



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA  
DELL'INFORMAZIONE

Tesi di Laurea Triennale in

INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

# Scheduling delle risorse in downlink nelle reti LTE

Relatore

Leonardo Badia

Candidato

Serena Barbiero

Anno Accademico 2012/2013



## Sommario

In questa tesi, dopo aver presentato la rete LTE con la sua architettura, verrà concentrata l'attenzione sul livello di downlink ed in particolare sulla modulazione OFDM e sulle procedure di Radio Resource Management. Tra queste procedure un compito importante è svolto dallo scheduler, che si occupa della distribuzione delle risorse agli utenti. Verranno quindi esposti e successivamente confrontati tramite simulazioni vari algoritmi di schedulazione presentati in letteratura. Questi si differenziano principalmente per i parametri che tengono in considerazione: da un lato le informazioni di feedback relative allo stato del canale, dall'altro i requisiti imposti per avere una certa qualità di servizio. Il confronto verrà fatto in termini di throughput e di fairness, sottolineando quale sia la strategia più opportuna da seguire per il conseguimento degli obiettivi relativi ai servizi richiesti dagli utenti.



# Indice

<b>Lista Acronimi</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1 Background storico e tecnologico . . . . .	1
1.2 Motivazioni e scopo della tesi . . . . .	4
<b>2 Overview di una rete LTE</b>	<b>5</b>
2.1 Architettura di rete . . . . .	5
2.1.1 Rete di accesso: E-UTRAN . . . . .	6
2.1.2 Core Network . . . . .	7
2.2 Livello fisico per il downlink . . . . .	8
2.2.1 OFDMA . . . . .	8
2.2.2 Procedure di RRM . . . . .	9
<b>3 Multi-user scheduling</b>	<b>13</b>
3.1 Parametri generali . . . . .	13
3.2 Algoritmi di schedulazione . . . . .	15
3.2.1 Strategie channel-unaware . . . . .	16
3.2.2 Strategie channel-aware, QoS-unaware . . . . .	16
3.2.3 Strategie channel-aware, QoS-aware . . . . .	17
3.3 Algoritmo Modified EDF-PF . . . . .	19
<b>4 Analisi delle prestazioni</b>	<b>23</b>
4.1 Primo scenario . . . . .	23
4.1.1 Considerazioni generali . . . . .	27

4.2	Secondo scenario . . . . .	27
4.2.1	Considerazioni generali . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>33</b>
5.1	Sviluppi futuri . . . . .	34

# Lista Acronimi

**3GPP** 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project

**AMC** Adaptive Modulation and Coding

**ARQ** Automatic Repeat reQuest

**BLER** BLock Error Ratio

**CQI** Channel Quality Indicator

**CN** Core Network

**CS** Circuit-Switched

**EDGE** Enhanced Data rates for GSM Evolution

**EPC** Evolved Packet Core

**EPS** Evolved Packet System

**E-SMLC** Evolved Serving Mobile Location Centre

**E-UTRAN** Evolved-UTRAN

**FDMA** Frequency Division Multiple Access

**FEC** Forward Error Correction

**GBR** Guaranteed Bit-Rate

**GPRS** General Packet Radio Service

**GSM** Global System for Mobile communication

**HARQ** Hybrid Automatic Repeat reQuest

**HOL** Head Of Line

**IP** Internet Protocol

**ITU-R** International Telecommunication Union - Radiocommunication sector

**LA** Link Adaptation

**LTE** Long Term Evolution

**MAC** Medium Access Control

**MME** Mobility Management Entity

**MT** Maximum Throughput

**NAS** Non Access Stratum

**OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing

**OFDMA** Orthogonal Frequency Division Multiple Access

**PDN** Packet Data Network

**PF** Proportional Fair

**P-GW** PDN GateWay

**PS** Packet-Switched

**QCI** QoS Class Identifier

**QoS** Quality-of-Service

**RR** Round Robin

**RRM** Radio Resource Management



**SAE** System Architecture Evolution

**S-GW** Serving GateWay

**TACS** Total Access Communication System

**TDMA** Time Division Multiple Access

**TTA** Time To Average

**TTI** Transmission Time Interval

**UE** User Equipement

**UMTS** Universal Mobile Telecommunication System

**VoIP** Voice over IP



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Background storico e tecnologico

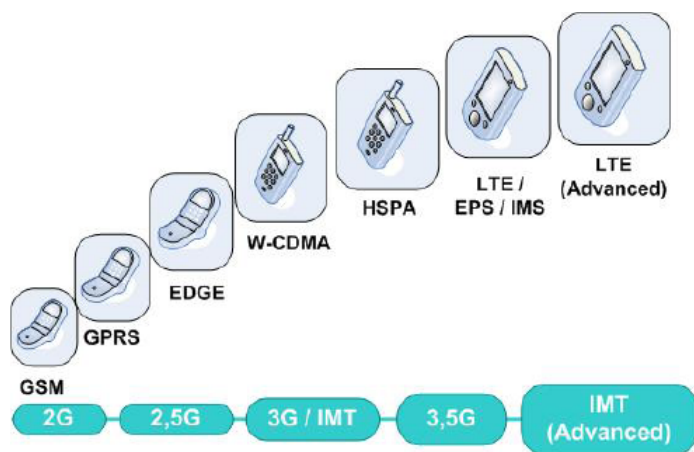
Il grande sviluppo tecnologico delle reti mobili che ha caratterizzato gli ultimi decenni porta con sé la necessità di perseguire obiettivi sempre più ambiziosi, frutto di nuove esigenze e di un pubblico in continuo aumento.

Alle prime reti di telecomunicazioni che utilizzavano come collegamento fisico cavi conduttori in rame sono seguite le comunicazioni wireless che fanno uso del canale radio. La prima generazione di sistemi di telefonia mobile, il Total Access Communication System (TACS) e successivamente l'Extended Total Access Communication System (ETACS)[24], si basava su una tecnologia trasmissiva analogica. Nato in Inghilterra e introdotto in Italia alla fine degli anni Ottanta, presentava però molti limiti tra cui la non interoperabilità con sistemi di altri nazioni, la ridotta capacità di banda e la scarsa sicurezza dei dati. Con l'avvento delle tecnologie di seconda generazione fu dismesso riducendone gradualmente i canali riservati. Già da questi primi passi lo spettro radio è diventato un mezzo trasmissivo condiviso sulla scena internazionale tra più servizi, operatori e tecnologie differenti e potenzialmente interferenti.

Nasce quindi l'esigenza di corpi di regolazione per l'utilizzo delle frequenze: l'International Telecommunication Union - Radiocommunication sector (ITU-R) gioca un ruolo fondamentale nell'evoluzione delle tecnologie deci-

dendo quali parti dello spettro e quanta banda può essere utilizzata da un particolare tipo di servizio e da una particolare tecnologia. Nell'ottica della *standardizzazione* delle famiglie di tecnologie radio (per garantirne l'interoperabilità) nasce poi nel 1998 il 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project (3GPP) accordo di collaborazione che si occupa di standardizzare vari sistemi di comunicazioni a livello mondiale: vi partecipano sei organizzazioni di sviluppo degli standard di telecomunicazioni (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TTA, TTC) [1].

Nello sviluppo dei sistemi radio di comunicazione ad opera del 3GPP sono evidenti tre passi nell'evoluzione delle tecnologie ad accesso multiplo (vedi figura 1.1): la *Seconda Generazione* GSM/GPRS/EDGE basata sul Time/Frequency Division Multiple Access (TDMA/FDMA), ovvero sull'accesso multiplo nel tempo o in frequenza; la *terza Generazione* UMTS caratterizzata dall'introduzione del Code Division Multiple Access (CDMA); infine Long Term Evolution (LTE) utilizza l'Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) che è la tecnologia d'accesso dominante le ultime evoluzioni di tutti gli standards di comunicazione radio-mobile [29].



**Fig. 1.1:** Sviluppo degli standard di rete mobile (tratto da [30])

LTE nasce da molte esigenze: se da un lato si vuole assicurare la competitività del 3G sul mercato futuro e soddisfare la domanda di data-rate più alti e di una migliore qualità del servizio, dall'altro lato è presente la necessità

di ridurre i costi (CAPEX e OPEX) e diminuire la complessità dei sistemi [1]. LTE quindi, secondo la sua versione riportata nella *Release 8* del 3GPP, rappresenta l'evoluzione del sistema High-Speed Packet Access (HSPA+) e ne supera le prestazioni in termini di:

- efficienza spettrale e quindi maggior capacità di supportare una modulazione 64-QAM a parità di condizioni di canale, garantendo la massima probabilità d'errore;
- copertura cellulare;
- ritardo relativo ad *handover*.

In particolare il miglioramento è pari al 34% per l'efficienza spettrale, 40% di utilizzo della 64-QAM contro il 7.4% dell'HSPA+ e una riduzione del 60% del tempo di interruzione dei dati durante l'handover, come emerge in [13].

Il release 8 del 3GPP include numerose caratteristiche e requisiti per la rete LTE [30, 3]:

- Peak data rate in downlink (uplink) pari a 100 Mbps (50 Mbps) con 20 MHz di banda corrispondente ad un'efficienza spettrale pari a 5 bps/Hz (2.5 bps/Hz) nella configurazione con due antenne riceventi e una trasmittente. Inoltre vengono aumentati anche i bit-rate relativi agli utenti a bordo della (*cell-edge users*) per uniformare la fornitura dei servizi;
- Capacità di almeno 200 utenti attivi simultaneamente in ogni cella di 5 MHz;
- Alta mobilità: connessione di terminali che si muovono fino alla velocità di 350 km/h;
- Coesistenza con gli standards di comunicazione già esistenti, 2G e 3G;
- Migliore flessibilità di utilizzo dello spettro radio da 1.4 a 20 MHz;
- Costo per bit ridotto: la complessità dell'UE e il consumo di potenza vengono minimizzati/ottimizzati;

- Architettura di rete semplificata;
- Ritardi ridotti sia in termine di connessione che di trasmissione dati.

