



Giugno 2015

Scheda informativa LTE e LTE-Advanced

LTE: Long Term Evolution di UMTS

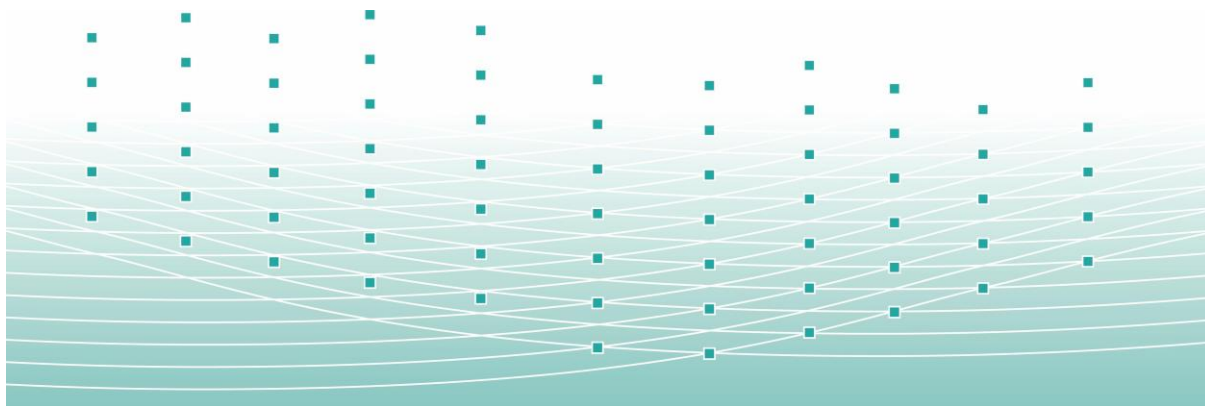
Sintesi

L'acronimo LTE (*Long Term Evolution*) è impiegato per indicare la tecnologia successiva al diffuso standard di radiocomunicazione mobile UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*). Questa tecnologia è stata introdotta per far fronte alla crescita repentina del traffico mobile di dati che, sinora, è raddoppiato a livello mondiale a ritmo quasi annuale. In numerosi Paesi, compresa la Svizzera, è duplicato in soli sette mesi.

La tecnologia LTE include un'interfaccia radio ottimizzata per la radiocomunicazione mobile, già impiegata con profitto nelle reti per la radiodiffusione digitale terrestre. Il suo utilizzo comporta la riorganizzazione delle stazioni esistenti, l'allestimento di stazioni di base supplementari e nuovi terminali (cellulari, tablet, PC, modem, router). Fra le caratteristiche distintive di questa tecnologia vi è una maggiore velocità di trasmissione nell'interfaccia radio tra la stazione di base e il terminale. In questo modo aumenta la capacità di trasmissione della rete mobile, è possibile servire un maggior numero di utenti o fornire velocità più elevate. Tra l'altro, la riduzione dell'intervallo di trasmissione dati (latenza) migliora considerevolmente la reattività della rete. Inoltre, rispetto allo standard UMTS, la tecnologia LTE richiede un minor consumo di energia da parte del terminale e consente dunque di prolungare i tempi di attività del servizio dati.

Lo sviluppo dell'interfaccia radio è strettamente legato a quello della rete centrale (interconnessione delle stazioni di base), anche indicato con l'acronimo SAE (*Services Architecture Evolution*). Fra gli obiettivi di LTE e SAE vi è il miglioramento delle prestazioni per l'utente e la riduzione dei costi per ogni bit trasmesso.

Senza alcuna pretesa di esaustività, questa scheda informativa vuole offrire una panoramica sull'interfaccia radio LTE e i relativi sviluppi, con qualche accenno alla realizzazione della rete e ai servizi.



Indice

1	Abbreviazioni	1
2	Panoramica	3
3	Frequenze e concessioni	5
4	Tecnologia dell'interfaccia radio LTE	5
4.1	Panoramica	5
4.2	Downlink	11
4.3	Uplink.....	12
4.4	Efficienza dello spettro	13
4.5	Aggregazione delle portanti (<i>carrier aggregation</i>).....	14
4.6	MIMO.....	15
5	Reti di radiocomunicazione mobile	16
6	Servizi	18
7	Bibliografia	19

1 Abbreviazioni

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AIPN	<i>All-IP Network</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
APN	<i>Access Point Name</i>
bps	<i>bit al secondo</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CMR	Conferenza mondiale delle radiocomunicazioni (UIT)
DECT	<i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DVB-T	<i>Terrestrial Digital Video Broadcast</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
eMBMS	<i>Evolved Multimedia Broadcast/Multicast Service</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System (EPS = E-UTRAN + EPC)</i>
E-UTRA	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
EV-DO	<i>Evolution-Data Optimized</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access (accesso multiplo a divisione di frequenza)</i>
FTTx	<i>Fiber To The x (Home, Building, Curb ...)</i>
GBR	<i>Guaranteed Bitrate (velocità minima di trasmissione dati garantita)</i>
GHz	Gigahertz (10^9 Hertz)
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HetNet	<i>Heterogeneous Network</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
ICIC	<i>Inter Cell Interference Coordination</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMS	<i>IP Multimedia System</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications (Telecomunicazioni mobili internazionali)</i>
IP	<i>Internet Protocol (protocollo Internet)</i>
LIPTO	<i>Local Internet Protocol Traffic Offload</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>LTE-Advanced</i>
MBMS	<i>Multimedia Broadcast/Multicast Service</i>
MHz	Megahertz (10^6 Hertz)
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output (sistemi di antenne multiple)</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PER	<i>Packet error rate (tasso di errore sui pacchetti)</i>
PRB	<i>Physical Resource Block (blocchi di risorse fisiche)</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>

QoS	<i>Quality of Service</i> (qualità del servizio)
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
SAE	<i>Services Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SDMA	<i>Space Division Multiple Access</i> (accesso multiplo a suddivisione di spazio)
SFN	<i>Single-Frequency Network</i>
SIPTO	<i>Selected Internet Protocol Traffic Offload</i>
SIR	<i>Signal to Interference Ratio</i> (rapporto segnale-interferenza)
SMS	<i>Short Message Service</i>
SON	<i>Self Organising Network</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UFCOM	Ufficio federale delle comunicazioni
UIT	Unione internazionale delle telecomunicazioni
UIT-R	Settore delle radiocomunicazioni dell'UIT
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i> (trasmissione vocale tramite protocollo Internet)
VoLTE	<i>Voice over LTE</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

2 Panoramica

Diversi studi di mercato indipendenti prevedono una crescita vertiginosa del traffico mobile di dati entro il 2030. Fino a ora, il traffico dati sulle reti mobili è praticamente raddoppiato ogni anno, una tendenza di crescita che in numerosi Paesi si mostra ancora più pronunciata. Per far fronte alle nuove necessità, la sola messa a disposizione di nuove frequenze per la radiocomunicazione mobile non è sufficiente: oltre a infittire le celle radio è necessario aumentare anche l'efficienza nell'utilizzo dello spettro.

Allo scopo di aumentare la velocità di trasmissione dati e l'efficienza dello spettro delle frequenze, l'industria ha sviluppato il nuovo sistema di radiocomunicazione mobile LTE, versione evoluta delle tecnologie 3GPP (UMTS, HSPA, HSPA+). La LTE mira a un'efficienza dello spettro di tre o quattro volte superiore all'UMTS-HSPA (*High Speed Packet Access*), a costi di rete relativamente inferiori (ovvero riducendo il costo di ogni bit trasmesso).

Questa tecnologia ha fatto il suo ingresso sul mercato nel 2010. La figura 1 illustra la sequenza temporale di introduzione delle diverse versioni (*release*) e le relative caratteristiche.

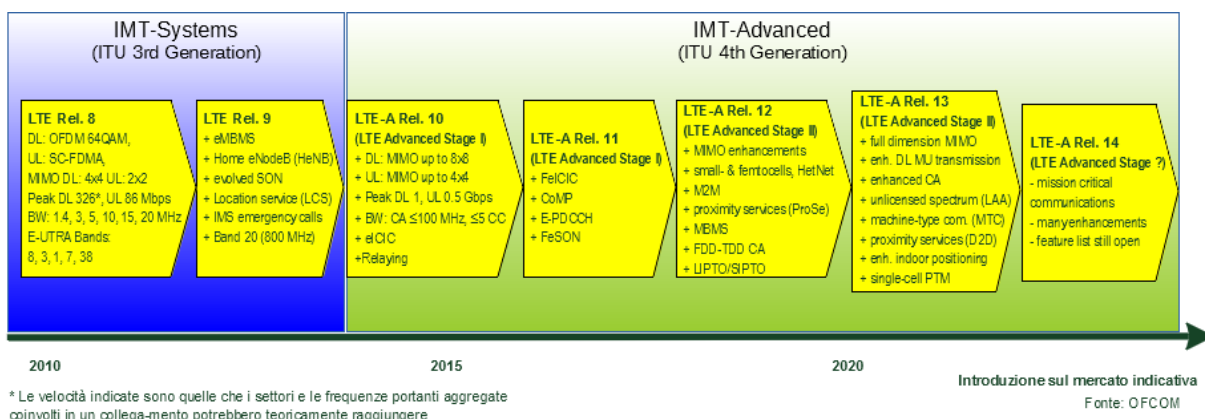


Figura 1: Sequenza temporale di introduzione delle diverse versioni dello standard LTE e le relative caratteristiche

Secondo i requisiti che il settore delle radiocomunicazioni dell'UIT (UIT-R) ha fissato per le interfacce radio, le tecnologie UMTS, HSPA, HSPA+ e LTE rientrano nella categoria dei sistemi di radiocomunicazione mobile di terza generazione (3G). La tecnologia LTE è pertanto considerata come "3.9G" o "3.99G". La denominazione LTE è utilizzata per riferirsi alle versioni 8 e 9 di questo standard. L'evoluzione successiva della LTE è denominata LTE-Advanced (LTE-A) ed è avvenuta in due fasi. La prima fase della LTE-A include le versioni dello standard 10 e 11, la seconda fase della LTE-A le versioni 12 e 13. La LTE-A soddisfa i requisiti dell'UIT-R per le interfacce radio di quarta generazione (4G) ed è anche chiamata IMT-Advanced. Lo sviluppo della versione 12 si è concluso a metà 2015.

