
Indice

Capitolo 1	1
Le reti wireless.....	1
1.1 Introduzione.....	1
1.2 Lo standard 802.11	2
1.3 Cenni storici.....	4
1.4 Lo strato fisico	4
1.5 Lo strato data-link	7
1.5.1 Problemi ricorrenti.....	7
1.5.2 La gestione delle collisioni.....	8
1.5.3 L'idea del protocollo CSMA/CA	9
1.6 Scenari di impiego delle reti WLAN.....	10
1.7 Lo standard 802.11n.....	11
1.7.1 Introduzione	11
1.7.2 Caratteristiche operative	12
1.7.3 La tecnologia MIMO	12
1.7.4 L'aggregazione dei pacchetti	14
1.7.5 Il channel bonding	14
1.8 Wireless Sensor Network	15
1.8.1 Campi di applicazione	18
1.8.1.1 Applicazioni militari	19
1.8.1.2 Applicazioni ambientali	19
1.8.1.3 Applicazioni medico-sanitarie.....	19
1.8.1.4 Applicazioni domestiche	20
1.8.1.5 Applicazioni commerciali	20
1.8.1.6 Applicazioni energetiche.....	21
1.9 WiMAX.....	21
1.9.1 Premessa	21
1.9.2 Caratteristiche tecniche.....	22
1.9.3 Elementi di una rete WiMAX	24
1.10 La tecnologia UMTS	26
1.10.1 Caratteristiche tecniche.....	27
1.10.2 Proposte di standardizzazione	28

1.10.3 L'interfaccia W-CDMA	29
Capitolo 2.....	31
La sfida dell'alta velocità in mobilità: l'UMTS e il WiMAX	31
2.1 Lo standard UMTS.....	31
2.1.1 Introduzione	31
2.1.2 I primi passi.....	31
2.1.3 L'allocazione dello spettro frequenziale	32
2.1.4 Verso la standardizzazione.....	33
2.1.5 L'armonizzazione globale.....	34
2.1.6 La tecnologia W-CDMA.....	36
2.1.6.1 Le tecniche spreading e scrambling	37
2.1.7 I canali UMTS.....	39
2.1.8 I canali fisici.....	40
2.1.8.1 I canali fisici in uplink.....	40
2.1.8.2 I canali fisici in downlink.....	42
2.2 Un passo oltre l'UMTS: lo standard HSPA.....	44
2.2.1 Premessa	44
2.2.2 L'architettura di sistema HSDPA.....	46
2.2.2.1 High-Speed Downlink Shared Channel (HS-DSCH).....	47
2.2.2.2 Fast Scheduling.....	47
2.2.2.3 Fast Retransmission e H-ARQ.....	47
2.2.2.4 Feedback sulla qualità del canale.....	48
2.2.2.5 Modulazione adattativa e codifica	48
2.2.2.6 Performance.....	48
2.3 L'avvento dell'802.16: la nascita del WiMAX.....	49
2.3.1 Introduzione	49
2.3.2 Infrastruttura WiMAX	51
2.3.3 Il protocollo WiMAX	52
2.3.3.1 Descrizione del livello fisico	53
2.3.3.2 Concetti di base OFDM e OFDMA	54
2.3.3.3 Confronto delle tecniche TDD e FDD	55
2.3.3.4 La struttura del frame.....	56
2.3.3.5 livello MAC.....	57
2.3.3.6 La gestione della QoS	59

2.3.3.7 Tecnologie smart antenna.....	60
Capitolo 3.....	61
La tecnologia Long Term Evolution.....	61
3.1 Cenni introduttivi.....	61
3.1.1 Premessa.....	61
3.1.2 La famiglia delle tecnologie 3GPP.....	63
3.1.3 Le caratteristiche generali dello standard LTE.....	65
3.2 L'architettura di rete.....	67
3.2.1 La scelta di una tecnica di accesso multiplo.....	67
3.2.2 Verso l'architettura definitiva.....	69
3.2.3 Le scelte finali.....	69
3.2.5 Configurazione di base del sistema con access network E-UTRAN.....	71
3.2.5.1 L'User Equipment.....	72
3.2.5.2 L'eNode-B (Evolved Node-B).....	73
3.2.5.3 Mobility Management Entity (MME).....	74
3.2.5.4 Serving Gateway (S-GW).....	76
3.2.5.5 Packet Data Network Gateway (P-GW).....	77
3.2.5.6 Policy and Charging Resource Function (PCRF).....	78
3.2.5.7 Home Subscription Server (HSS).....	79
3.2.5.8 Services Domain.....	79
3.2.6 Le procedure NAS (Non-Access Stratum).....	80
3.2.7 Le interfacce LTE.....	81
3.3 User Plane.....	84
3.3.1 Packet Data Convergence Protocol (PDCP).....	86
3.3.2 Radio Link Control (RLC).....	88
3.3.2.1 Transparent Mode (TM).....	89
3.3.2.2 Unacknowledged Mode (UM).....	89
3.3.2.3 Acknowledgement Mode (AM).....	91
3.4 Control Plane.....	92
3.4.1 Radio Resource Control (RRC).....	93
3.4.2 System Information.....	94
3.4.2.1 Scheduling temporale delle System Information.....	95
3.4.3 Controllo della connessione all'interno di LTE.....	96
3.4.3.1 Gestione delle chiavi di sicurezza.....	96

