

**Università degli studi di Roma
“La Sapienza”
Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni**



**Trasmissioni OFDM-CDMA e OFDM-TDMA con
applicazione alle Wireless-LANs**

Relatori
Prof.ssa Maria Gabriella Di Benedetto
Prof. Gennaro Fedele

Laureando
Andrea Vitali

Matricola: 09099128

Correlatore
Ing. Guerino Giancola

Anno Accademico 2000/2001

INDICE

PREFAZIONE..... pag. I

INTRODUZIONE..... “ II

Progetto PRIN 2000..... “ II

Struttura del lavoro..... “ III

CAPITOLO 1

WIRELESS-LOCAL AREA NETWORKS..... “ 1

1.1: Wireless-Local Area Networks..... “ 1

1.1.1: Attuali applicazioni delle reti Wireless..... “ 2

1.1.2: Come funziona una rete Wireless..... “ 3

1.2: Standard esistenti..... “ 6

1.2.1: Lo standard HiperLAN II..... “ 6

1.2.2: Lo standard IEEE 802.11..... “ 12

CAPITOLO 2

MODULAZIONE E TECNICHE DI ACCESSO MULTIPLO AL MEZZO

2.1: O.F.D.M..... “ 18

2.2: Strategie di accesso multiplo.....	“ 22
2.2.1: F.D.M.A.....	“ 22
2.2.2: T.D.M.A.....	“ 23
2.2.3: C.D.M.A.....	“ 24
2.3: Combinazione della modulazione OFDM con le varie tecniche di accesso multiplo.....	“ 26
2.3.1: OFDM-TDMA.....	“ 27
2.3.2: OFDM-FDMA.....	“ 28
2.3.3: OFDM-CDMA.....	“ 29
2.3.4: OFDM combinato con strategie di accesso multiplo: confronti, vantaggi e svantaggi.....	“ 31
2.4: Nuovi Sistemi: A.M.O.U.R.....	“ 36

CAPITOLO 3

STRUTTURA GENERALE DEL SISTEMA..... “ 38

3.1: Descrizione del sistema.....	“ 38
3.1.1: Classi di traffico.....	“ 41
3.1.1.1: La classe di traffico “Guaranteed Bandwidth”.....	“ 43
3.1.1.2: La classe di traffico “Best Effort”.....	“ 45
3.2: Architettura protocollare.....	“ 47
3.2.1: Strato di Rete e strato di Adattamento.....	“ 47
3.2.1.1: Caratterizzazione delle sorgenti di traffico.....	“ 50
3.2.2: Strato di controllo di accesso al mezzo: MAC.....	“ 54
3.2.2.1: Riservazione e allocazione della risorsa.....	“ 56
3.2.2.2: Allocazione delle risorse tramite conoscenza	

perfetta della sorgente.....	“ 57
3.2.2.3: Allocazione delle risorse tramite modello DLB	
della sorgente.....	“ 59
3.2.3: Strato Fisico.....	“ 64

CAPITOLO 4

LO STRATO M.A.C.: MEDIUM ACCESS CONTROL..... “ 67

4.1: Obiettivi dello strato MAC.....	“ 67
4.2: Dimensionamento delle unità informative e controllo centralizzato.....	“ 69
4.3: Canali logici e strutture e strutture utilizzate.....	“ 74
4.4: Assegnazione delle risorse: Algoritmo di scheduling.....	“ 79
4.4.1: Accettazione di chiamata a strato MAC per classe GB.....	“ 81

CAPITOLO 5

PROBLEMATICHE CONNESSE ALL'UTILIZZO DI UN SISTEMA ASIMMETRICO..... “ 86

5.1: Necessità di utilizzare un sistema asimmetrico.....	“ 86
5.2: Inserimento delle sorgenti indotte e verifica sulla banda.....	“ 90
5.3: Tempi e gestione delle trame temporali.....	“ 92
5.4: FDD e TDD.....	“ 94
5.5: Confronto tra le tecniche di accesso adottate nei due versi.....	“ 94

CAPITOLO 6

SIMULATORE

6.1: Realizzazione del simulatore per il DOWNLINK.....	“ 96
6.2: Realizzazione del simulatore per l'UPLINK.....	“ 106
6.3: Simulatore completo UPLINK-DOWNLINK.....	“ 109
6.3.1: Strategie di scheduling nella versione “1.0 UL_DL_FDD”.....	“ 111
6.3.2: Gestione degli “strem” nei due versi.....	“ 112
6.3.3: Dimensionamento dello sfasamento fra le trame nelle due tratte in un sistema FDD.....	“ 113

CAPITOLO 7

SIMULAZIONI E RISULTATI..... “ 117

7.1: Prima simulazione.....	“ 118
7.2: Seconda simulazione.....	” 125
7.3: Terza simulazione.....	“ 130
7.4: Confronti sulla banda occupata.....	” 136

CONCLUSIONI..... “ 139

APPENDICE A

GUIDA ALL'USO DEL SIMULATORE..... “ 141

APPENDICE B

PROGRAMMA VERSIONE “1.0 UL_DL:FDD”..... “ 143

BIBLIOGRAFIA..... “ 184

PREFAZIONE

Il presente tema di ricerca ha come obiettivo quello di completare la descrizione ed il funzionamento di uno strato MAC a partire dalla preesistente definizione di un protocollo implementante la sola tratta in downlink. In un primo momento è stato quindi necessario definire un protocollo che potesse descrivere ed implementare il funzionamento dello strato MAC nella sola tratta di uplink, per poi integrare opportunamente i due e simulare così una trasmissione completa .

La principale difficoltà di integrazione è stata determinata dal necessario utilizzo di una struttura asimmetrica: mentre infatti per la tratta downlink è stata considerata la tecnica di accesso al mezzo MC-CDMA (Multi Carrier-Code Division Multiple Access), per la tratta uplink si è dovuto ricorrere alla tecnica TDMA (Time Division Multiple Access). Tale scelta è dovuta al fatto che l'utilizzo della tecnica CDMA in uplink, e quindi l'applicazione della stessa su più e differenti canali, determina una perdita di efficienza ed una serie di problemi che verranno affrontati in seguito.

E' stato quindi necessario fare delle scelte sistemistiche in modo da avere una assoluta compatibilità con quelle già adottate per la definizione del downlink, tali da permettere il corretto trasporto dei dati, nonché l'esatta coordinazione tra le sorgenti presenti ai due capi.

INTRODUZIONE

PROGETTO P.R.I.N. 2000

Questo tema di ricerca rientra nel progetto P.R.I.N. 2000 (Progetto di Rilevante Importanza Nazionale) dal titolo “Sistemi OFDM con applicazione alle reti WLAN”, finanziato dal Ministero dell’Università per la Ricerca Scientifica e Tecnologica (M.U.R.S.T.).

Negli ultimi anni, il notevole aumento delle richieste riguardanti la disponibilità di sistemi di trasmissione radio (sistemi wireless) per ambienti interni ad elevato bit-rate, W-LAN, che permettano il collegamento di stazioni di lavoro fisse o portatili ai servizi di rete disponibili sui posti di lavoro. I dispositivi attualmente sul mercato per WLAN non soddisfano completamente le esigenze dell’utenza, poiché i bit-rate supportati si limitano al Mbit/s (intorno a 1.6 Mbit/s).

E’ in questo contesto che si è sviluppata l’idea del progetto ”Sistemi OFDM con applicazione alle reti WLAN”.

I principali obiettivi di questo progetto sono due:

- Valutare le prestazioni derivanti da determinati schemi di modulazione, protocolli di accesso alla rete, algoritmi di ricezione, protocolli per il trasporto di alcuni servizi IP a larga banda in modo da riuscire a garantire un utilizzo ottimo delle risorse disponibili
- Realizzare un dimostratore che consenta di vedere se le prestazioni teoriche sono confermate anche dalla pratica

Al fine di raggiungere tutti gli obiettivi, il progetto è stato suddiviso nei seguenti temi di ricerca:

TEMA 1: elaborazione numerica del segnale al trasmettitore;
TEMA 2: elaborazione numerica del segnale al ricevitore;
TEMA 3: TECNICHE DI ASSEGNAZIONE DELLA RISORSA RADIO;
TEMA 4: Piattaforma DSP per il dimostratore.

Il TEMA 3 mira alla definizione di un protocollo MAC, che garantisca un sistema di accesso alla risorsa radio efficiente per la fornitura di servizi IP classici e a qualità garantita in una W-LAN basata su OFDM-CDMA. In particolare questa tesi mira all'utilizzo non solo dell'OFDM-CDMA, ma anche a quello dell'OFDM-TDMA; il primo metodo di accesso multiplo è riservato al DOWNLINK, mentre il secondo viene utilizzato in UPLINK.