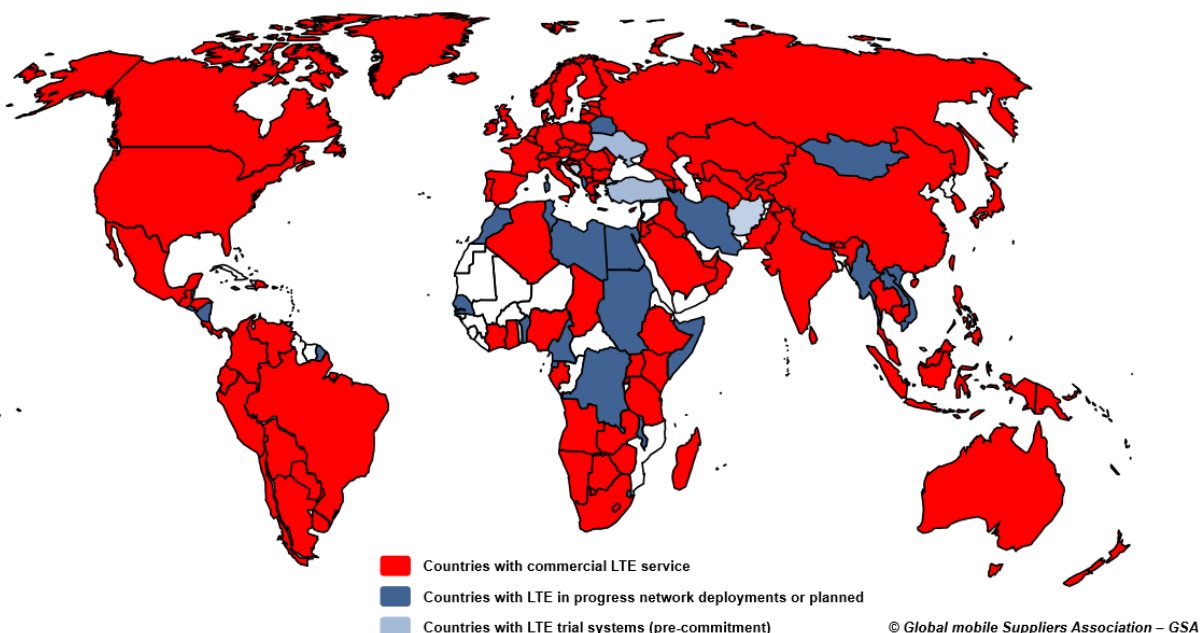
All'inizio del 2011 le reti commerciali LTE in funzione erano circa 15 in 11 Paesi, di cui 8 nell'Europa occidentale; altre reti erano pianificate.

La prima messa in funzione di una rete LTE a scopo commerciale in Svizzera risale alla fine del 2012, la terza, e finora ultima, è avvenuta a metà 2013. Da allora, le reti LTE sono state continuamente ampliate e rinnovate. Nel primo trimestre 2015, almeno due operatori su tre garantivano una copertura della popolazione svizzera superiore al 92 per cento¹.

¹ Dati degli operatori risalenti a maggio 2015.

Stando ai dati della *Global Suppliers Association (GSA)*, il numero di reti LTE commerciali operative a livello mondiale si attestava a 393 nell'aprile 2015 (di cui 54 LTE TDD²) e altri 200 operatori circa progetterebbero la realizzazione di una rete LTE (cfr. Figura 2).

Con i suoi circa 7 miliardi di terminali a livello globale (numero delle carte SIM e dei contratti di collegamento in grado di supportare la rete LTE) con standard 3GPP, la LTE ha chiaramente superato altri standard di radiocomunicazione mobile concorrenti come CDMA2000/EV-DO o IEEE/WiMAX (cfr. figura 9).



Fonte: www.gsacom.com ³

Figura 2: Reti LTE commerciali e pianificate su scala mondiale – stato maggio 2015

Lo standard LTE supporta tutte le frequenze di radiocomunicazione mobile. La prima introduzione della LTE è avvenuta nella banda 3 E-UTRA (1800 MHz), all'epoca impiegata per il GSM e tutt'ora in uso (cfr. Tabella 1). Così è iniziata la graduale sostituzione del GSM con la LTE. La banda 3 ha permesso che la LTE fosse introdotta senza dover aggiungere in un primo tempo antenne supplementari alle stazioni di base, che sarebbero state invece necessarie se la scelta fosse ricaduta sulle bande di frequenza 20 o 7 (800 MHz, 2.6 GHz). Inoltre, la banda 3, con una larghezza di 2 x 75 MHz, offre sufficiente capacità da ripartire tra GSM e LTE. Questa elevata flessibilità consente l'impiego di stazioni di base compatibili con Multi-RAT, capaci di supportare tutte le tecnologie di radiocomunicazione mobile (GSM, UMTS/HSPA+, LTE-x) e di renderle disponibili, in base alle necessità, in modo statico o dinamico. I primi terminali supportavano già, in parte, le bande di frequenza 20 e/o 7 (cfr. Tabella 1).

A differenza dell'UMTS, nel caso dei terminali compatibili con la LTE funzionano di norma entrambe le modalità duplex per la trasmissione simultanea⁴ di dati dalla stazione di base al terminale, e viceversa: FDD (*Frequency Division Duplex*) e TDD (*Time Division Duplex*). Molti terminali supportano entrambe le modalità. Questo permette di sfruttare le economie di scala nella produzione dei componenti dei terminali e degli stessi terminali. Avendo accesso a reti che sfruttano diverse modalità duplex, gli utenti possono dunque fruire del roaming nel mondo intero, mentre gli operatori di rete hanno potenzialmente a disposizione uno spettro di frequenze più ampio.

² http://www.gsacom.com/downloads/pdf/Snapshot_LTE-TDD_extract_GSA_Evolution_to_LTE_report_090415.php4

³ http://www.gsacom.com/downloads/pdf/LTE_World_map_393_LTE_networks_launched_090415.php4

⁴ Almeno approssimativamente.

3 Frequenze e concessioni

Nel febbraio 2012 la Commissione federale delle comunicazioni ComCom ha messo all'asta tutte le frequenze di radiocomunicazione mobile disponibili all'epoca⁵. I tre operatori di rete mobile svizzeri si sono aggiudicati tutti i blocchi di 5 MHz delle bande di frequenza disponibili riportate nella Tabella 1. Il ricavato dell'asta ha fatto confluire 996 milioni di franchi svizzeri nelle casse della Confederazione.

Bande di frequenza	Bande operanti con E-UTRA	Larghezza di banda	Modalità duplex	Versione LTE compatibile
800 MHz	20	2x30 MHz	FDD	9
900 MHz	8	2x35 MHz	FDD	8
1800 MHz	3	2x75 MHz	FDD	8
2100 MHz	1	2x60 MHz	FDD	8
2600 MHz	7	2x70 MHz	FDD	8
	38	1x45 MHz	TDD	
	Totale	585 MHz		

Tabella 1: Bande di frequenza per la tecnologia LTE in Europa

In molti Paesi di tutti i continenti si prevede di destinare ai sistemi IMT ulteriori bande per la radiocomunicazione mobile nelle gamme dei 700 MHz, 1400 MHz e 3.5 GHz: in questo modo si potrebbe raggiungere una larghezza di banda lorda complessiva di 525 MHz. La decisione in merito sarà presa durante la Conferenza mondiale delle radiocomunicazioni⁶ CMR-15 del novembre 2015. Il passo successivo sarà decidere se, per le telecomunicazioni mobili internazionali (IMT), si debbano utilizzare anche le bande di frequenza comprese tra circa 6 GHz e 100 GHz.

