.

La rete UMTS può essere schematizzabile in tre sottosistemi principali:

- UE (*User Equipment*): è il terminale mobile di cui si serve l'utente per usufruire di tutti i servizi di telecomunicazioni offerti dalla rete. L'UE è costituito da un ME (*Mobile Equipment*) e da una o più USIM (*Universal Subscriber Identity Module*): è la parte che contiene funzioni e dati necessari ad identificare ed autenticare l'utente. In particolare, contiene l'IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*) che serve ad riconoscere in maniera univoca l'utente, sebbene quest'ultimo può non conoscerne il valore. L'USIM è implementata insieme ad altre applicazioni in un circuito integrato posto su una carta removibile detta UICC (*UMTS Integrated Circuit Card*). Sono previsti diversi tipi di UE, in base alla modalità operativa supportata così come in

General Packet Radio Service (GPRS), è infatti prevista la possibilità di utilizzare solo i servizi a commutazione di circuito, solo quelli a commutazione di pacchetto o entrambi. Un UE comunica con l' *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) tramite l'interfaccia radio *Uu*, cioè l'interfaccia radio WCDMA attraverso la quale può accedere alla parte fissa del sistema.

- UTRAN: è l'entità dedicata al controllo dell'accesso alla rete tramite la gestione delle risorse radio disponibili. E' connessa alla CN (*Core Network*) tramite interfaccia *Iu*, divisa in *Iu-PS* (per interfacciare l'UTRAN con reti CN a commutazione di pacchetto) e *Iu-CS* (per reti CN a commutazione di circuito).

- CN (*Core Network*): è l'entità che si occupa di fornire agli utenti i vari servizi richiesti: può essere connessa con reti di tipo diverso che supportano svariati protocolli di comunicazione. Sarà compito dei diversi operatori di rete definire e negoziare le interconnessioni con quelle esterne (*Packet Data Network* - PDN o altro). L'UMTS GPRS *Support Node* (GSN) è costituito dal *Serving GSN* (SGSN) e dal *Gateway GSN* (GGSN). Essi rappresentano l'interfaccia tra la parte radio di accesso e la rete a pacchetto; in particolar modo GSN effettua tutte le operazioni necessarie per gestire le trasmissioni a pacchetto da e verso un generico utente.

- Il SGSN, nel dominio a pacchetto, ha le stesse funzioni dell'MSC/VLR del dominio a circuito; coordina le attività di instaurazione, mantenimento/modifica, abbattimento dei canali virtuali, gestisce il traffico degli utenti, la loro mobilità ed esegue funzionalità relative alla sicurezza.

- Il GGSN è quel nodo che si interfaccia con le reti a pacchetto esterne (Internet, Intranet Aziendali, etc...) se si desidera fare un trasferimento dati richiede all'SGSN l'instaurazione di un canale virtuale e provvederà poi a creare l'UE alla rete desiderata.

2.1.2 UTRAN

L'UTRAN, come si può notare nella Figura 2.1, è costituita da un sottosistema di rete radio, RNS (*Radio Network Subsystem*), a sua volta, composto da un controllore di rete RNC (*Radio Network Controller*) e da un gruppo di stazioni radio base ricetrasmittenti, che in ambito UMTS, prendono il nome di *NodeB*. Ciascun *NodeB* gestisce una serie di celle, mediamente da 3 a 6, supportando trasmissioni in modalità FDD, TDD o

entrambe.

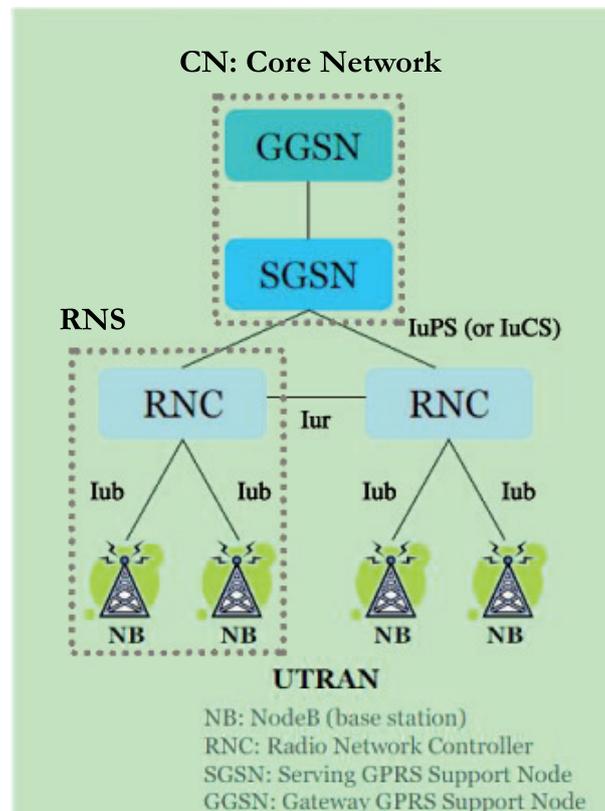


Figura 2.1: Architettura di rete (UMTS): UTRAN e CN.

Il collegamento con i terminali mobili viene realizzato tramite la interfaccia in aria (*air interface*), detta Uu , la quale ha il compito di trasportare, oltre ai servizi d'utente, anche tutte le informazioni che servono per la gestione della mobilità, delle risorse radio, e dei controlli di rete. L'RNS si collega alla CN mediante l'interfaccia Iu , e poiché le reti UMTS possono supportare servizi a commutazione di circuito e di pacchetto contemporaneamente, ciascuna interfaccia Iu viene specializzata per il tipo di servizio che trasporta e verrà indicata nel seguito come Iu -CS nel caso di commutazione di circuito e Iu -PS nell'altro caso. All'interno dell'UTRAN si ritrovano invece le connessioni tra gli elementi stessi della rete. L'interfaccia Iub è dedicata al collegamento tra l'RNC e i vari *NodeB* che esso controlla, mentre l'interfaccia Iur collega tra loro gli RNC appartenenti ai diversi RNS della stessa rete UTRAN. Gli elementi della rete di accesso (RNS) sono:

- l'RNC, il quale gestisce tutte le funzionalità dell'interfaccia radio lato utente, e rende possibile il trasporto dei servizi in modo trasparente verso la CN. In questo modo la mobilità dell'utente è controllata completamente dall'UTRAN, così come le funzionalità di *handover*. Utilizzando questa struttura di rete, la CN viene ad essere completamente separata nelle funzioni di trasporto dei servizi, mentre le funzioni di controllo e segnalazione terminano nell'RNC stesso, il quale provvederà a convertirle nei formati di protocollo radio necessari all'utente. L'RNC, controllando il protocollo radio e i *NodeB* ad esso connessi, svolge le funzioni di gestione delle risorse radio e controllo dei radio *bearer*. Un RNC può lavorare in modalità *servicing* (SRNC) così come in modalità *drift* (DRNC). Nel primo caso l'RNC controlla e gestisce le risorse dell'utente, e termina l'interfaccia *Iu*, mentre nel secondo caso l'RNC non fa altro che reinstradare i segnali provenienti dai propri *NodeB* verso il *servicing*, avvalendosi del collegamento reso possibile dall'interfaccia *Iur*.

- *NodeB* il quale ha il compito di realizzare le trasmissioni radio per il trasporto delle informazioni agli utenti serviti all'interno delle celle costituenti il *NodeB* stesso attraverso queste funzioni:

1. Controllo della potenza sui canali radio: realizza il controllo dei livelli di potenza sul canale per minimizzare i segnali interferenti e garantire un'adeguata qualità della trasmissione
2. Modulazione/Demodulazione
3. Implementa il livello fisico: *spreading/despreading*, *interleaver/deinterleaver*, codifica/decodifica del segnale.
4. Diversità di ricezione: il *NodeB* utilizza due o più antenne per migliorare la ricezione. In pratica il *NodeB* riceve dall'RNC le risorse che deve destinare ai singoli utenti, ed esso dovrà solamente trasmettere via radio quanto ricevuto, aggiustandone però i livelli di potenza secondo le informazioni che gli provengono dall'RNC stesso e, contemporaneamente, effettuare le misure di potenza e di qualità sul segnale ricevuto per consentire all'RNC di aggiustare i propri parametri nella gestione delle risorse radio.

2.2 Long Term Evolution (LTE) - Release 8

2.2.1 Architettura

Le caratteristiche principali del sistema EPS (*Evolved Packet System*) sono la definizione di un'architettura allo scopo di minimizzare il numero di nodi che il traffico dati deve attraversare, riducendo quindi la latenza di rete (in teoria nella sola rete di accesso, nelle implementazioni anche nella rete di commutazione *Core*), la separazione dei piani di controllo e trasporto ed, infine, l'adozione di soluzioni di trasporto del traffico e della segnalazione appartenenti alla famiglia di protocolli *Internet Engineering Task Force* (IETF), che rappresenta un requisito essenziale per il corretto funzionamento dei protocolli in un contesto *broadband*. Questa nuova architettura, secondo il modello SAE (*System Architecture Evolution*) progettata per ottimizzare le prestazioni della rete, migliorare l'efficienza dei costi e facilita il mercato di massa dei servizi basati su IP (*all-IP*). Oltre alla UE l'architettura di sistema LTE (vedi Figura 2.2) prevede:

- E-UTRAN (*Evolved-UTRAN*): la rete di accesso, che dispone di una sola entità l'E-UTRAN *NodeB* (eNB) che prendendo come riferimento la rete di accesso UMTS, l'eNB integra le funzioni dell'RNC e del *NodeB*.

- EPC (*Evolved Packet Core*): sono definite due entità di commutazione: il S-GW (*Serving Gateway*) e il P-GW (*PDN Gateway*). Il primo nodo rappresenta l'ancora locale del traffico in rete di accesso e corrisponde, secondo lo stesso paragone con il sistema UMTS, all'elemento di rete dell'SGSN; il secondo nodo è il P-GW di interconnessione verso le reti esterne e l'ancora assoluta del traffico dati e corrisponde con gli opportuni cambiamenti, all'entità GGSN dell'UMTS. Nelle implementazioni le due entità di *User Plane* sono integrate a costituire un unico nodo di commutazione, realizzando un'architettura composta da un basso numero di nodi anche per l'area di commutazione. La separazione dei due piani è realizzata attraverso la definizione del *MME* (*Mobility Management Entity*), che rappresenta il nodo di controllo locale degli UE e svolge funzioni di solo *Control Plane*. MME gestisce, a partire dal *download* del profilo d'utente dall'HSS (*Home Subscriber Server*), la mobilità di utente e l'attivazione dei *bearer* per il traffico e rappresenta il *peer* della UE nella segnalazione di *Non Access Stratum*. MME corrisponde alla parte di Controllo di un SGSN.

