

Università degli Studi di Padova



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria dell'informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Tesi di Laurea

Valutazione di tecniche di allocazione di risorse in reti cellulari di quarta generazione

Relatore
Ing. Leonardo Badia

Corelatore
Ing. Luca Anchora

Laureando
Antonino Orsino
n° matr. 623012 / TC

Anno Accademico 2011 / 2012

Indice

Lista degli acronimi	v
Premessa	vii
1. Introduzione	1
2. Lo standard LTE	5
2.1 Introduzione	5
2.2 Architettura di rete	9
2.2.1 <i>User Equipment</i>	11
2.2.2 <i>Rete di accesso</i>	11
2.2.3 <i>Core Network</i>	13
2.3 Lo strato fisico	15
2.3.1 <i>Multiplicazione OFDMA</i>	16
2.3.2 <i>Multiplicazione SC-FDMA</i>	17
2.4 I canali	19
2.4.1 <i>I canali fisici</i>	19
2.4.2 <i>I canali di trasporto</i>	22
2.4.3 <i>I canali logici</i>	23
3. Lo Spectrum Sharing	27
3.1 Introduzione	27
3.2 Spectrum Sharing	28
3.3 Il controllo di potenza	29
3.3.1 <i>Il controllo di potenza del canale PUSCH</i>	30
3.3.2 <i>Densità spettrale di potenza</i>	32
3.3.3 <i>Controllo di potenza ad anello aperto</i>	32
3.3.4 <i>Controllo di potenza ad anello chiuso</i>	33
3.3.5 <i>Controllo di potenza in downlink</i>	35

4. NS-3 ed algoritmo proposto	39
4.1 Introduzione	39
4.2 Descrizione del sistema	40
4.2.1 <i>Allocazione inter-cella</i>	41
4.2.2 <i>Coordinazione inter-cella</i>	42
4.3 Nuova estensione per NS-3	43
4.3.1 <i>Scenario utilizzato</i>	44
4.3.2 <i>Algoritmo proposto</i>	46
5. Risultati a livello di sistema	51
5.1 Introduzione	51
5.2 Descrizione dello scenario	51
5.3 Risultati	55
6. Conclusioni e ricerche future	63
7. Bibliografia	67
8. Ringraziamenti	73

Lista degli acronimi

3GPP	Third Generation Partnership Project
CN	Core Network
CQI	Channel Quality Indicator
EPS	Evolved Packet System
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
FDD	Frequency Division Duplexing
HSDPA	High Speed Download Packet Access
HSPA	High Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Service
HSUPA	High Speed Upload Packet Access
ITU	International Telecommunication Union
LTE	Long Term Evolution
ME	Mobile Equipment
MIMO	Multiple In Multiple Out
MME	Mobility Management Entity
MU-MIMO	Multi User MIMO
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access
P-GW	Packet Data Network Gateway
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PCRF	Policy Control and Charging Rules Function
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel

PL	Path Loss
PRB	Physical Resource Block
PSD	Power Spectral Density
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RB	Resource Block
RE	Resource Element
RNC	Radio Network Controller
RRC	Radio Resource Control
RS	Resource Signal
S-GW	Serving Gateway
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SINR	Signal to Interference Noise Ratio
SNR	Signal to Noise Ratio
SU-MIMO	Single User MIMO
TDD	Time Division Duplexing
TPC	Total Power Control
UE	User Equipment
UICC	Universal Integrated Circuit Card
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
USIM	Universal Subscriber Identity Module
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access

Premessa

Le telecomunicazioni mobili negli ultimi anni hanno avuto una rapida diffusione, non solo per quel che riguarda il trasferimento dei dati. L'incremento delle velocità di connessione e la sempre più crescente multimedialità dei dispositivi, ha creato non pochi problemi dal punto di vista della banda utilizzata.

Data la scarsità di risorse a disposizione e le elevate richieste degli utenti, è d'obbligo utilizzare le risorse attraverso un'accurata, ma soprattutto efficiente, politica di gestione. A questo scopo, è stata utilizzata un'allocazione di banda dinamica, che contrariamente a quella statica, ci permette di affidare le frequenze inutilizzate ad altre persone che le richiedono.

Il problema della gestione dello spettro radio, è stato ampiamente affrontato in letteratura, anche con buoni risultati. Quello che propone questo elaborato, è integrare uno schema di controllo di potenza, con quello che viene definito come Spectrum Sharing, dove due operatori mettono in condivisione una porzione della loro banda che può venire usata da tutti gli utenti attraverso delle politiche di gestione delle contese.

E' definito, quindi, un algoritmo di controllo di potenza, compatibile con lo standard LTE, che ci permetterà di dimostrare come in alcuni casi, considerando dei parametri come l'SINR, la potenza di ogni sotto-canale e la porzione di banda condivisa, unitamente all'algoritmo da noi proposto, la capacità dell'intero sistema aumenti, senza compromettere in modo evidente la qualità delle trasmissioni.

Per validare le nostre teorie ci serviremo di simulazioni ricavate da un'estensione ad hoc per un noto simulatore di reti di telecomunicazioni, dove verrà implementato il nostro algoritmo e paragonato ad alcuni esistenti, il tutto considerando un scenario di simulazione il più possibile reale.

Capitolo 1

Introduzione

Il mondo della telefonia mobile, negli ultimi anni, ha conosciuto un progresso e un'espansione di grande impatto sulla vita giornaliera delle persone. Mentre una volta il telefono cellulare era considerato un semplice apparecchio elettronico atto a compiere chiamate o mandare messaggi, ora invece è visto come una chiave universale per le comunicazioni multimediali, poiché ci permette di essere costantemente collegati ad internet, controllare periodicamente la nostra mail, e in generale offre una serie di applicazioni web-based molto utili quotidianamente.

Lo sviluppo non è stato solo a livello “applicativo”, ma anche a livello “fisico”, giacché in questo momento i terminali sono sempre più piccoli e performanti e offrono svariate modalità di interazione, dal touchscreen alla tastiera fisica qwerty o, in alcuni casi, entrambi.

Lo sviluppo tecnologico delle reti mobili, congiuntamente a quello della rete internet e delle applicazioni web in generale, e l'aumentare di telefoni di ultima generazione, ha evidenziato però un accrescere del traffico dati e un sovraccarico della rete mobile, sottolineando l'inadeguatezza delle infrastrutture attuali e il conseguente bisogno di una politica di gestione delle risorse radio più efficiente. Il crescente bisogno di data-rate sempre più alti e ritardi di trasmissione esigui,

congiuntamente all'esigenza di essere connessi alla rete sempre e ovunque, pone il problema ai gestori telefonici o di servizi internet di una gestione appropriata delle risorse radio e delle infrastrutture.

Il punto su cui si concentrerà questo elaborato sarà di trovare una valida soluzione per un corretto uso dello spettro. Più utenti cercheranno di accedere a delle risorse condivise in modo da compiere la loro trasmissione, il tutto però riferito al caso "ortogonale", in cui non più di un utente può accedere alla risorsa condivisa.

Lo scenario considerato avrà come scopo la coesistenza multi-operatore, già ampiamente documentata in letteratura [3]. Ogni operatore ha la propria porzione di banda, ed è incapace di distinguere le trasmissioni degli operatori vicini vedendole come delle interferenze, quindi l'unico modo per condividere il proprio spettro radio è quello di dividerlo in porzioni più piccole (vedi Figura 1.1) [36]. Uno dei difetti di questa tecnica è l'inefficienza con cui sono sfruttate le risorse radio.

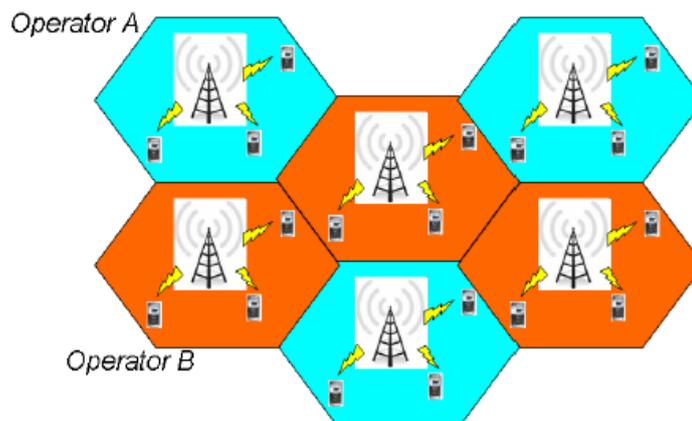


Figura 1.1: Scenario multi-operatore.

Si può verificare, infatti, una situazione in cui un nodo ha poco traffico da gestire, lasciando parte del proprio spettro inutilizzato. Tale spettro, invece, potrebbe

essere assegnato ad un altro nodo che fosse saturo e non riuscisse a soddisfare tutte le richieste degli utenti.

Di fondamentale importanza sarà quindi il concetto di spectrum sharing tra gli operatori di reti cellulari, dove vi è uno “spettro radio comune” che è visto come un’estensione della porzione iniziale dello spettro.

E’ stato dimostrato che questo concetto, se usato correttamente, non solo aumenta l’efficienza della rete, ma aumenta anche il livello di soddisfazione degli utenti [3]. Nella Figura 1.2 è esposto in maniera più chiara il concetto di spectrum sharing.

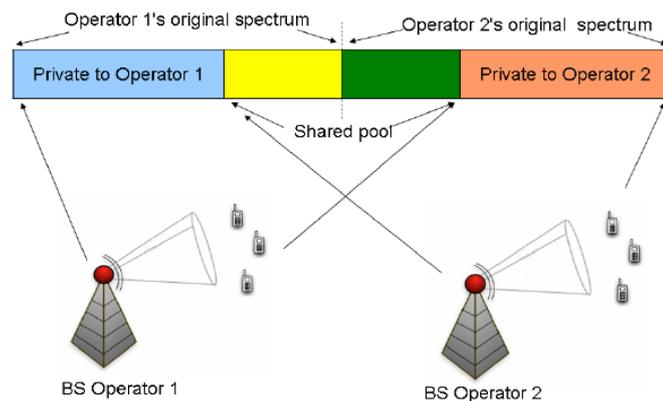


Figura 1.2: Spectrum sharing.

Molte tecniche di gestione delle risorse radio sono state sviluppate per utilizzare al meglio lo spectrum sharing, ma quello su cui si concentrerà questo elaborato sarà quello che di valutare le prestazioni della rete implementando un controllo di potenza per una più efficiente gestione dei canali modellando le risorse disponibili in base alle esigenze degli utenti

Ad ogni canale verrà assegnata una quantità variabile di potenza, dipendente da alcuni parametri di QoS (Quality of Service), ovvero la qualità dell’utente (come per esempio il CQI), e successivamente verranno valutati alcuni parametri, tra cui

la capacità totale, evidenziando attraverso delle simulazioni come il controllo di potenza può effettivamente migliorare o peggiorare la stessa.

Tutte le simulazioni sono state fatte utilizzando il simulatore di reti NS-3 [1], avvalendoci del modulo LTE implementato in esso [2]. Per il caso dello spectrum sharing è stata sviluppata un'estensione "ad hoc" con lo scenario che prenderemo in considerazione e degli algoritmi di allocazioni degli utenti [3] che ci serviranno per attuare un confronto con l'algoritmo che proporremo successivamente.

Il seguito dell'elaborato è organizzato come segue. Nel capitolo 2 viene fornita una panoramica generale sull'LTE e le reti di quarta generazione. Il capitolo 3 analizzerà le problematiche che andremo ad affrontare con le relative soluzioni proposte. Il simulatore NS-3 e il relativo modulo che utilizza lo spectrum sharing, insieme all'algoritmo da noi proposto saranno descritti nel capitolo 4. Il capitolo 5 illustrerà la campagna di simulazione e i relativi risultati ottenuti, mentre le conclusioni e i possibili sviluppi futuri verranno discussi nel capitolo 6.

Capitolo 2

Lo standard LTE

2.1 Introduzione

In telecomunicazioni l'UMTS, acronimo di Universal Mobile Telecommunication System, è uno standard di telefonia mobile di terza generazione, evoluzione del GSM [14]. Esso è stato migliorato nel corso del tempo introducendo l'*High Speed Packet Access* (HSPA) che altro non è che una famiglia di protocolli che includono l'*High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) per la trasmissione dati in downlink (verso l'utente) e l'*High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA) per la trasmissione dati in uplink (verso la rete). L'aumento del traffico dati e la necessità di avere delle velocità di trasmissione sempre più alte ha fatto sì che nel 2004 partisse il progetto *Long Term Evolution* (LTE) della tecnologia mobile *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) che aveva come scopo, il rafforzamento della *Universal Terrestrial Radio Access* (UTRA) e l'ottimizzazione dell'architettura dell'accesso radio di *3rd Generation Partnership Project* (3GPP). Gli obiettivi che si pone questo sviluppo sono principalmente:

- Incremento della velocità dei dati.
- Riduzione del tempo di latenza.
- Tecnologia di accesso radio packet-optimized.
- Riduzione dei costi.
- Supporto multi-antenna.
- Flessibilità della larghezza di banda.
- Integrazione con i sistemi già esistenti.

L’LTE è basato sull’ *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*, motivo per cui viene considerato un’evoluzione dei sistemi di quarta generazione. Solo dopo l’introduzione dello standard *LTE-Advanced* si può parlare di sistemi di quarta generazione, poiché rispetta le specifiche dettate dall’*International Telecommunication Union* (ITU) per i sistemi ITU-Advanced. Possiamo vedere le varie evoluzioni nel tempo degli standard definiti dal 3GPP [4] in Figura 2.1.

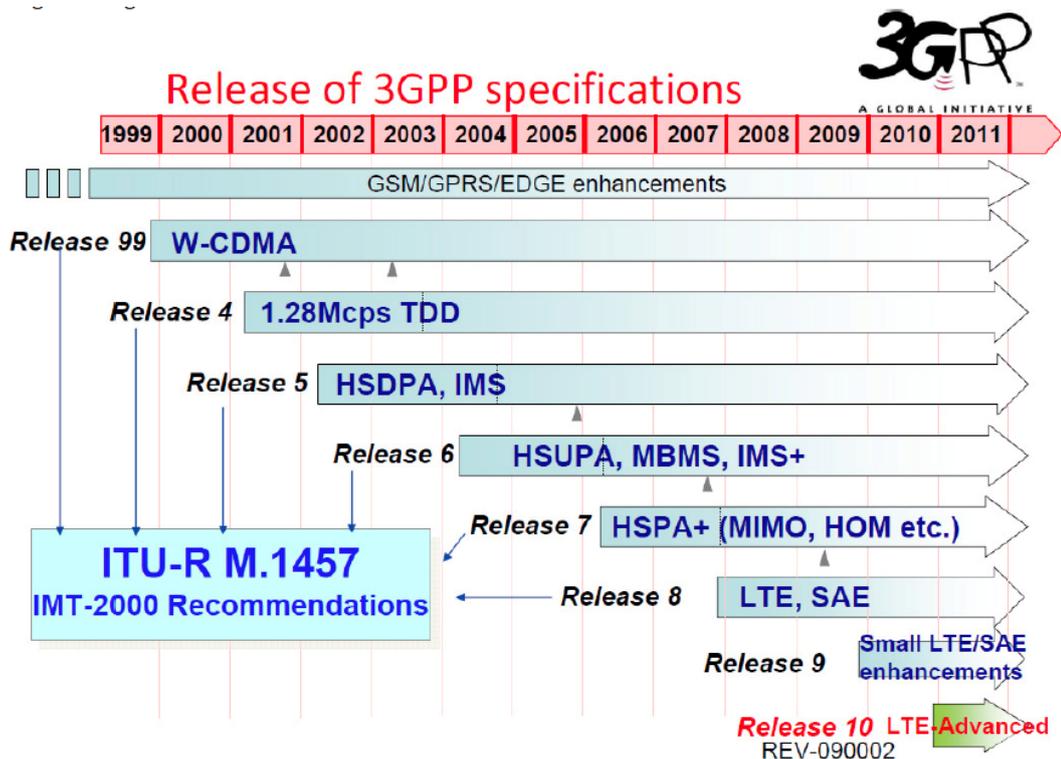


Figura 2.1: Evoluzione degli standard nel tempo.