4 Tecnologia dell'interfaccia radio LTE

4.1 Panoramica

Dal 2005 il progetto 3GPP definisce i requisiti (*requirements*) per la LTE e la LTE-Advanced sulla base dei requisiti dell'UIT-R per IMT-2000 e IMT-Advanced. Gli obiettivi tecnici di sviluppo iniziali per la LTE possono essere sintetizzati come segue:

- aumento significativo della velocità di trasmissione in downlink fino a 100 Mbit/s per una larghezza di banda di 20 MHz, ossia un aumento dell'efficienza dello spettro delle frequenze teoricamente fino a 5 bit/s/Hz/cella con un'antenna trasmittente e due antenne riceventi (un'efficienza dello spettro di 3 o 4 volte superiore all'UMTS/HSDPA Rel. 6);
- aumento significativo della velocità di trasmissione in uplink fino a 50 Mbit/s per una larghezza di banda di 20 MHz, ossia un aumento dell'efficienza dello spettro teoricamente fino a 2.5 Bit/s/Hz/cella con un'antenna trasmittente e due antenne riceventi (un'efficienza dello spettro di 3 o 4 volte superiore all'UMTS/HSDPA Rel. 6);
- utilizzo flessibile dello spettro grazie alla possibilità di regolare la larghezza di banda dei canali a 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz;
- tempo di latenza inferiore a 5 ms nell'interfaccia radio dal terminale alla stazione di base. Il tempo di propagazione andata-ritorno deve essere inferiore ai 10 ms;
- utilizzo flessibile dello spettro grazie a modalità duplex FDD e TDD;
- velocità di trasmissione dati superiore all'UMTS ai margini delle celle;
- mobilità fino a 500 km/h (ottimizzata per 0–15 km/h);
- compatibilità con diversi requisiti in materia di qualità di servizio (QoS) e mobilità;
- integrazione di MIMO nello standard;
- bassi costi di trasmissione per bit inviato tramite l'interfaccia radio;
- architettura semplice, adattabile, meno elementi di rete, interfacce aperte;
- minor consumo di energia possibile dei terminali (elevata autonomia).

⁵ <http://www.comcom.admin.ch/themen/00783/index.html?lang=it>

⁶ <http://www.itu.int/en/ITU-R/conferences/wrc/2015/Pages/default.aspx>

Le principali innovazioni nella rete centrale sono rappresentate dall'architettura orizzontale, decentrata, basata sul protocollo Internet, nonché dall'abbandono della commutazione di circuito; le reti che utilizzano soltanto la trasmissione a pacchetto sono chiamate reti All-IP (AIPN). La caratteristica principale è l'estrema semplificazione della struttura gerarchica delle componenti di rete in confronto alle reti a commutazione di circuito (2G e 3G). Obiettivo di questa architettura è una riduzione dei costi grazie a una maggiore scalabilità (cfr. cap. 5 e 6).

Le principali novità dell'interfaccia radio LTE sono l'introduzione di:

- modulazione OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e della procedura d'accesso ai canali OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) in downlink;
- SC-FDMA (*Single Carrier – Frequency Division Multiple Access*) in uplink;
- larghezze di banda graduabili.

La tecnologia SC-FDMA rappresenta un metodo affine all'OFDMA e consente di utilizzare il sistema adeguando la larghezza di banda del canale in una gamma che si estende da 1,4 MHz a 20 MHz. Ciò consente un impiego flessibile della tecnologia LTE nelle larghezze di banda di volta in volta assegnate e, diversamente dall'UMTS, non richiede un blocco unitario minimo di 5 MHz o suoi multipli.

La flessibilità nella larghezza di banda del canale permette la riorganizzazione⁷ graduale dell'infrastruttura disponibile (*refarming*) e delle reti nonché l'impiego con attribuzioni di frequenze frammentarie, una circostanza usuale, ad esempio, nel coordinamento delle frequenze preferenziali per i GSM nelle zone di confine.

La tecnologia che si cela dietro l'acronimo LTE è complessa: grazie alla flessibilità della larghezza di banda del canale e a una suddivisione molto fine dei segnali portanti, sia in rapporto al tempo che alla frequenza, la LTE consente una migliore efficienza in confronto alle interfacce radio precedentemente utilizzate nelle reti di radiocomunicazione mobile pubbliche.

Grazie alla nuova procedura d'accesso ai canali OFDMA e SC-FDMA, lo standard LTE consente adeguare rapidamente i parametri radio alle caratteristiche istantanee del canale radio, e ciò in un intervallo di trasmissione (TTI) dell'ordine di un millisecondo (cfr. Figura 3: Esempio di ripartizione dei blocchi di risorse (frequenze e tempo) fra tre utenti

Quest'attribuzione è effettuata da un algoritmo di *scheduling*, che opera nella stazione di base per allocare le risorse. Il terminale trasmette alla stazione di base i valori di misurazione mediante l'apposito canale di controllo. Dall'altro canto la stazione di base segnala le allocazioni delle risorse ai terminali della cella radio nel relativo canale di controllo. L'algoritmo di *scheduling* non è standardizzato, mentre lo sono la rappresentazione dei valori di riferimento e i protocolli nell'interfaccia radio.

A partire dalla versione 8/9 la LTE ha superato per la prima volta la velocità di 100 MBit/s in downlink: il nuovo standard di radiocomunicazione mobile promette, almeno in teoria, di raggiungere velocità di trasmissione dati massime fino a 326 MBit/s in downlink e 86 MBit/s in uplink. Dalla versione 10/11 della LTE sono teoricamente possibili velocità sino a 1 Gbit/s in downlink e a 500 Mbit/s in uplink. Tale incremento è reso possibile soprattutto dal ricorso a sistemi di antenne multiple (MIMO) che impiegano l'accesso multiplo a suddivisione di spazio (SDMA) (cfr. cap. 4.8 e 4.10). Ciò permette di impiegare fino a 8 antenne per ogni stazione di base e terminale (8x8 MIMO) in downlink e fino a 4 antenne per ogni stazione di base e terminale in uplink (4x4 MIMO).

Fin dalla prima fase di potenziamento è stato possibile raggiungere velocità di 100 MBit/s. Non solo la LTE offre velocità di trasmissione nettamente superiori e una migliore efficienza dello spettro rispetto alle tecnologie precedenti, ma anche una velocità di trasmissione dei pacchetti dati dal mittente al destinatario (tempo di latenza) di al massimo 5 millesimi di secondo, contro i 70–140 millesimi di secondo del tempo di latenza medio dell'UMTS. Con la LTE si è potuto ridurre anche la dispersione del tempo di latenza (*delay jitter*).

⁷ Per *refarming* si intende la migrazione da una tecnologia di radiocomunicazione a un'altra, di solito da una tecnologia precedente a una più recente.

Per funzionare correttamente, i servizi in tempo reale come la trasmissione vocale tramite protocollo Internet (VoIP) e il gioco richiedono che il tempo di latenza sia breve e, per quanto possibile, costante. Per questo motivo si è dovuto ridurre considerevolmente anche il tempo necessario per il passaggio tra le celle radio (*handover*), una prestazione ottenuta grazie a EPS e alla gerarchia orizzontale della rete centrale. La maggiore reattività della rete è determinante per la velocità percepita, una sensazione per la quale un'elevata velocità di trasmissione dei dati non è di per sé sufficiente. Rispetto all'UMTS, lo standard LTE dovrebbe agevolare fortemente il consumo di video.

Le migliorie apportate al MBMS permetteranno che in futuro la LTE si affermi come piattaforma per la diffusione dei servizi di radiodiffusione nelle reti di radiocomunicazione mobile. A partire dalla versione 10 l'evoluzione di eMBMS, denominata LTE-Broadcast, ha il potenziale di imporsi in certi mercati quale alternativa al DVB-T e ad altre tecnologie di radiodiffusione.

4.2 Downlink

Per il collegamento in downlink, è stato scelto l'OFDMA, un'applicazione dell'OFDM per l'implementazione di un sistema di accesso multiplo. Ciò che lo distingue dall'OFDM è che i blocchi delle singole frequenze sottoportanti sono attribuiti a un terminale a un momento preciso (cfr. figura 3).

Le attribuzioni si succedono rapidamente (1 ms) e guadagnano quindi molta flessibilità. Questi frammenti di frequenza/tempo delle sottoportanti sono chiamati blocchi di risorse fisiche (*Physical Resource Blocks PRB*). Altri dettagli sulla struttura e i parametri sono riportati nel riquadro grigio qui di seguito.

Con l'OFDM, in confronto ad altri sistemi a banda larga, i ricevitori sono stati semplificati notevolmente, in quanto la correzione delle distorsioni del canale è relativamente semplice. La scelta dell'OFDM è stata dettata dall'esigenza di larghezze di banda variabili da 1,4 MHz a 20 MHz. Con larghezze di banda relativamente ridotte e velocità di trasmissione elevate, il CDMA perde quanto aveva di vantaggioso.

Un altro punto a favore dell'OFDM in downlink è la relativa facilità nello stabilire reti isofrequenziali, in altre parole l'agevole utilizzo della stessa frequenza nelle celle adiacenti. Le reti isofrequenziali risultano efficienti soprattutto per la trasmissione dei servizi di radiodiffusione mediante eMBMS. L'impiego solo in downlink delle bande di frequenza TDD e le nuove bande di frequenza solo per il downlink sono da ricollegare all'asimmetria del traffico dovuta allo streaming di video. La crescita del consumo di video comporta infatti un'asimmetria nel traffico in downlink e uplink. Le asimmetrie osservate (downlink rispetto all'uplink) hanno raggiunto nel 2012 fattori dell'ordine di 7 a 11 volte.

Uno svantaggio dell'OFDM è la necessità di un amplificatore di trasmissione estremamente lineare. Ciò è determinato da un processo che richiede un elevato fattore PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) del segnale di modulazione. Gli amplificatori che garantiscono un'elevata linearità hanno un costo e un consumo energetico elevato, entrambi aspetti che incidono sui costi di allestimento ed esercizio di una stazione di base. Nell'economia generale prevalgono tuttavia i vantaggi per i terminali più semplici.