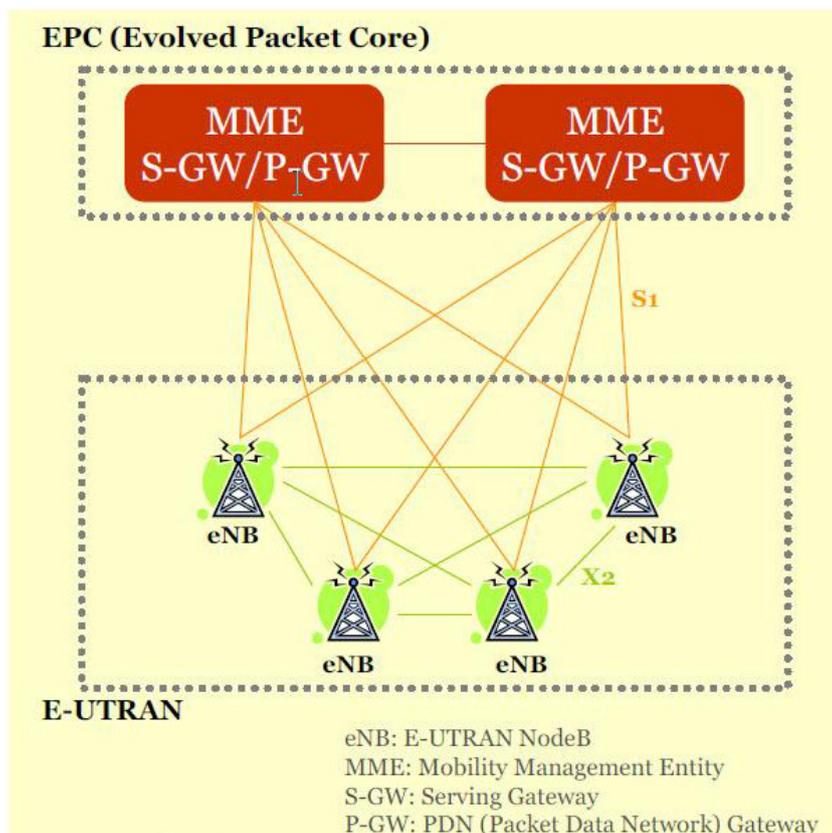


Figura 2.2: Architettura di rete (LTE): E-UTRAN e EPC.

2.2.2 E-UTRAN

L'E-UTRAN consiste in un insieme di BS dette appunto eNB che sono interconnesse tra loro attraverso una interfaccia $X2$. Ogni eNB è connesso alla rete EPC attraverso l'interfaccia $S1$. Nello *User Plane* l'interfaccia $S1$ termina nel S-GW mentre nel *Signaling Plane* l'interfaccia $S1$ termina nel MME. Questa architettura riduce il numero di nodi di rete coinvolti nelle connessioni. In E-UTRA le eNB sono punti terminali per lo *User* e *Control Plane* verso la UE e integrano tutte le funzioni dell'accesso, dalla trasmissione dei dati sull'interfaccia radio, alla gestione delle risorse radio RRM (*Radio Resource Management*), al *ciphering* del traffico dati e della segnalazione. L'eNB esegue una serie di funzioni di seguito elencate:

1. Funzioni per RRM: *Radio Bearer Control*, *Radio Admission Control*, *Connection*

Mobility Control, allocazione dinamica di risorse alla UE sia in *uplink* che in *downlink* (*scheduling*);

2. Compressione dell'*header* IP e codifica per flussi dati di utente;
3. Selezione di una MME alla inizializzazione della UE quando nessun *routing* verso una MME può essere determinato dalle informazioni fornite dalla UE;
4. Instradamento di dati del *User Plane* verso il S-GW;
5. Schedulazione e trasmissione di messaggi di *paging* (originati dalla MME);
6. Schedulazione e trasmissione di informazioni di *broadcast*;
7. Misurazioni e configurazione dei report di misurazione per la mobilità e lo *scheduling*, per esempio il modulo AMC *Adaptive Modulation and Coding* con i *CQI feedbacks* (*Channel Quality Index*).

2.3 Tecniche di Modulazione

2.3.1 UMTS - Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)

UMTS utilizza la tecnica WCDMA in cui l'accesso multiplo è realizzato moltiplicando i diversi flussi informativi per delle sequenze di bit *chip*, detti codici, tipiche di ciascun flusso. In ricezione, la separazione dei diversi flussi è resa possibile dalla ortogonalità o quasi ortogonalità dei codici a cui essi sono associati. Pertanto, la ricostruzione in ricezione del flusso *i*-esimo associato al codice C_i , è ottenibile con una operazione di correlazione con il codice C_i . La moltiplicazione di un flusso informativo con un codice di *spreading* ha l'effetto di spalmare l'informazione su di una banda maggiore di quella richiesta dal segnale sorgente secondo il fattore scelto. L'operazione suddetta ha l'effetto di innalzare il *bit rate*, più precisamente il *chip rate*, del segnale sorgente e quindi la banda ad esso associata. Inoltre, relativamente all'informazione dei flussi dati sulle tratte di *uplink* e *downlink*, il sistema UMTS prevede due modalità di trasmissione. La prima tecnica, detta *Frequency Division Duplexing* o FDD, porta ad una separazione dei flussi nel dominio delle frequenze (così come accade nei sistemi GSM), la seconda, detta *Time Division Duplexing* o TDD, attua una separazione nel dominio del tempo allocando, anche dinamicamente, intervalli temporali diversi per l'*uplink* e per il *downlink* pur impiegando la stessa banda di frequenza. La tecnica TDD è altamente vantaggiosa nel

caso di flussi di trasmissione e ricezione fortemente sbilanciati tra loro permettendo una allocazione ottimizzata di risorse, a discapito di una maggiore complessità realizzativa.

2.3.2 LTE - Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

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, 16QAM, 64QAM, etc...), 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 che:

- ciascun simbolo OFDM trasmesso è preceduto da un *Cyclic Prefix* (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 in frequenza di ciascuna sottoportante abbia un massimo laddove la risposta in frequenza dei canali adiacenti ha 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 conversione dei simboli nel segnale da trasmettere ed il viceversa si ottiene attraverso una semplice trasformata di Fourier (*Fast Fourier Transform* - *FFT*). Nello specifico, una FFT inversa (*Inverse Fast Fourier Transform* - *IFFT*) in trasmissione (vedi Figura 2.3.), per ottenere dai simboli associati alle singole sottoportanti il segnale

da trasmettere, ed una FFT in ricezione, per ottenere dal segnale ricevuto i simboli ad esso associati in corrispondenza delle varie sottoportanti.

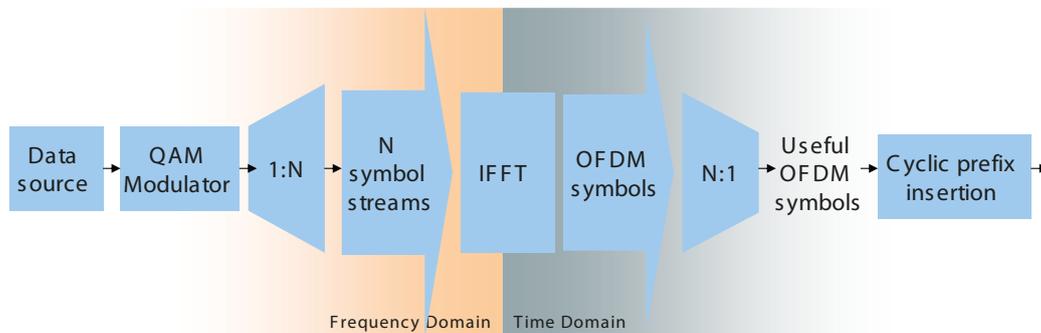


Figura 2.3: Generazione del segnale OFDM attraverso una IFFT in trasmissione.

La tecnica OFDM tuttavia risente anche di due principali limiti:

- suscettibilità ad errori dovuti alla stabilità delle frequenze portanti, determinate sia dagli oscillatori locali che dagli *shift Doppler*;

- necessità di un elevato rapporto *peak-to-average power ratio* (PAPR), in quanto il valore istantaneo della potenza RF in trasmissione può variare in modo repentino, anche all'interno di uno stesso simbolo, determinando una riduzione dell'efficienza dell'amplificatore di potenza in trasmissione. Questa caratteristica è particolarmente importante in quanto consente di evitare l'impiego, a livello di terminale d'utente, di amplificatori con elevata linearità e bassa efficienza (misurata dal rapporto tra la potenza trasmessa e quella necessaria per l'alimentazione dell'amplificatore). Le caratteristiche di PAPR sono molto importanti anche in termini economici, in quanto incidono pesantemente per il costo della progettazione di amplificatori di potenza di UE. Gli operatori telefonici tengono molto in considerazione il lato economico, perciò il fatto che OFDMA risulti peggiore dal punto di vista PAPR rispetto a SC-FDMA ha portato ad utilizzare quest'ultima modulazione per l'*uplink*.

La maggiore innovazione di LTE rispetto allo standard UMTS è l'utilizzo della modulazione *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) per il *downlink* e la *Single Carrier-Frequency Division Multiple Access* (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.

Capitolo 3

Strato Fisico

3.1 Tecniche di Modulazione

La modulazione utilizzata da LTE varia tra QPSK a 16 e 64QAM, in funzione delle condizioni radio. Essendo la QAM più sensibile ai fenomeni propagativi, sarà compito della rete utilizzare lo schema di modulazione più appropriato, per ottenere le migliori prestazioni trasmissive. La costellazione della modulazione QPSK ha quattro punti significativi identificati dalla fase ad ampiezza costante. Nella 16QAM così come nella 64QAM ne sono presenti rispettivamente 16 e 64 ognuno caratterizzato dalla fase e dall'ampiezza del segnale. In Figura 3.1 sono rappresentate le costellazioni relative alle modulazioni in esame.

Come si può vedere dalla Figura 3.1, a parità della massima ampiezza del segnale

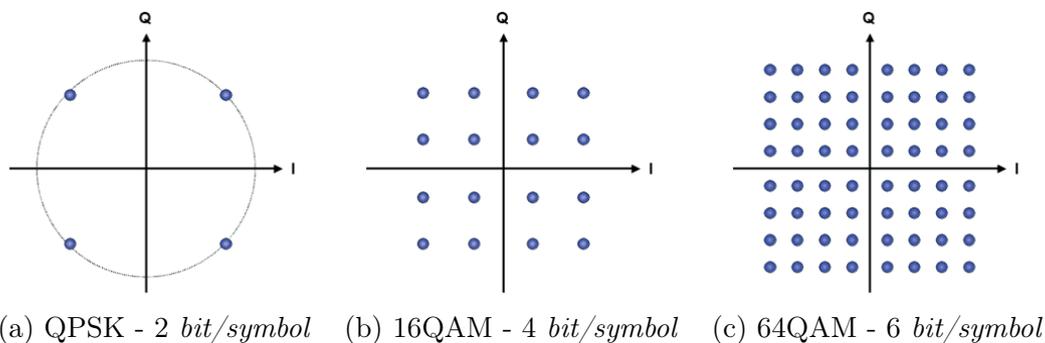


Figura 3.1: Costellazioni modulazioni LTE.

trasmesso, è evidente come tra due punti adiacenti della costellazione 64QAM vi sia minore differenza rispetto a quelli della 16QAM e della QPSK. Ciò rende più sensibile la modulazione 64QAM ai vari fenomeni di degradazione. Infatti tanto il rumore quanto l'interferenza alterano il segnale ricevuto, variando fase e ampiezza; in ricezione quindi i simboli possono essere rilevati ma non corretti. La 64QAM viene utilizzata in presenza di buone condizioni radio; quando le condizioni propagative peggiorano e aumentano gli errori trasmissivi, si passa alla 16QAM o, meglio ancora, alla QPSK. Il vantaggio della QAM, rispetto alla QPSK, è che la costellazione si compone di 64 (o 16 punti), quindi ogni simbolo è in grado di codificare 6 bit (o 4 bit), invece che 2 bit (caso QPSK). In LTE ci sono 6 o 7 simboli per TTI (*Transmission Time Interval*). Inoltre mentre tutti i simboli della QPSK hanno ampiezza costante in QAM ciò non avviene e i segnali possono variare sia l'ampiezza che la fase nella rappresentazione dell'informazione.

3.2 Downlink

Come già riportato nel capitolo 2.3.2 lo schema di trasmissione di *downlink* per le modalità E-UTRA FDD e TDD è basato su un sistema OFDM rappresentato nella Figura 3.2. Lo spettro a disposizione viene suddiviso in sottobande *sub-carriers*, ortogonali l'uno dall'altro. Ognuna di queste sottobande viene modulata con un basso valore di *data rate*.