La Figura 2.2, inoltre, ci permette di analizzare lo sviluppo delle tecnologie degli standard 3G e tecnologie senza fili, attualmente presenti nel tempo.

Come si può notare, il Mobile WiMAX [5], che appartiene alla famiglia IMT-2000, prevede che la propria long term evolution sarà compatibile con i sistemi IMT-Advanced, che saranno alla base dei moderni sistemi di telefonia mobile di quarta generazione (4G).

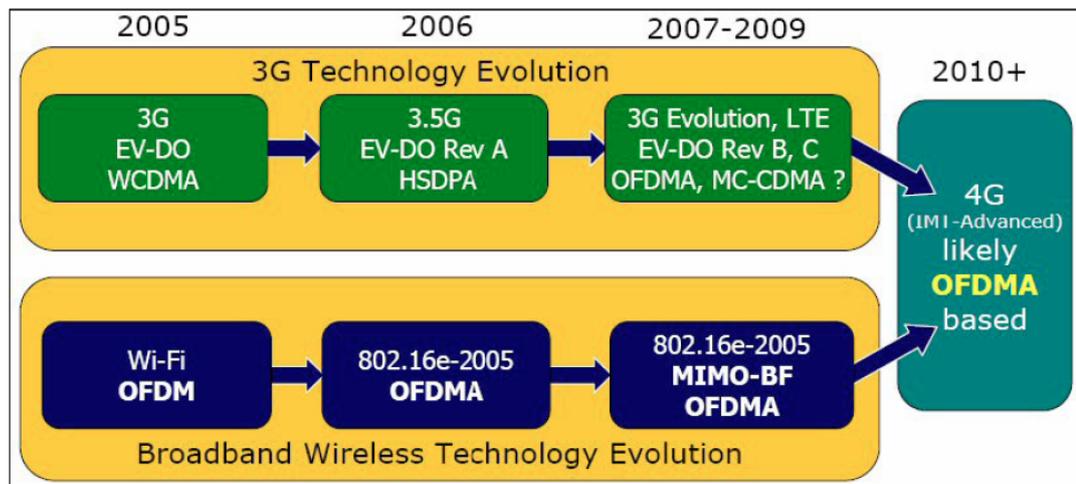


Figura 2.2: Sviluppo delle tecnologie nel tempo.

Quindi la tecnologia con le caratteristiche migliori (Tabella 2.1) atta a portare gli operatori mobili ai sistemi di quarta generazione sembra essere proprio l'LTE, anche chiamata super 3G.

Una delle maggiori peculiarità di questo standard è l'implementazione di tecniche di tipo *Multiple Input Multiple Output* (MIMO), ovvero una realizzazione di trasmissioni multiple di flussi di dati paralleli verso più ricevitori in modo da migliorare la capacità di dati trasmessi per singolo utente.

Questi sistemi, che formano una parte essenziale dell'LTE consentono un miglioramento dell'efficienza spettrale, indispensabile al fine di raggiungere gli obiettivi che si pongono i nuovi sistemi di quarta generazione.

Tabella 2.1: Confronto tra UMTS e LTE.

Requisiti	Versione attuale (Rel-6 HSxPA)	LTE E-UTRA
Picco di trasferimento dati	14 Mbps Downlink / 5.76 Mbps Uplink	100 Mbps Downlink / 50 Mbps UL
Efficienza spettrale	0.6 – 0.8 DL / 0.35 UL (bps/Hz/sector)	3-4x DL / 2-3x UL volte
5% capacità della chiamata di pacchetto	64 kbps DL / 5 Kbps UL	3-4x DL / 2-3x UL volte
Capacità di traffico media utente	900 Kbps DL / 150 Kbps UL	3-4x DL / 2-3x UL volte
Latenza	50 ms	5 ms
Tempo di instaurazione chiamata	2 sec	50 ms
Trasferimento dati in Broadcast	384 Kbps	6-8x volte
Mobilità	Fino a 250 km/h	Fino a 350 km/h
Supporto multi antenna	No	Si
Larghezza di banda	5 MHz	Scalabile (fino a 20 MHz)
RTT	200 ms (70 ms del HSPA)	Inferiore ai 10 ms

A seconda delle condizione del canale si possono distinguere due modalità di MIMO:

- *Spatial Multiplexing*: permette di trasmettere diversi flussi di dati simultaneamente nello stesso blocco di risorse di downlink. Questi flussi possono appartenere a un singolo utente (SU-MIMO) o a un differente utente (MU-MIMO) [15], dove il primo incrementa la velocità di trasmissione, mentre il secondo, la capacità complessiva di comunicazione.
- *Transmit Diversity*: usato quando il numero di flussi selezionato è uno, e nel caso in cui le condizioni del canale non permettono l'uso della modalità *Spatial Multiplexing* [15]. Ogni antenna in trasmissione può trasmettere lo stesso flusso di dati così il ricevitore ottiene una replica

dello stesso segnale. Questo aumenta il rapporto segnale/rumore al lato del ricevitore e così anche la robustezza dei dati in trasmissione.

Tale tecnologia, inoltre, dovrà essere in grado di coesistere con gli standard già esistenti, supportando contemporaneamente la qualità del servizio e l'*End-to-End Quality of Service* (QoS). Questo sarà possibile con l'utilizzo dell'OFDMA e della Single-Carrier FDMA (entrambi le esporremo successivamente in questo capitolo) per il downlink e l'uplink rispettivamente. Congiuntamente al supporto al MIMO, ci saranno inoltre i supporti alle modulazioni quali Quadrature Phase-Shift Keying (QPSK) e 16 o 64 Quadrature Amplitude Modulation (QAM), e il possibile utilizzo contemporaneo delle tecniche di duplexing Frequency Division Duplex (FDD) e Time Division Duplex (TDD) [16], illustrate entrambe in Figura 2.3.

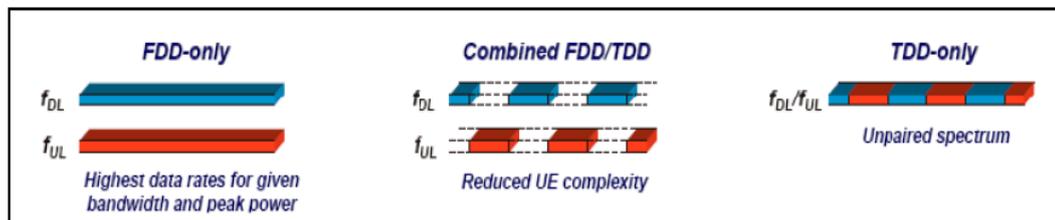


Figura 2.3: Tecniche FDD e TDD.

2.2 Architettura di rete

Il *System Architecture Evolution* (SAE) [6] è uno studio compreso tra gli obiettivi del 3GPP e riguarda l'evoluzione dell'architettura del sistema globale. Lo scopo è portare il sistema 3GPP ad un alto data rate, bassa latenza e a un sistema packet-optimized che supporti più tecnologie di accesso radio.

In questo studio sono descritti gli standard relativi alla *Core Network* (CN) [17] che è definita con lo scopo di supportare i servizi offerti dalla rete di accesso LTE.

2.2.1 *User Equipment*

Il terminale LTE è denominato *User Equipment* (EU) [19], è già come per l'UMTS, esso è visto come un apparecchio elettronico che ha delle funzionalità molto avanzate. L'UE in generale è costituito da:

- Mobile Equipment (ME).
- Universal Subscriber Identity Module (USIM).

Il primo è il terminale vero è proprio che contiene al suo interno sia l'hardware, che il software, che implementano lo standard LTE, la seconda, invece, non è altro che un circuito integrato chiamato UICC che contiene tutte le informazioni relative all'utente, alla rete e ai servizi supportati. Inizialmente gli UE erano classificati in cinque possibili categorie, a seconda delle loro specifiche prestazioni e capacità, ma con la Release 10 del 3GPP riferita all'LTE-Advanced ne sono state introdotte altre tre [7].

2.2.2 *Rete di accesso*

La rete di accesso, chiamata anche E-UTRAN, è costituita unicamente da eNB connessi tra loro tramite l'interfaccia X2 [20]. Ogni eNB è poi connesso alla CN tramite l'interfaccia S1, come mostrato in Figura 2.5.

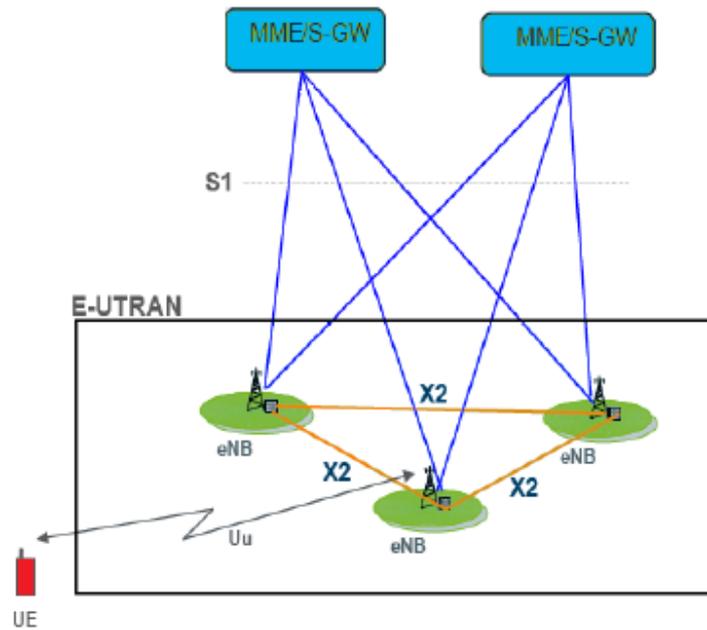


Figura 2.5: Rete di accesso LTE.

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

- *Radio Resource Management*: si occupa principalmente della gestione dei radio bearer, dello scheduling e in generale di tutta la gestione delle risorse radio.
- *Header Compression*: si occupa di comprimere quanto più possibile l'intestazione dei pacchetti IP, in modo da ridurre il più possibile il traffico di segnalazione.
- *Security*: tutti i dati trasmessi sul canale radio sono opportunamente criptati e la gestione della sicurezza prevede non solo la cifratura dei dati

ma anche la muta autenticazione di utente e rete e il controllo di integrità delle unità informative.

- *Connectivity to the EPC*: questa funzione permette di gestire i messaggi di segnalazione verso i nodi delle CN, in particolare verso il MME e verso il S-GW.

L'eNB quindi svolge le funzioni che, precedentemente, svolgevano in collaborazione l'NB e l'RNC. La struttura semplificata dell'LTE riduce l'interazione tra gli strati della pila protocollare, diminuendo la latenza e la quantità dei dati di segnalazione. E' da sottolineare, però, che l'assenza di un elemento centrale di controllo come l'RNC, aumenta la probabilità d'errore e ne rende più problematica la gestione [13]. Inoltre, per quanto riguarda l'Handover (il passaggio da una cella ad un'altra), molte tecniche usate con l'UMTS sono di difficile attuazione e di conseguenza sono necessari dei meccanismi di protezione dei dati durante lo stesso.

2.2.3 Core Network

La Core Network si occupa del trasferimento dei dati verso le reti a pacchetto interne ed esterne. I principali nodi logici che la costituiscono sono [20]:

- *Home Subscriber Service (HSS)*: si tratta di un database con tutte le informazioni per gestire un utente mobile. L'HSS include anche

l'Authentication Center (AuC) che si occupa di generare le chiavi per la cifratura dei dati e per la mutua autenticazione dell'utente e della rete.

- *Serving Gateway (S-GW)*: si tratta del nodo di interfaccia con la rete di accesso E-UTRAN e le altre reti della 3GPP (i.e. UMTS, GPRS).
- *PDN Gateway (P-GW)*: si occupa dell'allocazione degli indirizzi IP agli UE e della gestione dei flussi informativi, sulla base dei valori di QoS e sulle informazioni fornite dal PCRF.
- *Mobility Management Entity (MME)*: è il principale nodo di controllo della core network. Gestisce la segnalazione tra UE e CN e si occupa delle procedure di instaurazione della connessione per un terminale che si connette per la prima volta alla rete. Tiene anche traccia della posizione dei terminali mobili e si occupa dell'assegnazione delle identità temporanee ai singoli UE.
- *Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)*: è il nodo responsabile del controllo delle QoS. Gestisce l'assegnazione del flusso dati alle diverse classi e decide come il Policy Control Enforcement Function (PCEF), che risiede nel P-GW, dovrà gestire i flussi dati rispettando gli accordi sottoscritti con gli utenti.

2.3 Lo strato fisico

Lo strato fisico è stato sviluppato per supportare:

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

Al fine di soddisfare questi requisiti, LTE fa uso di due nuovi schemi di accesso al mezzo, entrambi basati su una divisione della banda disponibile in un insieme di sottoportanti ortogonali: la *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)* per la tratta in downlink e la *Single Carrier-Frequency Division*

Multiple Access (SC-FDMA) per la tratta in uplink [21]. Queste vanno a sostituire i precedenti schemi di accesso al mezzo illustrati in Figura 2.6.

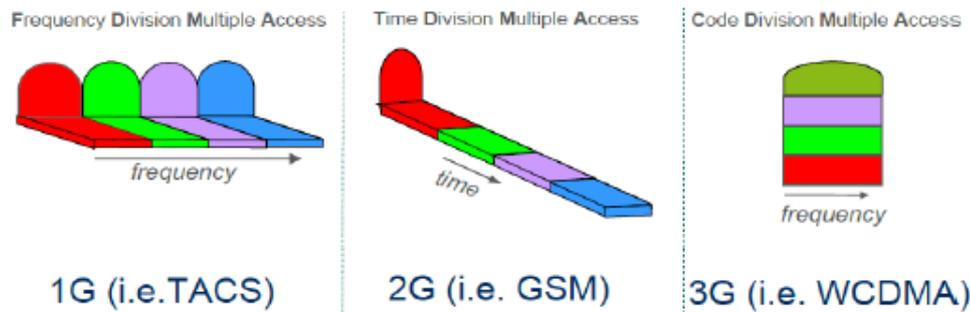


Figura 2.6: FDMA, TDMA e CDMA.

2.3.1 Moltiplicazione OFDMA

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

L'accesso multiplo è ottenuto assegnando a ciascun utente dei gruppi di sotto-portanti, permettendo così di ottenere un relativamente basso data-rate di trasmissione da parte di ogni utente.

Nello schema della modulazione OFDMA, ad ogni utente è assegnato, per un determinato intervallo di tempo, un sottoinsieme delle sotto-portanti in cui viene suddivisa la banda disponibile. Rispetto alla modulazione OFDM, le sotto-portanti non sono più assegnate a blocchi di dati distinti dello stesso utente, ma ad utenti diversi (Figura 2.7).

Uno degli svantaggi nell'uso di questa simulazione è l'elevato *peak-to-average ratio* (PAR), definito come il rapporto tra il fattore di picco e il valore *root-mean-square* [13].