Il perché ed il come vengono gestite entrambe le tecniche, verrà spiegato lungamente nel corso del lavoro.

STRUTTURA DEL LAVORO

Passiamo alla strutturazione della presente tesi accennando agli argomenti trattati nei diversi capitoli:

Nel CAPITOLO 1 si dà un'idea di cosa sia una rete wireless nelle sue diverse configurazioni e si illustrano gli standard attualmente presi in considerazione, ETSI HiperLAN II e IEEE 802.11.

Nel CAPITOLO 2 viene spiegata la modulazione a divisione di frequenze ortogonali e la sua combinazione con le varie tecniche di accesso multiplo al mezzo. Vengono forniti cenni ad un emergente sistema di modulazione: AMOUR.

Il CAPITOLO 3 descrive il sistema e lo scenario considerato e dà uno sguardo all'intera pila protocollare e agli strati con i quali si interfaccia il MAC.

Lo strato di interesse, il Medium Access Control, viene descritto in maniera approfondita e studiato nel CAPITOLO 4.

Il CAPITOLO 5 spiega le necessità dell'utilizzo di un sistema asimmetrico e affronta le problematiche a cui si va incontro.

La presentazione del simulatore fatto in questo tema di ricerca, e di quelli precedenti su cui si basa, sono descritti nel CAPITOLO 6.

Nel CAPITOLO 7, invece, vengono descritti gli ambienti di simulazione considerati e successivamente confrontati i risultati da cui si possono dedurre le relative conclusioni.

Infine abbiamo due appendici, la prima è una guida all'utilizzo del simulatore, la seconda è il simulatore stesso realizzato in linguaggio C (C++).

CAPITOLO 1

WIRELESS LOCAL AREA NETWORKS

1.1: WIRELESS-LOCAL AREA NETWORKS

Una wireless local area network (W-LAN) è un sistema di comunicazione dati che può essere visto come un'estensione della rete fissa (wired-LAN) all'interno di un edificio o in ambiente "campus"; questo fatto implica il notevole vantaggio di non dover sostenere costi aggiuntivi dovuti al cablaggio della rete. Si ha a che fare, insomma, con una rete locale che permettere di far circolare dati senza utilizzare il comune "filo"(wire), bensì utilizzando onde radio.

Se la mobilità delle stazioni all'interno di un edificio è molto limitata si parla di ambiente "*in building tethered*", liddove invece si possono sfruttare al meglio le potenzialità di una W-LAN e quindi all'interno di quegli edifici dove gli utenti si spostano liberamente e di continuo, si parla di ambiente "*in building non tethered*". Nel caso, infine, in cui la rete wireless ha il compito di gestire più edifici adiacenti, situati all'interno di un'area limitata, allora stiamo parlando di "*ambiente campus*".

Le principali caratteristiche di una rete wireless sono:

- **Mobilità:** gli utenti di una rete wireless possono ricevere e trasmettere dati in tempo reale ovunque all'interno della zona coperta. Questo determina opportunità di servizi ed un supporto alla produttività notevoli, non paragonabili con quelli permessi da una rete fissa.
- **Semplicità e velocità di installazione:** è notevolmente semplice installare una W-LAN risparmiando, fra l'altro, sul cablaggio.
- **Flessibilità:** La tecnologia wireless permettere alla rete di arrivare dove la tradizionale tecnologia wired non può.

- **Costi ridotti:** Oltre al risparmio dovuto all'eliminazione del cablaggio, la sempre più crescente diffusione di tali reti ha permesso una riduzione dei costi dei prodotti.
- **Scalabilità:** I sistemi wireless possono essere configurati in una varietà di topologie in modo da venire incontro alle necessità di specifiche applicazioni ed installazioni. Le configurazioni sono facilmente modificabili dipendentemente dal numero degli utenti.

A fronte di questi vantaggi, ci sono alcuni problemi, in particolare:

- Non esiste uno standard accettato a livello globale.
- Libero uso delle banda, senza licenza, ISM (Industrial, Scientific and Medic) che potrebbe determinare problemi di interferenza.

1.1.1: Attuali applicazioni delle reti wireless

Le reti wireless sono attualmente lo strumento più agile e snello per gestire il cosiddetto collegamento *“dell'ultimo miglio”* (last mile) e permette l'interfacciamento tra la tradizionale infrastruttura di rete fissa, PSTN (Public Switched Telephone Network) e gli utenti mobili *“in building”* o in ambiente *“campus”*.

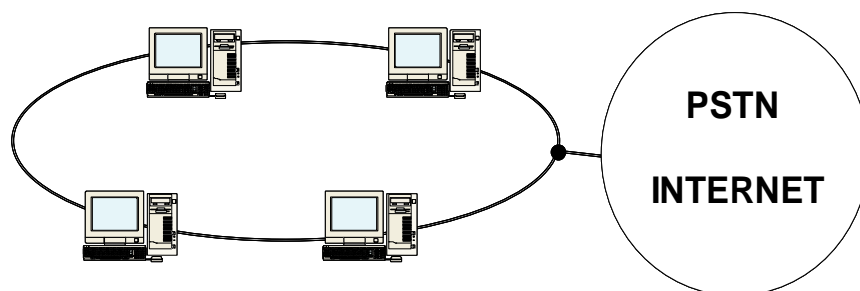


Figura 1.1: Interfacciamento di una W-LAN

Le principali applicazioni di una W-LAN sono:

- In ambito ospedaliero, il personale può cooperare in maniera più efficiente scambiandosi informazioni in tempo reale grazie all'utilizzo di calcolatori palmari collegati fra loro .

- Il personale di aziende e di strutture pubbliche o private può accedere ai database di ogni genere in ogni momento così da accrescere notevolmente il rendimento.
- All'interno delle attività commerciali, lo scambio di informazioni, attraverso dispositivi portatili, tra il personale lavorativo ed il database centrale velocizza, e quindi aumenta la produttività.
- Nelle aziende, gli amministratori di rete minimizzano l'overhead dovuto agli spostamenti e gestiscono facilmente e velocemente le reti evitando la creazione di strutture costose.

In conclusione, lo scambio "real time" di informazioni tra i vari utenti di una wireless LAN, all'interno di una qualsiasi struttura di lavoro, determina un aumento dell'efficienza e della produttività degli stessi guadagnando, fra l'altro, sui costi di gestione e realizzazione.

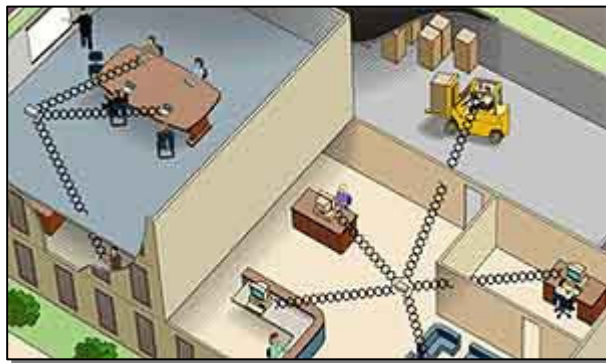


Figura 1.2: Esempio di W-LAN in ambiente aziendale

1.1.2: Come funziona una rete wireless

Un sistema radio a banda stretta trasmette e riceve informazioni ad una certa frequenza radio. Il segnale viene così concentrato nell'intorno di una certa frequenza ed indesiderati crosstalk tra i vari canali di comunicazione vengono evitati coordinando i diversi utenti con differenti frequenze. Una W-LAN utilizza

quindi onde elettromagnetiche (radio o infrarossi) per trasportate informazioni da un punto ad un altro senza il supporto di una connessione fisica.

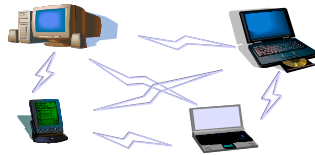


Figura 1.3: Terminali connessi senza supporto fisico

I dati vengono modulati su portanti radio così da poter essere estratti in maniera corretta. L'utilizzo di diverse portanti permette il simultaneo utilizzo della rete da parte di più utenti e l'accurata sintonizzazione, lato ricezione, elimina il problema dell'interferenza.