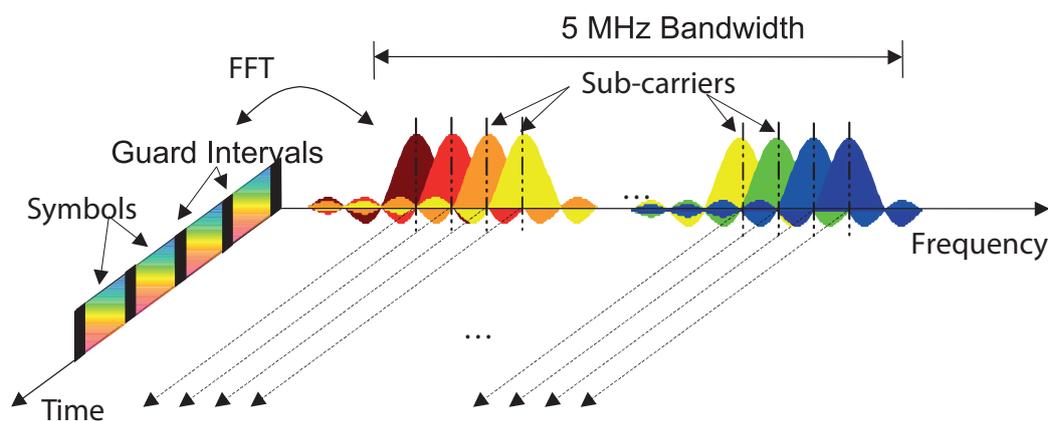


Figura 3.2: Rappresentazione del tempo e della frequenza di un segnale OFDM.

3.2.1 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)

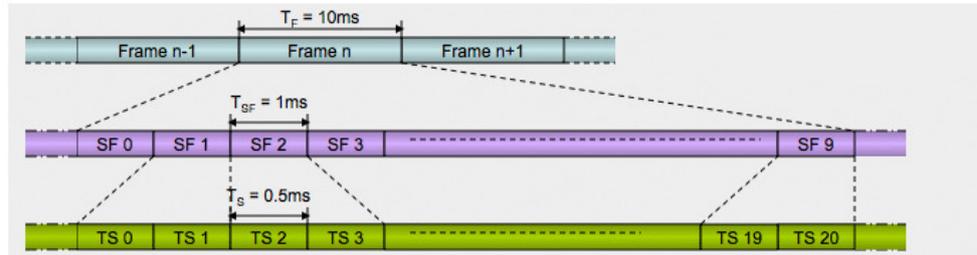
L'OFDMA è una tecnica di accesso multiplo, basata sulla modulazione OFDM, che consiste nell'assegnare a ciascun utente un sottoinsieme delle sottoportanti in cui viene suddivisa la banda disponibile per un determinato intervallo di tempo. Proprio per questa ragione a volte si usa dire che l'OFDMA può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

Poiché si tratta di una tecnica di tipo adattativo, funzione della qualità del canale radio, se l'assegnazione delle sottobande viene eseguita in maniera sufficientemente veloce, consente di raggiungere prestazioni molto elevate sia dal punto di vista di robustezza alle rapide variazioni del *fading* e sia per quanto riguarda le interferenze co-canale, permettendo, allo stesso tempo, di ottenere un'efficienza spettrale particolarmente elevata, specialmente quando viene utilizzata in combinazione con le tecniche MIMO. La caratteristica di assegnare a ciascun utente solo una porzione delle sottobande disponibili, consente di variare la potenza di trasmissione richiesta per comunicare con ognuno di essi a seconda delle necessità. Stesso discorso vale anche per la qualità di servizio (*QoS*) che può essere adattata a seconda del tipo di applicazione (voce, video streaming, accesso ad internet, etc...) che l'utente intende utilizzare.

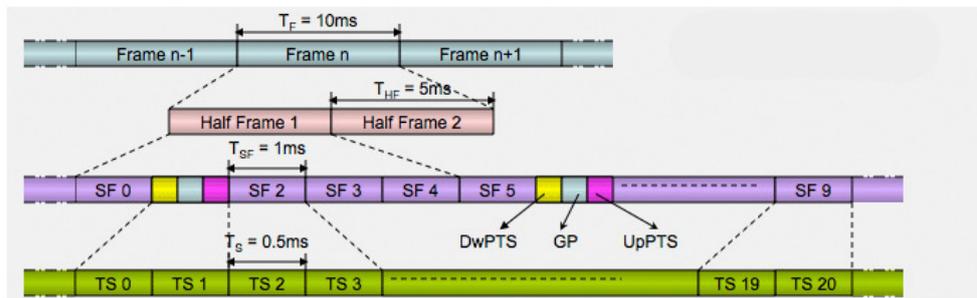
3.2.2 Struttura del frame

Un elemento comune tra *Downlink* e *Uplink* è la struttura del generico frame Figura 3.3.

Come già visto prima, per LTE si sono definite due modalità di operazioni ovvero FDD e TDD. La struttura del *frame* usato per FDD (per entrambi le operazioni di *full duplex* e *half duplex*) ha una durata di 10 ms e consiste di 20 *slots* con una durata di 0.5 ms. La struttura del frame usata per il TDD consiste di due mezzi *frames* con una durata di 5 ms ognuna e contenente 8 *slots* di 0.5 ms e tre campi speciali (DwPTS, GP e UpPTS) che hanno lunghezze individuali configurabili e con durata totale di 1 ms.



(a) frame FDD



(b) frame TDD

Figura 3.3: Struttura del frame LTE.

3.2.3 Struttura dello slot

Gli elementi che compongono la struttura di un *slot* si possono così riassumere:

Resource grid (griglia delle risorse): la larghezza banda disponibile in *downlink* consiste di N_{BW}^{DL} *sub-carriers* spaziate l'una dall'altra di 15 kHz. Ma il numero N_{BW}^{DL} può variare per permettere operazioni di larghezza di banda scalabile fino a 20 MHz. La Figura 3.4 sottostante ci mostra la struttura della griglia delle risorse (*resource grid*) di *downlink* per la durata di uno *slot*.

Un tale *slot* è costituito da N_{symb}^{DL} simboli OFDM. A ognuno viene inserito un *Cyclic Prefix* (CP) che funge da intervallo di guardia, cioè assicura che le varie trasmissioni non interferiscano tra loro. N_{symb}^{DL} dipende proprio dalla lunghezza di questo prefisso. È possibile inoltre aggiungere un CP esteso per poter coprire un numero maggiore di celle con alto *delay spread* (dispersione) e trasmissioni *Multimedia Broadcast and Multicast Services* (MBMS).

Resource element (Elementi di risorsa): è chiamato così ogni elemento di una *resource grid* di una data porta d'antenna p e rappresenta un simbolo OFDM in una

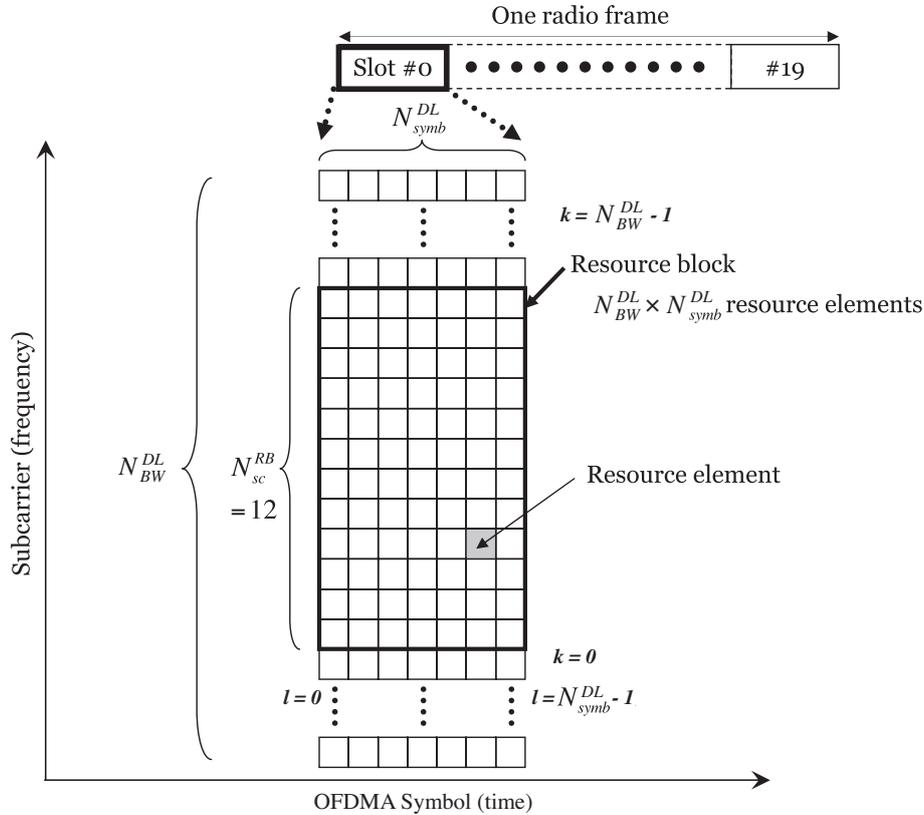


Figura 3.4: *Resource grid* del *downlink*.

determinata *sub-carrier*. Viene individuato unicamente dalla coppia di indici (k,l) in una slot dove $k=0, \dots, N_{BW}^{DL}-1$ e $l=0, \dots, N_{symb}^{DL}-1$ sono gli indici, rispettivamente, nel dominio della frequenza e in quello del tempo. Il *resource element* (k,l) di porta di antenna p corrisponde a un valore complesso. Nel caso in cui non ci sia rischio di confusione oppure non vi sia alcuna particolare specifica riguardante la porta dell'antenna, allora l'indice p può essere tralasciato.

Resource blocks (Blocchi di risorsa): vengono usati per descrivere la mappatura, in *resource element*, di determinati canali fisici.

- Il *resource block* fisico è caratterizzato da 12 *sub-carriers* consecutive nel dominio della frequenza nel caso di una differenza di frequenza l'una dall'altra di 15 kHz, mentre nel dominio del tempo è composto da N_{symb}^{DL} di simboli OFDM consecutivi, quindi uguale al numero di simboli OFDM presenti in uno *slot*. La dimensione del *resource*

block è la stessa per tutte le larghezze di banda, perciò il numero di *resource block* fisici a disposizione dipende esclusivamente dalla larghezza di banda.

- Il *resource block* virtuale ha la stessa dimensione di quello fisico. Si suddivide in due tipi: localizzato e distribuito. Per quanto riguarda il primo si tratta di un *resource block* virtuale mappato direttamente con quello fisico tale che i due corrispondano. Vengono numerati da 0 a $N_{V_{RB}}^{DL}-1$, dove $N_{V_{RB}}^{DL} = N_{RB}^{DL}$. Mentre il *resource block* distribuito avrà una mappatura descritta dalla Tabella 3.1.

System BW (N_{RB}^{DL})	$1^{st}Gap(N_{gap,1})$	$2^{nd}Gap(N_{gap,2})$
6-10	$N_{RB}^{DL}/2$	N/A
11	4	N/A
12-19	8	N/A
20-26	12	N/A
27-44	18	N/A
45-49	27	N/A
50-63	27	9
64-79	32	16
80-110	48	16

Tabella 3.1: Valori di gap RB.

Resource-element group (Gruppo di elementi di risorsa): sono usati per definire la mappatura dei canali di controllo in *resource element*. Vengono rappresentati dalla coppia di indici (k' , l') dei *resource element* aventi indice k il più basso del gruppo e tutti i *resource element* del gruppo dello stesso valore di l .

Guard Period (Intervallo di sicurezza): in termini di trasmissione *half-duplex* in modalità FDD, lo *User Equipment* (UE) crea questo intervallo quando non si ha la corretta ricezione dell'ultima parte di un *subframe* di *downlink*, quello immediatamente precedente al *subframe* di *uplink* dello stesso UE. Se invece si tratta di un'operazione in modalità TDD allora il campo GP della struttura del *frame* di secondo tipo serve proprio da intervallo di sicurezza.