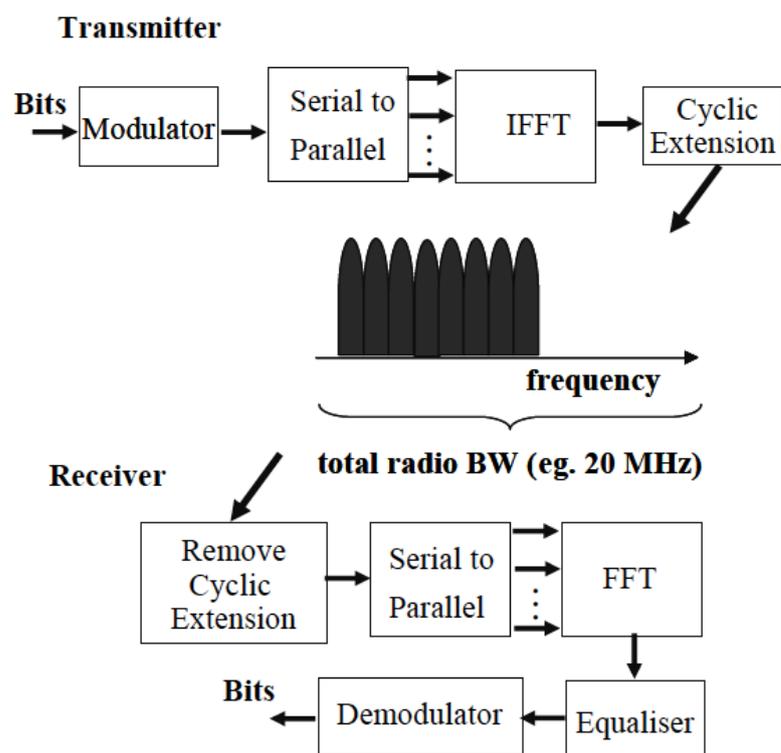


Figura 2.7: Schema di modulazione OFDMA.

Un segnale con un PAR elevato, per essere ricevuto correttamente, richiede l'uso di amplificatori di potenza con elevata linearità, che aumentano i costi dei ricevitori.

2.3.2 Multiplazione SC-FDMA

La modulazione OFDMA soddisfa pienamente i requisiti per il downlink, mentre è meno adatta per l'uplink. La causa di ciò è principalmente il *peak-to-average power ratio* (PAPR), una proprietà del segnale OFDMA che, a valori bassi, fa risultare una minor copertura in uplink.

Si è deciso perciò di utilizzare una versione modificata dell'OFDMA chiamata Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA). In Figura 2.8

possiamo vedere un confronto tra le due modulazioni, notando che in entrambe, il processo del segnale ha delle somiglianze.

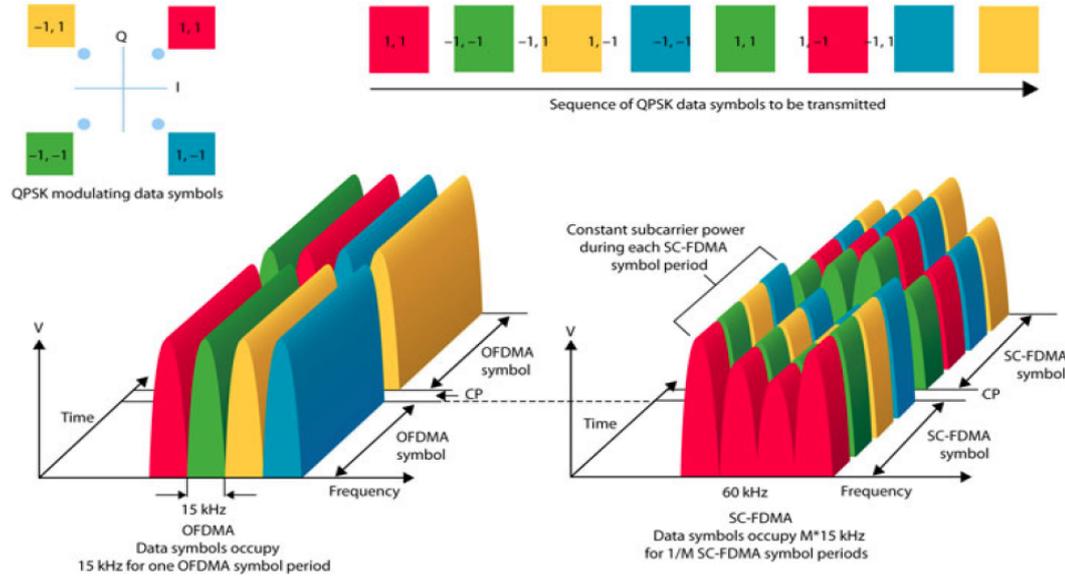


Figura 2.8: Confronto tra OFDMA e SC-FDMA.

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

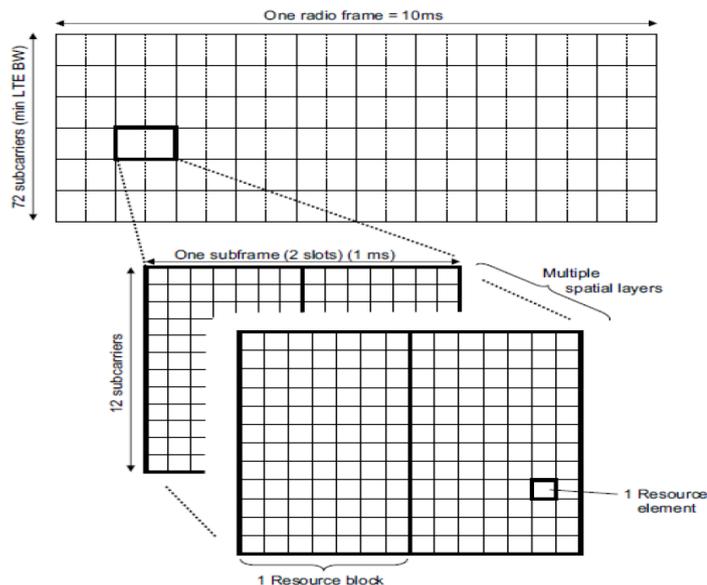


Figura 2.9: Assegnazione Resource Block in tempo e frequenza.

Più in generale possiamo dire che in LTE le risorse disponibili, sia in uplink che in downlink, sono gestite secondo una struttura a griglia tempo-frequenza ben determinata (Figura 2.9), dove nel dominio del tempo i dati sono organizzati in trame della durata di 10 ms, che a loro volta sono costituite da 10 sotto-trame da 1 ms, ciascuna delle quali contiene due slot (0.5 ms).

Ogni slot comprende un numero di simboli OFDM che dipende dalla lunghezza del prefisso ciclico, ed è costituito da 12 sotto-portanti spaziate di 15 Hz che nel loro insieme sono indicate come Resource Block (RB). La più piccola unità del dominio è il Resource Element (RE), che consiste in una sotto-portante per la durata di un simbolo OFDM.

2.4 I canali

2.4.1 I canali fisici

Per il downlink abbiamo i seguenti canali fisici [22]:

- *Physical Broadcast Channel (PBCH)*: è il canale adibito al trasporto delle informazioni del sistema per i requisiti dell'UE utili ad accedere alla rete, perciò porta anche l'informazione della larghezza di banda del sistema.
- *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)*: viene trasmesso nel primo simbolo OFDM del sub frame o del campo del Downlink Pilot Timeslot (DwPTS) e ha il compito di indicare la quantità di simboli OFDM che trasportano i dati del canale PDCCH in questo sub frame.

- *Physical Downlink Control Channel (PDCCH)*: contiene le informazioni di controllo di downlink (DCI), il suo formato cambia un po' per la modalità LTE TDD e LTE FDD. Il PDCCH viene trasmesso all'inizio di ogni sub frame e informa la stazione mobile sulla destinazione, verso lo stesso canale, dei dati di PDSCH che si trovano in downlink e quali risorse si possono usare per la trasmissione in uplink.
- *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)*: utilizzato esclusivamente per la trasmissione dei dati dell'utente. Canale nel quale può essere utilizzata la tecnica MIMO per l'aumento della velocità di trasmissione. La stazione mobile manda indietro un segnale di riconoscimento detto Acknowledgement (ACK) in uplink. Mentre se avviene un errore in trasmissione viene inviata una richiesta per la ripetizione della trasmissione (Not- ACK). A differenza di LTE FDD e LTE TDD è possibile inviare una singola risposta ACK/NACK per trasmissioni multiple del canale PDSCH.
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)*: questo canale ha il compito di portare le risposte ACK/NACK per trasmettere i pacchetti di uplink.
- *Physical Multicast Channel (PMCH)*: trasporta le informazioni del sistema con obiettivo il multicast.

Il canale fisico di uplink si compone di una serie di resource element che portano l'informazione proveniente dai livelli superiori e dalla sua interfaccia nota. Sono definiti i seguenti canali:

- *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)*: questo canale di uplink è di fatto la controparte del canale di download PDSCH. Il suo scopo è quello di trasmettere i dati dell'utente dalla stazione mobile alla stazione di base. Le informazioni di controllo di uplink come la qualità di canale, richieste di programmazione (scheduling request) e le risposte ACK/NACK per i pacchetti di downlink vengono anche queste trasmesse per mezzo di questo canale. Come per PDSCH, una serie di risposte ACK/NACK può essere spedita per trasmissioni PUSCH multiple dalla stazione di base nella modalità TDD.
- *Physical Uplink Control Channel (PUCCH)*: trasporta anch'esso informazioni di controllo, ma non viene mai trasmesso simultaneamente con il PUSCH dallo stesso UE, lo può fare solamente nel caso in cui una stazione mobile non abbia pacchetti in fase di trasmissione da parte del PUSCH. Può trasmettere informazioni di controllo riguardanti l'indicazione della qualità del canale (CQI), ACK/NACK, HARQ e scheduling request di uplink.
- *Physical Random Access Channel (PRACH)*: viene usato per le funzioni ad accesso casuale.

2.4.2 I canali di trasporto

Non ci sono più canali dedicati, ciò al fine di focalizzarsi sulla possibilità di condividere le operazioni di canale. Questo ha portato ad una riduzione degli stessi canali di trasporto in modo tale da poter anche ridurre la complessità dell'architettura del protocollo LTE. I canali di trasporto in Downlink sono [23]:

- *Broadcast Channel (BCH)*: è usato dalle stazioni di base per fornire informazioni di segnalazione alla stazione mobile. Quest'ultima ha bisogno di tali informazioni per trovare una rete, sincronizzarla e connetterla ad esso.
- *Downlink Shared Channel (DL-SCH)*: è il canale principale per i trasferimenti di dati di downlink. Viene usato da diversi canali logici.
- *Paging Channel (PCH)*: il suo utilizzo principale è quello di mandare un avviso al cellulare che indica l'arrivo di una chiamata. In pratica è un canale logico che invia messaggi alla stazione mobile.
- *Multicast Channel (MCH)*: è un canale di trasmissione usato per trasferire informazioni da una sorgente a uno o più dispositivi che operano all'interno di un'area di copertura radio.

I canali di trasporto Uplink sono:

- *Uplink Shared Channel (UL-SCH)*: è un canale trasmissivo che viene usato per il trasporto dati degli utenti da una o più stazioni mobili che possono trasmettere nel canale.
- *Random Access Channel (RACH)*: è usato per trasferire le informazioni di controllo da un terminale mobile alla rete, ad esempio per l'accesso iniziale per l'instaurazione della connessione per aggiornamenti della posizione all'interno dell'area. Può anche essere usato per il trasporto di piccoli e non frequenti pacchetti di dati proveniente dall'utente.

2.4.3 I canali logici

I canali logici possono essere suddivisi in due classi, una dei canali di controllo e l'altra dei canali di traffico. I canali di controllo sono [23]:

- *Broadcast Control Channel (BCCH)*: questo canale di controllo fornisce informazioni di sistema per tutti i terminali mobili collegati al eNodeB.
- *Paging Control Channel (PCCH)*: è un canale di controllo usato per informazioni di paging quando si sta cercando una unità nella rete.
- *Common Control Channel (CCCH)*: usato per informazioni d'accesso casuali, ad esempio per azioni che includono l'installazione di una connessione.

- *Multicast Control Channel (MCCH)*: è utilizzato per le informazioni necessarie per la ricezione multi cast.
- *Dedicated Control Channel (DCCH)*: è utilizzato per trasportare informazioni di controllo specifiche dell'utente, come ad esempio per azioni di controllo comprendendo il controllo di potenza, passaggi di consegne, ecc.

I canali di traffico sono:

- *Dedicated Traffic Channel (DTCH)*: usato per la trasmissione dei dati dell'utente.
- *Multicast Traffic Channel (MTCH)*: questo canale invece trasmette i dati di più utenti (multicast)

In figura 2.10(a) è 2.10(b) sono rappresentati schematicamente sia i canali in downlink che quelli in uplink.

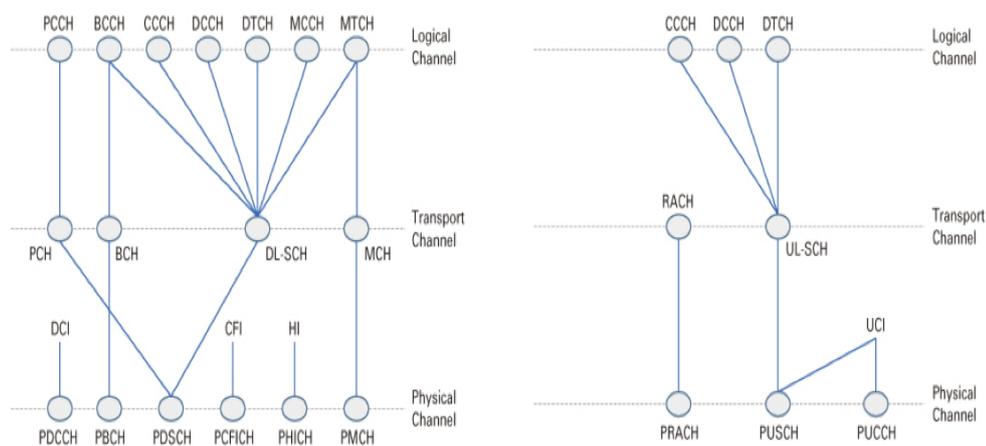


Figura 2.10: Canali in Downlink a sinistra, Canali in Uplink a destra.

Partendo dal basso verso l'alto, per ogni livello fisico, di trasporto e logico, sono illustrati i diversi tipi di canali che è possibile utilizzare sia in Downlink che in Uplink con i rispettivi collegamenti tra i canali.

Capitolo 3

Lo Spectrum Sharing

3.1 Introduzione

Il continuo aumentare del traffico dati e l'esigenza di avere delle trasmissioni con velocità sempre superiori, ci obbligano a gestire al meglio sia le risorse radio a disposizione, sia a rinnovare la rete mobile esistente, non certo consona alle richieste attuali degli utenti.

LTE risolve parzialmente questi problemi. Il suo futuro lancio porterà sicuramente ad un ammodernamento delle apparecchiature attualmente in uso, dato che si dovranno installare delle nuove stazioni radio base (che non andranno a sostituire la rete mobile esistente, bensì ad integrarla) che supportino tale standard. Il problema della gestione delle risorse radio è ancora ampiamente aperto e argomento di ricerca, dal momento che lo standard non specifica come questa gestione debba avvenire in maniera ottimale.

L'idea a cui questo elaborato fa riferimento è un algoritmo che integri lo spectrum sharing, che andremo a descrivere a breve, e il controllo di potenza. Dalla cooperazione di queste due tecniche ci si aspetta un miglioramento in termini di capacità del traffico che una stazione radio base è in grado di gestire.

3.2 Spectrum Sharing

Il concetto fondamentale su cui si basa questa tecnica è una condivisione gestibile delle risorse radio. Si tratta di passare da un'allocazione fissa ad una gestione multi-operatore, con lo scopo di aumentare l'efficienza dell'intero sistema condividendo parte dello spettro radio tra diversi provider [33].

Attualmente, in molti paesi, a ciascun operatore è data una porzione dello spettro radio [24], che viene affidatagli dopo una gara d'appalto. In questo modo l'interferenza che un operatore può provocare ai suoi vicini è completamente trascurata, dal momento che ogni stazione radio base conosce solamente ciò che succede dentro alla sua cella, ignorando ciò che succede alle stazioni radio base adiacenti. L'allocazione esclusiva, quindi, permette di sapere esattamente all'interno di ogni singola cella quanti utenti è possibile gestire, la quantità dello spettro usato e la qualità delle trasmissioni che viene garantita. E' evidente che un'allocazione di questo tipo fa un uso inefficiente delle risorse radio. In primo luogo, una stazione radio base non sempre ha un livello di traffico così intenso da usare completamente tutto lo spettro radio a disposizione, quindi ci possono essere delle risorse che rimangono inutilizzate e potrebbero essere assegnate ad altri utenti delle celle adiacenti. In secondo luogo, lo sfruttamento degli effetti della diversità multi-utente nelle trasmissioni in downlink di una stazione radio base è limitato alle frequenze che sono assegnate, anche se si potrebbe raggiungere una maggiore efficienza impiegando le frequenze che sono rimaste inutilizzate da altri operatori.