Le caratteristiche della LTE rendono possibile un adattamento molto flessibile alle situazioni più disparate:

- diversi ambienti (spazi interni, aree urbane, suburbane e rurali);
- diverse condizioni di mobilità (utilizzo stazionario o nomade, fino a 500 km/h);
- differenti raggi delle celle, da hotspot di 10 metri fino a diverse decine di chilometri;
- bande di frequenza da 400 MHz a 4 GHz.

4.3 Uplink

Per il collegamento in uplink, la tecnologia scelta è quella dell'accesso multiplo a divisione di frequenza con una sola portante (SC-FDMA) che presenta il vantaggio di produrre potenze relativamente basse nei canali adiacenti anche se l'amplificatore finale non è completamente lineare. La tecnologia SC-FDMA non richiede un'elevata linearità dell'amplificatore di trasmissione del terminale, permet-

tendo dunque di contenere il consumo di corrente. Per i terminali alimentati da accumulatori, un elevato fabbisogno elettrico costituirebbe un inconveniente enorme, che la tecnologia SC-FDMA permette di evitare elegantemente. Il consumo di un terminale SC-FDMA è all'incirca tre volte inferiore rispetto a un apparecchio OFDMA che presenta lo stesso tasso d'errore sui *bit*.

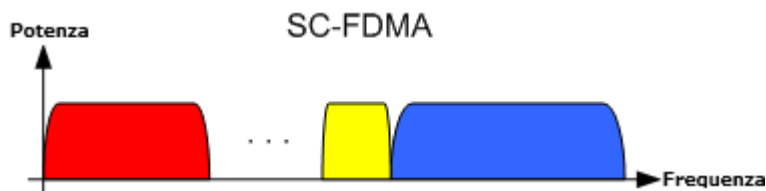


Figura 4: Rappresentazione schematica dello spettro di trasmissione in uplink. I vari colori simboleggiano lo spettro occupato da ogni utente.

Con la tecnica SC-FDMA il ricevitore della stazione di base necessita di un equalizzatore (*equalizer*) relativamente complesso. Tuttavia, questa tecnica resiste meglio dell'OFDMA agli scarti di frequenze portanti. In questo modo, la complessità del collegamento in downlink è stata in gran parte trasferita alla stazione di base, aprendo così la strada a terminali meno cari e con un'efficienza energetica maggiore. La tecnologia d'accesso multiplo SC-FDMA in uplink ha costituito una vera novità nel mondo della radiocomunicazione mobile.

La stazione di base attribuisce ad ogni utente una parte del canale di frequenza ascendente per una durata determinata. Quest'attribuzione avviene, come per il canale discendente, in intervalli del tempo di trasmissione (TTI) di un millisecondo (figura 3). La figura 4 riporta l'esempio del segnale di tre utenti ricevuto dalla stazione di base.

Analogamente all'OFDM, i dati sono ripartiti sulle sottoportanti; una trasformazione di Fourier (FT) viene applicata come precorrezione. Per questo motivo, nel caso dell'SC-FDMA si parla di *quasi-sottoportanti*. Le quasi-sottoportanti utilizzate da un utente sono sempre adiacenti e formano pertanto un blocco unico. In tal modo i singoli utenti vengono modulati su una propria frequenza portante (una *single carrier* appunto) nel canale ascendente. La combinazione di più utenti in uplink si traduce in un accesso FDMA semplice, come illustrato nella figura 4. La ripartizione delle quasi-sotto-portanti tra i vari utenti è effettuata dall'algorithm di *scheduling* (cfr. 4.1) in modo che a un determinato momento, nella stessa cella, lo stesso blocco di sottoportanti possa essere utilizzato da un unico terminale.

4.4 Efficienza dello spettro

Lo sviluppo dell'efficienza media dello spettro in una cella radio in downlink nell'evoluzione delle diverse tecnologie di radiocomunicazione mobile e delle relative versioni è illustrato nella figura 5. L'efficienza dello spettro costituisce un'unità di misura per la capacità di trasmissione di un'interfaccia radio in bit al secondo in rapporto alla larghezza di banda (Hertz) per cella (bit/s/Hz/cell), ripartita fra gli utenti che fanno capo a una data cella radio.

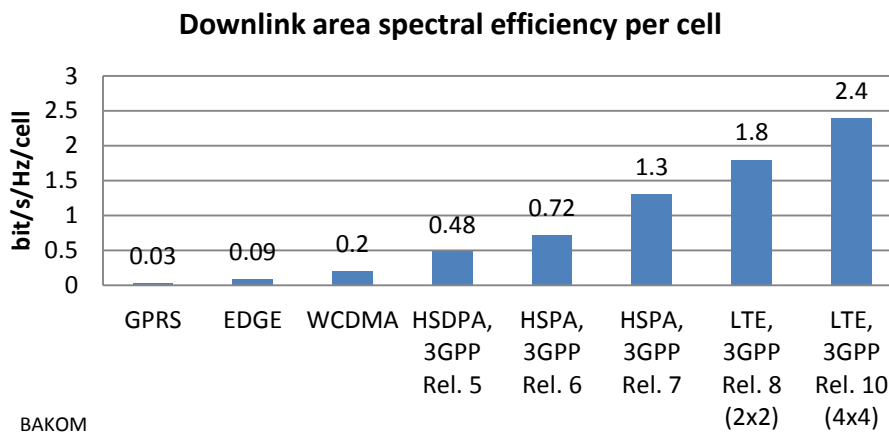


Figura 5: Efficienza dello spettro nelle diverse tecnologie di radiocomunicazione mobile (3GPP)

Esempio di efficienza dello spettro: la larghezza di banda di un canale è di 5 MHz e l'efficienza media dello spettro corrisponde a 1,8 bit/s/Hz/cella, per ogni due antenne trasmettenti e riceventi (MIMO 2x2). La capacità di trasmissione *media* C di cui tutti gli utenti di questa cella possono usufruire mediante la larghezza di 5 MHz del canale risulta quindi pari a 9 megabit al secondo in downlink:

$$C = 5 \text{ MHz} \cdot 1.8 \frac{\text{bit}}{\text{s} \cdot \text{Hz}} = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \cdot 1.8 \frac{\text{bit}}{\text{s} \cdot \text{Hz}} = 9 \cdot 10^6 \frac{\text{bit}}{\text{s}} = 9 \text{ Mbps}$$

Se gli altri fattori restano invariati, con una larghezza di banda del canale pari a 10 MHz, la capacità di trasmissione *media* a disposizione raddoppia a 18 Mbps. Bisogna tuttavia distinguere questo valore dalla capacità di trasmissione media per utente, che dipende dalla qualità di ricezione dell'apparecchio dell'utente e/o dalla quantità di traffico generato dagli altri utenti.

L'efficienza spettrale *massima* o la capacità di trasmissione *massima*, fornita a scopi di marketing o per dimostrare la prestazione di un sistema, si dimostra irrilevante nella prassi.

4.5 Aggregazione delle portanti (*carrier aggregation*)

Dalla versione 10 della LTE in avanti possono essere aggregati in uplink o downlink fino a 5 canali adiacenti all'interno di una banda di frequenza (*intra-band contiguous* – figura 7). Il numero di portanti aggregati in uplink o downlink può variare. I canali aggregati vengono messi a disposizione degli strati più elevati della rete dal sistema in modo logico come canale unico, con una capacità corrispondente più elevata.

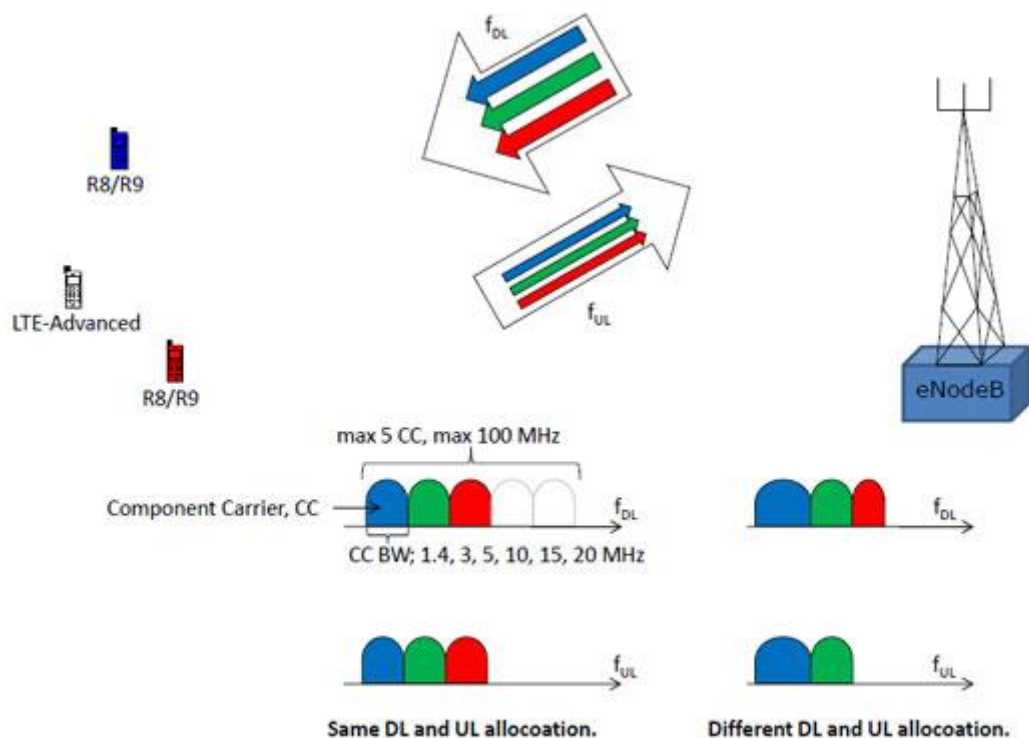


Figura 6: Aggregazione delle portanti dalla versione 10 della LTE

A partire dalla versione 11 della LTE è possibile aggregare in downlink e uplink un numero variabile di canali, fino a un massimo di 5, non soltanto della stessa banda di frequenza, ma anche di bande diverse (*inter-band non-contiguous*, cfr. figura 7). [7]