3.3 Uplink

Per l'*uplink*, sono state fatte numerose ricerche riguardo lo schema di trasmissione adatto per questa fase. OFDMA sembra soddisfare pienamente i requisiti per il *downlink*,

mentre le sue proprietà sono risultate, a causa del PARP meno favorevoli per la parte di *uplink*. Per questo motivo, per lo schema di trasmissione dell'*uplink* LTE, è stata scelta la modulazione SC-FDMA con *cyclic prefix* sia per la modalità FDD che per la TDD. Ad ogni modo l'elaborazione del segnale in entrambe le modulazioni ha delle somiglianze perciò la parametrizzazione di *downlink* e *uplink* può essere armonizzata. Possiamo vedere un raffronto tra le due modulazioni dalla seguente Figura 3.5.

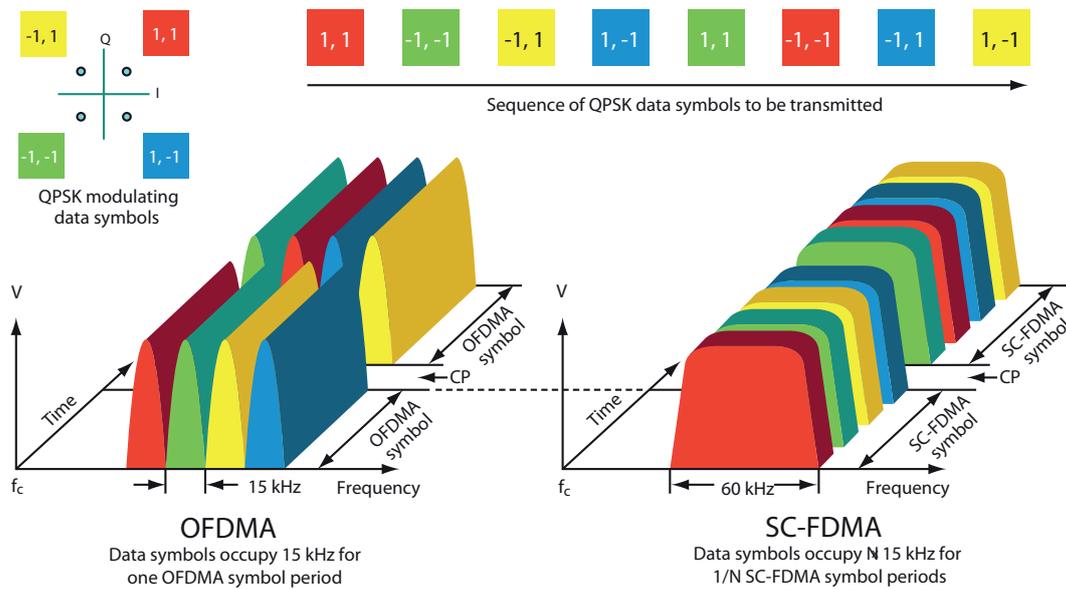


Figura 3.5: OFDMA trasmette i quattro simboli di dati della QPSK in parallelo, uno per ogni sottoportante; SC-FDMA trasmette i quattro simboli di dati della QPSK in serie a quattro volte il *rate*, con ogni simbolo che occupa una banda di $N \times 15$ kHz.

3.3.1 Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA).

In questo tipo di sistema di accesso all'utente, come avviene per l'OFDMA, vengono impiegate una serie di sottoportanti ortogonali per trasmettere le informazioni contenute nei simboli modulati. Tuttavia, con la tecnica SC-FDMA, le sottoportanti vengono trasmesse sequenzialmente e non in parallelo (vedi Figura 3.5.). Questo tipo di soluzione consente di ridurre considerevolmente le fluttuazioni dell'involuppo del segnale trasmesso, determinando un valore del PAPR molto più basso rispetto a quello riscontrato

nei segnali basati sull'OFDMA. D'altra parte, l'utilizzo di questa tecnica nei sistemi cellulari, intrinsecamente soggetti a propagazione caratterizzata da cammini multipli, comporta che il segnale, ricevuto in corrispondenza della stazione radio base, sia suscettibile ad interferenza intersimbolica. Per far fronte a questo problema risulta quindi necessario impiegare, a livello di stazione radio base, sistemi di equalizzazione adattativi nel dominio della frequenza che ovviamente, determinano un più elevato carico di lavoro di elaborazione nonché maggiori costi di implementazione che però graveranno principalmente sull'operatore.

Dal punto di vista dell'assegnazione delle sottoportanti per l'accesso all'utente ci sono due differenti approcci: il SC-FDMA localizzato (*Localized* FDMA o LFDMA) ed il SC-FDMA distribuito (vedi Figura 3.6.).

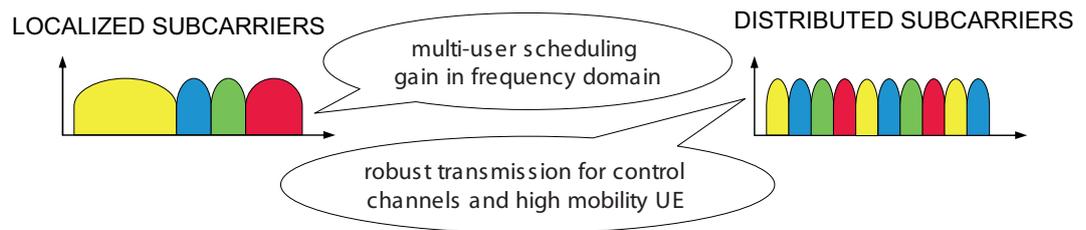


Figura 3.6: Le soluzioni LFDMA e IFDMA.

Nell'approccio LFDMA ogni terminale usa, per trasmettere le informazioni, un insieme di sottoportanti adiacenti. In sostanza è come se a ciascun utente venisse assegnata una specifica porzione di banda per la comunicazione con la stazione radio base. L'approccio alternativo è quello distribuito di cui, una possibile realizzazione, è quella denominata *Interleaved* FDMA (IFDMA). In questo caso le singole sottoportanti assegnate a ciascun utente sono a distanza prefissata e sono intervallate con quelle assegnate agli altri utenti. Questo secondo approccio risulta maggiormente immune rispetto agli errori di trasmissione, in quanto l'informazione da trasmettere viene distribuita sull'intera banda disponibile. Tra le varie possibilità di generazione del segnale SC-FDMA si è scelta la *Discrete Fourier Transform spread* OFDM (DFT-s-OFDM) per E-UTRA. Il principio viene illustrato in Figura 3.7. Viene applicata all'inizio una DFT di dimensione M al blocco di M simboli di modulazione. Per lo schema di modulazione vengono usate in *uplink* sia modulazioni QPSK che 16QAM e 64QAM. La DFT trasforma i sim-

boli di modulazione nel dominio della frequenza, il risultato è la loro mappatura nelle *sub-carrier* disponibili.

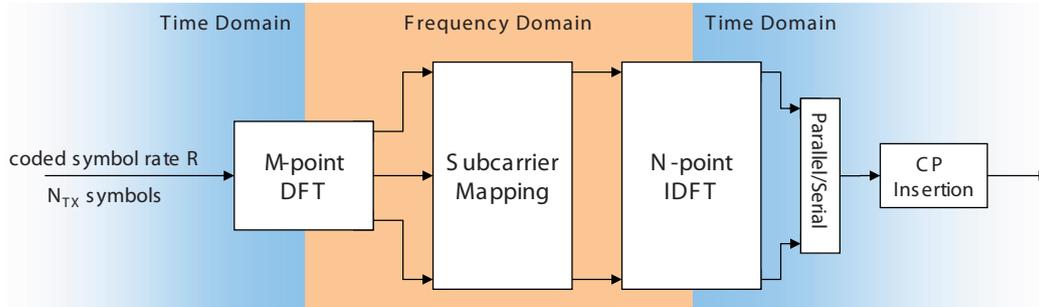


Figura 3.7: Diagramma a blocchi di DFT-s-OFDM.

Nell'*uplink* di E-UTRA sono permesse solamente le trasmissioni localizzate cio di *sub-carrier* consecutive. Viene eseguita una *N-point Inverse Fast Fourier Transform* (IFFT), come per l'OFDM, esclusivamente se $N > M$, in seguito si avrà l'aggiunta del *cyclic prefix* e un convertitore serie a parallelo. La differenza sostanziale tra SC-FDMA e OFDMA sta, quindi, tutta nel processo di DFT come si può notare dalla Figura 3.8. In un segnale SC-FDMA ogni *sub-carrier* usata per la trasmissione contiene informazioni di tutti i simboli di modulazione trasmessi, questo sin dal flusso di dati iniziale che è stato diffuso dalla trasformata di DFT sulle *sub-carrier* ancora a disposizione. A differenza di quello che succede per un segnale OFDMA nel quale ogni *sub-carrier* porta solo informazioni relative agli specifici simboli di modulazione.

3.3.2 Struttura dello slot

La struttura di uno *slot* di *uplink* come già detto in precedenza è molto simile a quella di *downlink*. Il *frame radio* di *uplink* consiste di 20 *slot* da 0,5 ms ognuno e un *subframe* si compone di 2 *slot*. Ogni segnale trasmesso in ogni *slot* è descritto dalla *resource grid* di Figura 3.9, è composta da $N_{RB}^{UL} \times N_{sc}^{RB}$ *sub-carriers* e N_{symp}^{UL} simboli SC-FDMA.

La quantità N_{RB}^{UL} dipende dalla configurazione della larghezza di banda della trasmissione di *uplink* all'interno della cella e dev'essere compresa tra un valore minimo e uno massimo della stessa, questo intervallo varia da un minimo di 6 a un massimo di 110. Questi i valori della larghezza di banda supportati nella versione corrente. Il nu-

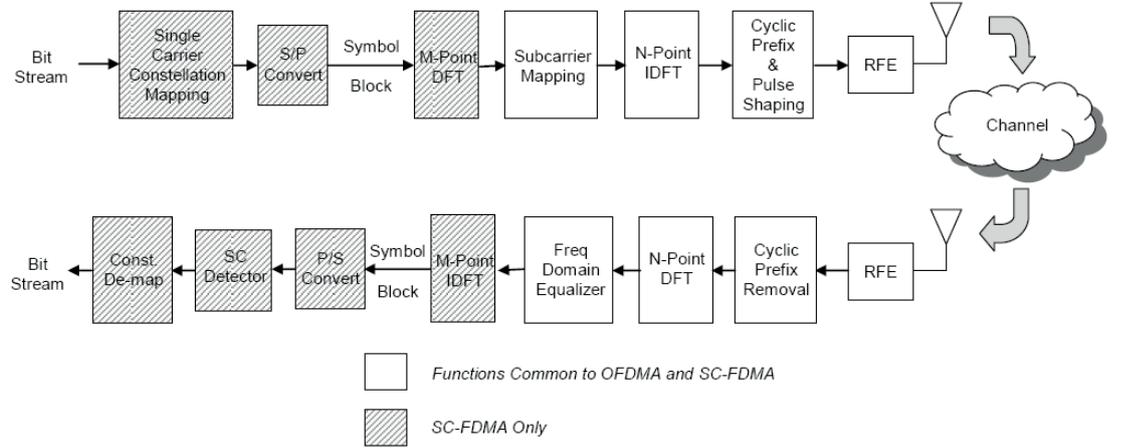


Figura 3.8: Struttura di un trasmettitore e ricevitore SC-FDMA e OFDMA.

mero di simboli SC-FDMA presente in uno *slot* dipende dalla lunghezza del *cyclic prefix* configurato con i parametri richiesti dallo strato più alto ($UL-CyclicPrefixLength$). Ogni elemento della *resource grid* viene chiamato *resource element* ed è unicamente definito dalla coppia (k, l) per uno *slot* dove $k=0, \dots, N_{RB}^{UL} - 1$ e $l=0, \dots, N_{sc}^{RB} - 1$ sono gli indici, rispettivamente, del dominio della frequenza e del tempo. I *resource element* corrispondono a dei valori complessi. Di queste quantità, dovranno essere impostate a 0 tutte quelle che corrispondono a *resource element* che non vengono utilizzati da un canale fisico per le trasmissioni oppure quelli utilizzati per un segnale fisico all'interno di uno *slot*. Un *resource block* fisico si definisce come N_{symp}^{UL} simboli SC-FDMA consecutivi nel dominio del tempo e N_{sc}^{RB} *sub-carriers* consecutivi nel dominio della frequenza. I simboli nel tempo sono uguali a 12 sia per *cyclic prefix* normale che esteso. Per i simboli in frequenza di un *cyclic prefix* normale ne abbiamo 7 mentre per l'esteso ne avremo 6. Un *resource block* fisico in *uplink* è costituito da $N_{RB}^{UL} \times N_{sc}^{RB}$ *resource element*, il corrispondente di uno *slot* nel dominio del tempo e 180 kHz nella frequenza.