Si possono avere due configurazioni di reti wireless:

La più semplice configurazione WLAN è quella detta “*peer to peer*” (o “*ad hoc*”, come si può vedere in figura 1.4) e consiste in una WLAN indipendente che connette un insieme di PCs con adattatori wireless. In qualsiasi momento due o più adattatori wireless si trovano all'interno del range di ogni altro e possono organizzare una rete indipendente. Queste reti tipicamente non richiedono nessuna amministrazione o configurazione. Ciascun utente avrà accesso solamente alle risorse di un altro utente e non anche ad un sistema centrale. Le stazioni, quindi, comunicano direttamente l'una con l'altra e non è necessaria l'installazione di alcuna infrastruttura. Unico svantaggio di tale configurazione l'area di copertura limitata.

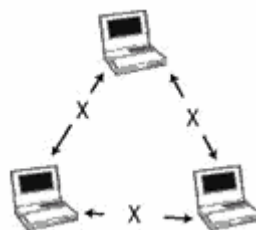


Figura 1.4: WLAN indipendente o “ad hoc” (peer to peer)

Un'altra possibile configurazione di rete wireless è costituita da un ricetrasmittitore, tecnicamente chiamato *Access Point* (AP), connesso alla rete cablata, che gioca il ruolo, come dice lo stesso nome, di punto di accesso alla rete fissa da parte di quella senza fili.

Nelle WLAN “*ad infrastruttura*” (un esempio è riportato in figura 1.5), più access points collegano la WLAN alla rete wired e permettono agli utenti di condividere efficientemente le risorse di rete. Gli access points non solo provvedono alla comunicazione con la rete wired ma mediano anche il traffico della rete wireless nelle immediate vicinanze. Più access points possono provvedere coperture di aree per un intero edificio o campus.

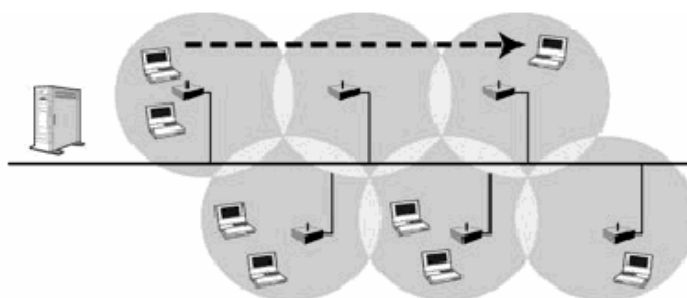


Figura 1.5: W-LAN ad infrastruttura

A causa della limitata potenza dei segnali trasmessi, il raggio di cella, cioè della zona coperta da un access point, è notevolmente limitato, e, così come accade per la telefonia mobile, le celle o, per utilizzare il termine più adatto parlando di W-LAN, le microcelle, si sovrappongono in modo da poter garantire una certa continuità della comunicazione ed evitare problemi dovuti ad un hand-off poco fluido.

I principali standard attualmente in uso ed in via di sviluppo per la gestione di una rete wireless sono l'IEEE 802.11 a/b e HIPERLAN 2.

1.2: STANDARD ESISTENTI

Diversi standard stanno emergendo al fine di implementare ed ottenere wireless-LAN ad alta velocità: ETSI HiperLAN II, la famiglia dell'IEEE 802.11, il Bluetooth e l'HomeRF.

I principali competitori in questo campo sono l'europeo HiperLAN II (High Performance Radio LAN) e il nordamericano 802.11, ma esistono anche altri standard minori ai quali è opportuno fare un accenno:

- Il **Bluetooth** è uno standard industriale concepito da Ericsson, è caratterizzato da un raggio di copertura molto limitato, dell'ordine della decina di metri, e da un segnale emesso a bassa potenza. Lavora nell'intorno di 2.4 GHz ad una velocità di 1 Mbps se parliamo della versione 1.0, di 2 Mbps nel caso della versione 2.0.
- L'**HomeRF** è uno standard sul quale stanno lavorando molteplici società, quali la Motorola, la Siemens, la Compaq ed altre, sulla scia dell'attuale sempre più crescente interesse sulla "domotica". È stato progettato per le applicazioni in ambiente domestico come ad esempio connettere i computer portatili fra loro, i telefoni cordless, gli elettrodomestici, in modo da poterne gestire il funzionamento a distanza, e così via. HomeRf include due standard in particolare: l'802.11/b per i dati e il Dect per la voce. Anch'esso lavora ad una frequenza di 2.4 GHz con un bit rate di 1.6 Mbps se consideriamo la versione 1.0, di 10 Mbps per la 2.0.

1.2.1: Lo standard HiperLAN II

HiperLAN II è il frutto del progetto BRAN (Broadband Radio Access Network) portato avanti dall'ETSI (European Telecommunications Standards Institute) [1]. In realtà si tratta di una famiglia di standards che comprende: HiperLAN I/II, HiperLink progettato per i backbone radio all'interno degli edifici, HiperAccess progettato per l'uso fisso all'esterno in modo da fornire accesso ad una struttura

cablata. L'architettura HiperLAN2 mette a disposizione connessioni con vari tipi di infrastrutture di rete, tra cui Ethernet, IP, ATM, PPP, con una QoS garantita. Viene utilizzata una banda di 5 GHz ad una velocità che va dai 5 ai 54 Mbps. Il range di azione è di 30 metri in ambienti indoor e di 150 in quelli outdoor, con una mobilità media. La prima versione di HiperLAN, identificata dall'indice I, era caratterizzata anch'essa da una banda di 5 GHz, ma aveva una velocità fissa a 23.5 Mbps ed una bassa mobilità, e questo la rendeva applicabile più che altro in ambienti indoor. [2]

HiperLAN II definisce i seguenti livelli ISO/OSI:

- Convergence Layer (CL), che permette di adattare la rete al DLC.
- Data Link Control (DLC). [3],[4],[5],[6]
- Physical Layer (PL), adibito al trasporto dei dati. [7]

Sono considerate le due tipologie di rete:

- “Ad Infrastruttura”: Si ha un certo numero di Access Points, ognuno dei quali copre una certa area e serve i vari Radio Terminals (RT).
- “Ad Hoc”: Non esistono AP ed i vari RT comunicano direttamente fra loro.

Lo standard è “*Connection Oriented*” : La trasmissione dei dati avviene una volta stabilita la connessione tra RT ed AP e le connessioni sono multiplaxate a divisione di tempo (TDM). La tecnica di modulazione adottata è l'OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) ed è proprio questo che permette di arrivare ad una velocità di 25 Mbps al livello 3. Ad ogni connessione può essere assegnata una certa QoS (Quality of Service) in termini di larghezza di banda, ritardi, jitter, bit error rate (BER) e così via. Una caratteristica fondamentale di HiperLAN II è l'*allocazione automatica di frequenza* : l'Access Point ha un sistema “built-in” per la selezione automatica del canale radio più appropriato sulla base delle risorse disponibili e della QoS contrattata. Per quanto riguarda la sicurezza e la protezione delle informazioni trasmesse, HiperLAN II supporta prima l'“*authentication*”, poi l'“*encryption*”: in un primo momento si richiede l'autorizzazione all'accesso alla rete, in un secondo momento, dopo essere stati identificati, si ha la protezione del messaggio. Altra grande nota di merito nei confronti di questo standard è la

“*mobilità*”: durante la comunicazione, un RT potrebbe “accorgersi” che un altro AP fornisce un rapporto segnale rumore (S/N) migliore, ordina un hand-over e sposta la connessione sul nuovo AP, rischiando, però, di perdere dei pacchetti. Sul fronte del risparmio energetico dei dispositivi, HiperLAN II prevede anche la negoziazione di un “sleep-period” prima di ricevere un segnale di “wake-up”.

Osserviamo più da vicino gli strati sui quali lavora HiperLAN II:

1) Strato Fisico:

- La trasmissione è “a burst”, costituiti da un preambolo e da una parte utile.
- Modulazione OFDM.
- 52 sottoportanti: 48 per i dati e 4 pilota per permettere una demodulazione coerente.
- Canali spazati di 20 MHz con un intervallo di guardia di 800 ns, con un aggiunta di 400 ns nei piccoli ambienti.
- Le bande utilizzate sono 2: 5150-5350 MHz (8 canali), 5470-5725 MHz (12 canali).

2) Strato DLC: Consta di 3 sottostrati:

2.1) Sottostrato MAC (Medium Access Control): E' il protocollo usato per l'accesso al collegamento radio. Il controllo è centralizzato nell'AP che comunica ai vari RT in che momento possono trasmettere i loro dati. L'interfaccia aerea sfrutta il Time Division Duplexing (TDD) per gestire le comunicazioni nei due versi, “uplink” e “downlink”, e il Time Division Multiple Access (TDMA) per permettere a più utenti di accedere alla risorsa condivisa.