La realizzazione del vasto spettro di obiettivi sopra elencati è possibile solo grazie a grandi progressi sottostanti la tecnologia radio mobile. Le tre tecnologie fondamentali su cui si basa il design dell'interfaccia radio LTE sono la tecnologia multiportante (OFDM) [23], la tecnologia multi-antenna MIMO [21] e l'approccio packet-switching nell'interfaccia radio [26].

## 1.2 Motivazioni e scopo della tesi

In questa tesi verrà trattato il livello fisico di downlink di una rete LTE ed in particolar modo il problema della schedulazione delle risorse. Infatti LTE deve supportare una vasta gamma di servizi internet e multimediali, anche in scenari ad alta mobilità. È stato progettato per garantire elevati data-rate, ritardi ridotti ed una miglior efficienza spettrale rispetto alle precedenti reti 3G. Per raggiungere questi obiettivi gioca un ruolo fondamentale il Radio Resource Management (RRM) : il design di una strategia per l'allocazione delle risorse diventa cruciale [11].

La tesi sarà strutturata come segue. Nel capitolo 2 verrà presentata l'architettura generale di una rete LTE (*Access Network* e *Core Network*) con particolare attenzione per il livello fisico di downlink, la modulazione OFDMA e quindi per le procedure di RRM. Nel capitolo 3 vengono esposti vari algoritmi di schedulazione proposti in letteratura, ognuno presentato con la metrica seguita. Vengono quindi classificati in tre gruppi: quelli che non utilizzano nessun tipo di informazione di feedback (Round Robin), quelli che tengono conto solo delle informazioni relative alla qualità del canale (Maximum Throughput, Proportional Fair e Time To Average) e quelli che oltre a ciò fanno anche riferimento anche alla qualità del servizio (Exponential Proportional Fair, Log Rule, Exp Rule e Modified EDF-PF). Nel capitolo 4 gli algoritmi presentati vengono confrontati tramite simulazioni e verrà discusso il trade off throughput-fairness. Il capitolo 5 infine espone le principali conclusioni tratte da questa tesi.

# Capitolo 2

## Overview di una rete LTE

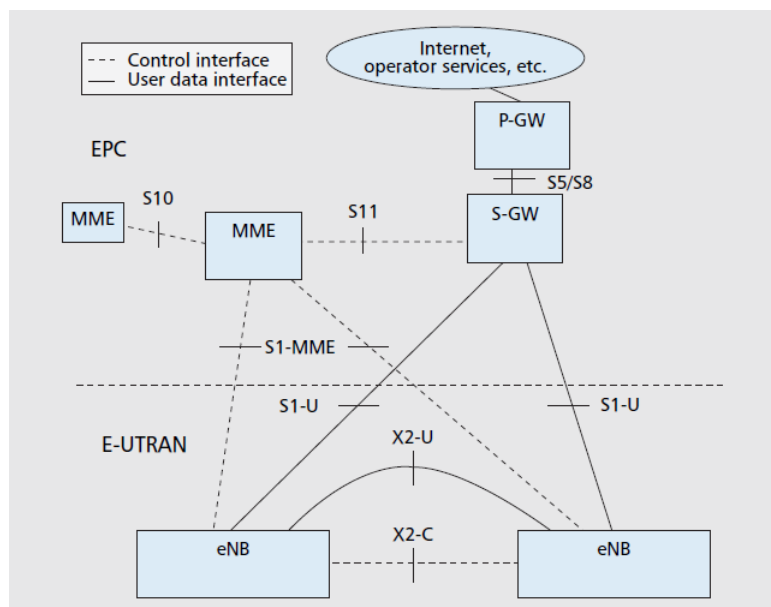
### 2.1 Architettura di rete

L'interfaccia LTE, progettata per il supporto di servizi esclusivamente Packet-Switched (PS), differentemente dai precedenti sistemi basati sulla commutazione di circuito (Circuit-Switched, CS), collega l'utente finale (User Equipment, UE) alla Packet Data Network (PDN) tramite protocollo IP. Il termine LTE comprende l'evoluzione dell'interfaccia radio attraverso l'Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) ed insieme alla 'System Architecture Evolution' (SAE), che include l'Evolved Packet Core (EPC) network, formano l'Evolved Packet System (EPS) [2]. Concetto fondamentale nell'EPS è quello di *EPS bearers* per gestire il traffico IP dalla PDN verso gli utenti (un *bearer* è un flusso di pacchetti IP con una ben definita *Quality of Service*, QoS). Un set di parametri di QoS è associato ad ogni bearer a seconda dell'applicazione dati che esso trasporta: sono definite molte classi di QoS identificate attraverso QoS Class Identifiers (QCIs). Come raffigurato nella tabella 2.1, ogni classe di QoS è caratterizzata dal tipo di risorsa (Guaranteed Bit-Rate, GBR o non-Guaranteed Bit-Rate, non-GBR), livello di priorità, massimo ritardo di consegna e massima perdita di rate sui pacchetti consentiti [11].

Verranno ora analizzati i componenti della rete ad alto livello, ovvero la rete d'accesso e la Core Network (CN).

QCI	Resource Type	Priority	Packet Delay Budget [ms]	Packet Loss Rate	Example services
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Conversational voice
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Conversational video (live streaming)
3	GBR	5	300	$10^{-6}$	Non-Conversational video (buffered streaming)
4	GBR	3	50	$10^{-3}$	Real time gaming
5	non-GBR	1	100	$10^{-6}$	IMS signaling
6	non-GBR	7	100	$10^{-3}$	Voice, video (live streaming), interactive gaming
7	non-GBR	6	300	$10^{-6}$	Video (buffered streaming)
8	non-GBR	8	300	$10^{-6}$	TCP based (e.g., WWW, e-mail), chat, FTP, P2P file sharing
9	non-GBR	9	300	$10^{-6}$	

**Tabella 2.1:** Classi standardizzate di QoS per LTE (tratto da [11])



**Fig. 2.1:** Architettura EPC/LTE (tratto da [19])

### 2.1.1 Rete di accesso: E-UTRAN

La rete di accesso è formata da eNodeBs (ogni eNB è una stazione base che controlla i terminali mobili presenti in una o più celle) interconnessi fra loro dall'interfaccia  $X2$  e all'EPC tramite interfaccia  $S1$  (figura 2.1). Essa svolge le seguenti funzioni relative alla trasmissione dei segnali sul canale radio [29]:

- Gestione delle risorse radio e di tutte le funzioni legate ai radio bearers



(tra cui scheduling e allocazione dinamica sia in uplink che in downlink);

- Compressione degli header nei pacchetti IP per un uso più efficiente dell'interfaccia radio;
- Sicurezza tramite criptazione dei dati;
- Localizzazione dell'UE, quindi supporto dell'E-SMLC;
- Connessione con la rete EPC.

### 2.1.2 Core Network

La CN o EPC è formata dai principali nodi logici [29]:

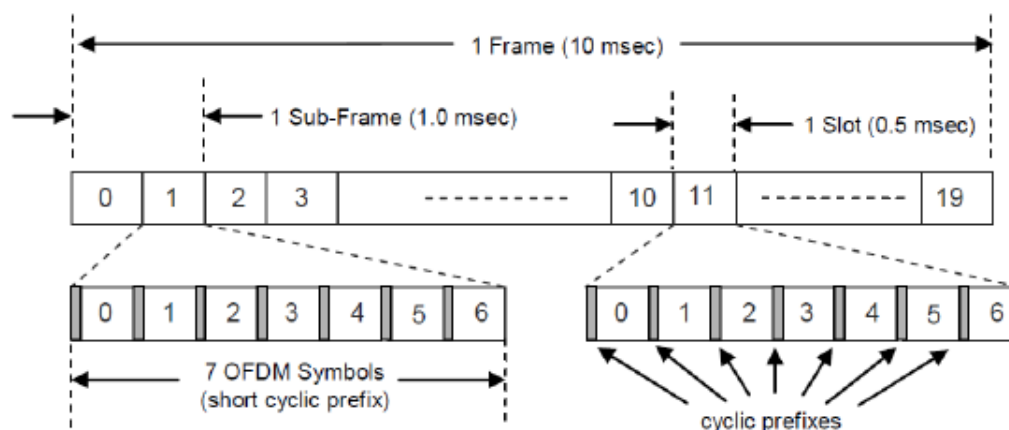
- **PDN GateWay (P-GW)**: si occupa dell'allocazione degli indirizzi IP agli UE. Agisce inoltre come filtro in downlink dei pacchetti IP suddividendoli in bearers basati sui diversi QoS. Si occupa poi dell'inter-working con tecnologie non-3GPP come le reti CDMA2000 e WiMAX;
- **Serving GateWay (S-GW)**: tutti i pacchetti IP vengono trasferiti attraverso il S-GW che funge da riferimento mobile per i data bearers quando gli UE si muovono attraverso gli eNBs. Conserva le informazioni relative ai bearers quando l'utente è inattivo (EPS Connection Management IDLE o ECM-IDLE) e memorizza i dati di downlink finché la Mobility Management Entity (MME) si occupa di connettersi con l'UE per ristabilire i bearers. Inoltre svolge anch'esso funzione di inter-working ma con altre tecnologie 3GPP come GPRS e UMTS;
- **Mobility Management Entity (MME)**: è un nodo di controllo che processa i segnali scambiati fra l'UE e la CN tramite i protocolli Non-Access Stratum (NAS);
- **Evolved Serving Mobile Location Centre (E-SMLC)**: gestisce interamente la coordinazione e lo scheduling delle risorse richieste per trovare l'UE connesso all'E-UTRAN. È in grado di calcolare la posizione finale basandosi sui dati che riceve, stimando la velocità dell'UE e con quale precisione è ottenuta.