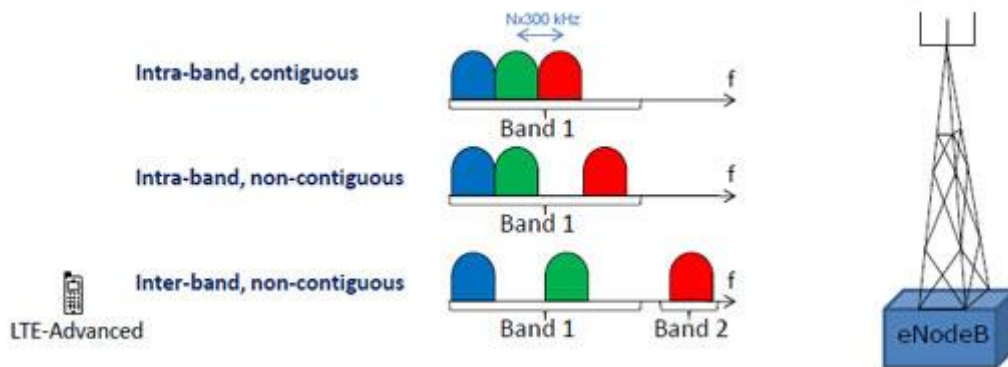


Figura 7: Aggregazione delle portanti dalla versione 11 della LTE

).

Tempo		User 2	User 2		User 1		User 2		
<input type="checkbox"/>	User 3	User 2		User 2		User 3	User 2	User 3	User 2
	User 1	User 2	User 3	User 3	User 3	User 1	User 3	User 3	
	User 1	User 2	User 3	User 1	User 2				

Frequenza →

Figura 3: Esempio di ripartizione dei blocchi di risorse (frequenze e tempo) fra tre utenti

Quest'attribuzione è effettuata da un algoritmo di *scheduling*, che opera nella stazione di base per allocare le risorse. Il terminale trasmette alla stazione di base i valori di misurazione mediante l'apposito

canale di controllo. Dall'altro canto la stazione di base segnala le allocazioni delle risorse ai terminali della cella radio nel relativo canale di controllo. L'algoritmo di *scheduling* non è standardizzato, mentre lo sono la rappresentazione dei valori di riferimento e i protocolli nell'interfaccia radio.

A partire dalla versione 8/9 la LTE ha superato per la prima volta la velocità di 100 MBit/s in downlink: il nuovo standard di radiocomunicazione mobile promette, almeno in teoria, di raggiungere velocità di trasmissione dati massime fino a 326 MBit/s in downlink e 86 MBit/s in uplink. Dalla versione 10/11 della LTE sono teoricamente possibili velocità sino a 1 Gbit/s in downlink e a 500 Mbit/s in uplink. Tale incremento è reso possibile soprattutto dal ricorso a sistemi di antenne multiple (MIMO) che impiegano l'accesso multiplo a suddivisione di spazio (SDMA) (cfr. cap. 4.8 e 4.10). Ciò permette di impiegare fino a 8 antenne per ogni stazione di base e terminale (8x8 MIMO) in downlink e fino a 4 antenne per ogni stazione di base e terminale in uplink (4x4 MIMO).

Fin dalla prima fase di potenziamento è stato possibile raggiungere velocità di 100 MBit/s. Non solo la LTE offre velocità di trasmissione nettamente superiori e una migliore efficienza dello spettro rispetto alle tecnologie precedenti, ma anche una velocità di trasmissione dei pacchetti dati dal mittente al destinatario (tempo di latenza) di al massimo 5 millesimi di secondo, contro i 70–140 millesimi di secondo del tempo di latenza medio dell'UMTS. Con la LTE si è potuto ridurre anche la dispersione del tempo di latenza (*delay jitter*).

Per funzionare correttamente, i servizi in tempo reale come la trasmissione vocale tramite protocollo Internet (VoIP) e il gioco richiedono che il tempo di latenza sia breve e, per quanto possibile, costante. Per questo motivo si è dovuto ridurre considerevolmente anche il tempo necessario per il passaggio tra le celle radio (*handover*), una prestazione ottenuta grazie a EPS e alla gerarchia orizzontale della rete centrale. La maggiore reattività della rete è determinante per la velocità percepita, una sensazione per la quale un'elevata velocità di trasmissione dei dati non è di per sé sufficiente. Rispetto all'UMTS, lo standard LTE dovrebbe agevolare fortemente il consumo di video⁸.

Le migliorie apportate al MBMS permetteranno che in futuro la LTE si affermi come piattaforma per la diffusione dei servizi di radiodiffusione nelle reti di radiocomunicazione mobile. A partire dalla versione 10 l'evoluzione di eMBMS, denominata LTE-Broadcast, ha il potenziale di imporsi in certi mercati quale alternativa al DVB-T e ad altre tecnologie di radiodiffusione.

4.6 Downlink

Per il collegamento in downlink, è stato scelto l'OFDMA, un'applicazione dell'OFDM per l'implementazione di un sistema di accesso multiplo. Ciò che lo distingue dall'OFDM è che i blocchi delle singole frequenze sottoportanti sono attribuiti a un terminale a un momento preciso (cfr. figura 3).

Le attribuzioni si succedono rapidamente (1 ms) e guadagnano quindi molta flessibilità. Questi frammenti di frequenza/tempo delle sottoportanti sono chiamati blocchi di risorse fisiche (*Physical Resource Blocks PRB*). Altri dettagli sulla struttura e i parametri sono riportati nel riquadro grigio qui di seguito.

Con l'OFDM, in confronto ad altri sistemi a banda larga, i ricevitori sono stati semplificati notevolmente, in quanto la correzione delle distorsioni del canale è relativamente semplice. La scelta

⁸ http://business.chip.de/news/LTE-Treiber-fuer-mobile-Netflix-und-Co._72556383.html

dell'OFDM è stata dettata dall'esigenza di larghezze di banda variabili da 1,4 MHz a 20 MHz. Con larghezze di banda relativamente ridotte e velocità di trasmissione elevate, il CDMA perde quanto aveva di vantaggioso.

Un altro punto a favore dell'OFDM in downlink è la relativa facilità nello stabilire reti isofrequenziali, in altre parole l'agevole utilizzo della stessa frequenza nelle celle adiacenti. Le reti isofrequenziali risultano efficienti soprattutto per la trasmissione dei servizi di radiodiffusione mediante eMBMS. L'impiego solo in downlink delle bande di frequenza TDD e le nuove bande di frequenza solo per il downlink sono da ricollegare all'asimmetria del traffico dovuta allo streaming di video. La crescita del consumo di video comporta infatti un'asimmetria nel traffico in downlink e uplink. Le asimmetrie osservate (downlink rispetto all'uplink) hanno raggiunto nel 2012 fattori dell'ordine di 7 a 11 volte.

Uno svantaggio dell'OFDM è la necessità di un amplificatore di trasmissione estremamente lineare. Ciò è determinato da un processo che richiede un elevato fattore PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) del segnale di modulazione. Gli amplificatori che garantiscono un'elevata linearità hanno un costo e un consumo energetico elevato, entrambi aspetti che incidono sui costi di allestimento ed esercizio di una stazione di base. Nell'economia generale prevalgono tuttavia i vantaggi per i terminali più semplici.

Altri parametri radio della LTE in downlink

I blocchi di risorse fisiche (PRB) sono composti di 12 frequenze sottoportanti OFDMA di 15 kHz ciascuna e quindi di una larghezza di banda di 180 kHz; la durata di un intervallo (*slot*) è di 0.5 ms.

Un intervallo include 7 simboli, un blocco di risorse comprende almeno 84 simboli. Una sotto-trama include 2 intervalli (14 simboli) e definisce l'intervallo di trasmissione minimo (TTI) di 1 ms. Una trama radio è composta da 10 sotto-trame (20 intervalli) e dura 10 ms.

I tipi di modulazione usati per le sottoportanti sono il QPSK, il 16-QAM e il 64-QAM con 2, 4 e 6 *bit* per simbolo. La scelta del tipo di modulazione (AMC) avviene in modo dinamico ricorrendo alla programmazione temporale selettiva (*selective scheduling*) mediante l'algoritmo di *scheduling* nella gestione delle risorse radio (RRM) sulla base delle caratteristiche istantanee del canale radio segnalato al terminale. La risorsa di *scheduling* minima è costituita da 2 blocchi di risorse. Il cambiamento di frequenze sottoportanti (*frequency hopping*) può essere effettuato in base agli intervalli.