3.4.3.2 Apertura e rilascio della connessione.....	98
3.4.3.3 Le fasi di apertura della connessione	99
Capitolo 4.....	101
L'architettura protocollare LTE.....	101
4.1 Lo strato fisico	101
4.1.1 Introduzione	101
4.1.2 Le risorse trasmissive dello standard LTE	102
4.1.3 I canali fisici in downlink.....	103
4.1.3.1 Physical Broadcast Channel (PBCH).....	104
4.1.3.2 Physical Downlink Shared Channel (PDSCH).....	106
4.1.3.3 Physical Multicast Channel (PMCH).....	107
4.1.3.4 Physical Downlink Control Channel (PDCCH)	107
4.1.3.5 Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)	108
4.1.3.6 Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)	109
4.1.4 Le tecniche OFDM e OFDMA.....	110
4.1.4.1 L'utilizzo della tecnica OFDM.....	110
4.1.4.2 Un semplice sistema OFDM	112
4.1.4.3 Gli effetti del prefisso ciclico	114
4.1.4.4 La tecnica di accesso multiplo OFDMA	115
4.1.4.5 Dimensionamento dei parametri.....	117
4.1.5 I canali fisici in uplink	118
4.1.5.1 Physical Uplink Shared Channel (PUSCH).....	118
4.1.5.2 Physical Uplink Control Channel (PUCCH)	119
4.1.5.3 Physical Random Access Channel (PRACH).....	120
4.1.6 Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA).....	121
4.1.6.1 Parametri LTE per SC-FDMA.....	122
4.1.7 Multiple-Input Multiple-Output (MIMO).....	123
4.1.7.1 L'evoluzione delle tecniche Multiple Antenna.....	123
4.1.7.2 MIMO Spatial Multiplexing.....	125
4.1.7.3 MIMO Transmit Diversity	125
4.1.7.4 MIMO Cyclic Delay Diversity	125
4.1.7.3 Modellazione del segnale MIMO	126
4.1.7.4 Modellazione Single-User MIMO (SU-MIMO).....	126
4.2 Lo strato MAC	128

4.2.1 Introduzione	128
4.2.2 Architettura MAC.....	128
4.2.3 Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ)	128
4.2.4 Multiplexing/demultiplexing.....	130
4.2.4.1 Formato delle MAC PDU.....	130
4.2.5 Il controller MAC	131
4.2.5.1 Discontinuous Reception (DRX).....	131
4.2.5.2 Lo Scheduler MAC	133
4.2.5.3 La gestione dei Buffer Status Report (BSR)	134
4.2.5.4 La gestione della priorità dei canali logici	136
4.2.6 I canali logici del livello MAC	138
4.2.6.1 Control logical channels.....	138
4.2.6.2 Traffic logical channels.....	139
4.2.7 I canali di trasporto del livello MAC	139
4.2.7.1 Downlink transport channels	139
4.2.7.2 Uplink transport channels.....	140
4.2.8 Multiplexing e mapping tra i canali logici e i canali trasporto	140
Capitolo 5	141
Valutazione delle prestazioni.....	141
5.1 Introduzione.....	141
5.2 Analisi delle velocità di picco.....	142
5.2.1 Le velocità di picco in downlink	142
5.2.2 Le velocità di picco in uplink.....	143
5.2.3 Terminal Categories.....	144
5.3 Le performance del livello di collegamento	145
5.3.1 Analisi prestazionale in downlink	145
5.3.2 Analisi prestazionale in uplink	148
5.3.2.1 L'allocazione della banda trasmissiva.....	148
5.3.2.2 Le conseguenze della velocità mobile.....	149
5.4 L'efficienza spettrale.....	150
5.4.1 Considerazioni preliminari.....	150
5.4.2 Performance di sistema in downlink.....	151
5.4.3 Performance di sistema in uplink	153
5.5 Valutazione della tecnica MIMO	157

5.5.2 Spatial Channel Model (SCM).....	157
5.5.2.1 Il framework SCM.....	157
5.5.2.2 Le differenti configurazioni MIMO.....	159
5.5.2.3 Performance degli ambienti SCM.....	161
5.6 Confronto con la tecnologia WiMAX	165
5.6.1 Parametri generali di LTE e di WiMAX adottati per la simulazione	165
5.6.2 Parametri di simulazione RAT	166
5.6.3 I risultati delle simulazioni RAT	167
Conclusioni.....	172
Bibliografia.....	176

Introduzione

L'obiettivo di questa tesi è illustrare la tecnologia wireless che introduce la quarta generazione delle comunicazioni radiomobili, ovvero lo standard Long Term Evolution.

Le tecnologie di comunicazione senza fili sono nate per assecondare il desiderio di mobilità degli utenti e, nel corso degli anni, il loro impiego è stato sempre più crescente. Dalla metà degli anni '90 avanzava fra gli utenti il desiderio di contrapporre allo standard Ethernet, che dominava gli scenari di connessione wired, un nuovo standard capace di rendere Internet mobile, in grado di funzionare, quindi, in modalità wireless.

Fu così che nel 1997 il comitato IEEE, per modellare questa tecnologia nascente, introdusse lo standard 802.11. I problemi che dovettero essere affrontati andavano dalla gestione delle radiofrequenze, infatti doveva essere utilizzata una banda univoca a livello mondiale, alla sicurezza dei dati, occorreva utilizzare delle serie tecniche crittografiche per salvaguardare la privacy degli utenti, alle questioni etiche, dal momento che non era e non è ancora chiaro se le radiofrequenze siano cancerogene o meno per la salute umana.