## 2.2 Livello fisico per il downlink

### 2.2.1 OFDMA

LTE è stata progettata per essere una tecnologia di accesso radio altamente flessibile che funziona su diverse bande di frequenza (da 1.4 MHz a 20 MHz). L'accesso dello spettro radio si basa sullo schema di modulazione Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM). L'OFDM divide la banda disponibile in molte sotto-portanti di larghezza minore e in queste i dati vengono poi trasmessi tramite flussi paralleli. Ogni sotto-portante utilizza poi una differente modulazione (QPSK, QAM, 64QAM) e un simbolo OFDM è ottenuto aggregando i segnali delle sotto-portanti modulanti [6].

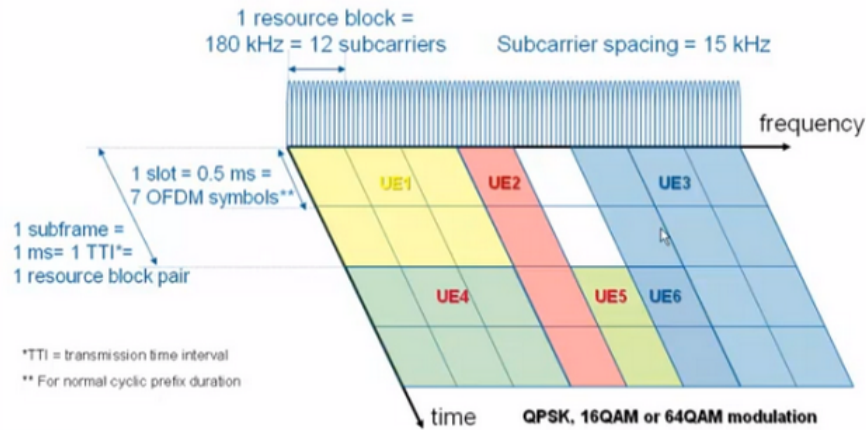
Le risorse radio vengono allocate in un dominio tempo-frequenziale strutturato come in figura 2.2.



**Fig. 2.2:** Struttura del dominio temporale, frame (tratto da [32])

Il dominio del tempo viene suddiviso in *frames* della durata di 10 ms: un frame radio è quindi formato da 10 subframes chiamati Transmission Time Interval (TTI). A sua volta un TTI è formato da due slot temporali della lunghezza di 0.5 ms corrispondenti a 7 simboli OFDM nella configurazione di default con prefissi ciclici corti (circa 5  $\mu$ s).

Nel dominio della frequenza invece la banda totale viene divisa in sotto-canali di 180 kHz ognuno formato da 12 sotto-portanti OFDM consecutive ed equispaziate. In base a questa suddivisione viene quindi identificata una griglia delle risorse (*resource grid*, figura 2.3).



**Fig. 2.3:** Multiplexing OFDMA, griglia tempo-frequenza (tratto da [31])

Un *resource block* (RB) ha la durata di uno slot temporale (come detto prima  $T_{slot} = 0.5 \text{ ms}$ ) ed è formato da 12 sotto-portanti: esso corrisponde alla più piccola unità di risorsa radio che può essere assegnata ad un UE nella trasmissione dei dati [11].

### 2.2.2 Procedure di RRM

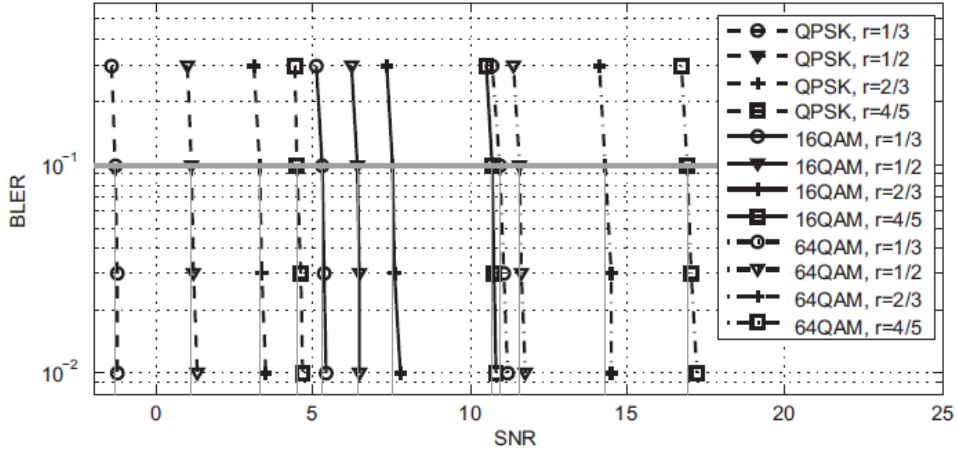
Utilizzando trasmissioni basate sull'OFDM, LTE può fare una schedulazione delle risorse dipendente dalle condizioni del canale (nel tempo e nella frequenza) per sfruttare oppure ovviare a rapide variazioni della qualità del canale raggiungendo quindi uno sfruttamento più efficiente delle risorse [6]. Lo scheduler infatti determina per ogni subframe a quali utenti è consentito trasmettere, su quali frequenze deve avvenire la trasmissione e con quale data-rate. Per fare ciò LTE si avvale di procedure di RRM come link adaptation (LA), Hybrid Automatic Repeat reQuest (HARQ) e Channel Quality

Indicator (CQI). Queste procedure avvengono a livello fisico e a livello MAC interagendo fortemente tra loro al fine di ottimizzare l'uso delle risorse.

- **Link Adaptation.** In un sistema di comunicazione cellulare, la qualità del segnale ricevuto dall'UE dipende dalla qualità del canale della cella servente, dal livello di interferenza delle altre celle e dal livello di rumore. Per massimizzare la capacità del sistema e la copertura per una certa potenza di trasmissione, il trasmettitore cerca di relazionare il data rate di ogni utente alle variazioni della qualità del segnale ricevuto: questo è ciò che si intende con LA ed è tipicamente basato sull'Adaptive Modulation and Coding (AMC). Da un lato viene scelto lo *schema di modulazione* opportuno: una modulazione di basso ordine (pochi bit per simbolo, es. QPSK) è più robusta e tollera maggiori livelli di interferenza, ottenendo però un basso rate di trasmissione. Una modulazione di alto ordine al contrario (es. 64QAM) offre un maggior bit-rate ma è più vulnerabile rispetto all'interferenza, al rumore e agli errori di stima del canale necessitando di un SINR sufficientemente alto [10]. Dall'altro lato nell'AMC viene scelto il *code rate* (utilizzato dall'encoder per la codifica di canale) dipendentemente alle condizioni del collegamento: un code rate più alto viene utilizzato solo in caso di buone condizioni di canale e quindi per un SINR più alto [29].
- **CQI feedback.** Un utente può essere configurato per mandare in feedback il CQI per aiutare l'eNodeB a scegliere un appropriato Modulation and Coding Scheme (MCS) per la trasmissione. Il CQI deriva dalla qualità del segnale ricevuto in downlink: l'UE riporta il più alto MCS che può decodificare con un Block Error Ratio (BLER) non eccedente il 10%. Il metodo con cui un UE sceglie l'appropriato valore di CQI si basa su soglie di BLER come nella tabella 2.2.
- **HARQ.** È la procedura di ritrasmissione che avviene a livello MAC. Hybrid ARQ (HARQ) [7] combina due tecniche per il controllo dell'errore. La prima, ovvero Forward Error Correction (FEC), provvede alla protezione dall'errore tramite codici di correzione; la seconda, ovvero

pura ARQ (Automatic Repeat reQuest), è responsabile di trasmettere *negative acknowledgements* (NACK) all'eNodeB da parte dell'UE tramite un canale di feedback, nel caso in cui dei pacchetti siano stati ricevuti in modo errato.

(a) BLER vs SNR per differenti MCS



(b) Tabella dei CQI

CQI index	Modulation	Approximate code rate	Efficiency (information bits per symbol)
0	'Out-of-range'	—	—
1	QPSK	0.076	0.1523
2	QPSK	0.12	0.2344
3	QPSK	0.19	0.3770
4	QPSK	0.3	0.6016
5	QPSK	0.44	0.8770
6	QPSK	0.59	1.1758
7	16QAM	0.37	1.4766
8	16QAM	0.48	1.9141
9	16QAM	0.6	2.4063
10	64QAM	0.45	2.7305
11	64QAM	0.55	3.3223
12	64QAM	0.65	3.9023
13	64QAM	0.75	4.5234
14	64QAM	0.85	5.1152
15	64QAM	0.93	5.5547

**Tabella 2.2:** Scelta del CQI e del corrispondente MCS (tratto da [29])

# Capitolo 3

## Multi-user scheduling

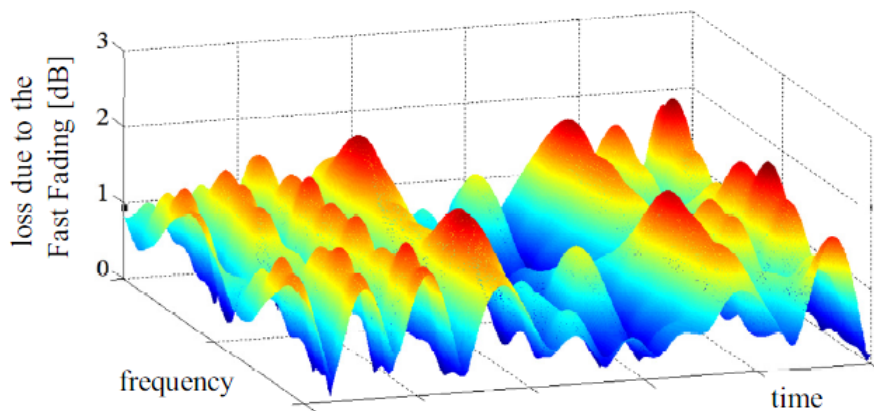
### 3.1 Parametri generali

La rete di accesso LTE è principalmente composta da eNodeBs dove avviene l'RRM. Questo ricopre l'importante funzione di packet scheduling ovvero seleziona gli utenti e quante risorse allocare a ciascuno di essi per utilizzare nel modo più efficiente possibile le risorse radio disponibili. Un parametro importante di cui tener conto è la **QoS**: i diversi requisiti di QoS dipendono dai servizi erogati all'utente (Voice over IP o VoIP, live streaming e altri) quindi, per esempio, dall'esigenza di minimizzare il ritardo piuttosto che garantire sempre un certo bit-rate a tutti gli utenti nella cella. Lo scheduling punta quindi a ottimizzare le prestazioni del sistema anche se, come sopra esposto, non esiste univocità nella definizione che dipende fortemente dagli obiettivi desiderati. In generale vengono identificati due estremi nelle procedure di scheduling: *opportunistic scheduling* e *fair scheduling* [29].