I canali di trasporto sono:

- Broadcast Channel (BCH): Usato in downlink e contiene le informazioni di controllo spedite nel “mac-frame”.
- Frame Control Channel (FCH): Contiene una informazione esatta di come sono state usate le risorse.
- Access Feedback Channel (ACH): Contiene le informazione sui precedentitativi di accesso.

- Random Access Channel (RACH): Viene usato dai RT per richiedere risorse per il *downlink-phase* ed *uplink-phase* nel mac-frame successivo.

Il “downlink-phase” e l’“uplink-phase” sono treni di PDU di utente (U-PDU) e di controllo (C-PDU). Il primo pacchetto è costituito da 54 ottetti e viene indicato come “Long-Transport-Channel” (LCH), il secondo è lo “Short-Transport-Channel” (SCH).

I canali logici sono:

- Slow Broadcast Channel (SBCH): Trasporta informazioni di controllo nel downlink e solamente se necessario.
- Dedicated Control Channel (DCCH): Trasporta segnali del sottostrato RLC una volta stabilita la connessione e quindi dopo che il RT ha ottenuto il proprio identificatore (MAC-ID).
- User Data Channel (UDCH): Trasporta DLC-PDU per il Convergence Layer (CL).
- Link Control Channel (LCCH): Trasporta informazioni sul controllo d’errore.
- Association Control Channel (ASCH): Trasporta messaggi di richiesta di nuova associazione.

L’associazione tra canali logici e di trasporto non prescinde dal verso della comunicazione, abbiamo due configurazioni differenti a seconda se parliamo di “uplink” o “downlink” (fig. 1.6 e 1.7).

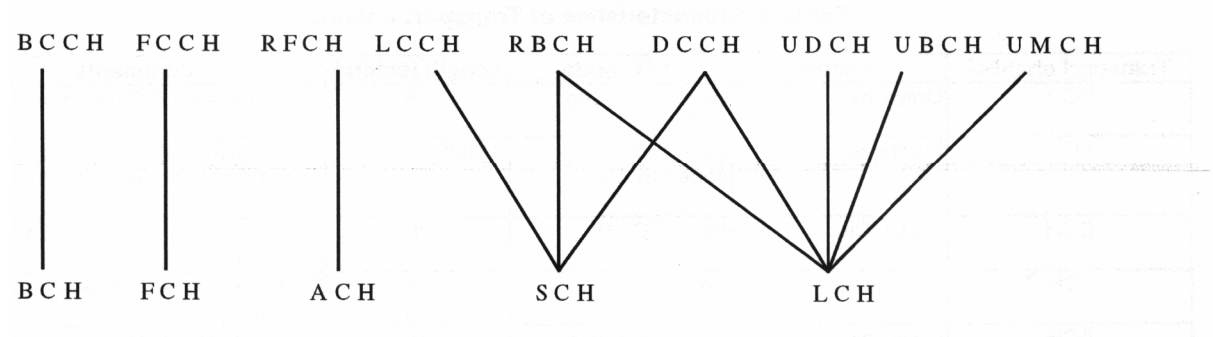


Figura 1.6: Associazione dei canali in DOWNLINK

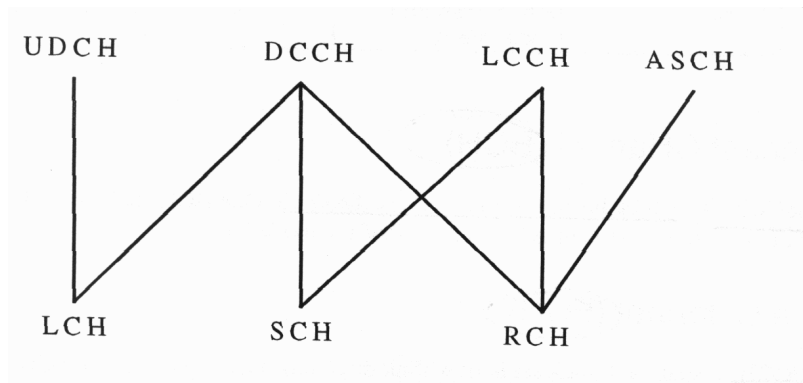


Figura 1.7: Associazione dei canali in UPLINK

Nel caso invece di collegamento diretto tra terminali, configurazione “ad hoc”, si ha un’altra associazione tra i canali (fig 1.8).

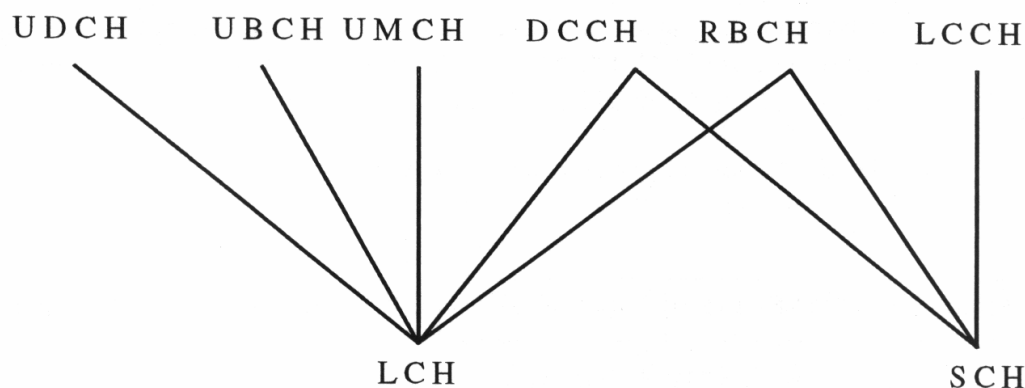


Figura 1.8: Associazione in DIRECT LINK

2.2) Sottostrato EC (Error Control): Viene preso in considerazione il “Selective Repeat ARQ”. Questa tecnica rivela bits errati e ne richiede la ritrasmissione, assicura inoltre la consegna in sequenza delle User-PDU al Convergence Layer. Dopo un certo numero di ritrasmissione andate male, il pacchetto viene scartato e perso. Gli strati superiori provvederanno all’eventuale recupero.

2.3) Sottostrato RLC (Radio Link Control): Fornisce un servizio di trasporto per le 3 entità di segnalazione:

- AFC: Si occupa dell’”associazione” e della “disassociazione”.
- DCC: Provvede al controllo di connessione per il canale DLC.

- RRC: Gestisce la risorsa radio.

3) Strato CL (Convergence Layer):Ha due funzioni da svolgere:

- Adattare le richieste degli strati superiori ai servizi offerti dal DLC (Data Link Control).
- Convertire i pacchetti degli strati superiori di dimensioni fisse o variabili in una dimensione fissa usata nel DLC.

Sono stati definiti 2 tipi di strato CL:

- “Cell based”: Usato per l’interconnessione con una rete ATM.
- “Packet based”: Usato in una varietà di configurazioni dipendenti dal tipo di rete fissa.

Per quanto riguarda lo “*scheduling*”, il mac-frame viene gestito secondo due algoritmi:

- Round Robin Esaustivo: Se ci sono risorse ancora disponibili nel mac-frame, viene servita una nuova connessione. Questo algoritmo è preferito per le “*best effort*”.
- Round Robin Non Esaustivo: Non vengono accettate nuove connessioni, ma le risorse disponibili vengono distribuite a chi è già connesso.

Come ultima cosa, è da segnalare che Hiperlan II supporta “antenne multi-lobo” (“multi-beam antennas”) al fine di aumentare il S/N del collegamento radio. Il protocollo MAC e la struttura della trama permettono di utilizzare antenne con 7 lobi.

Le applicazioni di tale standard riguardano l’accesso alla rete cellulare di terza generazione, UMTS (Universal Mobile Communications System), l’utilizzo in ambienti vasti se si adotta la tecnica CDMA (Code Division Multiple Access) per gestire l’accesso alla risorsa e, come già detto, l’utilizzo in piccoli ambienti (casa,ufficio...) per collegare vari terminali fra loro e installare così una rete locale “senza fili”,una W-LAN. [7]

1.2.2: Lo Standard IEEE 802.11

L'IEEE 802.11 è un gruppo di lavoro che si occupa della standardizzazione del livello MAC e del livello fisico delle reti locali wireless. Il gruppo di lavoro 802.11 si è prodigato nello sviluppo di uno standard globale per sistemi radio e reti operanti nella banda di frequenza "unlicensed" dei 2.4GHz con data-rates dell'ordine di 1 e 2Mbps. Lo standard non specifica tecnologie o implementazione ma semplicemente definisce le specifiche per gli strati fisico e MAC (Medium Access Control) per connessioni wireless per stazioni fisse, portatili ed in movimento all'interno di un'area locale (in building o campus) in grado di supportare velocità trasmissive multiple, scelte a seconda dello stato del mezzo e della capacità delle stazioni, e comunque superiori ad 1 Mb/s. Uno degli scopi principali di questo standard è che un singolo MAC possa supportare più livelli fisici, anche se questi fanno uso di tecnologie diverse. Il wireless MAC supporta sia servizi connectionless a velocità comprese tra 1 e 20 Mb/s, sia servizi di tipo isocrono (time bounded) per controllo di processi, voce e video.