Le prime velocità ottenute, operando nella banda ISM (Industrial, Scientific and Medical) dei 2.4 GHz, erano di 1 e 2 Mbps, e furono per questo ritenute insufficienti dagli utenti. Successivi raffinamenti portarono alla nascita delle tecniche 802.11a, b, g ed n. La variante a consente di raggiungere i 54 Mbps nella banda dei 5 GHz utilizzando la tecnica di modulazione OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), che come si vedrà è alla base delle tecniche WiMAX ed LTE. 802.11g raggiunge le stesse velocità con OFDM però nella banda ISM dei 2.4 GHz. 802.11b raggiunge al massimo 11 Mbps nella banda dei 2.4 GHz utilizzando la tecnica HR-DSSS (High Rate Direct Sequence Spread Spectrum). È più lenta di 802.11a ma il suo campo di azione è circa di 7 volte più ampio.

Lo strato data-link dell'802.11 presentava intrinsecamente più problemi rispetto allo stesso livello del protocollo Ethernet, principalmente a causa dell'assenza del cavo. Uno tra questi era la gestione delle collisioni.

In trasmissione, una stazione effettuava il carrier sensing del mezzo, per rilevare eventuali trasmissioni attive, ma questo non bastava ad assicurare il successo della comunicazione. Come avviene nel problema della stazione nascosta, il raggio di

copertura di una stazione potrebbe non coprire una seconda stazione trasmittente. Per cui, chi volesse trasmettere invaderebbe un canale ritenuto libero, ma che in realtà potrebbe essere impegnato in una seconda trasmissione. Il mezzo diventerebbe così interferente, e sia la prima che la seconda stazione sarebbero costrette a ritrasmettere. Nel problema della stazione esposta, al contrario, a causa delle aree di copertura delle antenne, potrebbe essere ritenuto occupato un canale che invece consentirebbe tranquillamente due differenti comunicazioni da parte di stazioni diverse.

La gestione delle collisioni viene effettuata attraverso il protocollo di collision avoidance CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) mediante l'invio dei messaggi RTS (Request To Send), e CTS (Clear To Send). Alla ricezione di un CTS, la stazione può cominciare a trasmettere. Entrambi i frame RTS e CTS contengono il tempo mancante prima della fine della trasmissione.

Una rete WLAN può avere quattro profili di funzionamento: infrastructure, ad-hoc, mixed mode e mesh mode. Il profilo di tipo infrastructure è quello maggiormente usato nello sviluppo dello standard 802.11. Include un Access Point (AP) che controlla la rete e gestisce le comunicazioni in transito attraverso le stazioni o il backbone. Nel profilo ad-hoc non vi è un AP centralizzato che monitora la rete, e le stazioni risultano interconnesse tra loro in modo dinamico nell'area di interesse. Il profilo mixed mode consente alle stazioni di comunicare le une con le altre anche se alcune di loro sono connesse a un AP. Il profilo mesh descrive delle reti decentralizzate, economiche da mettere in funzione e resistenti ai guasti. Un nodo infatti funge da repeater e deve trasmettere un segnale al massimo fino al nodo successivo.

802.11n rappresenta l'evoluzione del protocollo 802.11. La velocità reale di questo standard dovrebbe essere di 100 Mbps (quella fisica dovrebbe essere prossima a 300 Mbps), quindi si preannuncia 5 volte più rapido del 802.11g e 40 volte più rapido dell'802.11b. Fra le innovazioni utilizzate vi è la tecnica MIMO (Multiple-Input, Multiple Output), tramite la quale è possibile usare antenne multiple sia al mittente che al ricevente per migliorare le prestazioni nella comunicazione.

Viene utilizzata inoltre l'aggregazione di pacchetti per migliorare il throughput di rete. Pacchetti multipli provenienti dal livello applicativo sono uniti in un singolo frame trasmissivo. In questo modo le reti 802.11n possono spedire pacchetti multipli al costo di overhead prefissato per un singolo frame. L'aggregazione dei pacchetti apporta maggiori benefici per alcuni tipi di applicazioni come ad esempio il trasferimento dei file.

Le tecnologie senza fili convenzionali sono limitate a trasmettere su uno dei canali a 20 MHz. Le reti 802.11n impiegano una tecnica chiamata Channel Bonding tramite la quale è possibile unire due canali adiacenti da 20 MHz in un singolo canale da 40 MHz. Tale tecnica è più efficiente alla frequenza di 5 GHz grazie al gran numero dei canali disponibili.

Un altro tipo di reti wireless maggiormente usate sono le reti di sensori. Sono utilizzate in diverse applicazioni: controllo di processi industriali, domotica, controllo di aree sorvegliate, medicina, usi militari, monitoraggio ambientale e dei monumenti. La multidisciplinarietà delle aree di applicazione e la varietà delle problematiche connesse rende la ricerca sulle Wireless Sensor Network complessa, prospettandone un utilizzo in molte aree: reti di trasmissione, signal-processing, intelligenza artificiale, gestione di database, ottimizzazione delle risorse, algoritmi di gestione e controllo, e così via.

L'evoluzione tecnologica consente ormai di avere a disposizione dei nodi sensori di piccole dimensioni in grado di rilevare le grandezze fisiche, di applicare algoritmi di calcolo e di trasmettere i dati in modalità wireless ad un nodo principale preposto alla loro raccolta e aggregazione.