Le caratteristiche della LTE rendono possibile un adattamento molto flessibile alle situazioni più disparate:

- diversi ambienti (spazi interni, aree urbane, suburbane e rurali);
- diverse condizioni di mobilità (utilizzo stazionario o nomade, fino a 500 km/h);
- differenti raggi delle celle, da hotspot di 10 metri fino a diverse decine di chilometri;
- bande di frequenza da 400 MHz a 4 GHz.

4.7 Uplink

Per il collegamento in uplink, la tecnologia scelta è quella dell'accesso multiplo a divisione di frequenza con una sola portante (SC-FDMA) che presenta il vantaggio di produrre potenze relativamente basse nei canali adiacenti anche se l'amplificatore finale non è completamente lineare. La tecnologia SC-FDMA non richiede un'elevata linearità dell'amplificatore di trasmissione del terminale, permettendo dunque di contenere il consumo di corrente. Per i terminali alimentati da accumulatori, un elevato fabbisogno elettrico costituirebbe un inconveniente enorme, che la tecnologia SC-FDMA permette di evitare elegantemente. Il consumo di un terminale SC-FDMA è all'incirca tre volte inferiore rispetto a un apparecchio OFDMA che presenta lo stesso tasso d'errore sui *bit*.

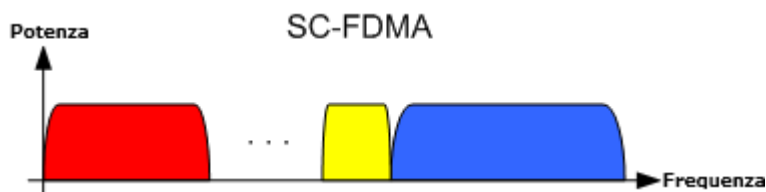


Figura 4: Rappresentazione schematica dello spettro di trasmissione in uplink. I vari colori simboleggiano lo spettro occupato da ogni utente.

Con la tecnica SC-FDMA il ricevitore della stazione di base necessita di un equalizzatore (*equalizer*) relativamente complesso. Tuttavia, questa tecnica resiste meglio dell'OFDMA agli scarti di frequenze portanti. In questo modo, la complessità del collegamento in downlink è stata in gran parte trasferita alla stazione di base, aprendo così la strada a terminali meno cari e con un'efficienza energetica maggiore. La tecnologia d'accesso multiplo SC-FDMA in uplink ha costituito una vera novità nel mondo della radiocomunicazione mobile.

La stazione di base attribuisce ad ogni utente una parte del canale di frequenza ascendente per una durata determinata. Quest'attribuzione avviene, come per il canale discendente, in intervalli del tempo di trasmissione (TTI) di un millisecondo (figura 3). La figura 4 riporta l'esempio del segnale di tre utenti ricevuto dalla stazione di base.

Analogamente all'OFDM, i dati sono ripartiti sulle sottoportanti; una trasformazione di Fourier (FT) viene applicata come precorrezione. Per questo motivo, nel caso dell'SC-FDMA si parla di *quasi-sottoportanti*. Le quasi-sottoportanti utilizzate da un utente sono sempre adiacenti e formano pertanto un blocco unico. In tal modo i singoli utenti vengono modulati su una propria frequenza portante (una *single carrier* appunto) nel canale ascendente. La combinazione di più utenti in uplink si traduce in un accesso FDMA semplice, come illustrato nella figura 4. La ripartizione delle quasi-sotto-portanti tra i vari utenti è effettuata dall'algoritmo di *scheduling* (cfr. 4.1) in modo che a un determinato momento, nella stessa cella, lo stesso blocco di sottoportanti possa essere utilizzato da un unico terminale.

4.8 Efficienza dello spettro

Lo sviluppo dell'efficienza media dello spettro in una cella radio in downlink nell'evoluzione delle diverse tecnologie di radiocomunicazione mobile e delle relative versioni è illustrato nella figura 5. L'efficienza dello spettro costituisce un'unità di misura per la capacità di trasmissione di un'interfaccia radio in bit al secondo in rapporto alla larghezza di banda (Hertz) per cella (bit/s/Hz/cell), ripartita fra gli utenti che fanno capo a una data cella radio.

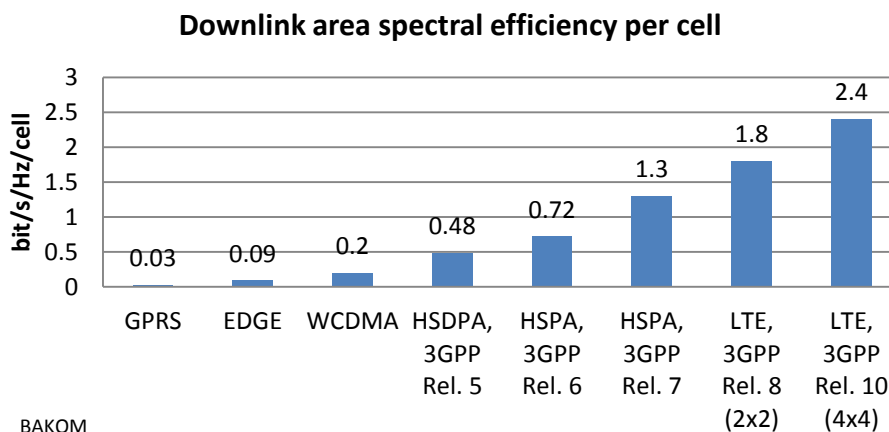


Figura 5: Efficienza dello spettro nelle diverse tecnologie di radiocomunicazione mobile (3GPP)

Esempio di efficienza dello spettro: la larghezza di banda di un canale è di 5 MHz e l'efficienza media dello spettro corrisponde a 1,8 bit/s/Hz/cella , per ogni due antenne trasmettenti e riceventi (MIMO 2x2). La capacità di trasmissione *media* C di cui tutti gli utenti di questa cella possono usufruire mediante la larghezza di 5 MHz del canale risulta quindi pari a 9 megabit al secondo in downlink:

$$C = 5 \text{ MHz} \cdot 1.8 \frac{\text{bit}}{\text{s} \cdot \text{Hz}} = 5 \cdot 10^6 \text{ Hz} \cdot 1.8 \frac{\text{bit}}{\text{s} \cdot \text{Hz}} = 9 \cdot 10^6 \frac{\text{bit}}{\text{s}} = 9 \text{ Mbps}$$

Se gli altri fattori restano invariati, con una larghezza di banda del canale pari a 10 MHz, la capacità di trasmissione *media* a disposizione raddoppia a 18 Mbps. Bisogna tuttavia distinguere questo valore dalla capacità di trasmissione media per utente, che dipende dalla qualità di ricezione dell'apparecchio dell'utente e/o dalla quantità di traffico generato dagli altri utenti.

L'efficienza spettrale *massima* o la capacità di trasmissione *massima*, fornita a scopi di marketing o per dimostrare la prestazione di un sistema, si dimostra irrilevante nella prassi.

4.9 Aggregazione delle portanti (*carrier aggregation*)

Dalla versione 10 della LTE in avanti possono essere aggregati in uplink o downlink fino a 5 canali adiacenti all'interno di una banda di frequenza (*intra-band contiguous* – figura 7). Il numero di portanti aggregati in uplink o downlink può variare. I canali aggregati vengono messi a disposizione degli strati più elevati della rete dal sistema in modo logico come canale unico, con una capacità corrispondente più elevata.

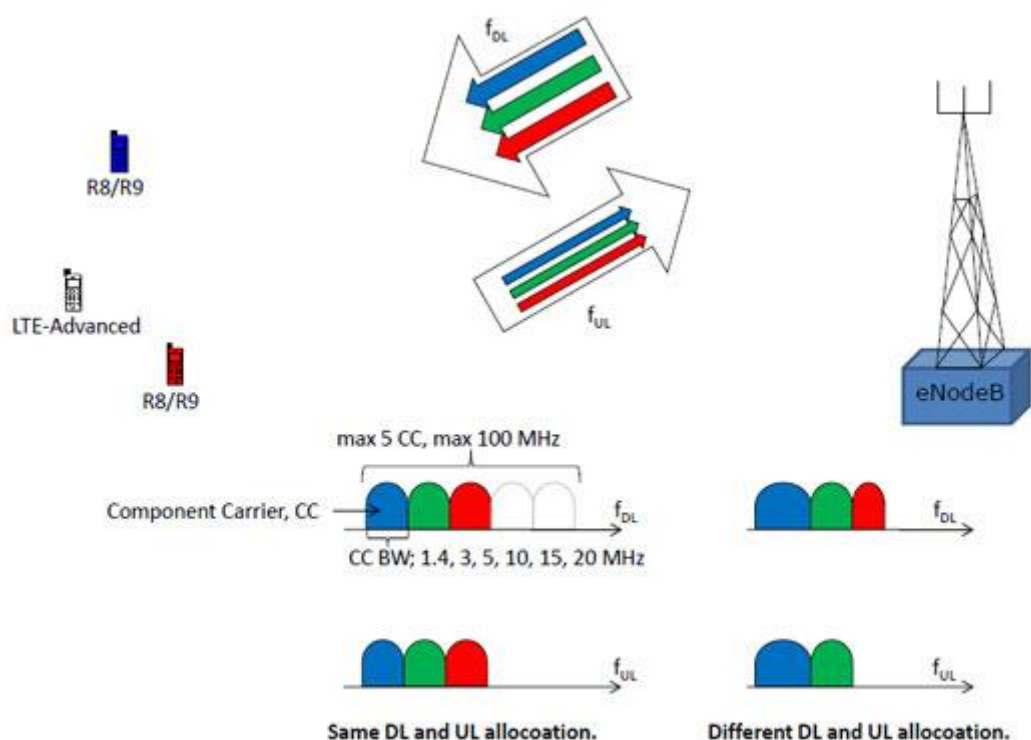


Figura 6: Aggregazione delle portanti dalla versione 10 della LTE

A partire dalla versione 11 della LTE è possibile aggregare in downlink e uplink un numero variabile di canali, fino a un massimo di 5, non soltanto della stessa banda di frequenza, ma anche di bande diverse (*inter-band non-contiguous*, cfr. figura 7). [7]