L'introduzione di una zona (vedi Figura 3.1) in cui vi è una sovrapposizione degli spettri di operatori diversi sembra risolvere queste problematiche. Naturalmente c'è bisogno di sincronizzazione tra gli operatori che condividono lo spettro, affinché si decida quale parte sia più conveniente mettere in comune ed in che

modo è possibile accedervi. Sono due i casi che posso essere presi in considerazione: il caso ortogonale, e il caso non-ortogonale. Nel primo, l'utente ha l'utilizzo esclusivo della risorsa, e mentre la usa, nessun'altro può accedervi, nel secondo caso, invece, più utenti possono accedere alla stessa risorsa contemporaneamente, ovviamente nel caso in cui il Signal to Interference-plus-Noise Ratio (SINR) non si abbassi notevolmente.

In letteratura sono già presenti numerosi articoli riguardo lo spectrum sharing [8,9] e numerosi algoritmi sono stati elaborati per quanto riguarda l'accesso alla risorsa condivisa [3].

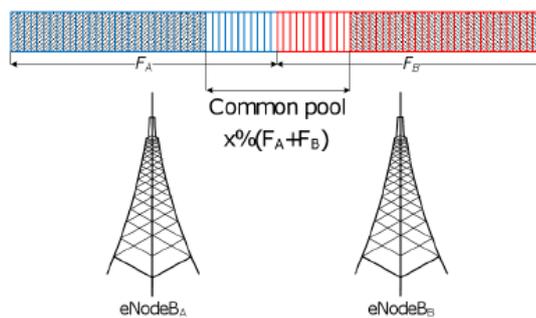


Figura 3.1: Zona di spettro radio comune.

Il nostro scopo sarà quello di elaborare una nuova mappa di allocazione delle risorse condivise integrando il controllo di potenza al fine di gestire al meglio sia la potenza totale di ogni stazione radio base, sia la potenza che viene affidata ad ogni singolo canale, nel tentativo di ottenere un aumento della capacità del sistema.

3.3 Il controllo di potenza

In uno scenario multi-utente sono condivise le stesse risorse radio, dove come conseguenza della limitata disponibilità di risorse, lo stesso canale viene assegnato

a più utenti. Il problema è che il segnale destinato ad un utente può raggiungere anche gli utenti adiacenti provocando interferenza alle loro connessioni e quindi un peggioramento della qualità del segnale. Prendendo in considerazione che un utente con una qualità alta può usare un minor quantitativo di potenza senza peggiorare la stessa in modo eccessivo, il controllo di potenza ci aiuta a far sì che questo accada però in maniera metodica e controllata, provocando una diminuzione dell'interferenza e, di conseguenza, un aumento della qualità del sistema.

Per massimizzare l'efficienza spettrale, l'LTE è stato progettato per il riutilizzo della frequenza sia in uplink che in downlink, questo vuol dire che tutte le celle all'interno della stesse rete utilizzano la stessa frequenza. E' decisivo quindi usare il controllo di potenza, affinché si assicuri il livello di SINR richiesto per mantenere un livello accettabile di comunicazione tra l'utente e la stazione radio base e contemporaneamente tenere sotto controllo l'interferenza causata dalle celle vicine.

3.3.1 Controllo di potenza del canale PUSCH

Le specifiche della 3GPP [10] definisce la potenza in trasmissione dell'UE per il canale PUSCH tramite la seguente equazione [25]:

$$P_{PUSCH} = \min\{P_{max}, 10 * \log_{10}M + P_0 + \alpha * PL + \delta_{mcs} + f(\Delta_i)\} [dBm] \quad (1)$$

dove:

- P_{max} è la massima potenza trasmessa ammessa.
- M è il numero dei blocchi di risorse (Physical Resource Block [PRB]).

- P_0 è uno specifico parametro della cella o dell'UE segnalato dal Radio Resource Control (RRC).
- α è il fattore di compensazione del path loss.
- PL è la stima del path loss in downlink.
- δ_{mcs} è lo specifico schema di modulazione e di codifica definito dalle specifiche 3GPP per l'LTE.
- $f(\Delta_i)$ è specifico dell'UE.

P_0 è calcolato [11] come:

$$P_0 = \alpha * (SNR_0 + P_n) + (1 - \alpha)(P_{max} - 10 * \log_{10} M_0) \text{ [dBm]} \quad (2)$$

dove:

- SNR_0 è il valore obiettivo dell'anello aperto.
- P_n è la potenza del rumore per PRB.
- M_0 definisce il numero di PRBs per cui il valore di SNR preso in considerazione è facilmente raggiungibile con tutta la potenza.

In figura 3.2 si può vedere lo scambio dei parametri citati nell'equazione (1) tra la stazione radio base e l'utente.

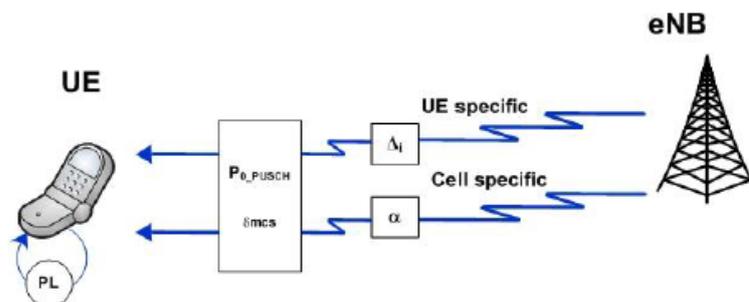


Figura 3.2: Scambio di parametri dalla stazione radio base verso l'utente.

3.3.2 Densità spettrale di potenza (PSD)

L'UE setta la sua potenza iniziale sulla base dei parametri che gli sono stati passati dalla stazione radio base e dal path loss calcolato. Naturalmente è da segnalare che il valore Δ_i , che rappresenta un valore di correzione, viene segnalato a tutti gli utenti solamente dopo che questi hanno impostato la loro potenza iniziale, non dando così un contributo.

L'espressione della potenza iniziale può essere così ottenuta dall'equazione (1) trascurando i valori Δ_i e δ_{mcs} ottenendo [26]:

$$P_{PUSCH} = 10 * \log_{10} M + P_0 + \alpha * PL \quad [dBm] \quad (3)$$

dove M è il numero totale dei PRB schedulati dalla stazione radio base. Dal momento che la potenza assegnata per la trasmissione agli UE è calcolata sulla base dei PRB, e ciascun PRB ha la stessa quantità di potenza, trascurando M , l'espressione usata dagli UE per assegnare la potenza a ciascun PRB è data da:

$$PSD_{Tx} = P_0 + \alpha * PL \quad \left[\frac{dBm}{PRB} \right] \quad (4)$$

che rappresenta la densità spettrale di potenza in trasmissione di un PRB espressa di dBm/PRB.

3.3.3 Controllo di potenza ad anello aperto

Il controllo di potenza ad anello aperto è la capacità dell'utente di settare la propria potenza di trasmissione in uplink con un specifico valore che sia accettabile per il ricevitore. Riscrivendo l'equazione (3) otteniamo [27]:

$$P_{OL} = \min\{P_{max}, 10 * \log_{10} M + P_0 + \alpha * PL\} \quad [dBm] \quad (5)$$

dove P_{OL} è la potenza in uplink, settata dal controllo di potenza ad anello aperto.

La scelta di α dipende se si uso uno schema di controllo di potenza convenzionale o frazionario [12].

La Figura 3.3 mostra un diagramma a blocchi che evidenzia le varie fasi del controllo di potenza ad anello aperto nel settare la potenza in uplink.

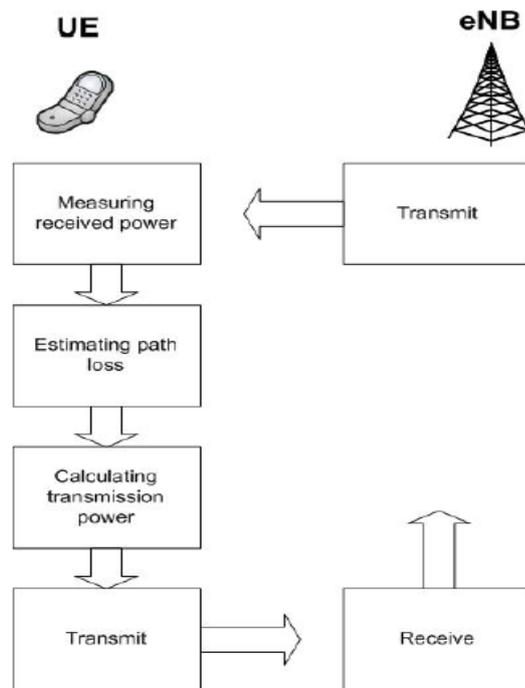


Figura 3.3: Controllo di potenza ad anello aperto.

3.3.4 Controllo di potenza ad anello chiuso

Il controllo di potenza ad anello chiuso è la capacità dell'utente di correggere la potenza di trasmissione di uplink in accordo ad un valore di correzione ad anello di chiuso altrimenti noto come transmit power control (TPC). Questi comandi sono

trasmessi, dalla stazione radio base attraverso l'utente, in base al valore di signal-to-interference and noise ratio (SINR) e misurano l'SINR ricevuto.

In un sistema di controllo ad anello chiuso, il ricevitore in uplink e la stazione radio base stimano l'SINR del segnale ricevuto, e lo comparano con il valore obiettivo. Quando l'SINR ricevuto è al di sotto del valore obiettivo, il comando TPC è trasmesso all'utente per fare in modo di incrementare la potenza in trasmissione. Naturalmente può succedere anche il contrario, cioè che la richiesta non sia di aumento ma di diminuzione della potenza.

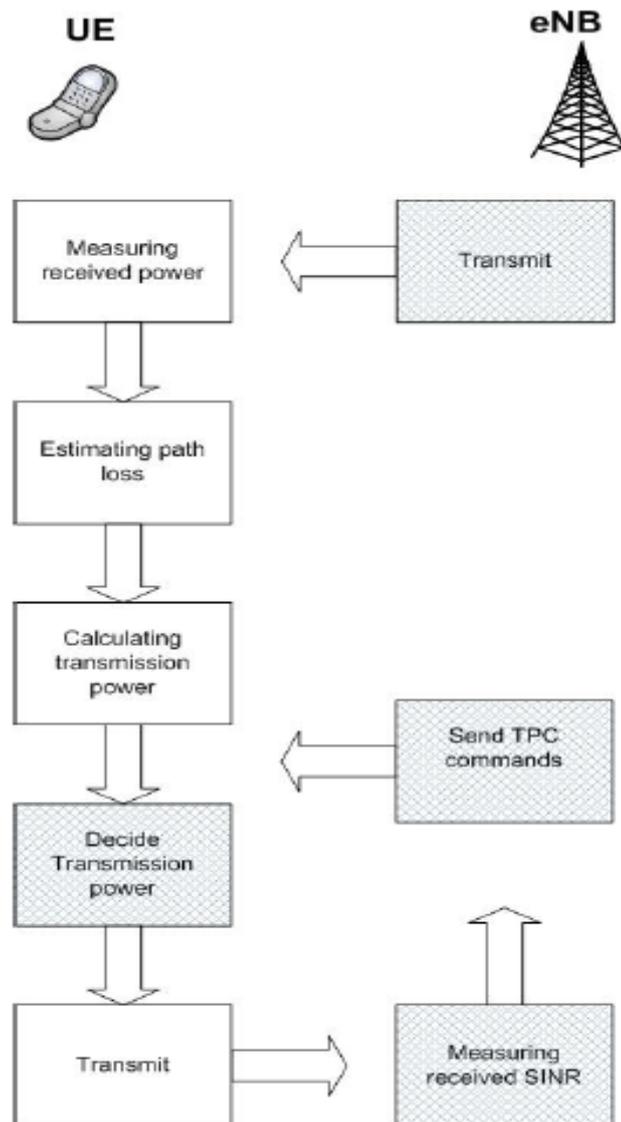


Figura 3.4: Schema di controllo di potenza ad anello chiuso.

Il meccanismo del controllo di potenza ad anello chiuso in LTE opera intorno alle operazione di controllo di potenza ad anello aperto. L'utente adatta la propria potenza di trasmissione in uplink attraverso un comando TPC ricevuto dalla stazione radio base, solamente dopo che questa è stata settata dalla tecnica ad anello aperto. Il controllo di potenza ad anello chiuso è illustrato in Figura 3.4.

Come mostrato in figura il valore di correzione dell'anello chiuso è applicato solamente dopo aver calcolato la potenza in trasmissione tramite la tecnica ad anello aperto. E' interessante notare, che, il controllo di potenza convenzionale o frazionario, indicano la scelta del valore di α , mentre la tecnica ad anello chiuso o ad anello aperto, indicano il metodo con cui viene settata la potenza in trasmissione.

3.3.5 Controllo di potenza in downlink

Come noto, i segnali di riferimento (Reference Signals) specifici della cella, sono incorporati nella banda del segnale in noti resource element (RE) [22]. Gli RS sono le componenti più importanti e potenti all'interno del segnale in downlink. Inizialmente la stazione radio base trasmette tutti gli RS con potenza costante su tutta l'intera banda, e la potenza di tutte le altre componenti, come per esempio i canali PBCH, PDCCH, PDSCH, è settata solamente in funzione di tale valore trasmesso.

La potenza relativa al Physical Downlink Shared Channel (PDSCH) per i simboli OFDM, è data da due differenti parametri: ρ_A e ρ_B (vedi Figura 3.5) [28]. Per la maggior parte dei casi ρ_A corrisponde a P_A che è segnalata dai livelli più alti, anche se in alcuni casi può assumere valori differenti, come quando si usa la

diversità in trasmissione attraverso l'impiego del MIMO multi-utente a quattro antenne.

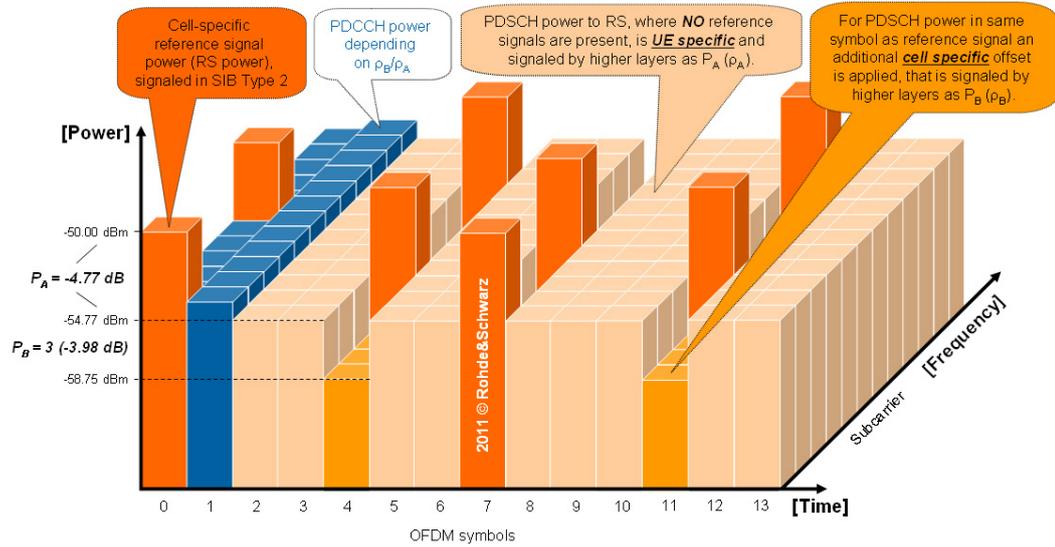


Figura 3.5: Controllo di potenza in downlink (questa figura è stata presa da [37]).