Viene così consentita la formazione di reti facilmente installabili e non pre-configurate geograficamente, i cui nodi sono dotati di capacità auto-organizzative.

Lo standard UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) così come specificato dal comitato 3GPP (Third Generation Partnership Project) è stato formalmente adottato dall'ITU (International Telecommunication Union) come membro della famiglia IMT-2000 degli standard di terza generazione delle comunicazioni mobili nel novembre del 1999.

L'introduzione delle reti a commutazione di pacchetto e l'adozione di differenti schemi di modulazione hanno consentito a UMTS di raggiungere data rate più elevati dello standard GSM (Global System for Mobile Communications). Gli utenti UMTS dispongono di un data rate di picco di 144 Kbps fino a velocità di 500 Km/h, di 384 Kbps per gli utenti lenti e di 2 Mbps per gli utenti indoor.

Il processo di allocazione e riserva dello spettro frequenziale per il nuovo standard radio occupò diversi anni. L'allocazione frequenziale fu divisa nelle bande 1885-2025 MHz e 2110-2200 MHz. Poi vennero destinate le sottobande 1980-2010 MHz e 2170-2200 MHz per le comunicazioni satellitari e le restanti per le comunicazioni terrestri. Inoltre per le bande "paired" venne adottata la tecnica FDD (Frequency Division Duplex) per

gestire l'accesso radio, mentre nelle bande "unpaired" fu preferita la tecnica di accesso radio TDD (Time Division Duplex).

La tecnologia W-CDMA fu il fulcro sul quale UMTS avrebbe iniziato a svilupparsi. Nel dicembre del 1998 venne fondata un'organizzazione nota con il nome di 3GPP allo scopo di armonizzare tutte le proposte mondiali basate sullo standard W-CDMA. Il chip rate del sistema adottato è di 3.84 Mcps, la lunghezza del frame è di 10 ms, contro i 4.615 ms dello standard GSM, e ciascun frame viene diviso in 15 slot (quindi si possono trasportare 2560 chip/slot con un chip rate di 3.84 Mcps). La banda di frequenza associata ad un canale è di 5 MHz, contro i 200 KHz dello standard GSM.

UMTS identifica tre tipologie di canali: i canali logici, i canali di trasporto e i canali fisici. I canali logici specificano il tipo di informazione da trasmettere, i canali di trasporto definiscono come e con quale tipo di caratteristiche i dati sono trasferiti dal livello fisico. Il livello fisico specifica le esatte caratteristiche fisiche del canale radio (codice, frequenza, intervallo temporale).

I continui miglioramenti adottati per lo standard UMTS hanno contribuito a far nascere l'HSPA (High Speed Packet Access). HSPA è un generico termine adottato dall'UMTS Forum per riferire i miglioramenti tecnologici nell'interfaccia radio nelle Release 5 (Downlink) e Release 6 (Uplink) degli standard 3GPP concernenti lo sviluppo della tecnologia UMTS. Vengono impiegate nuove tecniche di modulazione, come 16QAM (Quadrature Amplitude Modulation), per aumentare il throughput di rete e ridurre la latenza (100 ms per HSDPA e 50 ms per HSUPA). Inoltre vengono inserite nuove funzionalità di rete, tra le quali il protocollo di ritrasmissione HARQ (Hybrid Automatic Repeat reQuest).

HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) adotta velocità fino a 14 Mbps e HSUPA (High Speed Uplink Packet Access) arriva fino a 5.8 Mbps.

Mentre la Release '99 utilizza lo scheduling per i pacchetti dati al livello RNC (Radio Network Controller), HSDPA sposta queste decisioni nella base station. Lo scheduling della base station permette al sistema di reagire tempestivamente alle variazioni a breve termine, consentendo di aumentare la velocità e di semplificare i processi di scheduling critici. Ad esempio, quando la decodifica di canale di un pacchetto dati fallisce, a causa delle interferenze o del rumore, un terminale mobile richiede immediatamente la ritrasmissione di quel pacchetto. Sarà poi compito del protocollo HARQ rispondere alla richiesta, anticipando un compito di solito affidato al livello trasporto.

Il gruppo di lavoro IEEE 802.16 si occupa della definizione delle Wireless MAN. Fu questo gruppo a creare un nuovo standard di tipo BWA (Broadband Wireless Access) conosciuto con il nome di WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access), funzionante ad alta velocità, a costi minimi e semplice da mettere in opera. Le base station WiMAX possono offrire un grande raggio di copertura di circa 5 miglia con trasmissioni di tipo LOS (Line-Of-Sight) e una velocità fino a 70 Mbps.

Tipicamente un sistema WiMAX è formato da 2 componenti: la base station WiMAX e il ricevitore WiMAX. La base station consiste in apparecchiature elettroniche indoor e in una torre WiMAX. Una base station può coprire fino a 10 km di raggio.

Il servizio Wireless 802.16 rende disponibile un cammino di servizi radiomobili tra un Subscriber Site e la core network, così come avviene tra la rete di telefonia pubblica e la rete Internet. La Subscriber Station invia il traffico proveniente dal Terminal Equipment, a cui è connessa, verso la Base Station, che a sua volta lo inoltra verso la destinazione finale.