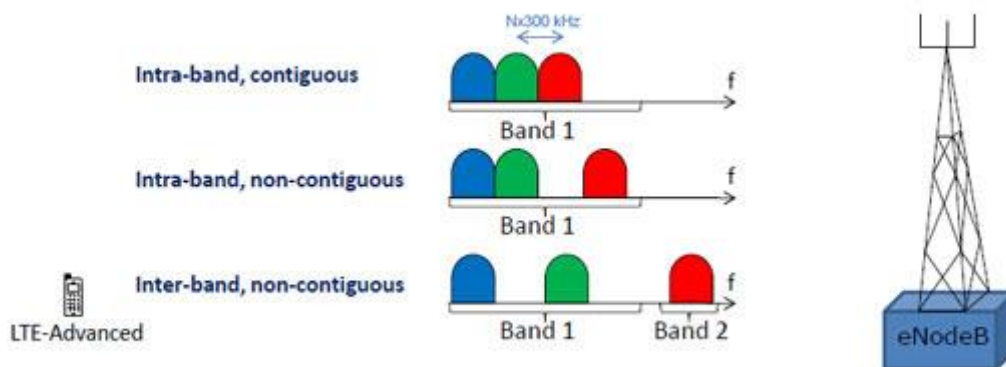


Figura 7: Aggregazione delle portanti dalla versione 11 della LTE

4.10 MIMO

I sistemi di antenne MIMO svolgono un ruolo importante nello standard LTE. L'utilizzo di antenne intelligenti consente di ottenere un'elevata efficienza dello spettro. Contrariamente all'UMTS, con l'LTE i sistemi di antenne MIMO sono parte integrante del sistema, sia a livello di stazione di base che di terminale.

La tecnologia MIMO consente la trasmissione parallela e simultanea di dati sulla stessa frequenza con diverse antenne a livello di trasmettitore e ricevitore. Per la LTE sono previste diverse forme di applicazione MIMO: moltiplicazione spaziale (*space multiplex*), diversità spaziale (*space diversity*), filtraggio spaziale (*beamforming*) o una combinazione appropriata di queste categorie generali. I requisiti di qualità richiesti per il servizio (cap. 6), la velocità di trasmissione dei dati, lo stato del canale di radiocomunicazione mobile e le proprietà del terminale o la categoria dell'apparecchio determinano dove e quando venga utilizzata una determinata forma di MIMO. Il principio è rappresentato schematicamente nella figura 8.

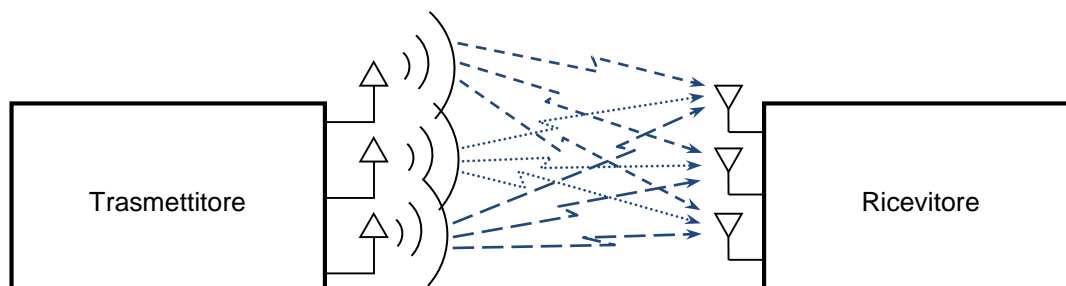


Figura 8: Principio della trasmissione su antenne multiple con MIMO (3x3)

La diversità spaziale (*space diversity*) permette di migliorare sensibilmente la qualità dei canali di radiocomunicazione in caso di forte e rapida attenuazione del segnale (*fading*). L'informazione di riscontro (*feedback*) inviata dal terminale alla stazione di base permette a quest'ultima un'attribuzione ottimale delle risorse temporali e di frequenza (PRB) su un determinato collegamento. In funzione dell'algoritmo di *scheduling*, le risorse del canale (PRB) sono attribuite agli utenti che dispongono delle migliori condizioni momentanee del canale di trasmissione (*Multi User Space Diversity*). Ciò consente di massimizzare il flusso di dati medio anche per utente, impiegando meno tempo prezioso per la trasmissione di dati su canali momentaneamente poco performanti. È probabile che qualche millisecondo più tardi la connessione sia migliore. Questo metodo utilizza dunque con abilità una trasmissione la cui qualità varia rapidamente senza che ciò possa essere percepito dall'utente finale.

La moltiplicazione spaziale (*space multiplex*) permette una velocità di trasmissione dati molto elevata a condizione che il canale radio sia di buona qualità (ossia presenti un'elevata potenza di ricezione me-

dia, un elevato rapporto tra segnale e interferenza [SIR] e una debole correlazione tra le singole antenne). La moltiplicazione spaziale può essere monoutente o multiutente. In entrambi i casi, la velocità di trasmissione del sistema è la stessa. Con la moltiplicazione spaziale monoutente, i flussi di dati paralleli delle diverse antenne trasmettenti della stazione di base sono trasmessi a un solo utente. Il numero di flussi di dati dipende dalla configurazione delle antenne MIMO. Un MIMO 4x4 (4 antenne trasmettenti e 4 antenne riceventi) teoricamente permette, ad esempio, di quadruplicare la velocità rispetto a un sistema di antenne convenzionale (1x1). Con la moltiplicazione spaziale multiutente, i flussi di dati partono dalla stazione di base verso utenti diversi (SDMA). Un MIMO 4x4 permette in downlink di servire complessivamente 4 utenti con le stesse risorse (PRB). La velocità di trasmissione dei dati per ogni utente corrisponde dunque a un quarto di quella della moltiplicazione spaziale monoutente, ma la velocità di trasmissione del sistema è la stessa poiché 4 utenti fruiscono delle risorse.

Il rapporto tra la moltiplicazione spaziale e la diversità spaziale è stato analizzato in funzione della velocità di trasmissione a livello di sistema (*bitrate* totale nella cella) e di utenti. Con la moltiplicazione spaziale monoutente, è possibile ottenere velocità di trasmissione elevate per un solo utente, se il rapporto segnale-interferenza (SIR) è elevato. Tuttavia alcune simulazioni hanno evidenziato che, in un sistema limitato da interferenze, le zone che presentano un SIR elevato sono relativamente ridotte, ragion per cui il guadagno in termini di velocità di trasmissione del sistema consentito dalla moltiplicazione spaziale è in confronto più modesto. Questa tecnologia consente però di trasmettere a velocità molto elevate verso celle isolate o utenti che si trovano in prossimità della stazione di base. Per i sistemi di radiocomunicazione mobile, che generalmente sono limitati dalle interferenze e presentano SIR piuttosto bassi, la diversità spaziale presenta più vantaggi rispetto alla moltiplicazione spaziale e permette complessivamente di ottenere velocità di trasmissione maggiori a livello di sistema.

La tecnica del filtraggio spaziale permette di proporre simultaneamente le stesse risorse (SDMA) a diversi utenti. Si possono inoltre sopprimere forti segnali di interferenza.

Nella pratica, le forme miste che combinano le diverse applicazioni MIMO diventeranno molto importanti per la LTE. La tecnica di filtraggio spaziale permette, ad esempio, di creare settori e in questi di utilizzare la tecnologia della moltiplicazione spaziale o quella della diversità spaziale, a seconda della qualità del canale radio e della distanza tra l'utente e la stazione di base.

5 Reti di radiocomunicazione mobile

In un primo tempo la LTE è stata impiegata per gestire il traffico dati in continuo aumento. Il prossimo traguardo è rappresentato dall'introduzione della trasmissione vocale tramite protocollo Internet che, in alcune reti di radiocomunicazione mobile, si è già conclusa (cfr. cap. 6).

In Svizzera, come in altri Paesi, la penetrazione di mercato dei dispositivi che supportano la LTE e la copertura di rete di questa tecnologia sono già molto avanzate, un effetto della diffusione degli smartphone, che si aggira all'80 per cento. Il carico di traffico si sposta pertanto sempre di più dalle reti 2G e 3G alle reti LTE.

Si ridimensiona così in modo particolare il ruolo del GSM (2G), che viene rimpiazzato da tecnologie più efficienti nell'utilizzazione dello spettro (in termini di bit al secondo e Hertz, cfr. figura 9 e 4.1).