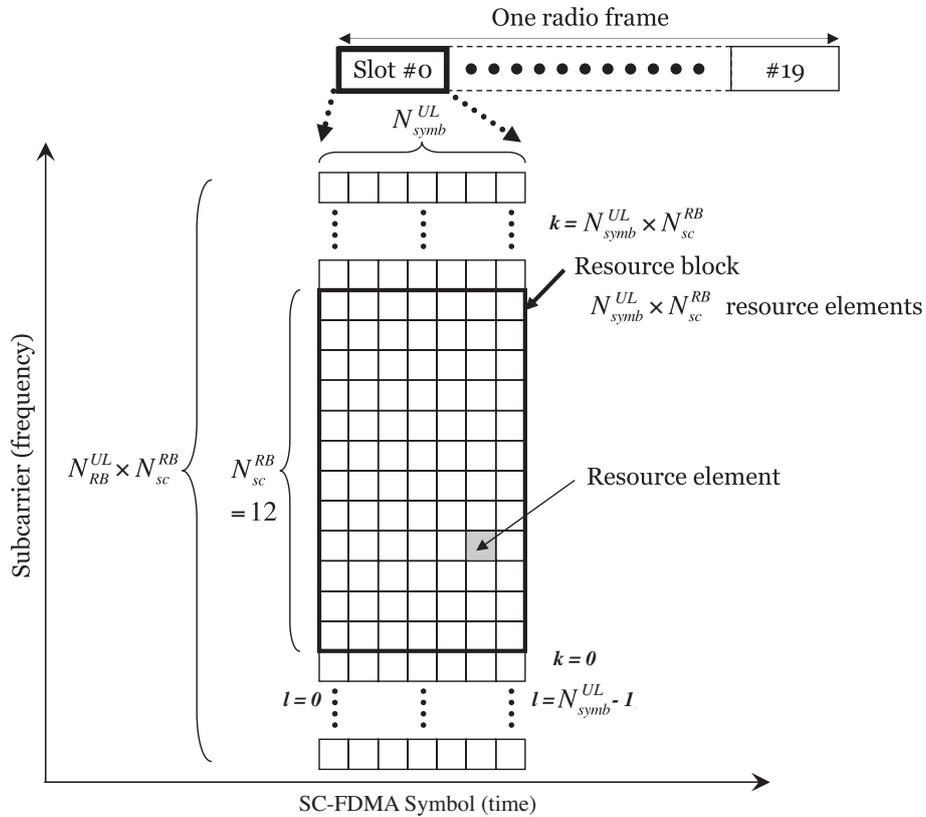


Figura 3.9: *Resource grid* del *uplink*.

3.4 Multiple Input Multiple Output (MIMO) e Maximal Ratio Combining (MRC)

A livello fisico i sistemi LTE possono, opzionalmente, impiegare più *transceivers* sia in corrispondenza della stazione radio base che del terminale utente, per migliorare la robustezza del collegamento ed incrementare la capacità dati trasmessa. Le tecniche utilizzate sono la MIMO e la MRC. La tecnica MRC viene usata per migliorare l'affidabilità del collegamento in condizioni di propagazione critiche quando l'ampiezza del segnale è bassa e si è in presenza di cammini multipli. La tecnica MIMO, invece, viene usata principalmente per ottenere migliori prestazioni in termini di velocità di trasmissione. Un sistema convenzionale dotato di ricevitore con antenne multiple non è sufficiente per poter supportare le tecniche MRC/MIMO. Infatti la caratteristica pe-

culiare di questi sistemi è quella di prevedere, oltre ad antenne multiple, anche blocchi di ricezione multipli.

Nel caso della tecnica MRC il segnale viene ricevuto mediante due o più sistemi antenna/*transceivers*, spazialmente separati tra loro, e, quindi, caratterizzati da diverse risposte impulsive. Il processore esegue l'equalizzazione del canale in modo distinto sui segnali ricevuti per poi combinarli in un unico segnale composto (vedi Figura 3.10).

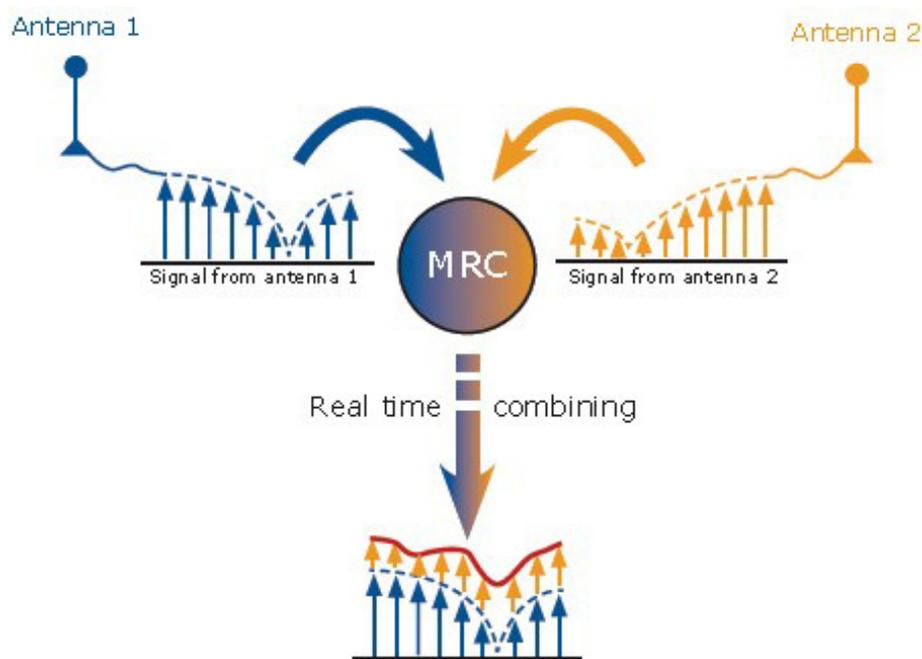


Figura 3.10: Segnale MRC.

Operando in questo modo, mentre i segnali ricevuti vengono combinati in modo coerente, il rumore termico introdotto da ciascun *transceiver* risulta non correlato determinando, nel caso di un ricevitore MRC a due canali, un incremento complessivo del rapporto segnale/rumore (SNR) di 3dB. A questo aspetto positivo va ovviamente aggiunto quello relativo alla separazione spaziale dei due ricevitori che riduce fortemente gli effetti legati al *fading* selettivo dovuto ai cammini multipli, migliorando complessivamente la qualità del segnale ricevuto.

L'utilizzo della tecnica MIMO consente invece, come detto, di incrementare il *data*

rate complessivo del sistema di trasmissione, conseguito attraverso l'utilizzo di antenne multiple in trasmissione ed in ricezione. Per poter ottenere questo risultato il ricevitore deve calcolare la risposta impulsiva del canale che caratterizza ciascuna antenna trasmittente. Nei sistemi LTE questo risultato si realizza trasmettendo, da ognuna delle suddette antenne ed in modo sequenziale (non sovrappontesi), opportuni segnali di riferimento. In pratica, in un sistema MIMO 2x2, andranno calcolate di volta in volta 4 risposte impulsive del canale.

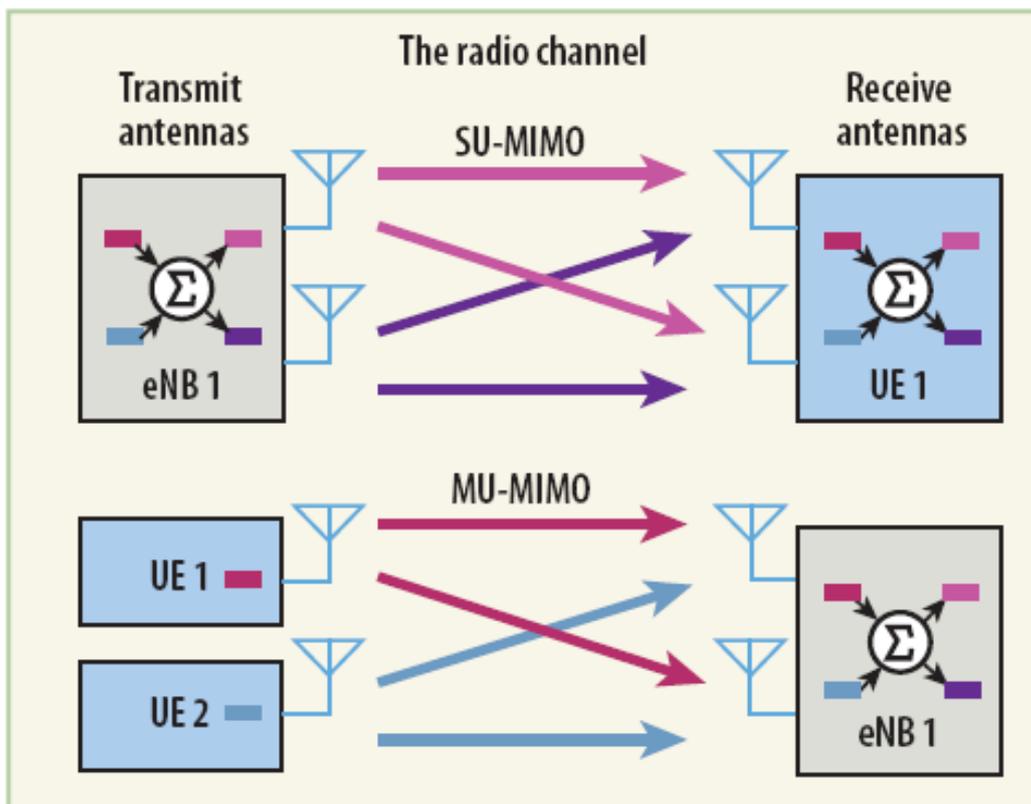


Figura 3.11: Esempio di singolo utente (SU-MIMO) e di utenti multipli (MU-MIMO).

A seconda delle condizioni del canale si possono distinguere due modalità di MIMO: *Spatial Multiplexing*: permette di trasmettere diversi flussi di dati simultaneamente nello stesso blocco di risorse di *downlink*. Questi flussi possono appartenere a un singolo utente (*Single User MIMO* o SU-MIMO) o a utenti multipli (*Multiple User MIMO*

o MU-MIMO). Mentre il primo incrementa la velocità di trasmissione (*data rate*), il secondo permette di incrementare la capacità complessiva di comunicazione. Questo principio di sfruttamento della dimensione dello spazio è rappresentato in Figura 3.11. Notiamo che ogni antenna trasmittente propaga un diverso flusso di dati e le antenne in ricezione possono ricevere flussi di dati da tutte quelle che trasmettono.