Lo strato fisico in qualsiasi rete definisce le caratteristiche di modulazione e trasmissione delle informazioni. A livello di strato fisico sono state definiti due metodi di trasmissione a RF ed uno ad infrarossi.

Gli standards di trasmissione a RF sono:

- Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)
- Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)

Il metodo ad infrarossi opera nella banda base, mentre i due metodi a RF operano nella banda tra i 2.4GHz e i 2.483GHz.

I sistemi ad infrarossi utilizzano le stesse frequenze usate nelle fibre ottiche e sono denotati dalla caratteristica di "scoprire" solo l'ampiezza del segnale, in tal modo l'interferenza è notevolmente ridotta. Essendo sistemi non limitati in banda possono raggiungere velocità maggiori rispetto ad altri sistemi. La tecnologia IR era inizialmente molto popolare per il fatto di essere caratterizzata da elevati data rates e costi relativamente bassi. Lo svantaggio dei sistemi IR è quello che lo

spettro di trasmissione è condiviso con sole ed altre luci fluorescenti. Se c'è molta interferenza da altre sorgenti la LAN può diventare inutile. I sistemi IR richiedono una LOS (line of sight) libera da ostacoli e si deve anche ricordare che i segnali IR non sono in grado di penetrare oggetti opachi. Ciò vuol dire che oggetti come muri, divisori, cortine o anche nebbia possono ostruire il segnale. InfraLAN è un tipico esempio di WLAN che usa tecnologia ad infrarossi.

I sistemi a radio frequenza utilizzano la tecnologia Spread Spectrum Frequency Hopping e la Direct Sequence Spread Spectrum. A causa di valori di overhead più elevati rispetto ai sistemi IR, i data rates supportati sono inferiori.

Con la DSSS la trasmissione del segnale è allargata su tutta la banda permessa (per esempio 25MHz). Una sequenza binaria, il codice di spreading, è usata per modulare il segnale da trasmettere. I bit di informazione sono mappati in una struttura di "chips" a loro volta mappati in un bit a destinazione. Il numero di chips rappresentanti un bit è il cosiddetto rapporto di spreading. Maggiore è quest'ultimo valore, più il segnale risulterà resistente all'interferenza. Più basso è tale rapporto, maggiore sarà la quantità di banda disponibile all'utente. L'F.C.C. (Federal Communication Commission) ha imposto che il rapporto di spreading deve essere maggiore di 10, lo standard 802.11 ha imposto un valore pari ad 11. trasmettitore e ricevitore devono essere sincronizzati sul medesimo codice di spreading. Se vengono utilizzati codici di spreading ortogonali, allora più di una LAN può condividere la stessa banda.

La tecnica FHSS suddivide la banda in tanti piccoli sottocanali (1 MHz). Il segnale salta allora da un sottocanale all'altro per trasmettere piccoli burst di dati su ogni canale per un certo periodo di tempo, detto "*dwell time*". La sequenza di hopping deve essere sincronizzata al trasmettitore e al ricevitore altrimenti l'informazione è persa. L'FCC richiede che la banda sia suddivisa in almeno 75 sottocanali e che il "*dwell time*" non sia maggiore di 400ms. Il FHSS è meno sensibile all'interferenza poiché la frequenza viene continuamente "shiftata". Ciò rende i sistemi FHSS difficili da intercettare, garantendo un elevato grado di sicurezza. Non a caso tali sistemi vengono usati in ambito militare. Per disturbare un sistema di tale tipo è

necessario che tutta la banda sia bloccata. Molte LAN FHSS possono essere situate vicino se sono usate frequenze di hopping ortogonali. Poiché i sottocanali sono più piccoli di quelli dei sistemi DSSS, il numero di LAN collocate nella stessa area geografica può essere più grande con i sistemi FHSS.

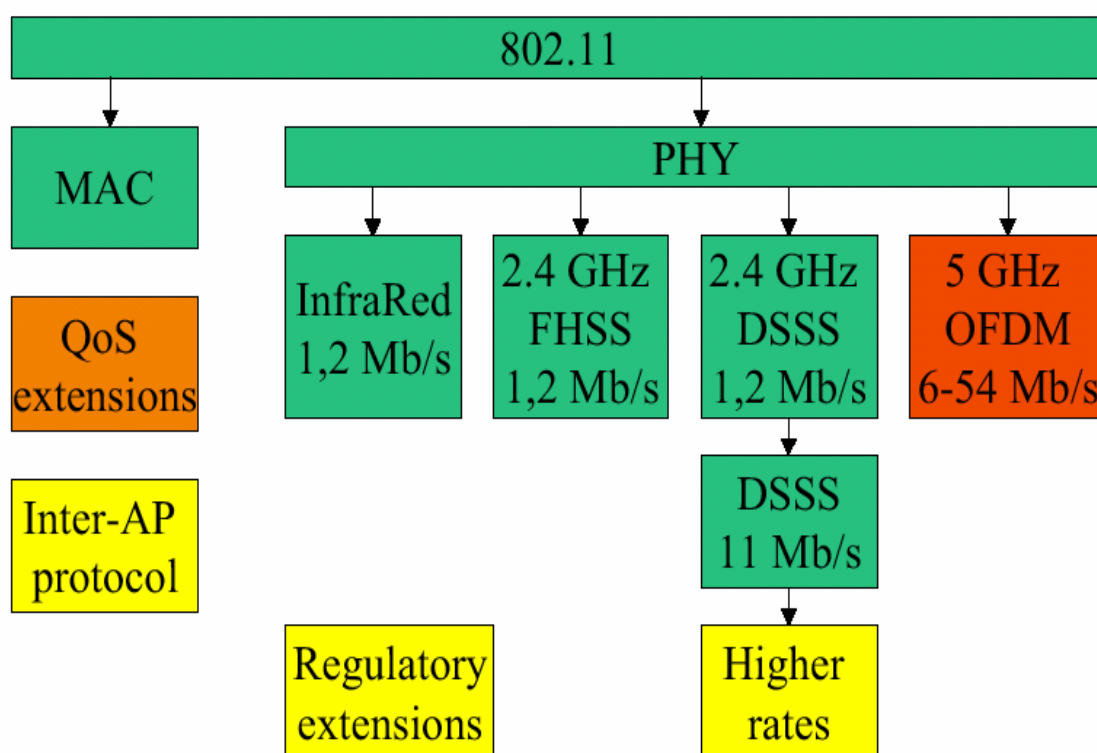


Figura 1.9: Struttura dello standard 802.11

Per quanto riguarda lo strato MAC, questo risulta essere caratterizzato da un insieme di protocolli responsabili dell'utilizzo intelligente del mezzo condiviso. Lo standard 802.11 specifica il protocollo CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). Esso è utilizzato per la trasmissione asincrona, e può essere affiancato da una funzione di coordinamento centralizzata (PCF - Point Coordination Function) con priorità superiore per i servizi tempo limitati. In questo protocollo, quando una stazione deve trasmettere un pacchetto, per prima cosa deve verificare che nessun'altra stazione stia trasmettendo, ascoltando il mezzo

(Carrier Sense). Se è riconosciuta la presenza di trasmissioni si mette in attesa. Quando il mezzo si libera attende che rimanga tale per un intervallo di tempo minimo (DIFS - Distributed InterFrame Space) e successivamente inizia una fase di contesa (Contention Window): la stazione sceglie un intervallo casuale (backoff) al termine del quale, se il mezzo è ancora libero, la stazione può trasmettere il pacchetto. Dal momento che la probabilità che due nodi scelgano lo stesso fattore di backoff è piccola, le collisioni tra pacchetti saranno minimizzate. L'intervallo di backoff è scelto tenendo conto di un parametro che oscilla tra un valore massimo ed uno minimo, raddoppiando ogni volta che si deve ripetere la trasmissione di un frame. In tal modo si allunga la finestra di contesa riducendo la probabilità di collisione nel caso di carico elevato della rete. Quando una stazione, in attesa che termini il backoff, sente che il mezzo non è più libero, congela il tempo di backoff rimasto. Quando rileva il mezzo libero per un tempo pari a DIFS, non sceglie un nuovo tempo di attesa ma termina il precedente. La detezione di collisione (Collision Detection) non può, nello standard 802.11, essere utilizzata come in Ethernet, in quanto una stazione che trasmette non può contemporaneamente ascoltare un'altra stazione nel sistema che potrebbe essere in trasmissione, dal momento che, il proprio segnale copre qualsiasi altro segnale arrivi alla stazione. Se un pacchetto sta per essere trasmesso, la stazione trasmittente invia prima un pacchetto corto RTS (ready-to-send) contenente l'informazione della lunghezza del pacchetto. Se la stazione ricevente ascolta l'RTS, risponde con un altro pacchetto corto CTS (clear-to-send). Dopo questo scambio, la stazione trasmittente manda il suo pacchetto. Quando il pacchetto è ricevuto con successo, come determinato dal CRC (Cyclic Redundancy Check), la stazione ricevente trasmette un pacchetto di acknowledgment (ACK).