La modulazione del livello fisico dello standard WiMAX si basa sulla tecnica OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). L'utilizzo combinato di tale tecnica con i protocolli del livello MAC consente un'allocazione ottimale delle risorse e il supporto della QoS (Quality Of Service) per i differenti tipi di servizi (VoIP, servizi real-time e non real-time, servizi di tipo best effort). WiMAX supporta le tecniche TDD, FDD e le operazioni Half-Duplex FDD, anche se la Release iniziale includeva soltanto l'utilizzo della tecnica TDD.

LTE rappresenta l'ultima evoluzione degli standard dedicati alle reti di telefonia mobile a banda larga. È giunto alla sua definizione finale solo ad inizio 2008, grazie all'accordo di collaborazione 3GPP stabilito nel dicembre 1998 tra i principali enti di standardizzazione nelle telecomunicazioni.

Questo standard è basato su tecnologie di comunicazione mobile esistenti, ma che erano state accantonate in passato. Il loro scarto negli anni precedenti era dovuto alle pesanti esigenze di elaborazione, che, grazie ai progressi tecnologici, non sono più problematiche.

Vengono introdotti nuovi modelli di multiplexing e tecniche di accesso multiplo come OFDM e per il downlink e SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access) per l'uplink. La tecnologia che comporta l'uso di antenne multiple sia al mittente che al ricevente per migliorare le prestazioni nella comunicazione, nota come MIMO, è importante in LTE.

Sono disponibili fino a 100 Mbps per il trasferimento dati in download e fino a 50 Mbps per il trasferimento dati in upload. L'allocazione di banda per gli utenti è molto flessibile e va da un minimo di 1.25 MHz ad un massimo di 20 MHz (contro i 5 MHz fissi del W-CDMA). L'assegnazione dell'ampiezza di banda è scalabile e può essere di 1.25 MHz, 1.6 MHz, 2.5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15MHz o 20 MHz. La banda di 5 MHz consente una transizione senza traumi allo spettro delle precedenti generazioni dei sistemi radiomobili.

Da notare inoltre che LTE consente di ottenere un'efficienza spettrale pari a 5 bit/s/Hz in downlink e 2.5 bit/s/Hz in uplink. Questi valori sono 3 volte superiori alla versione più evoluta dell'UMTS, cioè lo standard HSPA. Lo standard utilizza inoltre sia le tecniche di multiplazione duplex a divisione di tempo, TDD, che quelle a divisione di frequenza, FDD. L'uso combinato delle due tecniche consente una gestione più semplificata dei terminali a scapito delle elevate velocità ottenibili tramite la tecnica FDD.

Grazie all'adozione dell'architettura E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) si riescono a garantire le performance dichiarate entro un raggio di 5 Km. Un lieve peggioramento in esecuzione è tollerato entro un raggio di 30 Km. Tuttavia raggi fino a 100 Km o addirittura superiori non dovrebbero essere esclusi dalle specifiche. Le tecniche di modulazione che vengono supportate sono gli schemi QPSK, 16QAM e 64QAM sia in downlink che in uplink.

LTE è stato concepito per supportare solamente dei servizi packet-switched. Esso mira a offrire la connettività IP tra i terminali UE (User Equipment) e la rete PDN (Packet Data Network) senza alcuna interruzione in mobilità alle applicazioni utente. Nello sviluppo architetturale, chiamato "flat", si lascia più "intelligenza" alle base station così come mostrato dagli standard HSDPA e HSUPA.

L'architettura EPS (Evolved Packet System), parte fondamentale della rete E-UTRAN sulla quale si basa LTE, usa il concetto di bearers EPS per instradare il traffico IP da un gateway della PDN fino all'UE.

Un bearer è un flusso di pacchetti IP tra il gateway e l'UE con una QoS specificata. L'UE è quel dispositivo che l'utente finale utilizza per comunicare. Contiene l'USIM (Universal Subscriber Identity Module) dell'utente, usata per identificarlo nelle procedure di autenticazione e per ottenere le chiavi di sicurezza perché sia protetta l'interfaccia radio di trasmissione.

L'eNode-B (Evolved Node-B) è la stazione radio di base, Base Transceiver Station (BTS), che ha il controllo di tutte le funzioni radio relativamente alla parte prefissata del sistema. Le base station sono in genere distribuite in tutta l'area di copertura della rete. A livello funzionale operano al livello 2 della pila protocollare tra l'UE e l'EPC, essendo il punto terminale di tutti i protocolli radio diretti verso l'UE. Il loro compito è la trasmissione dei dati tra la connessione radio e la corrispondente connessione IP-based verso l'EPC.

L'MME (Mobility Management Entity) è il principale elemento di controllo dell'EPC. Assolve a differenti funzioni, tra le quali la gestione dell'autenticazione degli UE, il mobility management, cioè la registrazione della locazione degli UE nella propria area di servizio e il managing subscription profile, cioè le attività di recupero del profilo della sottoscrizione UE dall'home network.

Tutti i pacchetti IP sono trasferiti attraverso gli S-GW (Serving Gateway), che fungono da LAM (Local Mobility Anchor) per i bearer dati quando l'UE si sposta attraverso gli eNode-B.

Il P-GW (Packet Data Network Gateway) è responsabile per l'allocazione degli indirizzi IP per l'UE nonché dell'applicazione della QoS sui flussi dei dati in accordo alle regole del PCRF (Policy and Charging Resource Function).

Il PCRF è l'elemento di rete responsabile del Policy and Charging Control. Prende infatti decisioni su come un dato servizio deve essere fornito in termini di QoS. Inoltre spedisce le regole PCC quando viene creato un nuovo bearer.