A differenza di P_A che è specifica del dispositivo, P_B è relativa agli RS specifici della cella e non può essere cambiata dinamicamente. In base al numero di antenne usate (1,2 o 4) si ottiene un certo rapporto specifico della cella ρ_A/ρ_B i cui possibili valori sono illustrati nella tabella 3.1.

Tabella 3.1: Il rapporto ρ_A/ρ_B riferito al numero di antenne usate.

P_B	ρ_B / ρ_A	
	One Antenna Port	Two and Four Antenna Ports
0	1	5/4
1	4/5	1
2	3/5	3/4
3	2/5	1/2

Lo scopo del controllo di potenza in downlink è quello di avere una potenza costante per i simboli OFDM in modo tale da evitare una variazione di potenza al ricevitore, che in questo caso corrisponde con l'utente. Con poca potenza del canale PDSCH data da P_B si riesce a compensare la spinta dei segnali di riferimento, in comparazione ai simboli OFDM in cui questi sono assenti.

Tenendo presente che la potenza dal canale PDSCH dipende dall'allocazione che utilizziamo, e che questa può cambiare di sotto-trama in sotto-trama, incorporando sia P_A che P_B è garantito che la potenza complessiva dei simboli OFDM rimane costante, anche quando cambia lo schema di allocazione dei canali PDSCH.

Capitolo 4

NS-3 e algoritmo proposto

4.1 Introduzione

Il Network Simulator-3 (NS-3) è uno strumento conosciuto e ampiamente utilizzato dalla comunità di ricerca per le simulazioni di rete eterogenee di comunicazioni [1]. E' un simulatore completamente gratuito ed è gestito e sviluppato da una comunità di sviluppatori molto presenti. E' interamente scritto in C++ ed ha implementato lo stack protocollare TCP/IP insieme a molti altri protocolli dei livelli trasporto, rete e collegamento dati, come per esempio TCP, UDP, IP [29], ARP [31], IEEE 802.11 [30], IEEE 802.16 [5]. Molti altri tipi di applicazioni sono forniti con la versione base e molti altri possono essere implementati estendendo le classi esistenti. Le vecchie classi di NS-2 sono state rese compatibili con questa nuova versione, che è in grado di simulare svariati tipi di reti.

Anche se molte cose sono ancora da sviluppare, il principale pregio di questo simulatore è la sua modularità. L'implementazione avviene attraverso l'ausilio di molteplici blocchi che riguardano un diverso aspetto, rendendo molto più agevole l'implementazione di nuovi standard, protocolli, o caratteristiche. Proprio per la sua modularità, nel nostro lavoro di tesi useremo un'estensione di NS-3 proposta in [13], che ci permette di simulare il nuovo standard LTE per l'UMTS. Con

questa estensione saremo in grado di creare delle stazioni radio base, che in letteratura prendono il nome di *Evolved Node B* (eNb) e dei terminali utente, anche detti *User Equipment* (UE). In generale sono fornite la maggior parte delle funzionalità dei diversi livelli dello stack protocollare TCP/IP, e vi è anche la possibilità per lo sviluppatore di introdurre e testare dei nuovi algoritmi [33]. Specificatamente per il nostro lavoro ci avvarremo di un modulo che, oltre che integrare l’LTE, permette di utilizzare anche lo Spectrum Sharing. Questa nuova estensione permette la cooperazione multi-operatore, dove per ogni operatore si ha un numero considerevole di nodi, ed inoltre ha una classe che descrive un *market virtuale* che svolge le funzionalità di un arbitro, decidendo le diverse politiche di condivisione e le frequenze che faranno parte del pool comune tra gli operatori [32]. In altre parole, si occupa di riassumere le diverse regole con cui sono concordi i diversi operatori, nell’assegnare la porzione di spazio da condividere. Già molte mappe di allocazione delle risorse condivise sono state implementate e testate per analizzare l’architettura proposta e vedere gli effetti della stessa su uno scenario realistico [3]. Il codice è disponibile in forma totalmente gratuita a [32].

4.2 Descrizione del sistema

Per avere una completa caratterizzazione del sistema, dobbiamo considerare tutti quei parametri che ci permettono di avere una corretta gestione dello spettro, per esempio dettagli fisici come la frequenza centrale, la banda del canale, e la percentuale di spettro che decidiamo di condividere, dove c’è da sottolineare che le frequenze da condividere e i meccanismi per accedere ad esse sono già definite. Attenendoci allo standard LTE, considereremo ogni RB (Resource Block) OFDMA come un’entità fluida e trasferibile, in considerazione del fatto che tramite lo Spectrum Sharing (ampiamente descritto nel Capitolo 3), in accordo

con la percentuale di banda dello spettro che può essere condivisa, ogni stazione radio base può permettere un accesso parziale alle proprie risorse ad utenti appartenenti ad altri domini.

4.2.1 Allocazione inter-cella

L'allocazione inter-cella, esegue uno scheduling locale ed algoritmi di allocazione delle risorse che ci permettono di decidere una mappa di allocazione più generale, al fine di creare un corretto schema di trasmissione in downlink. Data la modularità del simulatore, non è molto difficile sviluppare degli algoritmi e integrarli nel codice esistente, ma per quello che concerne il nostro elaborato, andremo a considerare un algoritmo già esistente che prende il nome di *max throughput*.

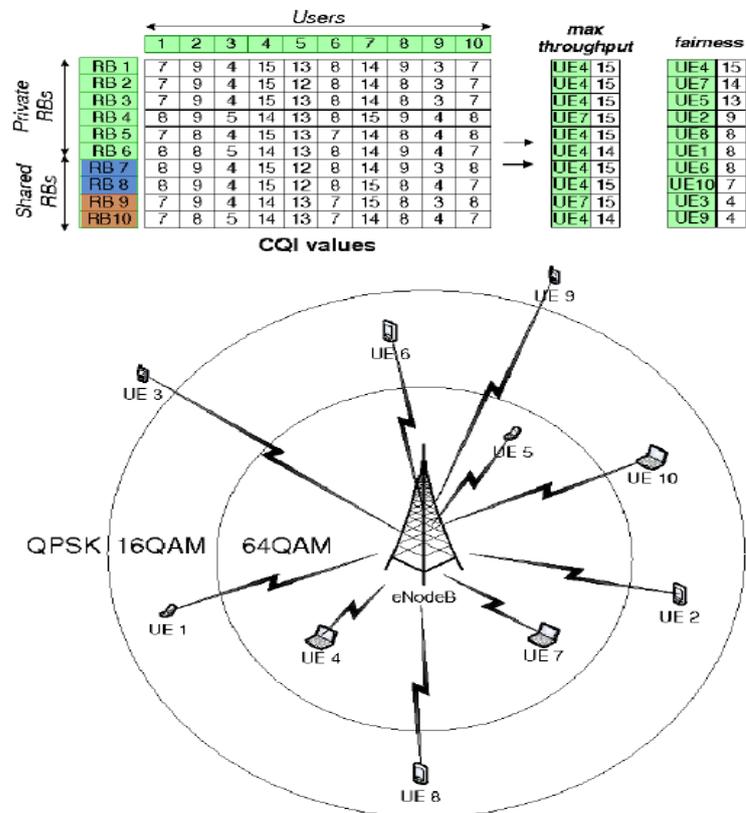


Figura 4.1: Schema di allocazione intra-cella.

Questo rappresenta uno schema di allocazione, dove le risorse sono allocate sempre agli utenti migliori, ordinati in una lista in ordine decrescente rispetto al valore di Channel Quality Indicator (CQI) come viene mostrato in Figura 4.1.

Naturalmente usando quest'approccio, gli utenti con CQI basso non saranno mai serviti. Per ovviare a questo problema si usa un algoritmo che va ad integrare quello del max throughput, che viene denominato *fairness*, che assicura che ad ogni utente venga assegnata almeno una risorsa, ma non essendo uno degli argomenti di questo elaborato non verrà analizzato nel dettaglio.

4.2.2 Coordinazione inter-cella

Le politiche di accesso alle risorse condivise sono implementate in un modulo differente che prende il nome di *market virtuale*. Qualsiasi strategia può essere implementata all'interno di questa classe, ed è possibile in ogni momento fare delle modifiche o implementare delle estensioni più complesse degli algoritmi già esistenti, sfruttando sempre la modularità del codice.

Ciascuna stazione radio base, dopo avere calcolato la propria mappa di allocazione, la spedisce al market virtuale, che una volta raccolte le informazioni di tutte le celle, ridefinisce la mappa di allocazione tenendo conto della politica di sharing usata. È importante sottolineare che questa classe non costituisce un'entità reale, come per esempio un nodo centrale che controlla la rete, ma è solamente una scelta implementativa che ci permette di separare la risoluzione del conflitto nell'accesso alla risorsa condivisa con il resto dell'architettura. Ciò nonostante, si potrebbe comunque implementare in maniera fisica all'interno di ciascuna stazione radio base, applicando un approccio distribuito, o al contrario, un in un nodo centrale, nel caso in cui si usasse un approccio centralizzato.

La Figura 4.2 ci permette di vedere meglio il processo che avviene dalla creazione della mappa di allocazione alla ridefinizione della stessa considerando la politica di sharing usata.

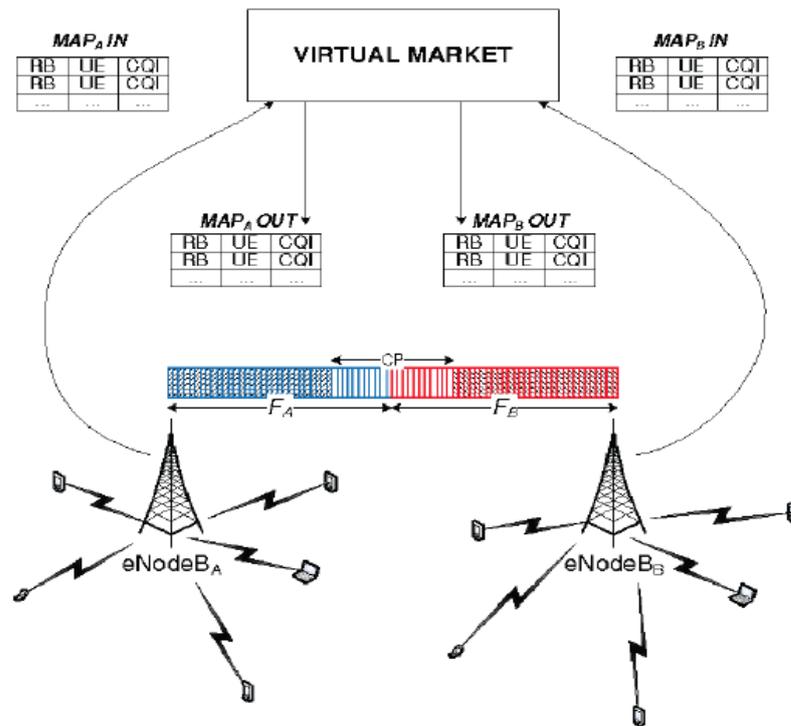


Figura 4.2: Coordinazione inter-cella.

4.3 Nuova estensione per NS-3

Quello che intendiamo proporre è un nuovo algoritmo, che si pone come obiettivo l'integrazione dello spectrum sharing, già presente nel modulo di NS-3 che stiamo usando, con uno schema per il controllo di potenza. Quello che ci aspettiamo è un incremento della capacità del sistema, dovuto ad una corretta gestione della potenza dei canali e in un miglioramento della qualità delle chiamate in conseguenza del fatto che viene ridotta l'interferenza che un utente provoca ai suoi vicini.

4.3.1 Scenario utilizzato

Il nostro scenario sarà multi-cella e multi-operatore. Per quel che concerne il simulatore usato, ogni cella è rappresentata da una classe *LteHelper*, dove al suo interno sono contenuti tutti i riferimenti alle stazioni radio base e a tutti gli utenti che sono contenuti dentro la cella. Ogni cella è contraddistinta da una classe *LteHelper*.

In generale possiamo affermare che il lato fisico viene modellato attraverso la classe *LtePhy*, sia per quel che riguarda la stazione radio base, sia per gli utenti. Ci sono, poi, due classe derivate, *EnbLtePhy* e *UeLtePhy* che forniscono particolari caratteristiche, come l'implementazione dello strato fisico per due particolari nodi, o la ricezione e la trasmissione del segnale da parte dell'utente. Supponendo che le due stazioni radio base siano sincronizzate, dentro alla classe *LtePhy* sono presenti due contatori che fanno riferimento al numero di trame e sotto-trame. Questi contatori sono incrementati, attraverso due funzioni contenute nella classe *EnbLtePhy*, ogni volta che una trama o sotto-trama ha inizio. Riferendoci, come detto sopra, al caso in cui le due stazioni sono sincrone, dal momento che le trame e le sotto-trame partono nel medesimo istante, ogni stazione radio base deve avere al suo interno questi contatori ed incrementarli di volta in volta.

Utilizzando lo spectrum sharing, sono state apportate numerose modifiche al codice originario, soprattutto nelle classi *EnbLtePhy* e *UeLtePhy*, dove al loro interno è stato inserito un vettore comprendente, oltre ai sotto-canali originariamente assegnati, anche un'estensione dello stesso, che contiene al suo interno la porzione di spettro (calcolata attraverso una percentuale assegnata) che un'altra stazione radio base (o più di una) è disposta a condividere, ed inoltre anche la priorità di ogni sotto-canale.

Questo vettore delle frequenze è usato dall'allocatore di risorse della stazione radio base, seguendo delle politiche di scheduling e allocazione precedentemente definite. Nel caso in cui si vogliono modificare queste politiche, basta creare un nuovo metodo ed inserirlo nella classe *PacketScheduler*.

Riassumendo, abbiamo quindi che ciascuna stazione radio base calcola indipendentemente la propria mappa di allocazione, in accordo alle politiche di scheduling e allocazione delle risorse. Il market virtuale successivamente raccoglie tutte le mappe di allocazione che gli sono state inviate e implementa il metodo per la risoluzione dei conflitti all'interno della zona di condivisione. Questa entità virtuale è definita come un'istanza della classe *VirtualMarket*, dove all'inizio di ciascuna sotto-trama questa riceve le diverse mappe di allocazione proposte da ciascuna stazione radio base e decide la mappa finale in accordo ad alcune politiche.

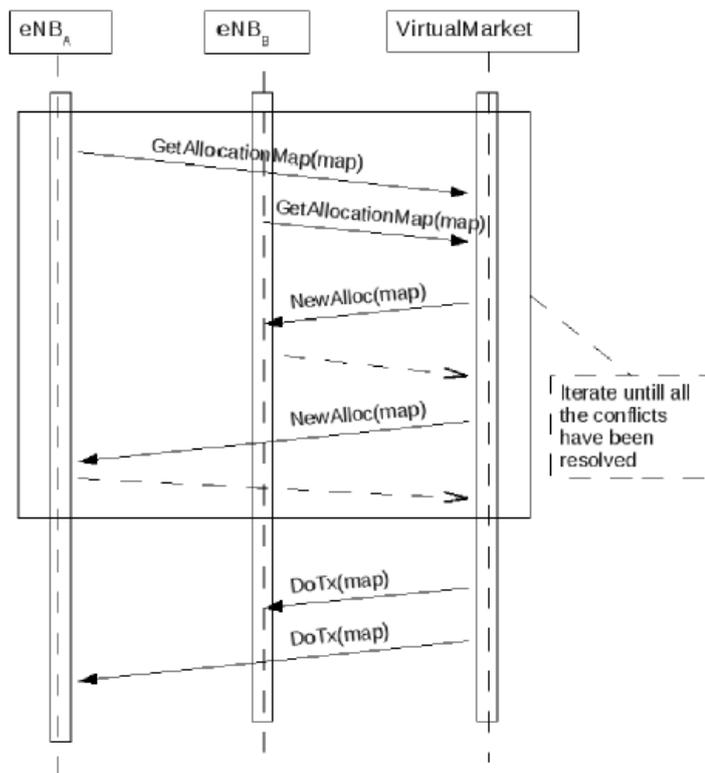


Figura 4.3: Diagramma della risoluzione dei conflitti.