Transmit Diversity: viene usato quando il numero di flussi (*rank*) selezionato è uno e nel caso in cui le condizioni del canale non permettono l'uso della modalità *Spatial Multiplexing*. Gli schemi di *Transmit Diversity* erano già conosciuti da WCDMA Release 99 e faranno ora parte anche dell'LTE figurando come una delle modalità MIMO. Ogni antenna di trasmissione può trasmettere lo stesso flusso di dati, così il ricevitore ottiene una replica dello stesso segnale. Questo aumenta il rapporto segnale/rumore al lato del ricevitore e così anche la robustezza dei dati in trasmissione specialmente quando si tratta di *fading*.

Una volta che sono note le risposte impulsive, i dati potranno essere trasmessi anche in simultanea su entrambe le antenne. La combinazione lineare dei due flussi di dati alle due antenne riceventi dà luogo ad un insieme di due equazioni in due incognite che si possono risolvere per ricavare i due flussi dati originali. Il rapporto tra la *Spatial Multiplexing* e la *Transmit Diversity* è stato analizzato in funzione della velocità di trasmissione a livello di sistema (*bit rate* totale nella cella) e di utenti. Con la *Spatial Multiplexing*, è possibile ottenere *bit rate* elevati per un solo utente, se il rapporto segnale-interferenza (SIR) è elevato. Tuttavia, alcune simulazioni dimostrano che in un sistema limitato da interferenze, le zone che presentano un SIR elevato sono relativamente limitate, per cui la *Spatial Multiplexing* sembra inappropriata. La *Spatial Multiplexing* (SU-MIMO) può tuttavia essere adoperata per trasmettere *bit rate* molto elevati verso celle isolate o utenti che si trovano in prossimità della stazione base. Per i sistemi di radiocomunicazione mobile, che generalmente sono limitati dalle interferenze e presentano SIR piuttosto bassi, la *Transmit Diversity* presenta più vantaggi rispetto alla *Spatial Multiplexing* e permette complessivamente di ottenere velocità di trasmissione maggiori a livello di sistema.

Questi sistemi formano una parte essenziale dell'LTE perchè consentono di migliorare il rendimento e l'efficienza spettrale indispensabili al fine di raggiungere gli obiettivi

prestazionali imposti dalle reti di nuova generazione.

Capitolo 4

Prestazioni

4.1 Bit rate

LTE offre un elevato *bit rate* di picco utilizzando una larghezza di banda fino a 20 MHz, e come già visto nel capitolo 3 una modulazione a 64QAM e una trasmissione MIMO. Con una trasmissione 2x2 MIMO si ha un doppio *bit rate* che permette di avere fino a 12 bit per simbolo. Pertanto, se la QPSK con *rate* di codifica di 1/2 trasporta 1 bps/Hz, con 64QAM senza alcun tipo di codifica ma con 2x2 MIMO abbiamo un'efficienza che raggiunge i 12 bps/Hz. Ad ogni larghezza di banda il sistema prevede l'assegnazione di un numero di RB (*Resource Blocks*) specifico perciò ne avremo: 6 con 1.4 MHz, 15 con 3 MHz, 25 con 5 MHz, 50 con 10 MHz, 75 con 15 MHz e 100 con 20 MHz.

Nella Tabella 4.1 sono riportati i valori massimi di *bit rate* in *downlink*. Si evidenzia come il *bit rate* massimo teorico è di circa 172 Mbps se però viene utilizzata una tecnica 4x4 MIMO allora può aumentare fino a 325 Mbps. I tassi di *bit rate* sono notevolmente maggiori in *downlink* rispetto all'*uplink* questo a causa della mancata specificazione del SU-MIMO in *uplink* nella 3GPP Release 8. In *uplink*, Tabella 4.2, il picco viene raggiunto a 86 Mbps se si utilizza una modulazione 64QAM ed è possibile arrivare fino a 57 Mbps con la 16QAM e una larghezza di banda di 20 MHz.

La tecnologia MIMO può essere utilizzata in *uplink* solo per aumentare la capacità complessiva delle celle (viene chiamata *Virtual-MIMO* o V-MIMO) in cui ciascuna trasmissione avviene con singola antenna ma in questo modo il valore massimo di *th-*

Modulation and coding	bits/symbol	MIMO usage	1.4MHz	3.0MHz	5.0MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Resource blocks			6	15	25	50	75	100
QPSK 1/2	1.0	Single stream	0.8	2.2	3.7	7.4	11.2	14.9
16QAM 1/2	2.0	Single stream	1.5	4.4	7.4	14.9	22.4	29.9
16QAM 3/4	3.0	Single stream	2.3	6.6	11.1	22.3	33.6	44.8
64QAM 3/4	4.5	Single stream	3.5	9.9	16.6	33.5	50.4	67.2
64QAM 1/1	6.0	Single stream	4.6	13.2	22.2	44.7	67.2	89.7
64QAM 3/4	9.0	2x2 MIMO	6.6	18.9	31.9	64.3	96.7	129.1
64QAM 1/1	12.0	2x2 MIMO	8.8	25.3	42.5	85.7	128.9	172.1
64QAM 1/1	24.0	4x4 MIMO	16.6	47.7	80.3	161.9	243.5	325.1

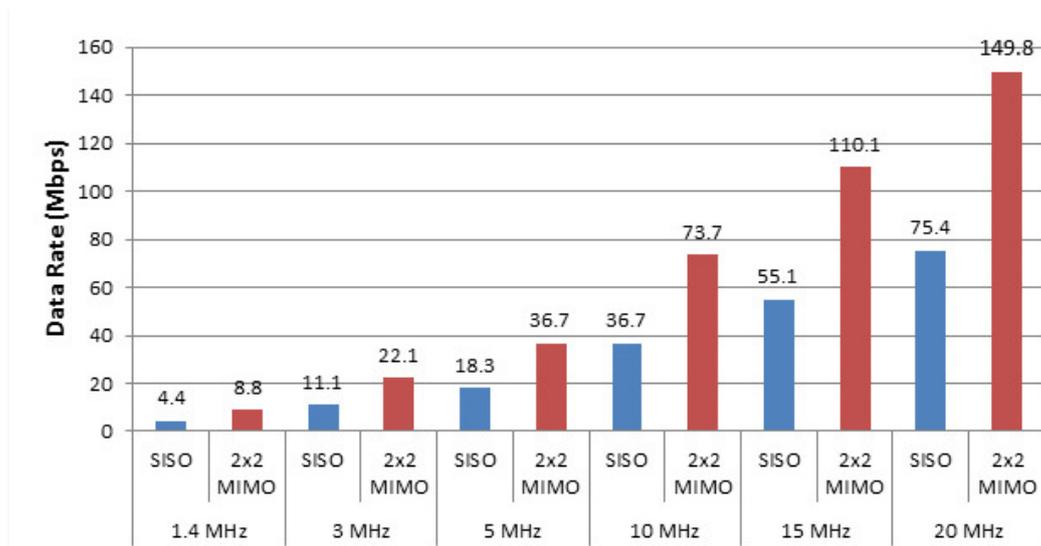
Tabella 4.1: *Bit rates* (Mbps) di picco in *downlink*

Modulation and coding	bits/symbol	MIMO usage	1.4MHz	3.0MHz	5.0MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Resource blocks			6	15	25	50	75	100
QPSK 1/2	1.0	Single stream	0.9	2.2	3.6	7.2	10.8	14.4
16QAM 1/2	2.0	Single stream	1.7	4.3	7.2	14.4	21.6	28.8
16QAM 3/4	3.0	Single stream	2.6	6.5	10.8	21.6	32.4	43.2
16QAM 1/1	4.0	Single stream	3.5	8.6	14.4	28.8	43.2	57.6
64QAM 3/4	4.5	Single stream	3.9	9.7	16.2	32.4	48.6	64.8
64QAM 1/1	6.0	Single stream	5.2	13.0	21.6	43.2	64.8	86.4

Tabella 4.2: *Bit rates* (Mbps) di picco in *uplink*

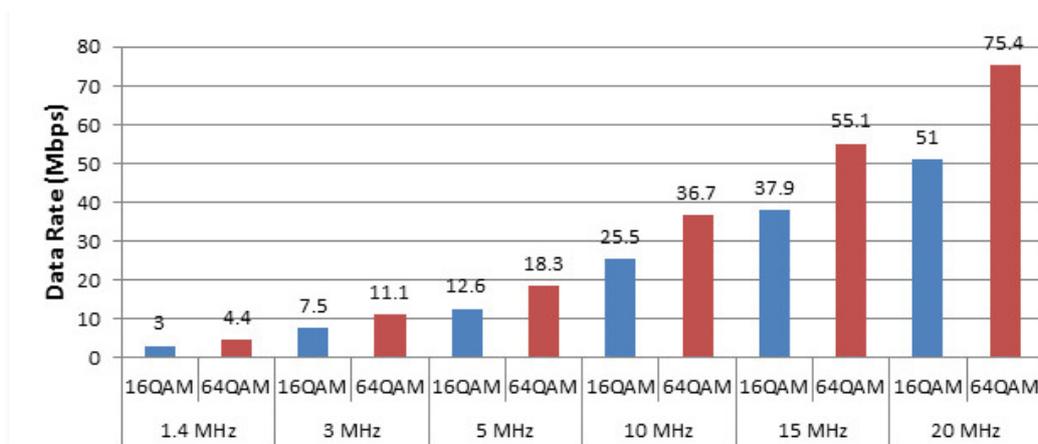
roughput delle celle possa essere raddoppiato. Inoltre la TBS (*Transport Block Size*) è stata definita nella [3] in modo che la trasmissione senza codifica non sia possibile. I massimi tassi di *bit rates* di TBS sono riportati in Tabella 4.3 e mostrati in Figura 4.1 per il *downlink* e rispettivamente in Tabella 4.4 e in Figura 4.2 per l'*uplink* suddivisi nei diversi schemi di modulazione. Il *bit rate* di picco in *downlink* è di circa 150 Mbps mentre in *uplink* raggiunge i 75 Mbps. I calcoli presuppongono che si utilizzi in *uplink* la 16QAM con TBS di indice 21 o la QPSK con TBS di indice 10, mentre in *downlink* la 16QAM con indice 15 o QPSK con TBS di indice 9.

Modulation	MIMO usage	1.4MHz	3.0MHz	5.0MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Resource blocks		6	15	25	50	75	100
QPSK	Single stream	0.9	2.3	4.0	8.0	11.8	15.8
16QAM	Single stream	1.8	4.3	7.7	15.3	22.9	30.6
64QAM	Single stream	4.4	11.1	18.3	36.7	55.1	75.4
64QAM	2x2 MIMO	8.8	22.1	36.7	73.7	110.1	149.8

Tabella 4.3: *Bit rate* di picco (Mbps) in *downlink* con i *resource block* consideratiFigura 4.1: *Data rate* di picco in *downlink*.

Modulation	MIMO usage	1.4MHz	3.0MHz	5.0MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Resource blocks		6	15	25	50	75	100
QPSK	Single stream	1.0	2.7	4.4	8.8	13.0	17.6
16QAM	Single stream	3.0	7.5	12.6	25.5	37.9	51.0
64QAM	Single stream	4.4	11.1	18.3	36.7	55.1	75.4

Tabella 4.4: *Bit rate* di picco (Mbps) in *uplink* con i *resource block* considerati

Figura 4.2: *Data rate* di picco in *uplink*.