L'HSS (Home Subscription Server) è il repository dei dati di sottoscrizione di tutti gli utenti permanenti della rete. Inoltre registra la posizione dell'utente all'interno della rete visitata, proprio come l'MME.

Tutte le informazioni spedite e ricevute dall'utente, come la voce codificata in una chiamata vocale, oppure i pacchetti in una connessione internet, vengono trasportati attraverso l'user plane. Esso comprende gli stream dati e i bearer a loro dedicati. Racchiude al suo interno il livello MAC, lo strato PDCP (Packet Data Convergence Protocol) e lo strato RLC (Radio Link Control).

PDCP processa i messaggi dell'RRC (Radio Resource Control) nel control plane e i pacchetti IP nell'user plane. A seconda del bearer radio, le principali funzioni del PDCP sono la compressione dell'header IP, la sicurezza (integrità dei dati e cifratura) e il supporto della ritrasmissione durante l'handover. C'è una sola entità PDCP per bearer.

Radio Link Control esegue la segmentazione e il re-assemblaggio dei pacchetti dello strato superiore in modo da adattare la loro dimensione a quella che attualmente può essere trasmessa sul canale. Esegue, inoltre, la ritrasmissione dei pacchetti per ovviare a quelli perduti in fase di trasmissione.

Il livello MAC si occupa del multiplexing dei dati provenienti dai diversi radio bearer. Decidendo la quantità di dati che possono essere trasmessi da ciascun radio bearer e istruendo il livello RLC circa la dimensione dei pacchetti ammissibili, il livello MAC riesce a ottenere e a garantire la QoS richiesta per ogni radio bearer.

Il control plane tratta i servizi di segnalazione e di controllo della connessione all'interno della pila protocollare LTE. Lo strato che ne fa parte si chiama RRC e svolge un gran numero di funzioni. Tra queste il broadcasting delle informazioni di sistema, che includono le informazioni comuni NAS (Non-Access Stratum) e tutte le procedure relative all'instaurazione, modifica e rilascio della connessione RRC, incluse le tecniche di paging, l'attivazione iniziale delle politiche di sicurezza, la creazione dei bearer di segnalazione (SRB, Signalling Radio Bearer) e dei bearer dati (DRB, Data Radio Bearer), il trasferimento del contesto dell'UE, la configurazione dei livelli protocollari più bassi e le procedure da adottare in caso di mancato collegamento radio.

Il livello fisico della pila protocollare LTE offre il servizio di trasporto dei dati ai livelli superiori. Esso è stato progettato per adempiere a molteplici funzioni; tra queste vi è il rilevamento degli errori sul transport channel e la loro indicazione ai livelli superiori, la codifica/decodifica FEC del transport channel, l'utilizzo delle tecniche HARQ per ovviare agli errori in fase di trasmissione, la sincronizzazione nel dominio della frequenza e del tempo e il supporto alla variante beamforming della tecnologia di trasmissione MIMO. Viene utilizzata la tecnica OFDMA con prefisso ciclico in downlink e la tecnica SC-FDMA con prefisso ciclico in uplink.

Le Transmission Resources dello standard LTE possiedono dimensioni spaziali, temporali e frequenziali. Un frame radio, della durata di 10 ms, viene suddiviso in 10 sottoframe da 1 ms ciascuno. Ogni sottoframe viene diviso in due slot da 0.5 ms. Ciascun slot comprende sette simboli OFDM nel caso di lunghezza normale del prefisso ciclico, oppure sei simboli OFDM se la cella è configurata con il prefisso ciclico esteso. Nel dominio frequenziale le resources sono raggruppate in unità di 12 sottoportanti per un totale di 180 KHz, in modo tale che un'unità di 12 sottoportanti per la durata di un slot si chiami Resource Block. La più piccola risorsa trasmissiva è il Resource Element, che consiste di una sottoportante della durata di un simbolo OFDM.

Un Resource Block comprende quindi 84 Resource Element se il prefisso ciclico ha la lunghezza normale, e 72 se il prefisso ciclico ha lunghezza estesa. Tali risorse vengono modulate e trasportate usando in maniera combinata le tecniche OFDM e OFDMA in downlink e SC-FDMA in uplink.

La tecnica OFDM suddivide la banda disponibile in tante sottobande e trasmette i dati su flussi paralleli. In ciascuna delle sottobande una sottoportante è modulata con un livello differente QAM, che dipende dal tipo dei dati e dall'interfaccia radio in quella particolare banda di frequenza. Poichè la trasmissione dei dati avviene in parallelo piuttosto che in serie, i simboli trasmessi con la tecnica OFDM sono generalmente molto più lunghi dei simboli trasmessi su sistemi a una portante a parità della velocità di trasmissione utilizzata.

OFDMA è un'estensione della tecnica OFDM che implementa un sistema di comunicazione multi-utente. Si assume che un utente singolo riceva i dati da tutte le sottoportanti a un qualsiasi istante di tempo. OFDMA distribuisce le sottoportanti a diversi utenti nello stesso tempo, in modo che utenti multipli possano essere schedati per ricevere i dati simultaneamente.

In SC-FDMA vengono impiegate una serie di sottoportanti ortogonali per trasmettere le informazioni contenute nei simboli modulati. A differenza di OFDMA, con la tecnica SC-FDMA le sottoportanti vengono trasmesse sequenzialmente e non in parallelo.