È possibile modificare le politiche di risoluzione dei conflitti alle risorse condivise modificando, o in alternativo sostituendo, il metodo presente all'interno della classe *VirtualMarket* denominato *GetAllocationMap()*. Le stazioni radio base, inoltre, riescono a comunicare tra di loro attraverso le loro interfacce pubbliche secondo lo schema illustrato in Figura 4.3.

4.3.2 L'algoritmo proposto

Per raggiungere i nostri obiettivi, occorre modificare lo schema del controllo di potenza ad anello chiuso secondo il diagramma a blocchi illustrato in Figura 4.4.

Come possiamo vedere, una volta che la stazione radio base trasmette i dati all'utente e questo calcola il proprio SINR e quindi il CQI, ritrasmettendo indietro i dati, la stazione, considerando la qualità dell'utente ed una soglia di SINR di riferimento, decide se aumentare o diminuire la potenza del sotto-canale, ritrasmettendo, attraverso i comandi TPC, la decisione all'utente, che ricalcola i propri valori e li ritrasmette alla stazione radio base.

Il processo è iterativo ed è compiuto di volta in volta, per ogni sotto-canale da assegnare e per ogni utente. Un particolare da segnalare è che per quanto riguarda i sotto-canali privati, essendo che questi non sono condivisi, è tolta una porzione di potenza, mentre l'algoritmo completo è eseguito tra le frequenze messe in condivisione con gli altri operatori.

Per quanto riguarda il codice del simulatore, sono state apportate delle modifiche alla classe *EnbPhy*, dove sono stati implementati dei metodi per ottenere e modificare la potenza di ogni singolo sotto-canale. Questi ci permettono di vedere la potenza del sotto-canale preso in considerazione, e se necessario aumentarla o diminuirla di una percentuale stabilita.

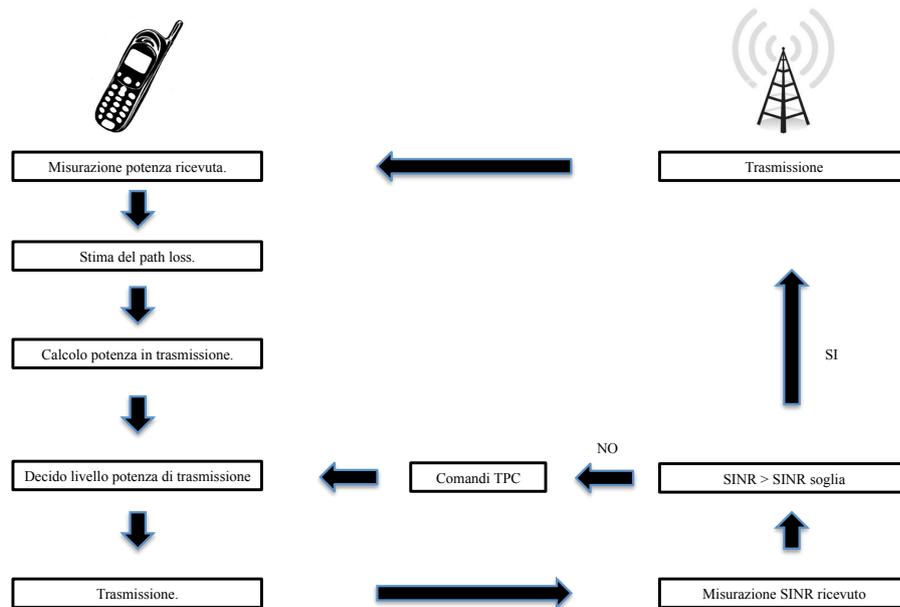


Figura 4.4: Nuovo schema controllo di potenza ad anello chiuso.

E' stato anche aggiunto il parametro "SINR" nel metodo `createCQIfeedback()` della classe `UePhy`, dal momento che dobbiamo paragonare questo valore con uno di riferimento. Di fondamentale importanza è che la potenza totale di tutti i sotto-canali deve essere 43 dB, quindi è stata creata un'istanza che tiene sotto controllo la potenza sottratta o aggiunta ai singoli sotto-canali, è fa in modo che non si superi mai la potenza totale assegnata in partenza.

Le modifiche più importanti, infine, sono state apportate alle classi `MultiOpPacketScheduler` e `CentralAuthority`. Nella prima classe gli utenti sono inseriti in una lista seguendo un ordine crescente del parametro "CQI", assegnando ai canali privati (quindi non appartenenti alla zona di condivisione) gli utenti con una qualità peggiore, e lasciando alle risorse condivise quelli con una qualità migliore. E' stato introdotto il parametro "SINR" nella creazione delle mappe di allocazione (prima assente), ed inoltre, a tutti i sotto-canali privati, viene

tolta una percentuale di potenza decisa in precedenza che va ad incrementare una variabile chiamata *PotenzaResidua* che, come detto sopra, ci aiuta a mantenere la potenza totale al valore di 43 dB.

Nella classe *CentralAuthority*, invece, è stata sviluppata una nuova mappa di allocazione che applica il nuovo controllo di potenza ad anello chiuso implementato e permette di gestire al meglio la risoluzione dei conflitti alle risorse condivise e salva in delle istanze gli utenti che sono respinti al fine di calcolare successivamente la capacità del sistema.

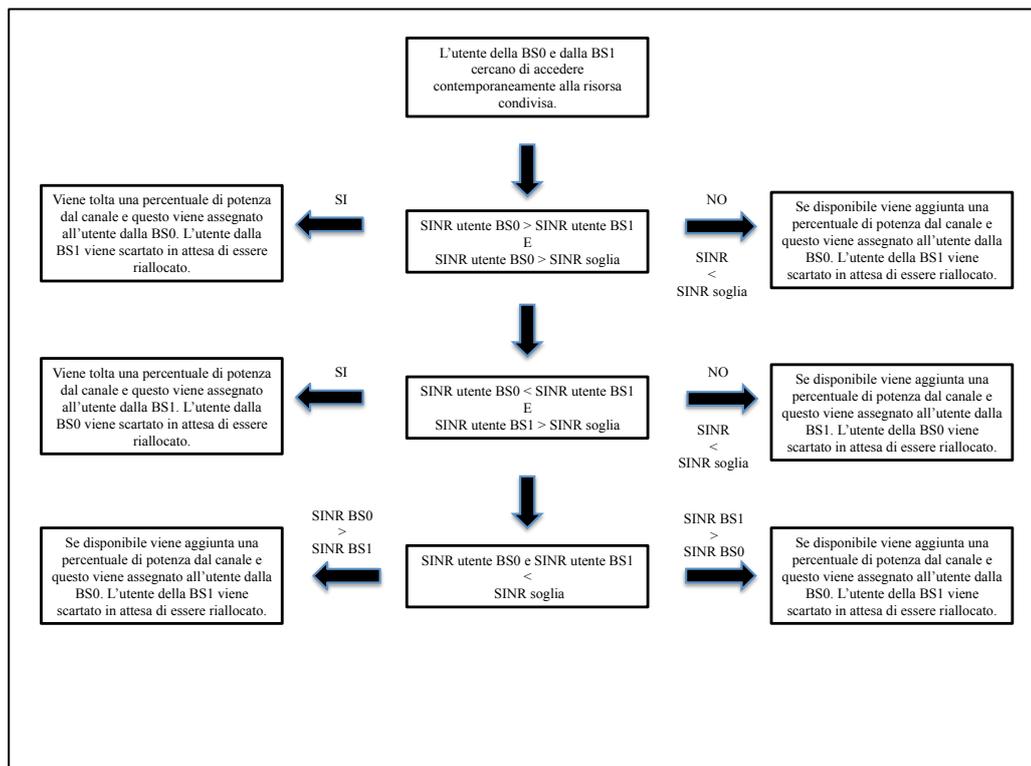


Figura 4.5: Schema algoritmo proposto.

Il nuovo algoritmo e' schematizzato in figura 4.5. Come ulteriore contributo, in questa tesi sono state eseguite simulazioni per verificare se, rispetto a mappe di allocazione preesistenti, si ha un guadagno in termini di capacità del sistema al

variare di parametri come la percentuale di spettro da condividere, la soglia di SINR di riferimento e la percentuale di potenza da sottrarre o aggiungere ai canali.

Capitolo 5

Risultati a livello di sistema

5.1 Introduzione

Nel presente capitolo vengono esposti i risultati ottenuti dalla campagna di simulazione effettuata attraverso l'uso del simulatore NS-3 [1] con l'aggiunta dell'estensione contenente lo spectrum sharing [32] e l'implementazione dell'algoritmo di controllo di potenza esposto nei capitoli precedenti.

Lo scopo delle simulazioni è quello di confrontare l'algoritmo dai noi proposto con uno di riferimento e analizzare, al variare di diversi parametri di interesse, la capacità di canale media dell'intero sistema.

5.2 Descrizione dello scenario

Lo scenario è formato da due stazioni radio base, ognuna con un raggio di copertura di 1500 m. Gli utenti di ciascuna di queste sono distribuiti uniformemente all'interno dell'area di copertura (vedi Figura 5.1).

Le due stazioni radio base sono in condizione di saturazione dal punto di vista del carico di traffico: ogni utente è backlogged e tutte le risorse a disposizione sono utilizzate con lo scopo di sfruttare al meglio la *multiuser diversity*. La qualità del canale percepita da ogni utente varia in accordo alla sua posizione per via delle

diverse componenti di radio propagazione come path loss, shadow fading, multipath fading e penetration loss. I canali in uplink tra gli utenti e le stazioni radio base sono considerati ideali, cioè senza perdita e con ritardo di trasmissione e propagazione nullo.

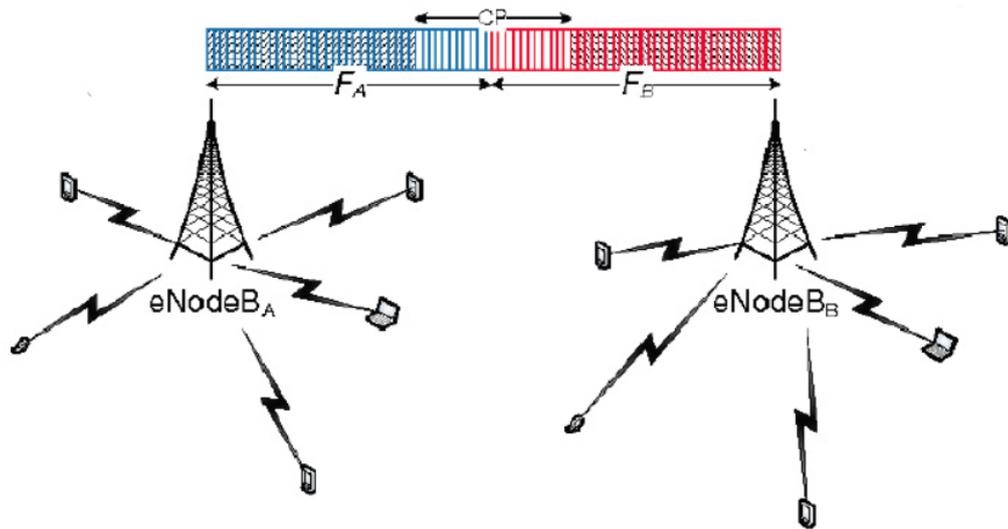


Figura 5.1: Scenario considerato.

In Tabella 5.1 sono riportati tutti i principali parametri usati per le simulazioni.

Analizzando le prestazioni dell’algoritmo da noi proposto da un punto di vista della capacità totale del sistema, cercheremo di evidenziare se l’utilizzo dello spectrum sharing unito al controllo di potenza da noi elaborato, porta a dei miglioramenti.

Bisogna sottolineare che tutte le simulazioni sono state condotte con un errore relativo massimo del 5%, per far sì che i risultati siano il più precisi possibili.

Prenderemo come unità di confronto l’algoritmo *SmartAlgo*. Questo algoritmo applica una sorta di “*smart sharing*”, nel senso che nessuno dei due operatori presi in considerazione condividerà delle risorse nel momento in cui non si avranno, per entrambi, dei miglioramenti in termini di data rate rispetto al caso *non-sharing*.

Tabella 5.1: Parametri usati per le simulazioni.

Parametri	Valore
1st sub-channel frequency	2110 MHz
Downlink Channel Bandwidth	20 MHz
Sub-carrier Bandwidth	15 kHz
Doppler frequency	60 Hz
$RB_{bandwidth}$	180 kHz
$RB_{subcarriers}$	12
$RB_{OFDMsymbols}$	7
BS downlink TX power	43 dBm
Noise spectral density (N_0)	-174 dBm/Hz
Macroscopic Pathloss at a distance of R	
km from the eNB	$128.1 + (37.6 * \log(R)) \text{ dB}$
Shadow fading	log-normal ($\mu = 0, \sigma = 8 \text{ dB}$)
Multipath fading	Jakes model with 6 to 12 scatterers
Wall penetration loss	10 dB
Frame duration	10 ms
TTI (sub-frame duration)	1 ms

Notiamo che per il multipath useremo il modello di Jakes [34], che è quello più usato per simulare il canale multipath tenendo conto anche dell'effetto doppler. Questo metodo assume stazionarietà e ugual potenza delle componenti multipath, ed inoltre quest'ultime arrivano all'antenna con una fase casuale uniformemente distribuita nell'intervallo $[0, 2\pi]$ e l'angolo di arrivo è compreso tra $-\pi$ e π .

Nelle telecomunicazioni il canale radio mobile è solitamente caratterizzato dalla sovrapposizione di tre differenti componenti separate con effetti di propagazione su piccola, media e larga scala [35]. Le variazioni su piccola scala fanno riferimento al multipath fading, dove queste variano abbastanza rapidamente nello

spazio come cambiamenti significativi spesso nell'ordine di una lunghezza d'onda.

Gli effetti su scala media, riferiti allo shadowing, sono influenzati dai movimenti nello spazio nell'ordine di dieci lunghezze d'onda, creando delle variabili casuali per quel che riguarda la potenza media del segnale ricevuto che tipicamente segue una distribuzione log-normale.

Su larga scala, i movimenti nello spazio nell'ordine di centinaia di lunghezze d'onda fanno sì che il livello medio della potenza varia secondo le leggi che regolano la potenza in stretta relazione alla lunghezza del percorso. Le variazioni su larga scala fanno riferimento al path-loss.

I parametri fondamentali che andremo a variare durante le simulazioni sono illustrati in Tabella 5.2:

Tabella 5.2: Parametri che variano durante le simulazioni.

Parametri	Valori
Percentuale Sharing	Variabile da 0% a 100%
Soglia di SINR	9, 12, 18 [dB]
Percentuale di potenza α	5% , 10% e 15%
Numero di utenti	9, 18, 27, 36

La percentuale di potenza α è la percentuale che aggiungeremo ai singoli canali per far sì che l'utente migliori la qualità della trasmissione nel caso in cui il suo CQI sia basso, mentre la sottrarremo nel caso in cui il CQI dell'utente sia alto e la qualità non peggiori in maniera evidente anche se il canale avrà una potenza di poco inferiore. In questo caso considereremo un α pari al 5%, 10% e 15% della potenza complessiva del sotto-canale.

5.3 Risultati

Le prime simulazioni svolte si sono concentrate sul valore della soglia di SINR. Si può ipotizzare che l'algorithmo ideato funzioni bene quando il maggior numero di utenti delle stazioni radio base accedono alla zona di frequenze condivisa, mentre negli altri casi non dovrebbe essere assicurata la validità dello stesso rispetto alla mappa di allocazione che abbiamo preso come confronto.

Per ogni valore di SINR sono state condotte cento simulazioni e alla fine è stata calcolata la capacità media totale dell'intero sistema e paragonati i risultati ottenuti con la mappa di allocazione *SmartAlgo* considerando inizialmente un numero di utenti pari a nove.