Mobile subscriptions by technology (billion)

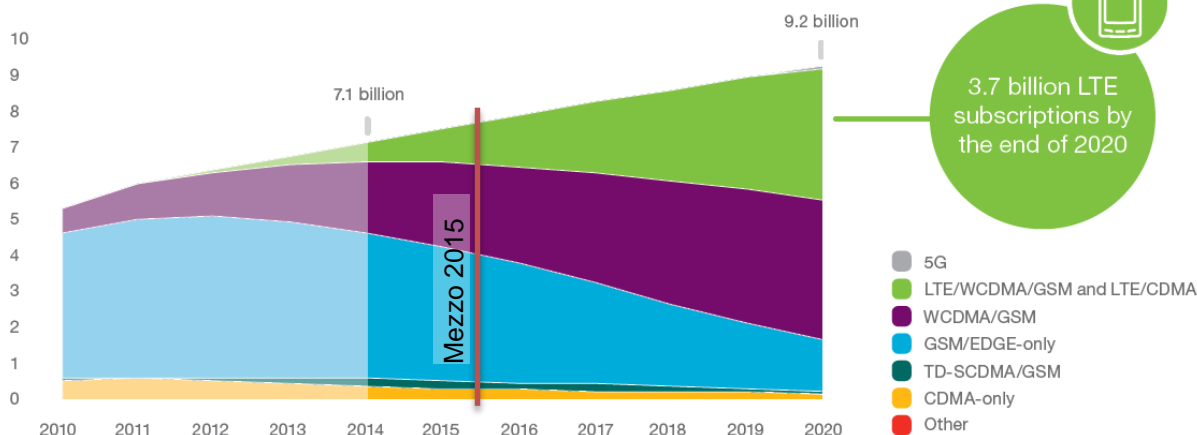


Figura 9: Sviluppo dei collegamenti degli utenti in base alla tecnologia (1 billion = 1 miliardo, fonte: *Ericsson Mobility Report*, giugno 2015)

Il passaggio dalla tecnologia GSM/EDGE, che presenta un'efficienza media dello spettro di 0,09 bit/s/Hz/cella (cfr. figura 5), alla versione 7 della HSPA con 1,3 bit/s/Hz/cella o alla versione 8 della LTE con 1.8 bit/s/Hz/cella, costituisce un salto in avanti significativo quanto a capacità di trasmissione media: a parità di larghezza di banda utilizzata, la velocità aumenta di 10 volte con la HSPA e di 20 volte con la LTE. Solitamente la GSM/EDGE nella banda dei 900 MHz è sostituita dall'UMTS/HSPA+, mentre nella banda dei 1800 MHz dalla LTE e dalla LTE-A.

Il ruolo della "stratificazione" nelle reti di radiocomunicazione mobile, ossia di celle di dimensione diversa, assume un'importanza ancora maggiore con la LTE. Dopo le macro-celle, che nelle aree rurali possono raggiungere un raggio di alcune decine di chilometri, il crescente volume di traffico rende indispensabili celle che coprono piccole porzioni di rete (microcelle e picocelle). Nelle aree urbane e suburbane il raggio delle celle misura talvolta, in funzione della densità di traffico mobile, molto meno di 2 chilometri.

Le picocelle hanno una portata simile a quella dei telefoni senza filo (DECT), ovvero circa 60 metri all'interno degli edifici e 250 metri all'esterno. Lo scopo principale di microcelle, picocelle e femtocelle è quello di sgravare le macrocelle (*offloading*) accelerando il trasferimento del traffico mobile alla rete centrale mobile su DSL, rete cablata, fibra ottica (FTTx) e ponti radio.

Una fetta considerevole del volume di traffico totale che transita sulle reti mobili è prodotto all'interno degli edifici (ad es. appartamenti, uffici), ossia nelle immediate vicinanze dei collegamenti alla rete fissa. Anche se già oggi si può contare su una buona diffusione degli impianti che assicurano la copertura all'interno degli edifici nonché nei tunnel, nei centri commerciali, nei parcheggi ecc., nella maggior parte dei casi essi non supportano ancora le celle di piccole dimensioni per la LTE. È comunque solo una questione di tempo, la trasformazione è imminente: la copertura del traffico prodotto all'interno e destinato all'esterno dovrà essere assicurato da femtocelle e il traffico mobile, in particolare il gigantesco volume di dati che sarà trasmesso in futuro, dovrà essere convogliato sulla rete fissa e centrale quanto più vicino possibile al luogo in cui è stato generato. La copertura degli utenti in prossimità degli edifici non è altrettanto prioritaria. La strategia adottata sinora, che prevede la copertura dell'interno degli edifici mediante una stazione di base esterna, dovrà essere completata. L'obiettivo è piuttosto quello di servire gli utenti esterni tramite celle esterne e quelli situati all'interno degli edifici mediante celle di piccole dimensioni idonee per gli spazi chiusi. La rete di radiocomunicazione mobile che viene così a crearsi è una rete eterogenea. [11]

Una delle sfide principali che si profilano nelle attuali reti eterogenee, ossia reti con un elevato numero di stazioni di base, è rappresentata dalla segnalazione. Lo standard LTE è già stato concepito per sopperire a questo genere di esigenze.

Lo standard LTE prevede funzioni di auto-organizzazione della rete (*Self Organising Network SON*) e di prevenzione delle interferenze grazie alla gestione delle risorse radio (*Radio Resource Management RRM*) e al coordinamento inter-cella (*Inter-Cell Interference Coordination ICIC*). Queste funzioni

riducono le interferenze tra le celle e semplificano la pianificazione della rete, allo scopo di massimizzare il flusso di dati e ridurre i costi. [10]

6 Servizi

La lista dei servizi è breve, perché sono tutti erogati mediante il protocollo Internet (IP). Né la rete di collegamento (LTE), né la rete centrale (EPC, EPS, SAE) prevedono la commutazione di circuito, e i servizi vocali proposti dagli operatori di rete sono erogati tramite *Managed VoIP*⁹ (ad es. *Voice over LTE – VoLTE*).

L'odierno standard LTE non include ancora un servizio di comunicazione vocale in 3GPP, perciò esistono diverse soluzioni proprietarie adottate dai fornitori di attrezzature di rete.

Una soluzione sempre più diffusa è lo standard di settore *VoLTE*, elaborato dall'associazione GSM (*GSM Association GSMA*), che riunisce operatori di rete mobile e fornitori di attrezzature di rete. La GSMA elabora lo standard per il servizio vocale e SMS basandosi su *IP Multimedia System (IMS)*. IMS è il servizio di nuvola informatica degli operatori che, a sua volta, costituisce una componente dell'architettura dei servizi (SAE). [8]

In Svizzera, il primo operatore ha iniziato a supportare *VoLTE* dalla metà del 2015. A maggio 2015 gli smartphone di gamma più alta erano compatibili con la *VoLTE*.

Il sistema 3GPP opera la distinzione tra classi di traffico standardizzate (traffic class) e la qualità di servizio (QoS). Queste categorie sono caratterizzate da:

- tempo di latenza (*delay*);
- tasso di errore sui pacchetti (BER/PER);
- priorità;
- velocità minima di trasmissione dati garantita (GBR);
- ordine di consegna dei pacchetti.

Ad esempio, i servizi VoIP richiedono innanzitutto un tempo di latenza breve per la trasmissione e una velocità minima per garantire la qualità del servizio vocale; il tasso d'errore sui pacchetti di dati non è invece rilevante, mentre lo è per il download di file. La tabella 2 esemplifica i parametri QoS per diverse applicazioni. [9]

Applicazione	Priorità	Latenza massima	Tasso di errore sui pacchetti (PER)	Velocità di trasmissione dati minima garantita (GBR)
VoIP	2	100 ms	0.1 %	Sì, ad es 172 kbps
navigazione Web	8	300 ms	0.0001 %	No

Tabella 2: Esempi di parametri di qualità (QoS) per diversi servizi

⁹ Per *Managed VoIP* si intende il controllo della qualità vocale da parte dell'operatore tramite misure adeguate.

7 Bibliografia

- [1] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network; *User Equipment (UE) radio transmission and reception*. 3GPP TS 36.104 Releases 8, 9 ,10, 11, 12
- [2] 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network; *Base Station (BS) radio transmission and reception*. 3GPP TS 36.104 Releases 8, 9 ,10, 11, 12
- [3] Seidel E. (2008): 3GPP Long Term Evolution, *LTE, The Future UMTS Standard*. CEI-Europe
- [4] Seisa S. / Toufik I. / Baker M. (2009): *LTE, The UMTS Long Term Evolution*. Wiley
- [5] Holma H. / Toskala A. (2011): *LTE for UMTS, Evolution to LTE-Advanced*. Wiley
- [6] Holma H. / Toskala A. (2012): *LTE-Advanced, Solution for IMT-Advanced*. Wiley
- [7] Wannstrom J. (2013): *Carrier Aggregation explained*. 3GPP
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>
- [8] GSM Association (2013): *IR.92 - IMS Profile for Voice and SMS Version 7.0*. GSMA
<http://www.gsma.com/newsroom/wp-content/uploads/2013/04/IR.92-v7.0.pdf>
- [9] 3GPP Technical Specification Group Services and System Aspects; *Quality of Service (QoS) concept and architecture*. 3GPP TS 23.107
- [10] Volker P. / Seidel E. (2011): *Inter-Cell Interference Coordination for LTE-A*. Nomor Research GmbH
<http://www.nomor.de/uploads/1d/19/1d196a493af5511cc92466089924cc5c/2011-09-WhitePaper-LTE-A-HetNet-ICIC.pdf>
- [11] Qualcomm (2015): *The 1000x data challenge*