4.2 Categorie di Terminali

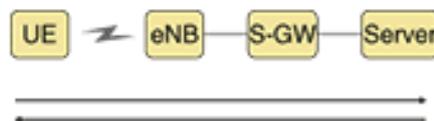
Lo standard 3GPP *Release* 8 definisce, per il sistema LTE, 5 categorie di terminali con i quali è possibile sperimentare differenti *data rate*. In particolare la categoria 1 è quella che permette di raggiungere al più un *bit rate* di 10 Mbps in *downlink* e 5 Mbps in *uplink*, mentre la categoria 5 è quella che permette di ottenere i *bit rate* più alti, di 300 Mbps in *downlink* e 75 Mbps in *uplink*. Tutte le categorie devono supportare le differenti ampiezze di banda da 1,4 MHz a 20 MHz e la modulazione 64QAM in *downlink*. Il supporto di tecniche MIMO non è richiesto a tutte le categorie; se ai terminali di categoria 1 non è richiesto, le categorie 2, 3 e 4 devono supportare il MIMO in configurazione 2x2, mentre per i terminali di categoria 5, al fine di supportare i massimi *data rates* previsti dallo standard 3GPP, è richiesto il supporto di tecniche MIMO in configurazione 4x4. Le categorie di terminali vengono mostrati in Tabella 4.5. La massima modulazione supportata in *uplink* è la 16QAM per le categorie dalla 1 alla 4, mentre per i terminali di categoria 5 è richiesto anche il supporto anche della la 64QAM.

	Category 1	Category 2	Category 3	Category 4	Category 5
Peak rate <i>downlink</i> (approximately)	10Mbps	50Mbps	100Mbps	150Mbps	300Mbps
Peak rate <i>uplink</i> (approximately)	5Mbps	15Mbps	50Mbps	50Mbps	75Mbps
Max bit received within TTI	10296	51024	102048	149776	299522
Max bit transmitted within TTI	5160	25456	51024	51024	75376
RF bandwidth	20MHz	20MHz	20MHz	20MHz	20MHz
Modulation <i>downlink</i>	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Modulation <i>uplink</i>	16QAM	16QAM	16QAM	16QAM	64QAM
Receiver diversity eNodeB	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
MIMO <i>downlink</i>	Optional	2x2	2x2	2x2	4x4

Tabella 4.5: Categorie di Terminali.

4.3 Latenza

Uno dei principali obiettivi della standardizzazione del sistema LTE è stata la sensibile riduzione, rispetto a quanto offerto dai sistemi precedenti, della latenza. Ci sono diverse applicazioni (voce, giochi in tempo reale, applicazioni interattive, etc...) che richiedono una latenza molto bassa rispetto all'elevato *data rate* necessario. La latenza può essere definita come il tempo necessario che un pacchetto IP, di dimensioni trascurabili, impiega per viaggiare dal terminale attraverso la rete al server internet, e tornare indietro. Tale misura si chiama *round trip time* ed è illustrata in Figura 4.3.

Figura 4.3: *round trip time*.

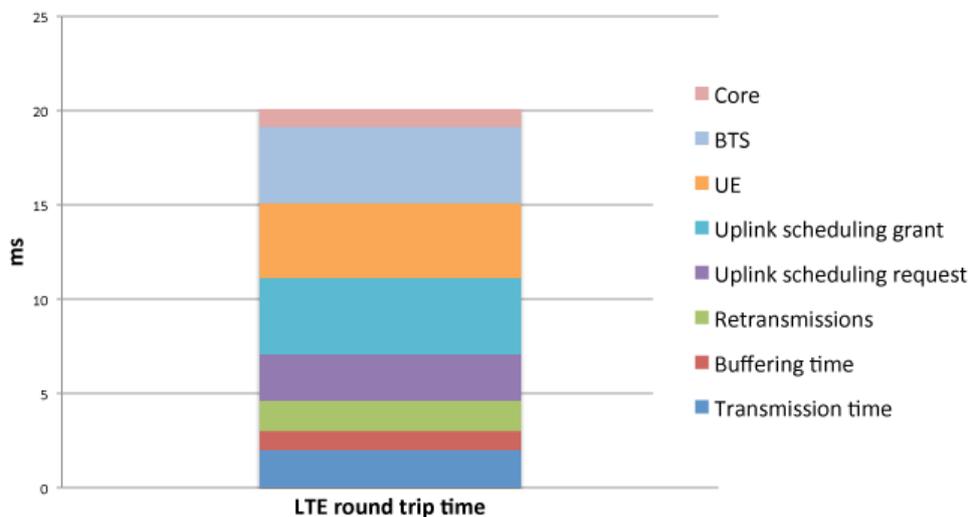
Il ritardo nel collegamento dell'*end-to-end* è calcolato nella Tabella 4.6 ed illustrato in Figura 4.4.

La dimensione del *frame* di 1 ms consente tempi di trasmissione molto piccoli e in media si deve aspettare un tempo pari a 0.5 ms per l'invio del successivo pacchetto. La

Delay component	Delay value
Transmission time uplink + downlink	2 ms
Buffering time (0.5 x transmission time)	$2 \times 0.5 \times 1 \text{ ms} = 1 \text{ ms}$
Retransmissions 10%	$2 \times 0.1 \times 8 \text{ ms} = 1.6 \text{ ms}$
Uplink scheduling request	$0.5 \times 5 \text{ ms} = 2.5 \text{ ms}$
Uplink scheduling grant	4 ms
UE delay estimated	4ms
e-NodeB delay estimated	4ms
Core Network	1 ms
Total delay with pre-allocated resource	13.6 ms
Total delay with scheduling	20 ms

Tabella 4.6: Componenti della latenza.

probabilità di ritrasmissione assunta è del 10% e prevede al massimo un tempo pari a 8 ms mentre il ritardo medio per l'invio della (*scheduling request*) è di 2.5 ms e della successiva concessione (*scheduling grant*) di 4 ms. Si assumerà inoltre un ritardo di preparazione dell'UE di 4 ms, un ritardo di elaborazione dell'eNB di 4 ms e un ritardo di CN di 1 ms.

Figura 4.4: *End-to-end round trip time* con latenza.

La media di un ciclo completo comprensivo della eventuale ritrasmissione può essere nettamente inferiore a 15 ms se ci sono risorse già assegnate e sarà di circa 20 ms se

includiamo lo *scheduling delay*. Il *round trip time* è basso per applicazioni con precisi requisiti di ritardo mentre può essere più alto se il ritardo di trasporto è più lungo, o se il server è lontano dalla rete principale.

4.4 Efficienza Spettrale

La larghezza di banda del sistema LTE ha un notevole impatto sull'efficienza spettrale e ciò è dovuto principalmente ai seguenti fattori:

1. Il guadagno di diversità con frequenza ottenibile dalla *scheduler* cresce all'aumentare della larghezza di banda poiché vi è più libertà di procedere nell'ottimizzazione della trasmissione. Per la larghezza di banda a 1.4 MHz tale guadagno è molto basso in quanto tutta la banda del canale è caratterizzata dallo stesso *fading*.
2. L'*overhead* relativo dei canali comuni e del canale di controllo diminuisce al crescere della larghezza di banda.
3. La banda di guardia relativa è maggiore con la banda a 1.4 MHz: sei blocchi di risorsa a 180 kHz a 1.08 MHz corrispondente al 77% di utilizzo rispetto alla spaziatura dei canali di 1.4 MHz. L'utilizzo è del 90% per tutte le altre frequenze.

I calcoli per l'efficienza spettrale relativa alle larghezze di banda di LTE sono mostrati nella Tabella 4.7 per il *downlink* e nella Tabella 4.8 per l'*uplink*. Il guadagno di *scheduling* dipende da fattori diversi tra cui gli ambienti di lavoro, i servizi e la struttura dell'antenna, possiamo comunque partire dal presupposto che tale guadagno in *uplink* è la metà del guadagno in *downlink* per tutte le larghezze di banda disponibili. I risultati sono riassunti nella Figura 4.5. Quando la banda è compresa fra i 5 MHz e i 20 MHz l'efficienza è quasi uguale mentre vi è una differenza del 15% per quella a 3 MHz. Se infine, la larghezza di banda è pari a 1.4 MHz l'efficienza diminuisce di circa il 35-40% in rispetto a quella a 10 MHz.

Il *throughput* in *downlink* a 20 MHz è $1.74 \text{ bps/Hz/cell} \times 20 \text{ MHz} = 35 \text{ Mbps}$, mentre il *throughput* per 1.4 MHz è $1.74 \text{ bps/Hz/cell} \times 60\% \times 1.4 \text{ MHz} = 1.5 \text{ Mbps}$. In conclusione LTE dovrebbe utilizzare la larghezza di banda più grande possibile. La motivazione risiede nel fatto che bisogna inizialmente massimizzare il *data rate* e successivamente ottimizzare l'efficienza spettrale dove possibile. Un *throughput* a 1.4 MHz di 1.5 Mbps che apparentemente può sembrare relativamente basso, è in realtà più

	1.4MHz	3.0MHz	5.0MHz	10MHz	20MHz
Resource blocks	6	15	25	50	100
Guard band overhead	23%	10%	10%	10%	10%
BCH overhead	2.9%	1.1%	0.7%	0.3%	0.2%
SCH overhead	2.5%	1.0%	0.6%	0.3%	0.2%
Frequency domain scheduling gain	5%	20%	35%	40%	45%

Tabella 4.7: Efficienza spettrale relativa alle larghezze di banda di LTE in *downlink*

	1.4MHz	3.0MHz	5.0MHz	10MHz	20MHz
Guard band overhead	23%	10%	10%	10%	10%
PUCCH overhead	16.7%	13.3%	8.0%	8.0%	8.0%
Frequency domain scheduling gain	2.5%	10%	17.5%	20%	22.5%

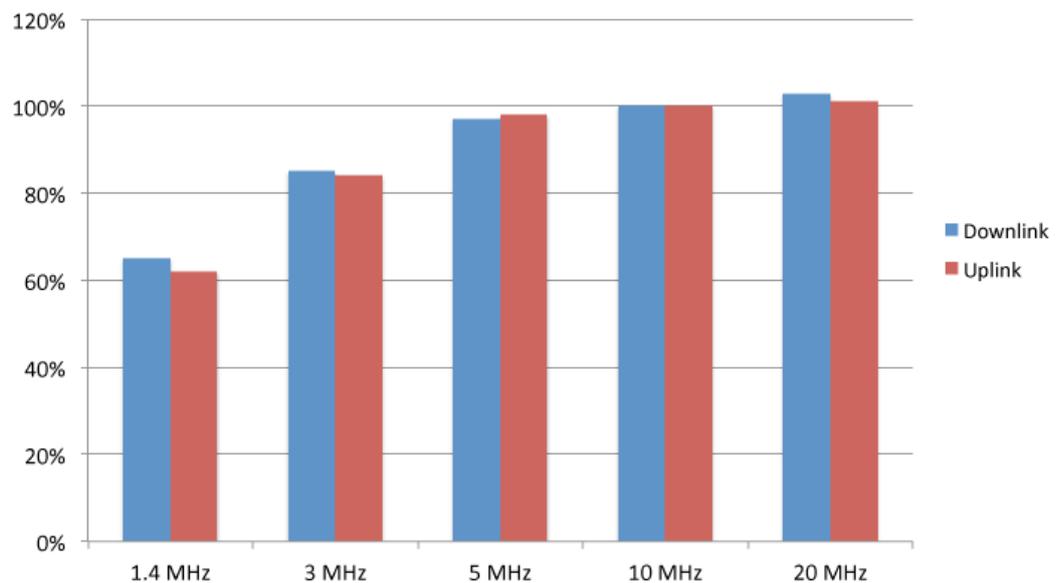
Tabella 4.8: Efficienza spettrale relativa alle larghezze di banda di LTE in *uplink*

Figura 4.5: Efficienza spettrale relativa a 10 MHz.

di quello che veniva offerto con i sistemi 2G precedenti (GPRS *General Packet Radio Service* e EDGE *Enhanced Data rates for GSM Evolution*).