Come si può vedere in Figura 5.2 al diminuire della soglia di SINR si ottengono dei miglioramenti in termini di capacità totale del sistema, anche se rispetto all'algorithmo *SmartAlgo*, che usa lo spectrum sharing ma non adotta nessun algorithmo di controllo di potenza, le prestazioni sono ben al di sotto dei valori di riferimento.

Una possibile spiegazione a questi risultati è che utilizzando 100 sotto-canali per ogni stazione radio base ed essendoci solamente nove utenti, la relativa frazione che riceve risorse è veramente esigua e quindi l'algorithmo non svolge in modo efficiente il suo lavoro.

Infatti osservando il grafico possiamo vedere come le curve riferite alla nostra mappa di allocazione, comincino a crescere intorno alla percentuale di sharing pari al 60%, momento in cui le risorse condivise sono maggiori di quelle private.

Notiamo, però, che al diminuire della soglia di SINR le prestazioni aumentano, quindi in generale possiamo affermare che l'aumento delle prestazioni è funzione decrescente della soglia prefissata. Ovvero, in riferimento al nostro algorithmo, più è piccola la soglia, più è alta la capacità media dell'intero sistema.

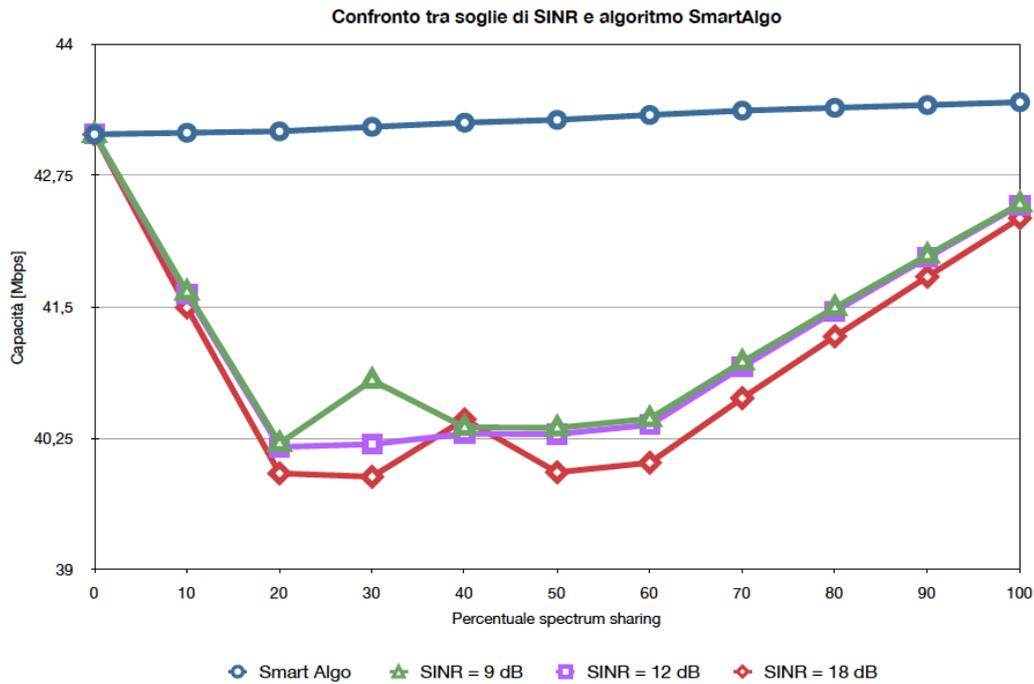


Figura 5.2: Confronto della capacità al variare delle soglie di SINR.

Il passo successivo della nostra analisi è quello di variare la percentuale di potenza che usiamo per aumentare o diminuire la potenza del sotto-canale che affidiamo all'utente nel caso in cui questo abbia un CQI, rispettivamente, basso oppure alto. La soglia di SINR è fissata a 9 dB dal momento che, come visto in precedenza, per questo valore le prestazioni sono risultate migliori rispetto alle altre soglie prese in considerazione.

I risultati ottenuti, come possiamo vedere in Figura 5.3, mettono in luce in modo evidente che, per lo scenario da noi usato, la variazione della percentuale di potenza non influisce in maniera rilevante sulle prestazioni del sistema, cioè sulla capacità. Non è da escludere però che con uno scenario diverso o usando un numero di sotto-canali in downlink e uplink inferiore al nostro, questo parametro non possa risultare rilevante. Possiamo ipotizzare che diminuendo il numero dei sotto-canali, a questi sia affidata una potenza maggiore rispetto a quella usata nelle nostre simulazioni, e di conseguenza la quantità di potenza che abbiamo a

disposizione per aumentare o diminuire quella del canale preso in esame sia quantitativamente maggiore a quella presente in questo elaborato.

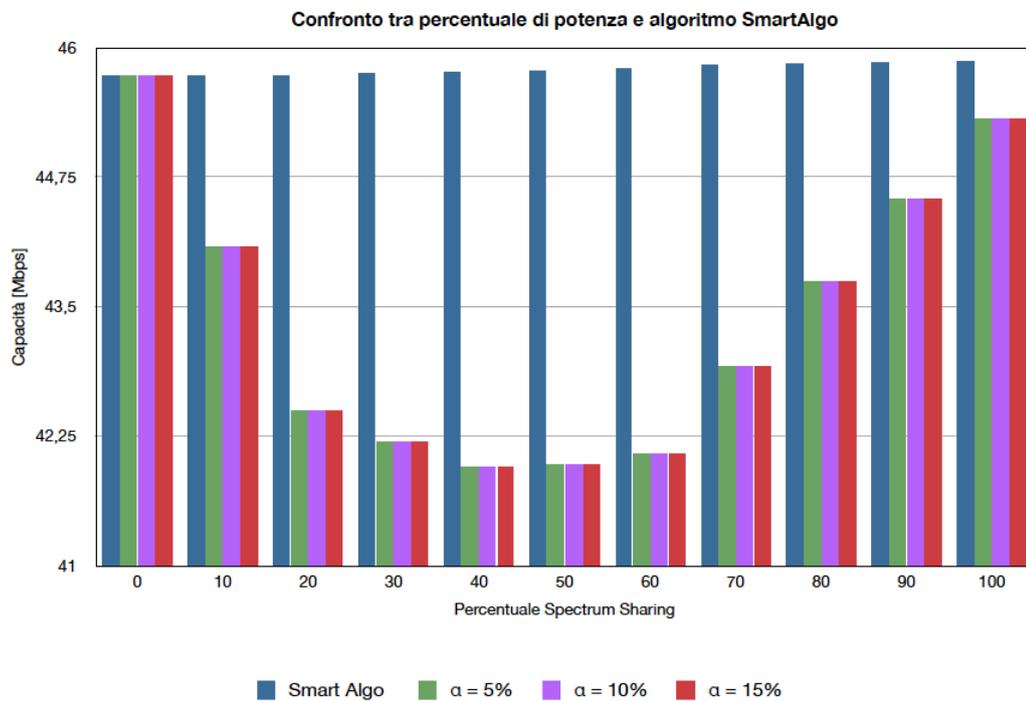


Figura 5.3: Confronto della capacità al variare della percentuale di potenza.

Ad ogni modo, non è da escludere che con uno scenario diverso o usando un numero di sotto-canali in downlink inferiore al nostro, questo parametro non possa risultare rilevante. Possiamo ipotizzare che diminuendo il numero dei sotto-canali, per ognuno di questi sia utilizzata una potenza trasmittiva maggiore rispetto a quella usata nelle nostre simulazioni, e di conseguenza la quantità di potenza che abbiamo a disposizione per aumentare o diminuire quella del canale preso in esame sia maggiore. Questo argomento rientra tra i possibili futuri lavori che si possono svolgere sull'argomento.

L'ultimo effetto analizzato è la variazione della capacità totale del sistema al variare del numero degli utenti registrati presso ciascuna stazione radio base. Ricordiamo che la posizione degli utenti è casuale all'interno di una circonferenza con al centro la stazione radio e raggio pari a 1500 m. Le figure sottostanti

forniscono una panoramica del comportamento totale del sistema, evidenziando la capacità media del sistema prendendo in considerazione l'algoritmo SmartAlgo (Figura 5.4) e la mappa di allocazione proposta (Figura 5.5).

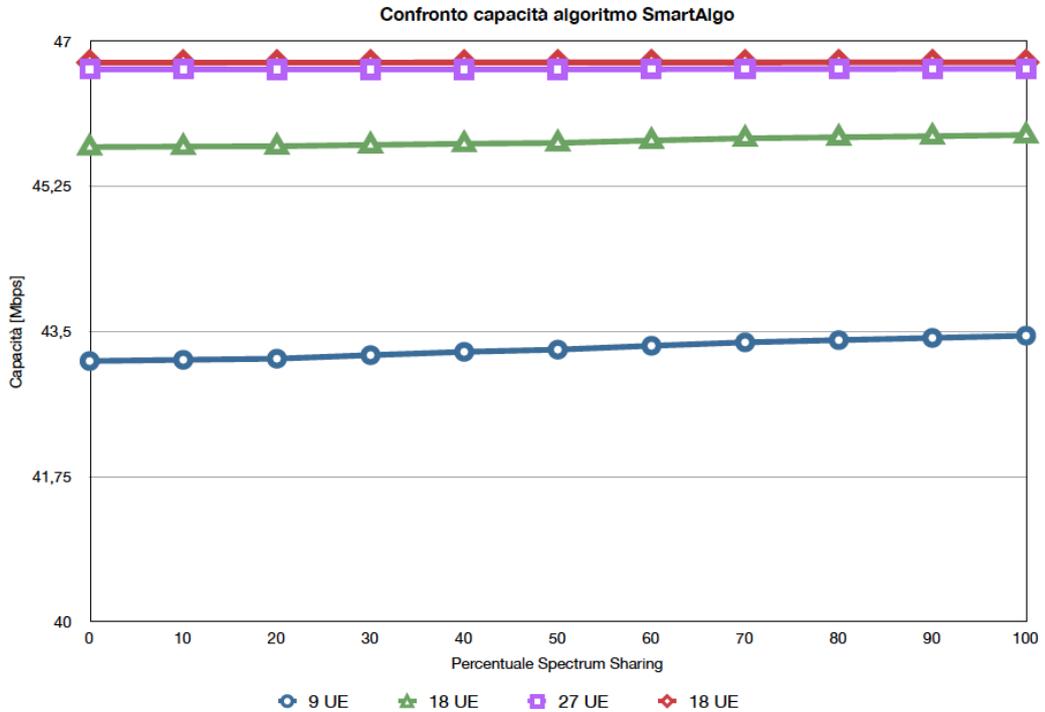


Figura 5.4: Confronto capacità al variare degli utenti per l'algoritmo SmartAlgo.

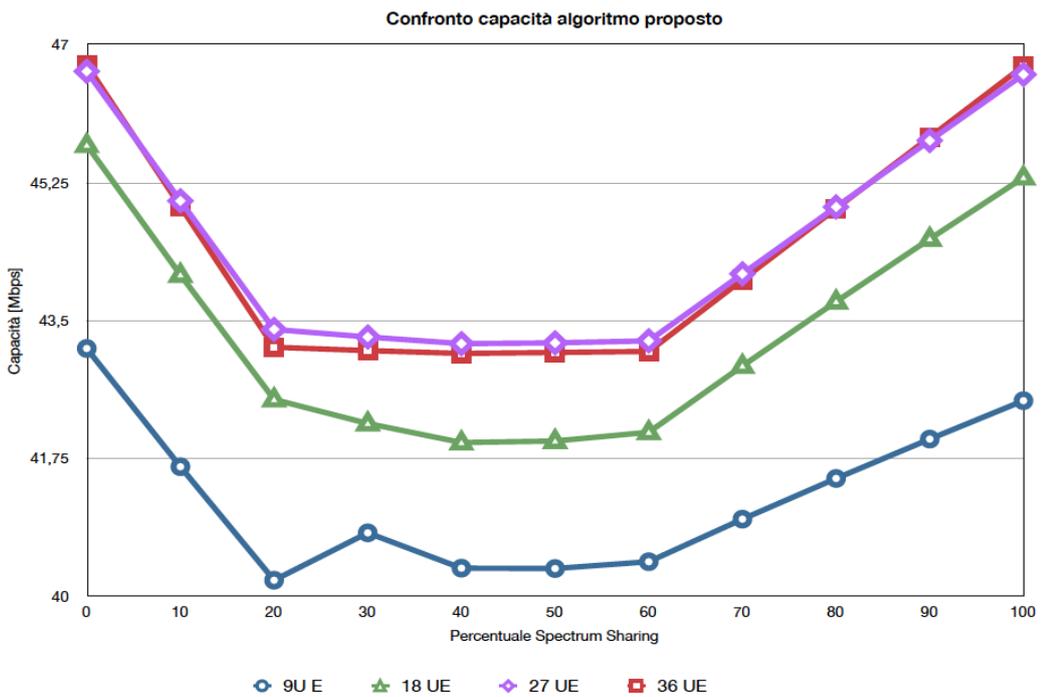


Figura 5.5: Capacità al variare del numero di utenti per l'algoritmo proposto.

Separatamente mostriamo in Figura 5.6 l'andamento della prendendo in considerazione 36 utenti totali per ciascuna stazione radio base, dove si evidenzia ancora di più il ridursi del divario tra il nostro algoritmo e quello di riferimento.

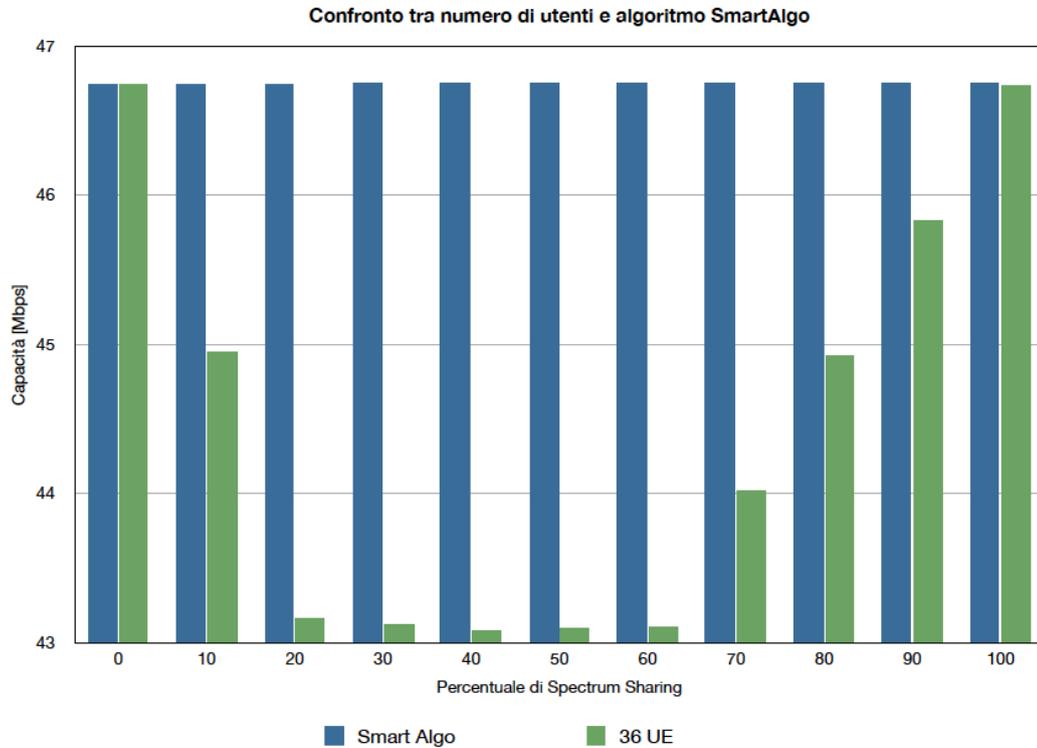


Figura 5.6: Capacità del sistema con 36 utenti.

Per avvalorare i risultati trovati, la Figura 5.7 ci mostra la differenza percentuale tra la capacità ottenuta con l'algoritmo di riferimento e quella ottenuta con l'algoritmo proposto.