L'*opportunistic scheduling* punta alla massimizzazione del throughput complessivo del sistema: viene misurato come il numero totale di bit trasmessi con successo ( $B$ ) dall'UE all'eNodeB durante un determinato periodo temporale (tempo di simulazione  $t_{sim}$ ). Il throughput complessivo si ottiene quindi come somma dei throughput dei singoli utenti.

$$Throughput = B/t_{sim}$$

Il throughput è fortemente legato al concetto di *channel sensitivity*: l'idea basilare è di schedulare gli utenti che, in un certo momento, hanno delle buone condizioni di canale basandosi su determinate metriche. Il segnale ricevuto infatti è soggetto a molti disturbi tra cui il *fading* ovvero ad attenuazione dovuta al mezzo di propagazione (figura 3.1). Tuttavia in un sistema multi-utente la caratteristica del fading di essere un processo statisticamente indipendente per ogni utente può essere sfruttata dalle procedure di allocazione ottenendo guadagno dalla *multi-user diversity*. Infatti in uno scenario con molti utenti con effetti di fading indipendenti, si può notare che la probabilità di trovare un utente con buone condizioni di canale in un certo istante è molto alta. È dimostrato che la capacità totale del sistema cresce con il numero di utenti, anche se il guadagno per multi-user diversity risulta superiormente limitato, fatto che dev'essere tenuto in considerazione nella fase di design di un algoritmo di schedulazione [11].



**Fig. 3.1:** Fast fading nel dominio tempo-frequenziale (tratto da [11])

Il secondo estremo nelle procedure di scheduling, il *fair scheduling*, presta invece molta più attenzione ai tempi di latenza e a raggiungere un minimo data-rate per ogni utente piuttosto che massimizzare il rate complessivo. Questo è particolarmente importante per le applicazioni real-time come



VoIP o video-conferenze in cui un data-rate minimo dev'essere garantito indipendentemente dalle condizioni di canale. Possono essere utilizzate molte metriche e formulazioni matematiche per quantificare la *fairness*. Uno degli approcci maggiormente utilizzati è l'**indice di Jain** [17] dato dalla formula (3.1) in cui  $\mathbf{T}$  è il vettore dei throughputs attesi degli utenti,  $\mathbf{T}(k)$  è il  $k$ -esimo valore di  $\mathbf{T}$  e  $K$  è il numero di utenti:

$$J(\mathbf{T}) = \frac{(\sum_{k=1}^K \mathbf{T}(k))^2}{K \sum_{k=1}^K \mathbf{T}(k)^2}. \quad (3.1)$$

L'indice di Jain varia tra  $\frac{1}{K}$  (solo un utente viene servito) a 1 (tutti gli utenti vengono serviti con lo stesso rate) [28].

## 3.2 Algoritmi di schedulazione

Un packet-scheduler effettua le sue decisioni di allocazione per massimizzare il livello di soddisfazione dei requisiti del sistema (opportuno trade off tra throughput massimo globale e fairness tra gli utenti). Uno schedulatore misura la soddisfazione dei requisiti di sistema basandosi su opportune metriche di performance, come data-rate raggiunto dal singolo UE, fairness nell'allocazione tra gli UE, ritardo medio dei pacchetti e così via. La scelta di quale metrica di performance ottimizzare influenza come lo scheduler risolve le contese tra gli UE [4]. Ogni TTI le decisioni di allocazione vengono prese confrontando le metriche per RB: il  $k$ -esimo RB è allocato al  $j$ -esimo UE se la sua metrica  $m_{j,k}$  è la più grande, ovvero se soddisfa l'equazione (3.2):

$$m_{j,k} = \max_i \{m_{i,k}\}. \quad (3.2)$$

In [11] le strategie di allocazione vengono classificate in tre gruppi, di seguito riportati nelle prossime sotto-sezioni: strategie channel-unaware, strategie channel-aware/QoS-unaware e strategie channel-aware/QoS-aware.

### 3.2.1 Strategie channel-unaware

Sono gli algoritmi progettati per reti cablate basati sull'assunzione di avere mezzi di trasmissione tempo-invarianti e senza errori. Per questo motivo la loro applicazione per reti wireless non è realistica in quanto non considerano nessun tipo di feedback o informazione sul canale: tuttavia sono fondamentali quando combinati con altre strategie di allocazione. Tra questi uno dei più noti è *Round Robin* (RR) [14] che alloca le risorse a turno in modo equo seguendo la metrica in (3.3) in cui  $T_i$  si riferisce all'ultima volta in cui l'utente è stato servito mentre  $t$  è il tempo attuale:

$$m_{i,k}^{RR} = t - T_i. \quad (3.3)$$

### 3.2.2 Strategie channel-aware, QoS-unaware

Questi algoritmi tengono conto dei CQI ovvero dei feedback inviati periodicamente dagli utenti. Tramite questi è possibile stimare la qualità del canale percepita dall'UE in modo da prevedere il massimo throughput raggiungibile. Una spiegazione numerica dell'importanza della conoscenza del canale in un contesto wireless è data dall'espressione di Shannon per la capacità del canale [10]:

$$d_k^i(t) = \log(1 + SINR_k^i(t)). \quad (3.4)$$

Il massimo throughput raggiungibile dall' $i$ -esimo utente al tempo  $t$  e sul  $k$ -esimo RB ( $d_k^i(t)$ ) può essere calcolato utilizzando il modulo AMC o stimato tramite l'espressione di Shannon [11].

1. *Maximum Throughput, MT*. Questo algoritmo [20] punta a massimizzare il throughput complessivo della cella assegnando ogni RB all'utente che può raggiungere le massime prestazioni nel TTI corrente. La sua metrica è espressa in (3.5) dove  $d_k^i(t)$  ha lo stesso significato assunto in (3.4).

$$m_{i,k}^{MT} = d_k^i(t) \quad (3.5)$$

2. *Proportional Fair, PF*. PF [20] presenta una forma di trade off tra fairness ed efficienza spettrale. L'idea è che il throughput medio ottenuto

fino al tempo  $t$  ( $\overline{R}^i(t)$ ) agisce come un peso per il data-rate atteso: in questo modo si garantisce che anche gli utenti che non manifestano buone condizioni di canale vengano serviti per un certo tempo. Risulta quindi:

$$m_{i,k}^{PF} = \frac{d_k^i(t)}{\overline{R}^i(t-1)} \quad (3.6)$$

con

$$\overline{R}^i(t) = \beta \overline{R}^i(t-1) + (1-\beta)r^i(t) \quad (3.7)$$

dove  $0 \leq \beta \leq 1$  e  $r^i(t)$  è il data-rate raggiunto dall'utente  $i$ -esimo al tempo  $t$ . Una formulazione equivalente [22] per questo algoritmo è la seguente:

$$m_{i,k}^{PF} = \frac{r^i(t)}{\overline{R}^i(t)}. \quad (3.8)$$

3. *Throughput to Average, TTA*. Questa strategia [18] si può considerare un compromesso tra MT e PF; presenta la seguente metrica ( $d^i(t)$  è il data-rate complessivamente atteso per l'utente  $i$ -esimo al tempo  $t$ ):

$$m_{i,k}^{TTA} = \frac{d_k^i(t)}{d^i(t)}. \quad (3.9)$$

Il throughput raggiungibile nel TTI corrente viene utilizzato come fattore di normalizzazione del throughput atteso per un dato RB. TTA garantisce un buon livello di fairness in quanto più alto è il throughput atteso di un utente, più bassa sarà la sua metrica su un singolo RB: questo significa che lo scheduler sfrutta la conoscenza del canale per garantire un livello minimo di servizio a tutti gli utenti.

### 3.2.3 Strategie channel-aware, QoS-aware

La differenziazione tramite QoS assegna un set di parametri ad ogni flusso di bit a seconda del tipo di dati che esso trasporta (tabella 2.1). Conoscendo il valore di questi parametri lo scheduler tratterà i dati in modo da garantire le prestazioni minime richieste.

1. *Exponential PF, EXP/PF*. Questo algoritmo, presentato in [15], tiene conto sia delle caratteristiche dell'algoritmo PF che della funzione esponenziale del ritardo end-to-end. Esso distingue tra i flussi real-time e quelli non real-time per i quali viene seguita la filosofia del *best effort*. Questo scheduler è quindi composto da due schemi di schedulazione per garantire i limiti di ritardo dei servizi real-time, massimizzando al contempo il throughput del sistema. Per i flussi real-time la metrica è espressa in (3.10).

$$m_{i,k}^{EXP/PF} = \exp\left(\frac{\alpha_i D_{HOL,i} - \chi}{1 + \sqrt{\chi}}\right) \cdot \frac{d_k^i(t)}{R^i(t-1)} \quad (3.10)$$

dove

$$\chi = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=1}^{N_{rt}} \alpha_i D_{HOL,i} \quad (3.11)$$

$$\alpha_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} \quad (3.12)$$

e  $N_{rt}$  è il numero di flussi real-time attivi in downlink mentre Head of Line Delay ( $D_{HOL,i}$ ) è il ritardo del primo pacchetto trasmesso dall'utente  $i$ -esimo. Il parametro  $\alpha_i$ , espresso in (3.12), gioca un ruolo molto importante: dati due flussi con uguale ritardo della HOL,  $\alpha_i$  bilancia le metriche in modo che l'utente con i più forti requisiti in termini di perdita di rate accettabile e time-out per la perdita dei pacchetti, sarà preferito per l'allocazione. In (3.12)  $\delta_i$  rappresenta la perdita di rate accettabile mentre  $\tau_i$  la soglia di ritardo per l'utente  $i$ -esimo.