Lo strato MAC è il sottostrato più basso del livello 2 della pila protocollare LTE. La connessione verso il livello fisico avviene tramite i transport channels, mentre la connessione verso il livello RLC avviene tramite i logical channels. Due delle sue funzioni più importanti sono il multiplexing e il demultiplexing tra i canali logici e i canali di trasporto. Nel lato trasmittente costruisce le MAC PDUs (Protocol Data Unit), note con il nome di transport block, dalle MAC SDUs (Service Data Unit) ricevute attraverso i canali logici, mentre nel lato ricevente recupera le MAC SDUs dalle MAC PDUs ricevute attraverso i canali di trasporto.

Può essere considerato come costituito da un'entità HARQ, da un'entità di multiplexing/demultiplexing e da un controller MAC che esegue varie funzioni di controllo.

Ad esempio l'entità HARQ è responsabile per le operazioni di trasmissione e ricezione HARQ. Le operazioni di trasmissione HARQ comprendono la trasmissione e la ritrasmissione dei transport blocks, la ricezione e il processing degli ACK/NACK. Le

operazioni di ricezione HARQ includono la ricezione dei transport block, la combinazione dei dati ricevuti e la generazione della segnalazione ACK/NACK.

Il controller MAC è responsabile di molte funzioni importanti di controllo, tra le quali la gestione del meccanismo DRX e della procedura RACH (Random Access Channel), lo scheduling dei dati e, cosa non meno rilevante, il controllo del timing in uplink.

La tecnica DRX di ricezione discontinua, che limita l'attività del ricevitore al tempo strettamente indispensabile per poter ricevere il segnale, mira ad accrescere l'autonomia dell'apparato portatile.

Grazie alle tecnologie impiegate, LTE è in grado di superare, in prestazioni lo standard WiMAX del 60% circa. I risultati ottenuti dalle simulazioni cambiano a seconda che vengano condotti su scenari a micro-celle, con ISD (Inter-Site Distance) minore o uguale a 500 m, o su scenari a macro-cella, con ISD strettamente maggiore di 500 m. L'obiettivo di progetto per gli UE LTE è quello di raggiungere la velocità massima di 300 Mbps in downlink utilizzando la modulazione 64QAM e la configurazione MIMO 4x4.

La velocità massima teorica di picco in downlink che è possibile raggiungere è approssimativamente di 172 Mbps in configurazione MIMO 2x2. Come detto, se si utilizza la configurazione MIMO 4x4, la velocità di picco massima disponibile risulta 325 Mbps. Usando MIMO 2x2, la velocità di picco a 5 MHz è di 42.5 Mbps mentre a 1.4 MHz scende fino a 8.8 Mbps.

Per quanto riguarda le velocità di picco in uplink, usando la modulazione 64QAM, il massimo ottenibile è 86 Mbps, mentre si raggiungono i 57 Mbps con la tecnica 16QAM a 20 MHz.

La Release 8 3GPP ha definito 5 categorie terminali utente, ciascuna delle quali avente una differente capacità in termini di bit rate. La categoria 1 possiede la capacità più bassa con bit rate massimo in downlink di 10 Mbps e di 5 Mbps in uplink. La categoria 5 invece è la classe più alta in termini di capacità, con i suoi 300 Mbps in downlink e i 75 Mbps in uplink. Tutte le categorie devono supportare le opzioni possibili di ampiezza di banda, dai 1.4 MHz fino ai 20 MHz, la modulazione 64QAM in downlink e la configurazione trasmissiva 1-a-4 agli eNode-B. La categoria 1 non ha il bisogno di supportare MIMO, mentre le categorie 2, 3 e 4 adottano MIMO 2x2. La categoria 5 utilizza MIMO 4x4. La modulazione in uplink è la 16QAM, ad eccezione della categoria 5 costretta a utilizzare la 64QAM.

Considerando le prestazioni del livello di collegamento in downlink, gli scenari a macro-celle offrono le prestazioni basilari dello standard LTE, mentre i casi particolari di sviluppo, come gli scenari a micro-celle, sono utilizzati per valutare le tecniche MIMO di multiplexing spaziale.

Tali tecniche sono capaci di sfruttare al meglio l'alto SNIR (Signal-To-Noise Plus Interference Ratio) del canale, cioè il rapporto tra la potenza ricevuta del segnale desiderato per la potenza ricevuta dei segnali non desiderati, come il rumore e le interferenze. Il valore medio dello SNIR prende il nome di G-factor (Geometry Factor) e viene espresso in decibel. Questa grandezza serve per comparare le prestazioni nei diversi scenari di utilizzo di LTE.

Gli scenari a macro-celle hanno mediamente un G-factor di 2-3 dB, mentre gli scenari a micro-celle hanno G-factor al di sopra degli 8 dB. Una macro-cella, in pratica, non ha valori al di sopra dei 15 dB mentre la micro-cella ha il 25% dei campioni sopra i 15 dB. I G-factor più elevati delle micro-celle permettono un maggior throughput rispetto alle macro-celle.

Senza l'utilizzo della tecnica MIMO, il throughput medio in ambiente a macro-celle è 1.4 Mbps, mentre lo scenario a micro-celle offre 2.5 Mbps. I valori massimi sono 3-4 Mbps. Considerando gli stessi scenari adottando però la tecnica MIMO 2x2, i data rate degli ambienti a micro-celle aumentano da 4 a 7 Mbps.