Notiamo, come già visto per i grafici precedenti, che la differenza si riduce man mano che aumenta il numero di utenti nel sistema, permettendo così al nostro algoritmo di funzionare in maniera più efficiente. L'effettivo guadagno si ha quando le stazioni radio base non hanno sufficienti risorse private da assegnare e tutti gli utenti dovranno risolvere la contesa per accedere alle risorse condivise.

La parte centrale del grafico, invece, mette in evidenza che quando si ha il bilanciamento tra gli utenti a cui si assegna un canale privato e quelli a cui si assegna una risorsa condivisa, la differenza tra la capacità calcolata con

l'algoritmo SmartAlgo e quella calcolata con la mappa di allocazione da noi proposta aumenta e si attesta ad un valore che varia dal 7% al 9%. permettendo così al nostro algoritmo di funzionare in maniera più efficiente.

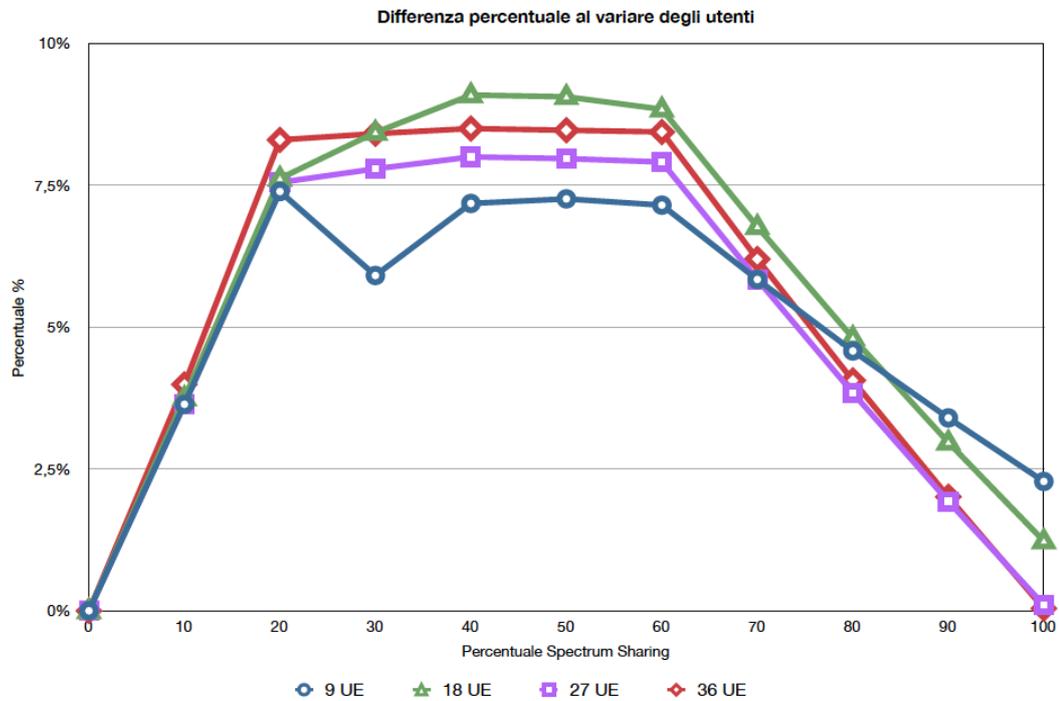


Figura 5.7: Differenza percentuale tra la capacità del nostro algoritmo e quella di SmartAlgo.

L'effettivo guadagno si avrà nella condizione in cui le stazioni radio base non avranno risorse private da assegnare e tutti gli utenti dovranno risolvere la contesa per accedere alle risorse condivise.

Le simulazioni condotte hanno evidenziato che il parametro che più influenza le prestazioni del sistema, e quindi la capacità, è il numero degli utenti presenti nelle stazioni radio base. All'aumentare di questo numero la capacità dell'algoritmo da noi proposto aumenta e va a migliorare nel caso in cui la percentuale di sharing sia massima, quella dell'algoritmo ottimo che abbiamo preso come confronto (SmartAlgo).

La percentuale di potenza e la soglia di SINR non danno particolari benefici, ma questo non vuol dire che, cambiando scenario e prendendo in considerazione altri aspetti, come per esempio il traffico sbilanciato delle due celle, questi valori non assumano particolare rilievo nella valutazione delle prestazioni.

In definitiva possiamo affermare che, affinché il nostro algoritmo sub-ottimo, che comunque lavora bene anche quando il traffico è particolarmente intenso, raggiunga le prestazioni di quello ottimo preso in considerazione, nel sistema devono esserci un numero elevato di utenti, dove i sotto-canali di ogni cella sono tutti condivisi con l'assenza totale di canali privati.

Una soglia di SINR molto bassa (dalle simulazioni abbiamo potuto vedere che si attesta intorno a 9 dB) e una percentuale di potenza attorno al 5% contribuiscono all'aumento delle prestazioni, anche se non in maniera decisiva come in numero degli utenti.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

Lo spectrum sharing ci consente di far cooperare due operatori mettendo in condivisione una parte delle loro frequenze che altrimenti potrebbero rimanere inutilizzate, permettendoci una più efficiente gestione delle risorse radio.

Come dimostrato in [3], sono stati già elaborati e valutati molti algoritmi che utilizzano questa tecnica con risultati più che soddisfacenti.

In questa tesi si è elaborata una nuova mappa di allocazione che utilizzasse oltre allo spectrum sharing, il controllo di potenza, rendendo possibile valutare le prestazioni del sistema (nel nostro caso la capacità media dei due operatori) per evidenziare se questa cooperazione portasse dei vantaggi.

Le simulazioni svolte hanno evidenziato in linea generale che la cooperazione dello spectrum sharing e del controllo di potenza non portano particolari benefici alle prestazioni generali del sistema se confrontate a quelle di una mappa di allocazione di riferimento, che nel nostro caso era *SmartAlgo*.

Più precisamente possiamo affermare che, almeno per lo scenario da noi utilizzato, la percentuale di potenza che utilizziamo per accrescere o diminuire quella del sotto-canale non influisce in maniera rilevante sulla capacità, che in tutti i casi esaminati rimane pressappoco identica.

Le variazioni più importanti, invece, sono state registrate al variare della soglia di SINR e del numero totale degli utenti per ogni stazione radio base.

Per il primo parametro possiamo affermare che la capacità del sistema nel momento in cui utilizziamo l'algoritmo da noi proposto, è funzione decrescente della soglia. La spiegazione è che abbassando la soglia, aumenta il numero di utenti a cui viene assegnata una frequenza appartenente al pool di risorse condivise e di conseguenza la nostra mappa di allocazione è più efficiente. Molto dipende anche dalla posizione in cui vengono generati attraverso una distribuzione uniforme gli utenti all'interno del raggio di copertura della cella, che si riflette sul valore di CQI che avranno.

Bisogna evidenziare che anche se la capacità aumenta al diminuire della soglia di SINR considerata, in generale il nostro algoritmo non migliora quello di riferimento, pertanto questo parametro non assume una rilevanza così importante su cui indagare in un possibile miglioramento del nostro algoritmo.

Al contrario, la variazione del numero totale degli utenti, ha portato a migliori risultati. La capacità totale del sistema cresce in maniera considerevole all'aumentare di questo parametro, e la differenza con l'algoritmo *SmartAlgo* si riduce sempre di più fino ad un superamento delle prestazioni. Ciò è dovuto a due fattori fondamentali: il primo è l'aumento degli utenti, mentre il secondo è l'aumento della diversità in frequenza degli UE.

Sappiamo che l'algoritmo *SmartAlgo* assegna la risorsa condivisa solamente all'utente che migliora le prestazioni rispetto al caso non-sharing. Quando nessuno dei due partecipanti alla contesa soddisfa questo requisito, allora viene chiesta la riallocazione degli stessi o ai canali privati, se ce ne sono disponibili, o ad altri canali condivisi.

L'algoritmo da noi proposto funziona in maniera efficace e con buoni risultati solamente al verificarsi di determinate condizioni. Innanzitutto il numero di utenti all'interno delle celle deve essere relativamente alto (dalle simulazioni abbiamo potuto constatare che deve essere maggiore di 36) e contemporaneamente si deve fissare una soglia di SINR relativamente bassa (intorno ai 9 dB). Costatato che la percentuale di potenza non influisce in maniera decisiva sulle prestazioni, l'ultima condizione che si deve verificare è che il numero dei sotto-canali condivisi deve essere maggiore di quelli privati. La condizione ottima sarebbe che i canali fossero totalmente condivisi, ovvero una percentuale di sharing pari al 100%.

Una possibile futura ricerca potrebbe coinvolgere la valutazione dell'impatto della percentuale di potenza, esaminando le prestazioni del sistema e della stessa al variare del numero di sotto-canali in downlink ed uplink e integrandola con quanto proposto in questo elaborato per osservare se la mappa di allocazione proposta migliori ulteriormente.

Il nostro elaborato non propone un algoritmo ottimo, quindi migliorarlo apportando delle modifiche o magari considerando qualche altro aspetto che magari è stato tralasciato potrebbe essere un altro ottimo tema di ricerca.

Un'interessante analisi, potrebbe essere quella di variare il traffico all'interno delle celle. Nel nostro caso il traffico è costante e tutte e due le stazioni radio base sono sature; se questa ipotesi fosse verificata, si potrebbero condurre delle simulazioni considerando il traffico variabile o magari anche con una cella completamente scarica e una percentuale di sharing del 100%, in modo che i canali inutilizzati possano essere messi completamente a disposizione della stazioni con maggior traffico.

In definitiva possiamo affermare che l'integrazione dello spectrum sharing con il controllo di potenza ha dato principalmente due contributi: il primo è

l'integrazione software, mentre il secondo sono i risultati ottenuti. Questi ultimi mostrano degli aumenti di capacità limitati, ma che in ogni caso possono essere usati come base per sviluppi futuri che diano un aumento maggiore. Ciò non toglie che indagando più a fondo o magari apportando qualche modifica, la mappa di allocazione proposta non diventi un valido aiuto nell'aumento delle prestazioni dello standard LTE.

Bibliografia

- [1] The Network Simulator ns-3, <http://www.nsnam.org/>.

- [2] <http://code.nsnam.org/giuseppepiro/ns-3-lte/>.

- [3] L. Anchora, M. Mezzavilla, L. Badia, and M. Zorzi. Simulation Models for the Performance Evaluation of Spectrum Sharing Techniques in OFDMA Networks. In Proceedings of 14th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems (MSWiM), 2011.

- [4] 3GPP TS 36.211, Physical Channels and Modulation (Release 9) 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Marzo, 2010.

- [5] Mobile WiMAX, <http://www.wimax.com/>.

- [6] Ulrich Barth 3GPP Long Term Evolution / System Architecture Evolution Overview Settembre, 2006.

- [7] 3GPP TS 36.306, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities Aprile, 2010.

- [8] M. Bennis and J. Lilleberg. Inter Base Station Resource Sharing and Improving the Overall Efficiency of B3G Systems, Vehicular Technology Conference, 2007. VTC-2007 Fall. 2007 IEEE 66th, 2007.
- [9] G. Middleton, K. Hooli, A. Tolli, J. Lilleberg, Inter-Operator Spectrum Sharing in a Broadband Cellular Network, Spread Spectrum Techniques and Applications, 2006 IEEE Ninth International Symposium on, 2003.
- [10] 3GPP TS 36.213 V8.2.0 “E-UTRA Physical layer procedures”
- [11] R1-074850 “Uplink Power Control for E-UTRA – Range and Representation of P0”
- [12] Bilal Muhammad, Closed loop power control for LTE uplink, Novembre, 2008
- [13] G. Piro, N. Baldo, and M. Miozzo. An LTE Module for the ns-3 Network Simulator. In Proceedings of Workshop on NS-3, March 2011.
- [14] http://it.wikipedia.org/wiki/Universal_Mobile_Telecommunications_System
- [15] Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker, “LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice”, John Wiley & Sons 2009, Capitolo 11.
- [16] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld and Per Beming, “3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband”, Academic Press, Secondo Edition 2008, Capitolo 14.

- [17] Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker, “LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice”, John Wiley & Sons 2009, Capitolo 2.
- [18] <http://www.goinglte.com/glossary/enb-evolved-node-b/>.
- [19] 3GPP: “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception”, TS 36.101.
- [20] Ing. Elena Guzzon, “Appunti per il corso di Telecomunicazioni: Introduzione a Long Term Evolution”, 2011.
- [21] T. Zemen, “OFDMA/SC-FDMA Basics for 3GPP LTE (E-UTRA)”, 28 Aprile 2009.
- [22] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation”, 3GPP TS 36.211 version 10.4.0, December 2011.
- [23] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification”, 3GPP TS 36.321 10.5.0, March 2011.
- [24] Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, “Publicazione bando di gara per l’assegnazione di diritti d’uso di frequenze nelle bande 800, 1800, 2000 e 2600 MHz”, disponibile su www.gazzettaufficiale.it, 27 Giugno 2011 5° serie speciale n. 75, pag 36

- [25] Bilal Muhammad, “Closed loop power control for LTE uplink”, Blekinge Institute of Technology School of Engineering, November 2008, Capitolo 2.4
- [26] Bilal Muhammad, “Closed loop power control for LTE uplink”, Blekinge Institute of Technology School of Engineering, November 2008, Capitolo 2.4.2.
- [27] Bilal Muhammad, “Closed loop power control for LTE uplink”, Blekinge Institute of Technology School of Engineering, November 2008, Capitolo 2.4.5
- [28] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures”, 3GPP TS 36.213 versione 10.5.0, March 2012.
- [29] Erik Rodriguez, “TCP vs UDP”, disponibile su <http://www.skullbox.net/tcpudp.php>
- [30] Wireless Lan <http://www.ieee802.org/11/>
- [31] Address Resolution Protocol RCF 826 su <http://tools.ietf.org/html/rfc826>
- [32] NS-3-LTE Spectrum Sharing su <http://code.nsnam.org/lanchora/ns-3-lte-SpectrumSharing/>.
- [33] Luca Anchora, “Spectrum sharing in mobile cellular networks: an alternative approach for efficient resource utilization”, IMT Institute for Advance Studies , Lucca, 2012

- [34] William C. Jakes, Editor (February 1, 1975). Microwave Mobile Communications. New York: John Wiley & Sons Inc. ISBN 0-471-43720-4.

- [35] Mahmood M. Zonoozi and Prem Dassanayake, “Shadow Fading in Mobile Radio Channel”, Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1996. PIMRC'96., Seventh IEEE International Symposium on 1996, *Vol. 2 pages 291-195*.

- [36] 3GPP. LTE physical layer - general description, TS 36.201 (V9.1.0) edition, March 2010.

- [37] Andreas Roessler, Rohde & Schwarz, Understanding Downlink Power Allocation in LTE, Wireless Design and Development.

Ringraziamenti

Voglio ringraziare tutti quelli che mi sono stati di aiuto durante questi anni universitari a Padova. Prima di tutti la mia famiglia, mia mamma, mio padre e mia sorella, che mi hanno sempre supportato al massimo sotto tutti i punti di vista e mi ha permesso di arrivare fino a qui. Con loro ho un debito di enorme valore che spero di saldare durante la mia vita regalandogli ancora tante soddisfazioni come questa.

Poi voglio ringraziare il Professore Ing. Leonardo Badia e l'Ing. Luca Anchora, che mi hanno seguito ed aiutato durante tutto l'arco di tempo che ho svolto la tesi, sempre con grande disponibilità ed interesse dandomi la possibilità di lavorare su un argomento che per me è di particolare interesse.

In fine voglio ringraziare tutti i miei amici, sia di Reggio Calabria, ma soprattutto quelli che ho incontrato negli ultimi tre anni a Padova. Li ringrazio perché con la loro amicizia mi hanno fatto sentire meno lontano da casa e mi hanno fatto passare dei momenti indimenticabili.

Grazie veramente a tutti!!!