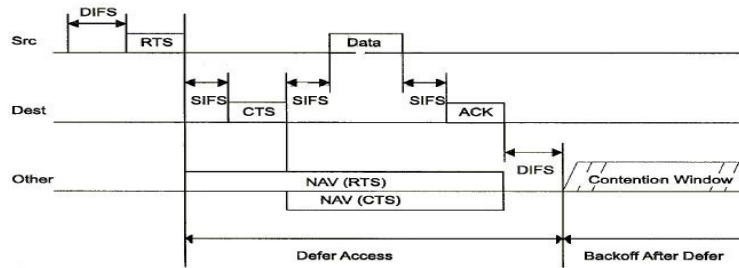


Figura 1.10: Handshake tra TX e RX

Questo scambio avanti ed indietro è necessario per evitare il problema del terminale nascosto (hidden node).

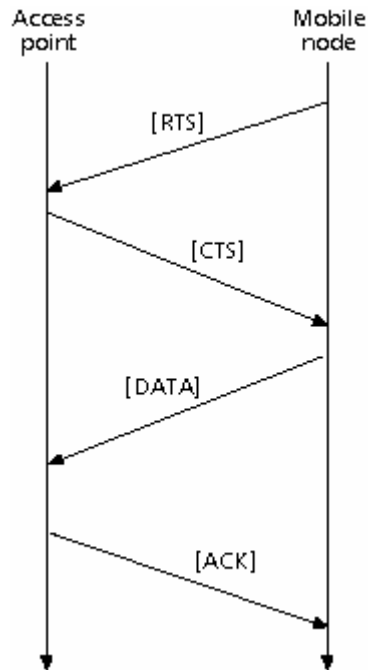


Figura 1.11: Scambio messaggi RTS-CTS-DATA-ACK

L' "Hidden Node" è un terminale che si trova al limite tra il terminale di destinazione e il terminale di sorgente.

Consideriamo la figura 1.12:

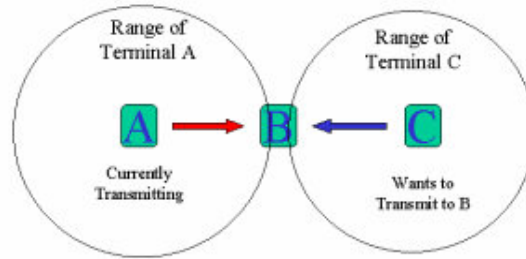


Figura 1.12: Hidden Node

Il nodo A trasmette al nodo B. Il nodo C non può sentire la trasmissione di A. Durante questa trasmissione, quando C sente il canale, pensa erroneamente che il canale sia “idle”. Se, a questo punto, il nodo C inizia una trasmissione verso B, lui stesso interferirà con la ricezione dei dati del nodo B. In questo caso il nodo C è un “hidden node” (terminale nascosto) per A e, come tale, può causare collisioni sulla trasmissione dei dati. Il meccanismo di Handshake serve a far fronte al problema.

Da chiarire che per evitare che durante i messaggi di protocollo si entri in una nuova fase di contention window, il tempo di attesa per i messaggi di risposta e per l'invio dei dati dopo il CTS è più corto del DIFS, tale tempo è detto SIFS (Short InterFrame Space). Per la bassa affidabilità della trasmissione, una stazione potrebbe ricevere i messaggi e iniziare una trasmissione generando una collisione. Per evitare questo, il protocollo realizza una sorta di “carrier sense virtuale”. I messaggi RTS e CTS contengono informazioni sulla durata della trasmissione successiva, che le stazioni non interessate alla ricezione caricano in un registro detto NAV (Net Allocation Vector).

Questo registro viene via via decrementato ed ogni stazione ne attende l'azzeramento prima di cominciare la procedura di trasmissione.

Per quanto riguarda la funzione di coordinamento centralizzata precedentemente accennata, questa può essere gestita solo da alcune stazioni, come gli Access Point. La PCF usa una struttura a superframe in cui si alternano periodi di contesa in cui è attivo il DCF a periodi senza contesa dove è attiva la PCF. Il point coordination diventa padrone del mezzo trasmissivo mediante un accesso prioritario.

CAPITOLO 2

MODULAZIONE E TECNICHE DI ACCESSO MULTIPLO AL MEZZO

2.1: OFDM

La rapida crescita dei servizi internet ed il crescente interesse per una totale mobilità e connettività per i computer portatili hanno verosimilmente creato una forte domanda per servizi dati wireless ad alta velocità. [9]

Una delle tecniche più promettenti per raggiungere trasmissioni con elevato data-rate in un ambiente mobile è l'*OFDM* (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) che, in linea di principio, divide una banda di segnale larga in molti sottocanali a banda stretta, attraverso i quali la trasmissione avviene in parallelo. La banda del sottocanale è tipicamente scelta stretta in modo da eliminare gli effetti del *delay spread*¹.

La tecnica OFDM fornisce dunque un interessante approccio nelle comunicazioni mobili per raggiungere un'alta efficienza spettrale² e combattere la selettività in frequenza del canale. Tali vantaggi giustificano il perchè gli standard per le WLAN abbiano scelto proprio questa tecnica di modulazione come supporto per i loro sistemi.

Prima di mostrare lo schema di modulazione MC (Multi Carrier) e successivamente lo schema OFDM facente uso di IFFT-FFT, è utile chiarire il suo funzionamento.

Il canale di comunicazione mobile soffre della propagazione dovuta a multipath, tempo varianza (movimento dei veicoli e del ricevitore), variazioni dell'ambiente e

¹Il delay spread fornisce una misura della dispersione temporale del segnale. In letteratura è usato per dare una corretta indicazione del massimo data-rate supportato dal canale, quando non vengono prese in considerazione equalizzazione e tecniche di diversità.

rumore.

La funzione di trasferimento del canale $H(f,t)$ può essere modellata con un modello di canale selettivo in frequenza e dispersivo nel tempo. Il massimo delay spread dovrebbe essere più piccolo del tempo di simbolo mentre il tempo di coerenza (l'inverso della frequenza doppler) dovrebbe essere maggiore del tempo di simbolo. L'OFDM fornisce una buona proposta per combattere la selettività in frequenza del canale.

Consideriamo una banda di B [Hz] ed un data-rate di R [bit/s]. Sia t_s il periodo di informazione di simbolo, f_d la frequenza doppler, e τ il massimo delay spread del canale.

Il principio di OFDM si basa sul suddividere la banda B in N sotto-portanti, spaziate di B/N Hz. In ogni sottoportante, l'informazione, multiplata, di rate R/N bit/s è modulata con portanti ortogonali. Lo spettro delle differenti sottoportanti si sovrappone reciprocamente, dando una efficienza ottima nell'occupazione della banda. Durante la propagazione, a causa del multipath del canale, la condizione di perfetta ortogonalità tra le sottoportanti non è mantenuta a lungo, di conseguenza deve essere inserito un intervallo di guardia per ogni simbolo prima della trasmissione, in modo da contrastare l'interferenza intersimbolica (ISI). Se l'intervallo di guardia è più grande del delay spread, e se il tempo di simbolo OFDM che è pari a $T_s = N * t_s$, su ogni sottoportante è più piccolo del tempo di coerenza $1/f_d$, allora $H(f,t)$ sarà costante nel tempo e nella frequenza per un singolo simbolo: il canale apparirà come un canale con fading piatto e basso.