2. *LOG RULE*. LOG rule e la seguente EXP rule sono due strategie presentate in [27]. La sensibilità alle condizioni di canale viene qui considerata insieme ad una metrica PF che viene modellata tramite una funzione del ritardo della HOL dei pacchetti. Per la LOG rule la funzione è:

$$m_{i,k}^{LOGrule} = b_i \log(c + a_i D_{HOL,i}) \cdot \Gamma_k^i \quad (3.13)$$

dove i parametri  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c$  sono delle variabili che in [27] vengono ottimizzati a seconda degli scopi da conseguire.

3. *EXP RULE*. Questa tecnica può essere considerata come un'estensione dell' EXP/PF presentato prima. La sua metrica è simile a quella della LOG rule.

$$m_{i,k}^{EXPrule} = b_i \exp\left(\frac{a_i D_{HOL,i}}{c + \sqrt{(1/N_{rt}) \sum_j D_{HOL,j}}}\right) \cdot \Gamma_k^i \quad (3.14)$$

Nella seguente sezione verrà esposto un ulteriore algoritmo non compreso dagli autori nella classificazione fatta in [11] in quanto di recentissima pubblicazione. Lo schedatore Modified EDF-PF [22] elaborato per supportare servizi real-time ha lo scopo di aumentare la qualità di servizio dei traffici in downlink pur mantenendo una bassa complessità. Per questo motivo si può collocare nella terza categoria ovvero tra gli algoritmi sensibili alla qualità del canale e alla QoS.

### 3.3 Algoritmo Modified EDF-PF

In [22] viene esposto un algoritmo a bassa complessità basato sulle strategie Earliest Deadline First (EDF) e Proportional Fair (PF): viene proposto per aumentare la QoS nei traffici real time che hanno requisiti stringenti sul ritardo dei pacchetti.

L'*algoritmo EDF* è definito per i servizi con ritardo massimo garantito: questi richiedono che ogni pacchetto debba essere ricevuto entro una certa scadenza per evitare la perdita di pacchetti. EDF, come espresso dal nome, schedula prima i pacchetti che hanno il time-out più stringente. Tuttavia questa strategia non tiene conto delle variazioni del canale che come già sottolineato sono fondamentali in un ambiente wireless. La sua metrica è esposta in (3.15).

$$m_{i,k}^{EDF} = \frac{1}{(\tau_i - D_{HOL,i})} \quad (3.15)$$

L'*algoritmo PF*, presentato prima, mantiene un buon equilibrio tra fairness e throughput totale prestandosi bene per le High Data Rate Networks.

Tuttavia non è una buona scelta per lo scheduling di traffico real time in quanto non tiene conto della QoS.

L'algoritmo Modified EDF-PF (M-EDF-PF) combina i due algoritmi sopraesposti risultando quindi essere sia channel-aware che QoS-aware: inoltre presenta un buon compromesso tra fairness, throughput e soddisfacimento della QoS. Per renderlo più flessibile alle caratteristiche dei diversi flussi vengono introdotti dei parametri modificabili. Nella metrica

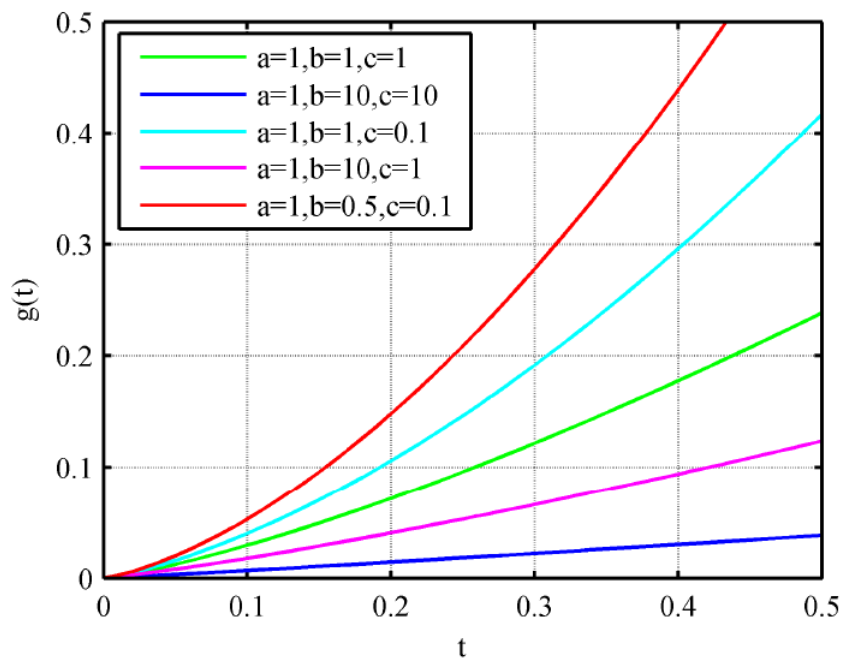
$$m_{i,k}^{M-EDF-PF} = g_i(D_{HOL,i}) \cdot \frac{1}{(\tau_i - D_{HOL,i})} \cdot \frac{r^i(t)}{\overline{R}^i(t)} \quad (3.16)$$

con

$$g_i(t) = \frac{a_i \cdot t}{\log(1 + b_i/t) + c_i} \quad (3.17)$$

$g_i(t)$  è una funzione crescente concava la cui pendenza cambia al variare dei parametri  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  come in figura 3.2;  $\overline{R}_i(t)$  è calcolata come in (3.7) mentre è evidente la composizione della strategia con le metriche espote in (3.8) e (3.15).

L'introduzione di parametri variabili permette di raggiungere differenti metriche di valutazione a seconda delle diverse priorità di traffico: per i traffici ad alta priorità è infatti necessaria una metrica sufficientemente grande raggiungibile settando i parametri in modo opportuno.



**Fig. 3.2:** Andamento di  $g_i(t)$  al variare dei parametri (tratto da [22])





# Capitolo 4

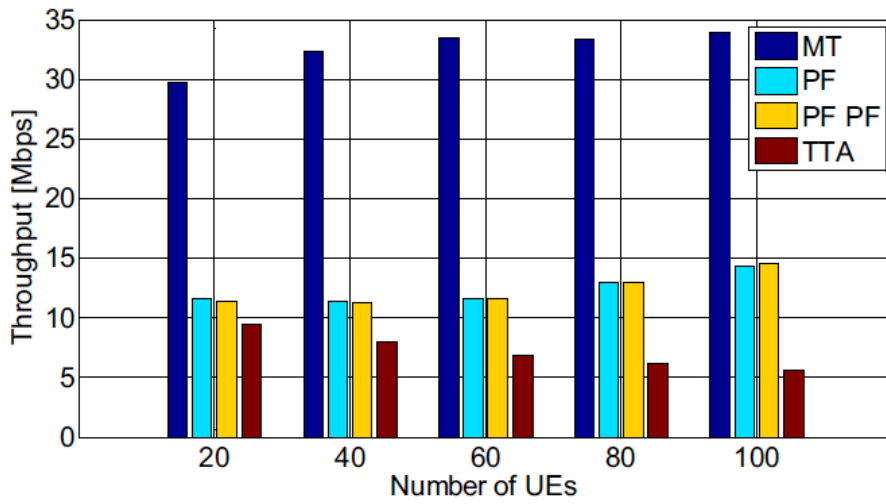
## Analisi delle prestazioni

L'analisi delle prestazioni verrà fatta considerando due gruppi di algoritmi: quelli *Channel aware/QoS unaware* e quelli *Channel aware/QoS aware* così come sono stati esposti nel capitolo precedente. Verranno quindi introdotti due opportuni scenari e sarà discusso il trade off fairness-throughput a seconda dei casi. Per la fairness si farà riferimento in entrambi i casi all'indice di Jain.

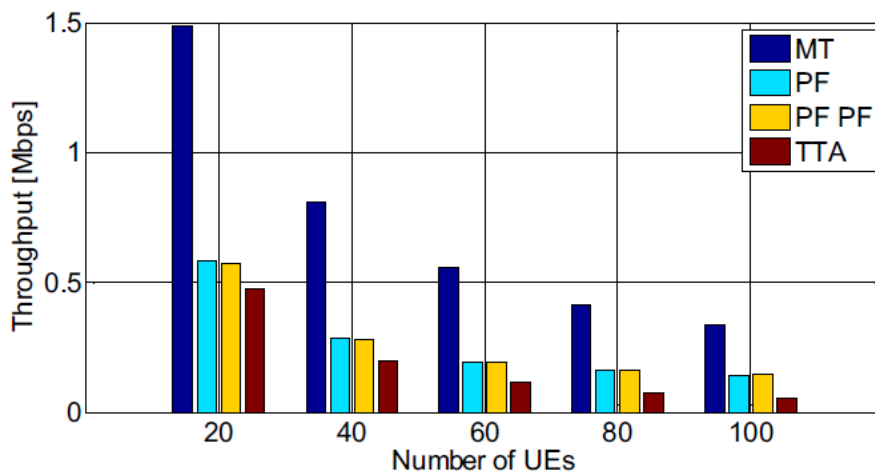
### 4.1 Primo scenario

La prima simulazione vede uno scenario composto da un numero variabile di utenti, scelto con probabilità uniforme nell'intervallo  $[20, 100]$ , che si muove lungo percorsi casuali alla velocità di 30 km/h all'interno della stessa cella. Si suppone che sia attivo per ogni utente un flusso in downlink, modellato con un buffer infinito alla sorgente. Lo scenario considera modelli di canale realistici e molte caratteristiche di RRM [11]. I grafici seguenti, risultato della simulazione, presentano il confronto tra gli algoritmi MT, PF e TTA insieme all'ulteriore algoritmo PF-PF [9] che presenta una schedulazione in due passi applicando lo stesso schema di PF prima nel dominio del tempo e poi nel dominio della frequenza.