Per valutare le prestazioni in uplink si considera la modalità di trasferimento Best Effort con l'utilizzo dei Sounding Reference Signals e di scheduler di tipo round robin e proportional fair. I risultati migliori si apprezzano considerando gli scheduler proportional fair e l'utilizzo delle tecniche MIMO di beamforming.

La valutazione delle tecniche MIMO viene effettuata simulando il framework geometrico di disposizione delle base station e degli UE, lo Spatial Channel Model. Le caratteristiche spaziali del canale MIMO sono definite da un coefficiente angolare e da una distribuzione direzionale dei cammini di propagazione, che vanno dalla base station verso gli UE, e viceversa. Le simulazioni di sistema consistono di celle/settori multipli, di base station e di UE multipli. Le metriche, quali il throughput e il ritardo, vengono valutate in un gran numero di esperimenti, chiamati Drops, che riguardano un numero predefinito di radio frame.

MIMO è stata valutata per tutte le sue configurazioni: cioè 2x2 a), b) e c) 4x2 a), b), c) e d) e 8x2 a), b), c) e d). Sono stati provati tutti e tre gli scenari del framework, l'ambiente

urbano a micro-celle con ISD pari a 555 m, l'ambiente urbano a macro-celle con ISD pari a 1350 m e l'ambiente suburbano a macro-celle con ISD pari a 2700 m.

Dai test effettuati risulta che la tecnologia MIMO 4x2 procura il 20% in più di costi e complessità computazionale rispetto alla tecnologia 2x2 MIMO mentre 8x2 MIMO arriva al 50% in più. Nello scenario urbano a micro-celle conviene adottare per lo schema 2x2 la configurazione (a), per il 4x2 la configurazione (d) e per 8x2 MIMO la configurazione (c). Nello scenario urbano a macro-celle conviene adottare per lo schema 2x2 la configurazione (a), per il 4x2 la configurazione (d) e per 8x2 MIMO la configurazione (c) oppure (d). Nello scenario suburbano a macro-celle conviene adottare per lo schema 2x2 la configurazione (a), per il 4x2 la configurazione (d) e per 8x2 MIMO la configurazione (d). Per tutti e tre gli scenari adottare 8 antenne all'eNode-B consente di ottenere le migliori prestazioni.

Il confronto di LTE con la tecnologia WiMAX coinvolge gli scenari a 2.6 GHz di banda con un'ampiezza di banda di 20 MHz. Sono ammesse come velocità dei terminali utente sia quella pedonale, PedA, che quella veicolare, VehA. La correlazione spaziale del canale viene trascurata, assumendo una sufficiente separazione delle antenne e un coefficiente angolare consistente.

Vengono esaminati gli scenari SISO, MIMO 2x2 Transmit Diversity, e MIMO 2x2 Spatial Multiplexing. Nello scenario SISO, le prestazioni dimostrano di essere simili, con un throughput limitato a 3.84 Mbps per la modulazione 64QAM con code rate 2/3, utilizzando soltanto il 6% delle risorse disponibili (corrispondenti a 1 MHz di ampiezza di banda). Occupando l'intera ampiezza di banda di 20 MHz, si raggiungerebbe, come previsto, una velocità di 64 Mbps.

Nello scenario MIMO 2x2 Transmit Diversity, vi è un guadagno di 5 dB rispetto alle simulazioni dello scenario SISO. Nel caso di 4QAM con code rate pari a 3/4, WiMAX e LTE raggiungono gli stessi risultati in termini di performance. Per tutti gli altri scenari MCS (Modulation and Coding Schemes), LTE rivela un guadagno piccolo, ma non per questo trascurabile, di 1 dB. Nel caso di velocità pedonale LTE utilizza meno overhead, di conseguenza ha un throughput più alto di circa il 17% per ogni schema di codifica e modulazione con SNIR elevato. Per esempio nel caso di 64QAM con code rate pari a 2/3, LTE ottiene 60.8 Mbps mentre WiMAX raggiunge "solo" 51.84 Mbps, per valori dello SNIR superiori ai 15 dB.

Nello scenario MIMO 2x2 Spatial Multiplexing, in modo simile allo scenario SISO e a MIMO Transmit Diversity, vi è un piccolo vantaggio di LTE su WiMAX di circa 1 dB.

Ma è nel caso pedonale che LTE eccelle: usando la tecnica 64QAM con code rate pari a $2/3$, LTE totalizza 121.6 Mbps laddove WiMAX raggiunge “soltanto” 103.7 Mbps, per i valori dello SNIR che eccedono i 25 dB.

Concludendo si può dire che la tesi mostra l'evoluzione dello standard LTE, descrivendone le sue potenzialità e i suoi limiti. Viene descritta interamente l'architettura E-UTRAN, che è alla base del suo sviluppo, mostrandone i vantaggi rispetto alla tecnologia UMTS e HSPA. Sono inoltre illustrati i livelli protocollari fisico e data-link, con riferimento agli schemi user plane e control plane. Infine vengono misurate e valutate le prestazioni LTE in termini di velocità di picco, di efficienza spettrale e di prestazioni MIMO, tanto in uplink quanto in downlink. È presente un confronto dello standard rispetto alla tecnologia WiMAX, sua diretta concorrente, in termini di throughput negli scenari urbani e suburbani, tanto in scenari a micro-celle quanto in scenari a macro-celle.