Un primo schema rappresentativo di una modulazione di questo tipo compare nella figura 2.1:

² $\rho = M (T_s B)^{-1}$, con M pari al numero di sottoportanti, B uguale alla banda disponibile e T_s tempo di simbolo

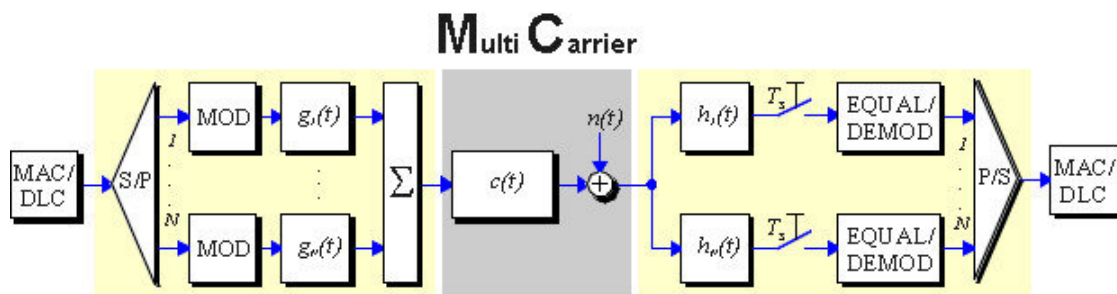


Figura 2.1 Multi Carrier

Come spiegato precedentemente la trasmissione dei dati avviene in parallelo ripartendo il contenuto informativo del segnale seriale a larga banda in pacchetti di simboli, appartenenti alle singole sottobande multiplate di frequenza, dove l'ampiezza associata ad ogni simbolo modula una portante differente. Il passaggio da una trasmissione serie ad una in parallelo ha permesso di ridurre il problema dell'equalizzazione (che nel caso di trasmissione a singola portante risultava costosa per valori elevati di data-rates che causavano durate di simbolo brevi e ritardi di canale lunghi), dal momento che ogni sottocanale diventa non selettivo, sotto l'ipotesi di sotto-banda sufficientemente stretta, e risulta, pertanto, affetto da una attenuazione ed una rotazione di fase costante.

La durata di simbolo più lunga di un fattore N nel caso Multi Carrier (dove N è il numero di sottoportanti) consente di far fronte all'interferenza intersimbolica in modo più semplice.

Nel modulare un flusso di dati parallelo con N sottocanali, ogni canale è modulato con un singolo simbolo separatamente. Le prestazioni sono direttamente relazionate al numero di sottobande che è possibile allocare. L'utilizzo della modulazione con portanti ortogonali, idealmente, evita il problema dell'interferenza tra le sottoportanti (ICI), consentendo la sovrapposizione parziale dei sottocanali senza pregiudicare la loro ricostruzione. L'ortogonalità è ottenuta scegliendo delle opportune forme di impulsi di dati che sagomano il pacchetto di simboli in TX ed in RX. Dal punto di vista di mo-demodulazione è possibile ricostruire i simboli senza interferenza tra loro. In pratica, il massimo di una sottoportante cade in

corrispondenza dei minimi delle altre.

L'interferenza tra simboli (ISI) di uno stesso pacchetto e di pacchetti differenti, dovuta alla presenza di echi può essere controllata introducendo l'intervallo di guardia temporale (fig.2.2), citato prima, in cui viene ripetuta una parte del pacchetto trasmesso.

Questo accorgimento, a meno di una attenuazione, consente il recupero dei simboli se la durata della risposta impulsiva del canale si mantiene all'interno dell'intervallo di guardia prescelto. L'utilizzo della IFFT, mostrato in fig.2.2, dopo il blocco S/P per modulare le portanti, restituisce i campioni del segnale da trasmettere.

In ricezione vengono affrontate le operazioni inverse ovvero FFT e conversione parallelo/serie. La complessità degli algoritmi di mo-demodulazione è contenuta proprio grazie all'uso di efficienti FFT-chips.

Qui sotto, viene mostrato un sistema discreto OFDM.

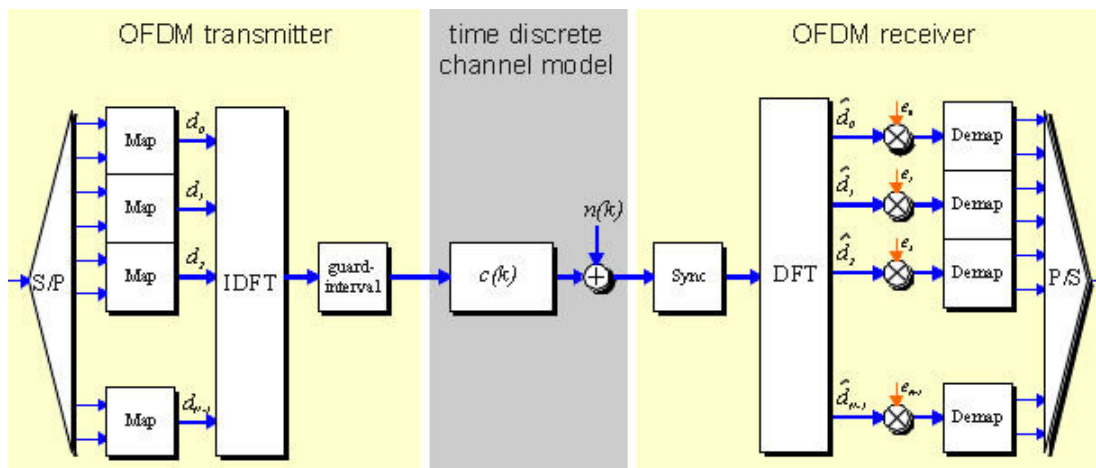


Figura 2.2 Sistema OFDM

I blocchi funzionali del trasmettitore e ricevitore digitale OFDM sono illustrati in Fig. 2.2. La sequenza di dati modulanti in ingresso viene segmentata in blocchi di dimensione M dal convertitore serie-parallelo (S/P) per poi calcolare la IFFT (IDFT). Gli ultimi L punti della IFFT (IDFT) vengono aggiunti in testa al vettore formando il cosiddetto *prefisso ciclico*. Il convertitore parallelo serie mette in sequenza i dati delle successive IFFT (IDFT) ed i dati vengono trasmessi digitalmente con una modulazione lineare ad un rate circa pari a B .

Al ricevitore i dati vengono demodulati linearmente ed i campioni $x(n)$ vengono convertiti da serie a parallelo, il prefisso ciclico viene scartato e la FFT (DFT) dei dati restituisce la sequenza di simboli moltiplicata per la funzione di trasferimento del canale sulla corrispondente sottoportante.

2.2: STRATEGIE DI ACCESSO MULTIPLO

2.2.1: FDMA

L'avvento della modulazione di radiofrequenza ha reso possibile la coesistenza di diverse trasmissioni radio nel tempo e nello spazio senza che queste interferiscano tra loro, usando frequenze portanti diverse. *Frequency-Division Multi-plexing o Frequency-Division Multiple Access (FDMA)* è un sistema di accesso multiplo utilizzato soprattutto nei sistemi analogici di comunicazione cellulare. La banda allocata dal sistema viene divisa in un certo numero di sottobande ed ogni sottobanda è assegnata ad un singolo utente, come mostrato in fig.2.3. Un canale corrisponde ad una sottobanda. Poiché ogni utente usa una banda differente, tutti gli utenti possono trasmettere contemporaneamente.

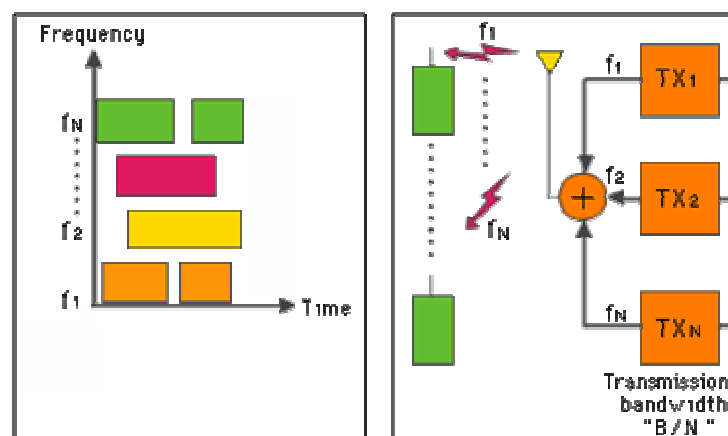


Figura 2.3 FDMA

Un filtraggio di tipo passabanda o eterodina abilita la distinzione di ogni sottocanale mediante demodulazione, unico inconveniente è dato dalla generazione di prodotti di intermodulazione, originati da non linearità, tra le portanti contemporaneamente presenti.