L'obiettivo iniziale era quello di fornire LTE di un'efficienza spettrale almeno tre volte superiore a quello HSPDA-UMTS *Release 6* in *downlink* e due volte superiore a quella UMTS-HSUPA *Release 6* in *uplink*. Il risultato dei contributi di diversi operatori sono illustrati, con colori diversi, nella Figura 4.6 per il *downlink* e in *uplink* in Figura 4.7 riportati rispettivamente da [11] e [10].

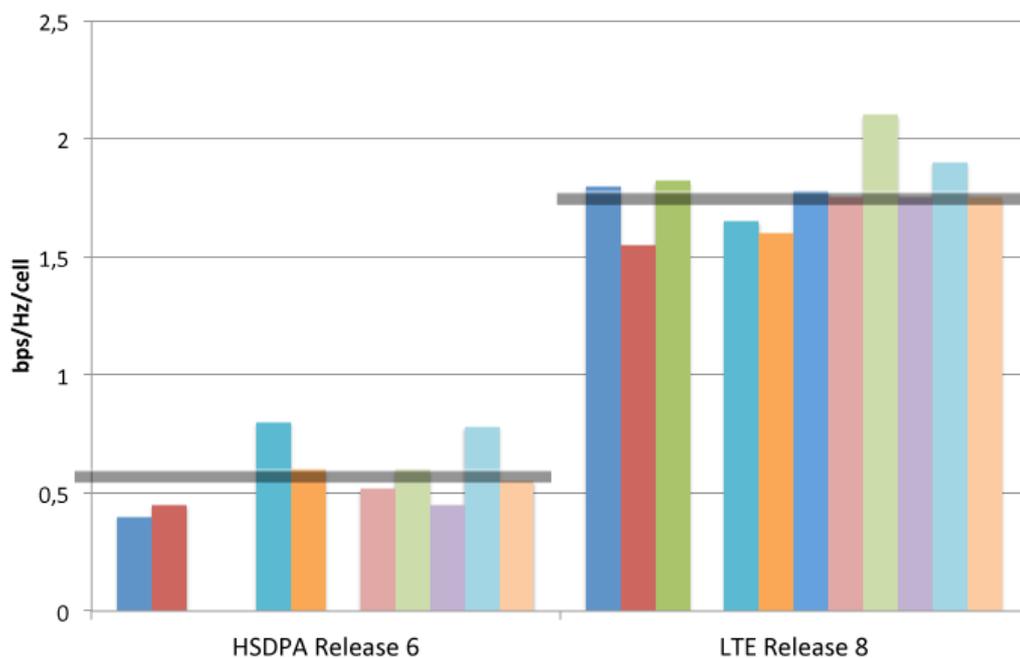


Figura 4.6: Risultato dei contributi di diverse società sull'efficienza spettrale in *downlink*.

Il guadagno nell'efficienza spettrale rispetto all'UMTS-HSPA può essere spiegato analizzando alcune caratteristiche della progettazione del sistema LTE. Innanzitutto utilizza la modulazione OFDM al fine di evitare l'interferenza *intra-cell* fornendo una elevata capacità rispetto alla HSDPA con ricevitore *rake* dove le trasmissioni CDMA soffrono molto di interferenza di *intra-cell* causate da propagazione *multi-path* (cammini multipli) e i codici stessi sono ortogonali solo nel *single path channel*. Oltre alla maggior quantità di propagazione in *multi-path* un altro vantaggio introdotto in LTE

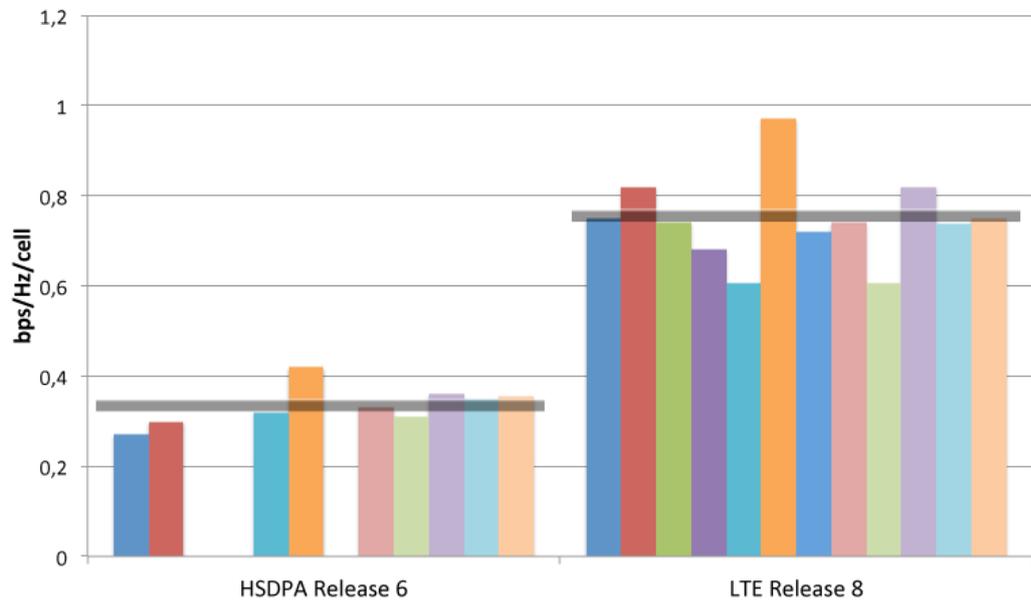


Figura 4.7: Risultato dei contributi di diverse società sull'efficienza spettrale in *uplink*.

è la programmazione nel dominio della frequenza, che non è possibile in un sistema basato su CDMA. Anche l'utilizzo della tecnica MIMO fornisce alcuni benefici di efficienza in quanto permette la cancellazione dell'interferenza *intra-cell* sia in *downlink* che in *uplink*. L'efficienza media in *downlink* aumenta da 0.55 a 1.75 bps/Hz/cell così come in *uplink* passa da 0.33 a 0.75 bps/Hz/cell nei sistemi LTE rispetto all'HSPA, che corrispondono esattamente ai risultati prefissati, dimostrando che LTE è in grado di soddisfare tali obiettivi.

Capitolo 5

Conclusioni

A seguito dell'analisi svolta, si può facilmente immaginare come l'introduzione dello standard LTE nel panorama delle tecnologie mobili a banda larga potrà introdurre un radicale miglioramento nelle capacità degli operatori di fornire servizi a valore aggiunto con i requisiti di *bit rate*, latenza e banda richiesti, ma con una gradualità, determinata dalla accurata scelta dei parametri e dalle procedure attuate nella standardizzazione, che ne fa il vero punto di forza. Proprio la caratteristica di essere un'evoluzione di 3G, infatti, facilita la coesistenza con altre tecnologie precedenti (come HSPA, UMTS, GSM/EDGE, etc...), permettendo, nella fase iniziale del passaggio da rete tradizionale 3G a rete evoluta completamente LTE, di mantenere una linea di continuità nell'erogazione di servizi all'utenza. In questo modo si rende possibile un continuo aggiornamento della rete operando per singoli segmenti, se non addirittura per singole celle. Per i consumatori, lo sviluppo di LTE si tradurrà nella disponibilità di nuovi servizi a banda larga mobile su protocollo IP, incluso il VoIP, offerti su tutta la rete nazionale. Ai venditori, invece, LTE permetterà lo sviluppo di un nuovo mercato in grado di bilanciare il declino dei profitti 3G. Più in particolare, per gli operatori, una rete *all-IP* con architetture flat semplificate ridurrà notevolmente i costi di gestione portando a un notevole incremento dei profitti. Lo standard, tuttavia, deve affrontare la concorrenza di altre tecnologie wireless a banda larga e deve perciò dimostrare di poter generare concreti vantaggi tecnici ed economici per convincere gli operatori a supportarlo. Tra gli antagonisti di LTE è facile individuare WiMAX, che tuttavia, pur essendo in vantaggio

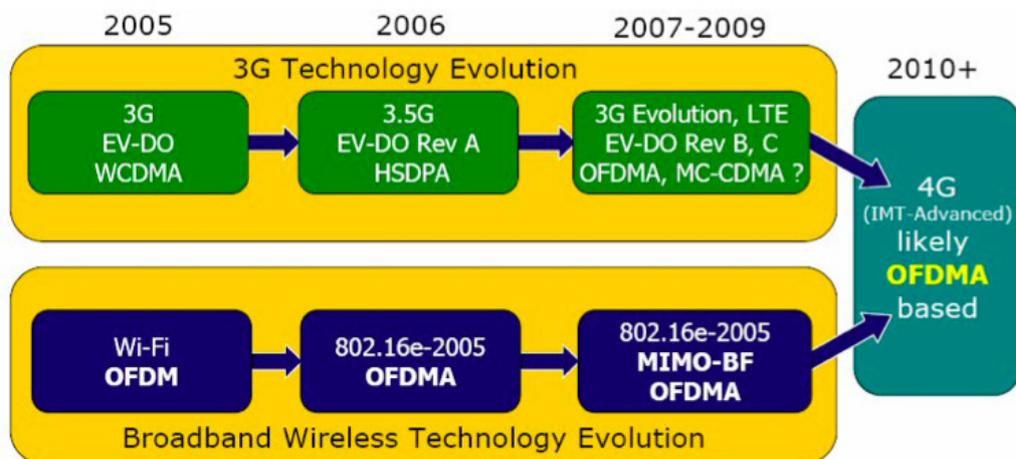


Figura 5.1: sviluppo futuro delle principali tecnologie di accesso wireless.

di almeno due anni in termini di sviluppo, soffre del fatto di non essere compatibile con UMTS come lo è LTE. Ad oggi, lo stesso WiMAX Forum [4], successivamente al riconoscimento dello standard Mobile WiMAX nella famiglia IMT-2000, prevede che la cosiddetta *Long Term Evolution* del WiMAX porterà a renderlo compatibile con IMT-Advanced. Qualcuno addirittura sostiene che questi due standard si possono fondere per creare un *chipset* capace di implementare entrambi, grazie al fatto che risultano simili per molti aspetti, con lo scopo di costituire una base comune per il futuro standard di quarta generazione (4G). La Figura 5.1 ci mostra lo sviluppo nel tempo delle tecnologie degli standard 3G e delle tecnologie wireless, attualmente presenti, con uno sguardo al futuro.

Bibliografia

- [1] 3GPP TR 25.892 3rd Generation Partnership Project. *Feasibility Study for Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement (Release 6)*. Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Dicembre 2004.
- [2] 3GPP TS 36.211 3rd Generation Partnership Project. *Physical Channels and Modulation (Release 8)*. Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Marzo 2010.
- [3] 3GPP TS 36.213 3rd Generation Partnership Project. *Physical Layer Procedures (Release 8)*. Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Giugno 2008.
- [4] WiMAX FORUM. <http://www.wimaxforum.org/>.
- [5] Harri Holma and Antti Toskala. *WCDMA for UMTS Radio Access For Third Generation Mobile Communications*. John Wiley & Sons, Ltd, 2000.
- [6] Harri Holma and Antti Toskala. *LTE for UMTS OFDMA and SC-FDMA Based Radio Access*. John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [7] QUALCOMM Incorporated. LTE TECHNICAL OVERVIEW. Technical report, Qualcomm Wireless Academy, 2009.
- [8] 3GPP A Global Initiative. <http://www.3gpp.org/>.
- [9] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries, 1990.

-
- [10] 3GPP TSG RAN R1-072261. *LTE Performance Evaluation - Uplink Summary*. Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Maggio 2007.
- [11] 3GPP TSG RAN R1-072444. *Summary of Downlink Performance Evaluation*. Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Maggio 2007.
- [12] Alessio Ricci, Columpsi Gennaro, and Marco Leonardi. *UMTS Tecniche e architetture per le reti di comunicazioni mobili multimediali*. Hoepli, 2009.