Si può osservare innanzitutto (fig. 4.1a) il guadagno ottenuto dalla diversità multi-utente: la capacità della cella aumenta al crescere del numero di



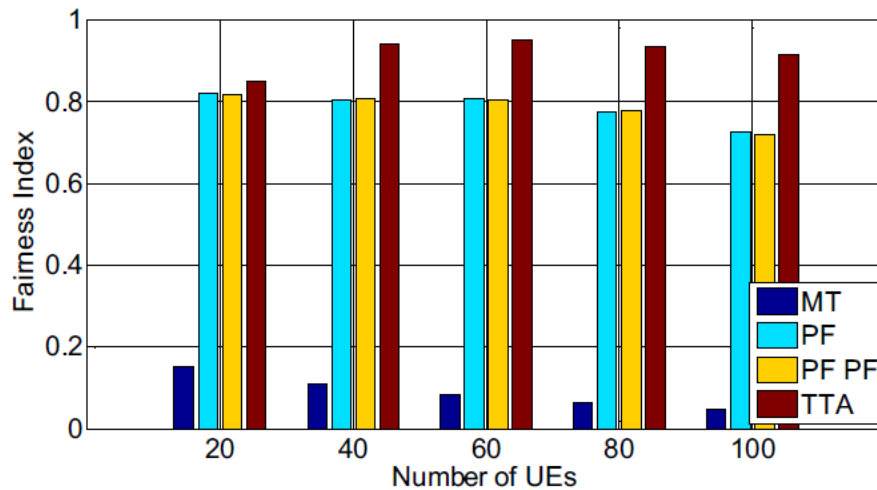
(a) Throughput aggregato della cella



(b) Throughput medio per utente

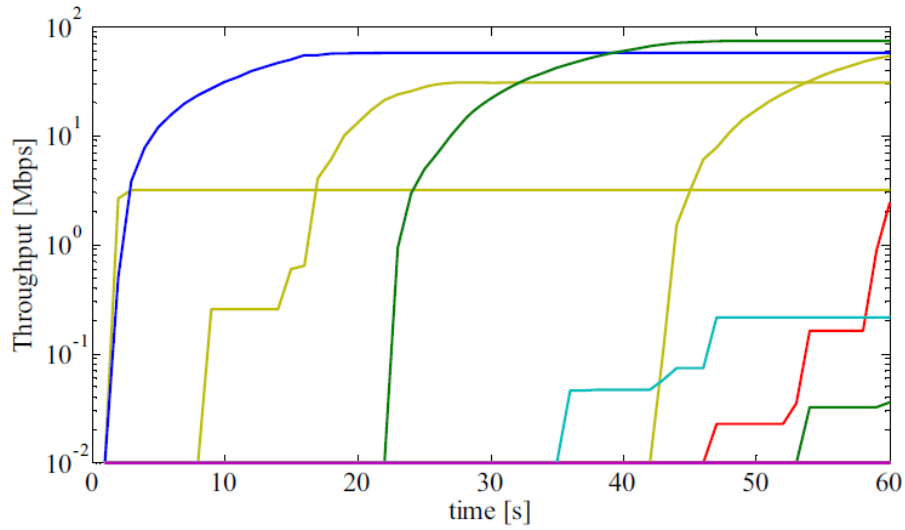
**Fig. 4.1:** Throughput al variare del numero di utenti

utenti. Questo avviene perché, crescendo il numero di utenti, aumenta la probabilità di trovare un utente che sperimenti buone condizioni di canale ad un certo tempo e ad una certa frequenza. L'effetto è più marcato per la metrica MT (in blu) poiché è quella che ha come obiettivo la massimizzazione del throughput mentre le altre tengono conto anche della fairness. Al contrario TTA, al crescere del numero degli utenti, ottiene l'effetto opposto cercando sempre di allocare in ogni TTI le risorse a tutti gli utenti. La figura 4.1b mostra come, per tutte le strategie di schedulazione, il throughput medio per UE diminuisca man mano si presentino più utenti sulla stessa scena. I risultati presentati confermano inoltre come MT abbia migliori prestazioni in termini di throughput massimo raggiunto (sia individuale che globale) ottenendo però scarsi risultati in termini di fairness (fig. 4.2).

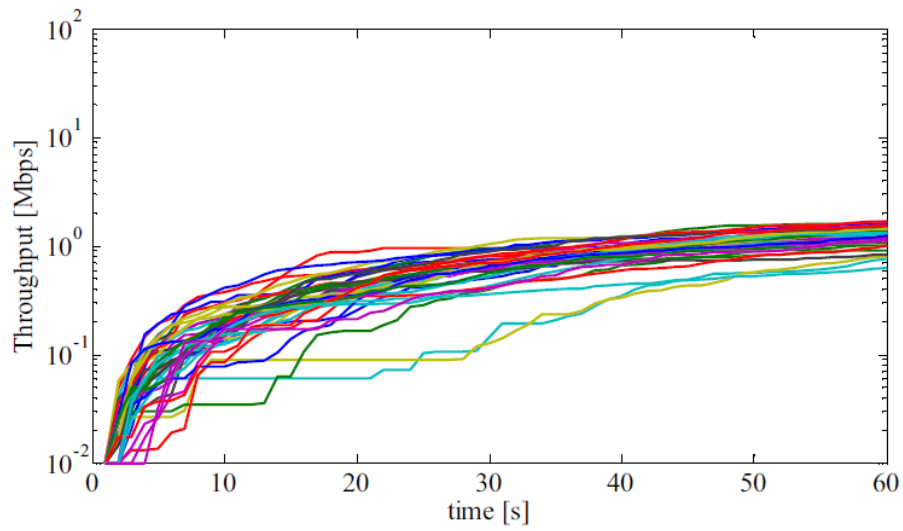


**Fig. 4.2:** Indice di Jain al variare del numero di utenti

Questo avviene perché, come si nota dalla figura 4.3a, in uno scenario con molti utenti MT garantisce un alto data-rate solo ad un numero limitato di UE (quelli vicini all'eNobeB) mentre gli altri sperimentano throughput molto bassi. Mentre PF e PF-PF si comportano allo stesso modo, complessivamente la più alta fairness è raggiunta da TTA: si può infatti notare dalla fig 4.3b la compattezza delle curve che rappresentano la variazione temporale dei



(a) Algoritmo MT



(b) Algoritmo TTA

**Fig. 4.3:** Andamento temporale del throughput per UE: scenario con 40 utenti nella cella

throughput dei singoli UE. Si ricordi a tal proposito che l'indice di Jain varia da 0 a 1: in fig 4.2 più ci si avvicina ad 1 e più l'allocazione è equa.

### 4.1.1 Considerazioni generali

La conoscenza del canale è un concetto fondamentale per raggiungere alte prestazioni in un ambiente wireless: questo avviene sfruttando le procedure di RRM come il CQI e LA. Se è possibile stimare la qualità del canale percepita da un certo UE in un dato RB è possibile allocare consapevolmente le risorse ottenendo data-rate molto alti. Tuttavia l'efficienza spettrale non è l'unico obiettivo perseguibile in una rete cellulare in quanto dev'essere garantito un certo livello di servizio anche agli utenti a bordo cella. In questo senso PF viene considerato l'approccio più efficiente per affrontare il problema della fairness tenendo conto anche dell'efficienza spettrale [11].

## 4.2 Secondo scenario

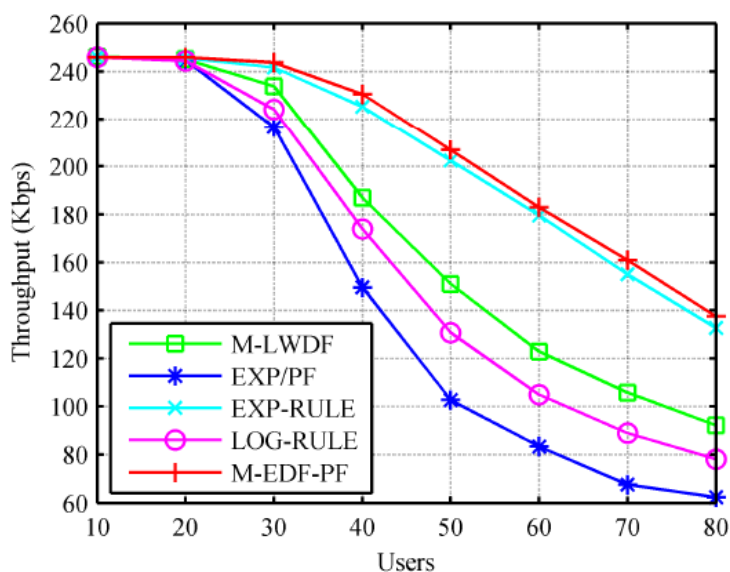
Il secondo scenario si presenta più complesso [22], in quanto vengono confrontati gli algoritmi *QoS aware* che tengono in considerazione anche parametri aggiuntivi. Si modella quindi una singola macro-cella (raggio 1 km), libera da interferenza inter-cella, in ambiente urbano: il 50% degli utenti sperimenta dei flussi video mentre i restanti utenti supportano traffico VoIP. Gli utenti sono uniformemente distribuiti nella cella e si muovono con una velocità costante di 3 km/h in direzioni casuali: una volta che un utente raggiunge il bordo della cella sceglie casualmente un'altra direzione all'interno di essa mantenendo la stessa velocità. Le assunzioni fatte sono due:

- La potenza in downlink è egualmente allocata tra le sotto-portanti che vengono utilizzate per la trasmissione;
- I valori istantanei di SINR relativi ai RB vengono riportati all'eNodeB ogni TTI senza errore e ritardo.

Nei grafici seguenti si considerano gli algoritmi EXP/PF, EXP-RULE, LOG-RULE e l'ultimo presentato M-EDF-PF. Inoltre è presente un quinto algorit-

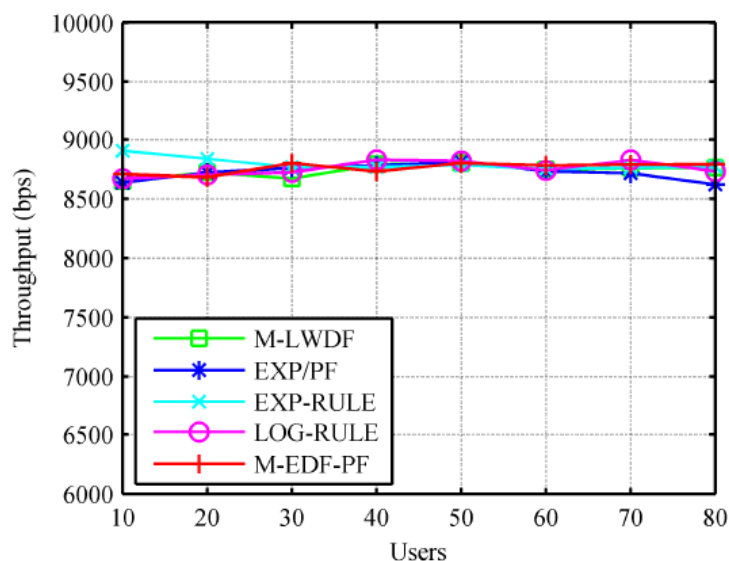
mo ovvero Modified Largest Weighted Delay First (M-LWDF) [8] progettato per supportare molti utenti con diversi requisiti di QoS. Per l'algoritmo M-EDF-PF i parametri  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  vengono tutti impostati a 1 (vedi fig. 3.2). L'analisi verrà fatta considerando disgiuntamente il traffico video e quello VoIP: anche se sono entrambi servizi real-time questi richiedono una diversa Qos e differenti data-rate.

La figura 4.4 mostra il throughput medio per il flusso video che diminuisce per tutti gli algoritmi al crescere del numero di utenti. Quando il numero di utenti supera 30, il throughput di M-LWDF, EXP-PF e LOG-RULE è soggetto ad una rapida decrescita mentre gli altri due manifestano una diminuzione più lenta. Per il maggior numero di utenti considerato, cioè 80, il throughput di M-EDF-PF e EXP-RULE supera notevolmente quello degli altri algoritmi.



**Fig. 4.4:** Throughput medio per il flusso video

Per quanto riguarda il throughput medio per i flussi VoIP (fig. 4.5) si mantiene quasi lo stesso, circa 8500-9000 bps per tutte le strategie utilizzate. Una possibile spiegazione di questa non-variazione è dovuta al modello di traffico e ai periodi ON/OFF utilizzati durante la simulazione [22].



**Fig. 4.5:** Throughput medio per il flusso VoIP

L'indice di Fairness dei flussi video si mantiene vicino ad uno per tutti gli algoritmi considerati finché il numero di utenti si mantiene inferiore a 30 come in figura 4.6. Quando ci sono più di 30 utenti, l'indice di fairness presenta una rapida diminuzione nel caso di M-LWDF, EXP/PF e LOG-RULE. Invece utilizzando M-EDF-PF ed EXP-RULE si ha un indice di fairness pari circa a 0.9 anche quando nella cella ci sono 80 utenti. Questo dimostra come questi due algoritmi ottengano migliori risultati in termini di fairness nell'allocazione delle risorse tra diversi flussi video.

Per i flussi VoIP invece, considerando l'indice di Jain in figura 4.7, tutti gli algoritmi presentano lo stesso comportamento ovvero sono molto vicini ad uno indicando che le risorse radio sono ben distribuite per questi flussi.

Infine considerando l'efficienza spettrale complessiva della cella (fig. 4.8), comprendente quindi i due tipi di flusso, si nota che essa cresce all'aumentare degli UE e quindi del carico di servizi richiesti. Tuttavia sopra una certa soglia, l'efficienza spettrale tende a rimanere costante. Anche qui i migliori risultati sono ottenuti da M-EDF-PF e EXP-RULE.

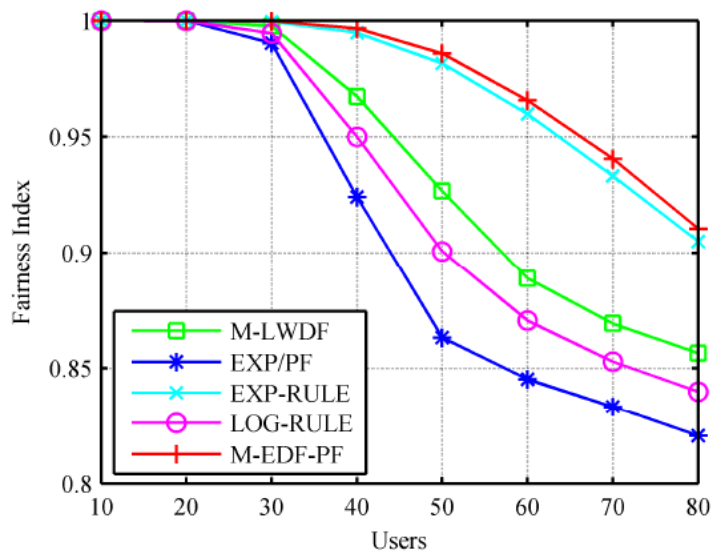


Fig. 4.6: Indice di fairness per i flussi video

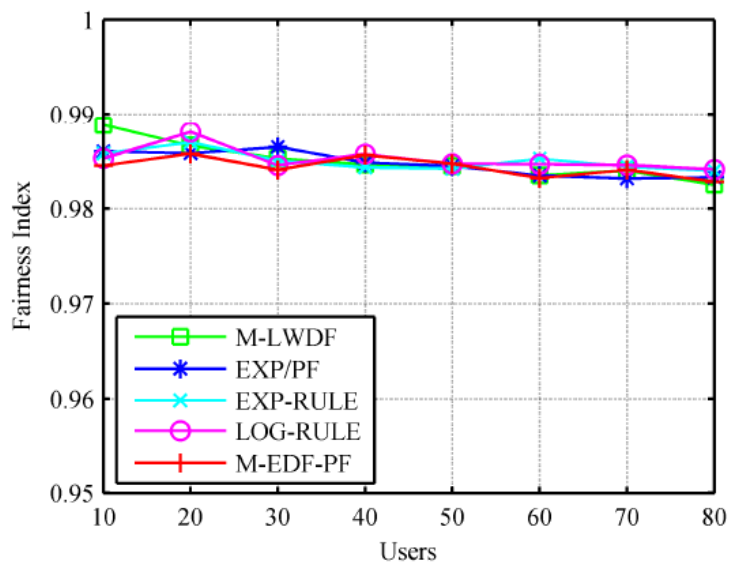


Fig. 4.7: Indice di fairness per i flussi VoIP

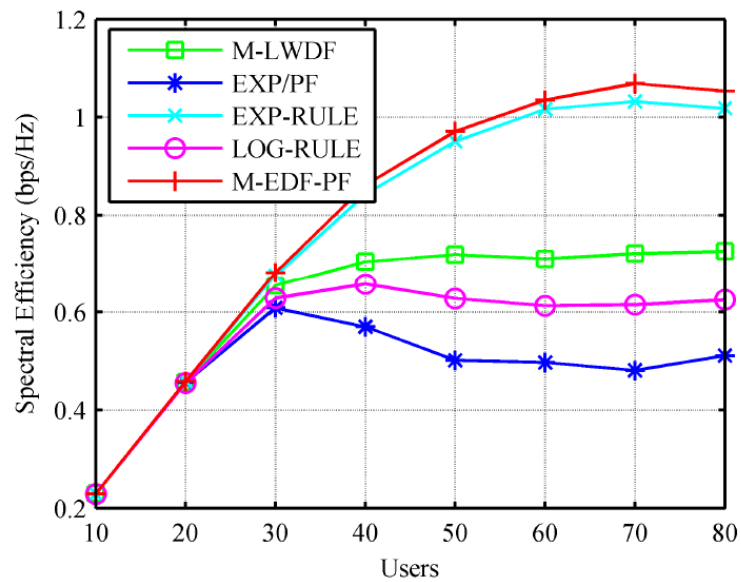
### 4.2.1 Considerazioni generali

Con queste simulazioni sono stati ottenuti risultati simili per M-EDF-PF e EXP-RULE ed entrambi ottengono prestazioni migliori rispetto agli altri al-



goritmi. Tuttavia EXP-RULE presenta un'elevata complessità specialmente quando la cella è impegnata a soddisfare un alto carico di servizi. L'algoritmo M-EDF-PF, proposto in [22] è più semplice in quanto può essere implementato con una complessità minore.

Complessivamente si può osservare che i migliori risultati in termini di throughput sono stati raggiunti con l'algoritmo Maximum Throughput che non ha nessuna pretesa di equità in quanto alloca le risorse sempre agli utenti che manifestano le migliori condizioni di canale. Per quanto riguarda la fairness invece sono state proposte molte soluzioni che mantengono sempre un certo livello di equità anche al crescere del numero di utenti: tuttavia questo avviene sempre a discapito delle prestazioni del sistema.



**Fig. 4.8:** Efficienza spettrale complessiva della cella



# Capitolo 5

## Conclusioni e sviluppi futuri

In questa tesi, dopo un resoconto sull'evoluzione tecnologica della telefonia mobile, è stata presentata la tecnologia LTE con la sua architettura (access network e core network) e le sue caratteristiche principali. È stata poi illustrata la modulazione OFDM (relativa allo schema di accesso OFDMA) che è il cuore della trasmissione in downlink: è robusta alla dispersione nel tempo sul canale radio e semplifica il lavoro di processazione dati al ricevitore riducendo in conseguenza i costi al terminale e il consumo di potenza [6]. In seguito sono state illustrate le procedure di RRM fondamentali per la distribuzione delle risorse. Il compito più importante del RRM è svolto dal packet scheduler che distribuisce le risorse radio agli utenti in modo efficiente. A tal proposito si manifestano diversi obiettivi, quali la massimizzazione del throughput o della fairness, a seconda delle applicazioni e dei servizi che devono essere forniti dalla rete. Per applicazioni *real time* come video streaming, VoIP ed altre relative all'accesso Internet, si è dimostrata necessaria la conoscenza del canale tramite segnali di feedback oltre che il soddisfacimento dell'opportuna QoS che impone siano soddisfatti nella trasmissione determinati requisiti (come ritardo e perdita dei pacchetti). Dal punto di vista dell'efficienza spettrale, la soluzione migliore è allocare ciascun RB all'utente che manifesta le migliori condizioni di canale: qualunque altro obiettivo come fairness, riduzione della complessità computazionale, maggior copertura cellulare o soddisfacimento della QoS può essere raggiunto solo a discapito

dell'efficienza spettrale. In questo senso il design di un buon algoritmo di schedulazione deve trovare un buon trade off tra i requisiti a seconda dello scopo che l'operatore di rete vuole raggiungere, oltre a mantenere dei bassi costi computazionali.

## 5.1 Sviluppi futuri

Lo studio delle tecniche di scheduling segue lo sviluppo delle tecnologie di telefonia mobile. Nonostante LTE superi già le prestazioni dei sistemi 3G, il 3GPP ha introdotto la rete *LTE-Advanced* nella *Release 10* per far fronte alle richieste di servizi sempre più performanti. LTE-A offre un throughput e un'efficienza spettrale maggiori introducendo la *Carrier Aggregation* (CA) e tecniche multi-antenna di ordine superiore (Multi-user MIMO) [13]. Inoltre nell'LTE-A possono essere adottate tecniche di condivisione delle risorse [12, 5]; ad esempio, può essere raggiunto un throughput maggiore per gli utenti a bordo cella tramite la Coordinated Multi-Point Trasmission (CoMP) [16], cioè la coordinazione delle trasmissioni in downlink originate da più stazioni base. Gli utenti a bordo cella non solo sperimentano prestazioni inferiori in conseguenza alla distanza dalla BS, ma soffrono anche di alti livelli di interferenza inter-cella. In questo caso il processo di allocazione delle risorse necessita la sincronizzazione e coordinazione tra gli eNodeBs che possono condividere i RB inutilizzati [11]. L'introduzione della tecnica CoMP permette quindi la definizione di nuove strategie di allocazione basandosi su un promettente approccio distribuito in termini sia di raccolta delle informazioni sia di coordinazione per le decisioni riguardo la distribuzione delle risorse. Un'altra area attiva di ricerca è quella che riguarda l'implementazione di algoritmi distribuiti con una bassa complessità computazionale in modo da massimizzare il throughput della rete e limitare il consumo di potenza [25].

# Bibliografia

- [1] The 3GPP website. Available online: <http://www.3gpp.org>.
- [2] UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture Evolution (SAE), April 2006. [www.3gpp.org](http://www.3gpp.org).
- [3] ETSI TR 125 913. Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN). Technical report, 3GPP, 2009.
- [4] Salman A. AlQahtani and Mohammed Alhassany. Comparing Different LTE Scheduling Schemes. In *Proc. Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International*, pages 264–269, July 2013.
- [5] L. Anchora, M. Mezzavilla, L. Badia, and M. Zorzi. Simulation models for the performance evaluation of spectrum sharing techniques in OFDMA networks. In *Proc. MSWiM 2011*.
- [6] David Astély, Erik Dahlman, Anders Furuskär, Ylva Jading, Magnus Lindström, and Stefan Parkvall. LTE: The Evolution of Mobile Broadband. *IEEE Communications Magazine*, 47(4):44–50, April 2009.
- [7] Leonardo Badia, Marco Levorato, and Michele Zorzi. Markov Analysis of Selective Repeat Type II Hybrid ARQ Using Block Codes. *IEEE Transactions on Communications*, 56(9):1434–1441, September 2008.
- [8] R. Basukala, H.A. Mohd Ramli, and K. Sandrasegaran. Performance Analysis of EXP/PF and M-LWDF in Downlink 3GPP LTE System .

- In *Proc. First Asian Himalayas International Conference on Internet*, pages 1–5, 2009.
- [9] Kian Chung Beh, S. Armour, and A. Doufexi. Joint Time-Frequency Domain Proportional Fair Scheduler with HARQ for 3GPP LTE Systems. In *Proc. Vehicular Technology Conference (VTC) Fall*, September 2008.
- [10] Nevio Benvenuto and Michele Zorzi. *Principles of Communications Networks and Systems*. John Wiley & Sons Inc, 2011.
- [11] Giovanni Capozzi, Giuseppe Piro, Luigi Alfredo Grieco, Gennaro Boggia, and Pietro Camarda. Downlink Packet Scheduling in LTE Cellular Networks: Key Design Issues and a Survey. *IEEE Communications Survey & Tutorials*, 15(2):678–700, 2013.
- [12] T. Fahldieck E.A. Jorswieck, L. Badia. Resource Sharing in Wireless Networks: The SAPHYRE Approach. In *Future Network and Mobile Summit 2010*, pages 1–8, June 2010.
- [13] Ayman Elnashar and Mohamed A.El-Saidny. Looking at LTE in practice. *IEEE Vehicular Tecnology Magazine (VTC) Fall*, 8(3):81–92, September 2013.
- [14] E.L. Hahne. Round-robin scheduling for max-min fairness in data networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 9(7):1024–1039, September 1991.
- [15] Jong-Hun Rhee Jack M. Holtzman and Dong-Ku Kim. Scheduling of real/non-real time services: adaptive EXP/PF algorithm. In *Proc. Vehicular Technology Conference (VTC) Spring*, volume 1, pages 462–466, 2003.
- [16] R. Irmer, H. Droste, P. Marsch, M. Grieger, G. Fettweis, S.Brueck, H.-P. Mayer, L. Thiele, and V. Jungnickel. Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results. *Communications Magazine, IEEE*, 49(2):102–111, February 2011.

- [17] R. Jain, D. Chiu, and W. Hawe. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. Technical Report TR-301, DEC, September 1984. <http://www1.cse.wustl.edu/~jain/papers/>.
- [18] P. Kela, J. Puttonen, N. Kolehmainen, T. Ristaniemi, T. Henttonen, and M. Moisiö. Dynamic packet scheduling performance in UTRA Long Term Evolution downlink. In *Proc. Wireless Pervasive Computing, ISWPC*, pages 308–313, May 2008.
- [19] Anna Larmo, Magnus Lindström, Michael Meyer, Ghyslain Pelletier, Johan Torsner, and Henning Wiemann. The LTE Link-Layer Design. *IEEE Communications Magazine*, 47(4):52–59, April 2009.
- [20] Hang Li, Qinghua Guo, Licai Fang, and Defeng Huang. Fairness and capacity analysis of opportunistic feedback protocol with proportional fair or maximum throughput scheduling. In *Proc. Wireless Communications & Signal Processing, WCSP*, pages 1–5, October 2012.
- [21] Qinghua Li, Guangjie Li, Wookbong Lee, Moon il Lee, D. Mazzaresè, B. Clerckx, and Zexian Li. MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview. *IEEE Communications Magazine*, 48(5):86–92, May 2010.
- [22] Bin Liu, Hui Tian, and Lingling Xu. An efficient downlink packet scheduling algorithm for real time traffics in LTE systems. In *Proc. Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013 IEEE*, pages 364–369, January 2013.
- [23] Richard van Nee and Ramjee Prasad. *OFDM for Wireless Multimedia Communications*. Artech House, Inc., Norwood, MA, USA, 1st edition, 2000.
- [24] J.E. Padgett, C.G. Gunther, and T. Hattori. Overview of wireless personal communications. *IEEE Communications Magazine*, 33(1):28–41, January 1995.

- [25] Guanhong Pei and V.S. Anil Kumar. Low-complexity Scheduling for Wireless Networks. In *Proc. MobiHoc 2012*, June 2012.
- [26] L.G. Roberts. The evolution of packet switching. In *Proceedings of the IEEE*, volume 66, pages 1307–1313, November 1978.
- [27] Bilal Sadiq, Ritesh Madan, and Ashwin Sampath. Downlink Scheduling for Multiclass Traffic in LTE. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, November 2009.
- [28] Stefan Schwarz, Christian Mehlführer, and Markus Rupp. Throughput Maximizing Multiuser Scheduling with Adjustable Fairness. In *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 2011.
- [29] Stefania Sesia, Issam Toufik, and Matthew Baker. *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons Inc, second edition, 2011.
- [30] Alma Skopljak-Ramović and Senad Pivač. The Challenge of Implementation of Long Term Evolution / System Architecture Evolution (LTE/SAE). In *Proc. MELECON 2010 - 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, pages 1241–1246.
- [31] S.S.Prasad, C.K.Shukla, and Raad Farhood Chisab. Performance Analysis of OFDMA in LTE. In *Proc. International Conference on Computing Communication & Networking Technologies (ICCCNT)*, July 2012.
- [32] Jim Zyren. Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer, July 2007. Freescale Semiconductor.