2.2.2: TDMA

Un secondo tipo di accesso multiplo è l'accesso TDM (*Time-Division Multiplexing*) o, TDMA (*Time Division Multiple Access*). Le risorse in questo caso vengono assegnate su base temporale: [10]

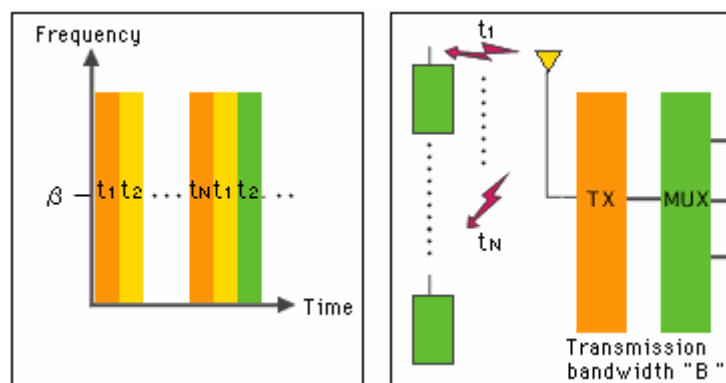


Figura 2.4 TDMA

Nel *Time-Division Multiplexing*, ogni utente accede al sistema in un intervallo temporale limitato (slot) ed è abilitato a farlo periodicamente. L'insieme di slot che si susseguono in tale periodo viene chiamato trama. TDMA lavora dividendo una frequenza radio in TS e allocando su questi più chiamate. Un canale consiste quindi in uno slot temporale. Gli utenti trasmettono ad alta velocità (circa $N \cdot f_b$, dove f_b è il ritmo binario d'utente ed N il numero di slot nella trama) pacchetti realizzati mediante compressione temporale di flussi numerici provenienti da sorgenti (ad esempio la fonia numerica) a ritmo di emissione costante. La banda occupata è

proporzionale quindi a $N \cdot f_b$. Il TDMA può usare un singolo sistema ricevente per tutti i canali che utilizzano la stessa portante. E' un sistema di accesso molto adatto ad essere gestito in modo dinamico con un accesso su richiesta per trasmissioni a pacchetto. L'inconveniente è che richiede requisiti stringenti di sincronizzazione con conseguente perdita di capacità per overhead destinati al monitoraggio del sistema, cosa che invece non accade con la tecnica FDMA dove le trasmissioni non vengono assolutamente coordinate nel tempo in quanto non è necessaria alcuna sincronizzazione tra gli utenti.

L'effetto di un canale o ricevitore non ideali possono richiedere l'inserimento di intervalli di guardia nel TDMA e bande di guardia nel FDMA per evitare interferenza co-canale.

2.2.3: CDMA

L'ultima tecnica di accesso multiplo presentata è la tecnica CDMA (*Code Division Multiple Access*) che consente la contemporanea trasmissione degli utenti sull'intera banda mediante l'utilizzo di opportuni codici. I flussi informativi lato ricevitore risultano separabili mediante l'assegnazione ad ogni utente di un differente codice.

Ci sono due criteri fondamentali per l'applicazione di questa tecnica:

- La banda utilizzata nella trasmissione deve essere molto più grande di quella del segnale di informazione.
- La larghezza della banda risultante a Radio-Frequenza deve essere statisticamente indipendente dall'informazione trasmessa.

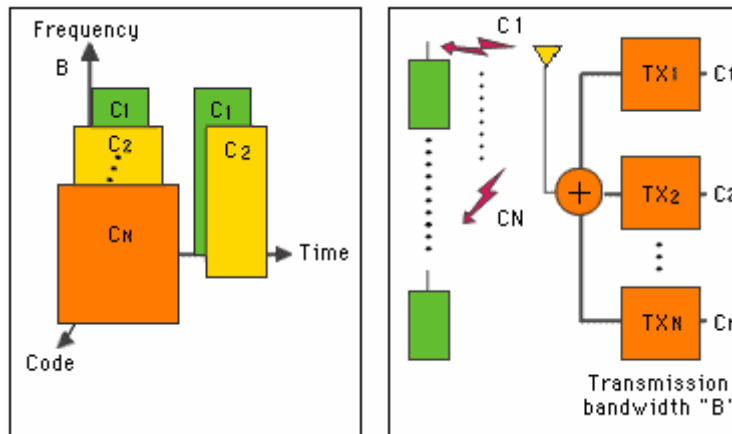


Figura 2.5 CDMA

Tale tecnica si basa su trasmissioni di tipo Spread Spectrum (“Spettro Espanso”) Uno dei modi con cui realizziamo il CDMA è il DS-CDMA (Direct Sequence-CDMA), in cui è utilizzata una unica portante per tutti gli utenti. Ad ogni utente viene associato un particolare codice che consente, in trasmissione, di codificare il segnale in modo da essere trasmesso sulla stessa frequenza ad altri messaggi criptati e, in sede di ricezione, di estrarre il segnale utile dai segnali degli altri utenti, nonostante siano sovrapposti in banda. Un canale quindi consiste in un codice. La separazione del segnale utile dall’interferenza da accesso multiplo è possibile grazie a proprietà di ortogonalità di cui godono i codici: la Cross-Correlazione tra i codici deve essere molto bassa, idealmente nulla.

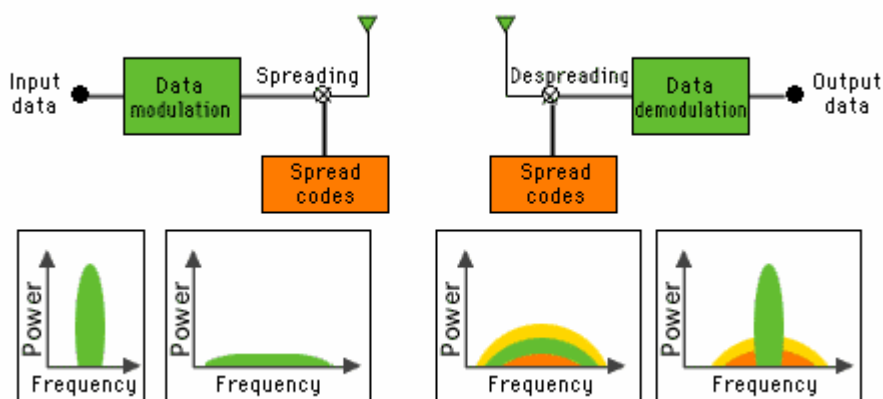


Figura 2.6 DS-CDMA

I principali vantaggi del DS-CDMA sono:

- Semplicità nella generazione del segnale codificato, infatti è sufficiente una semplice moltiplicazione.
- Semplicità nel realizzare il generatore di portante.
- Non è necessario sincronizzare i vari utenti fra loro, ma solamente il ricevitore col trasmettitore

Come controparte, però, ci sono degli svantaggi notevoli:

- Difficoltà nell'operazione della sincronizzazione dei codici: questa infatti deve essere contenuta in una frazione del tempo di codice.
- Effetto *near-far*: un utente prossimo al ricevitore è in grado di mascherare gli utenti lontani. Per evitare ciò, si dovrebbero utilizzare meccanismi di controllo di potenza.

Un confronto accurato fra il DS-CDMA e la tecnica MC-CDMA, cioè la combinazione dell'OFDM con il CDMA viene fatto nel capitolo successivo e risulterà chiaro il vantaggio di usare quest'ultima. (sempre considerando un ambiente wireless e per quel che riguarda il DL).

2.3: COMBINAZIONE DELLA MODULAZIONE OFDM CON LE VARIE TECNICHE DI ACCESSO MULTIPLO

Passiamo a vedere come le varie tecniche di accesso multiplo possano affiancare la tecnica di modulazione OFDM.

Le risorse che debbono essere distribuite possono essere rappresentate all'interno di una griglia Banda- Tempo e a seconda della tecnica utilizzata, le risorse, ovvero i tasselli assegnati, saranno disposti in modo diverso. Il simbolo OFDM fissa la durata dello slot temporale, M sono i sottocanali disponibili in frequenza durante ogni T_s .

2.3.1: OFDM-TDMA

In OFDM-TDMA più simboli OFDM (slots) sono raggruppati in frames ed i frames sono riuniti in superframes. Gli utenti possono essere multiplati in tempo tramite un accesso di tipo random oppure tramite un controllo centralizzato che assegna dinamicamente gli slots. In tal caso, un certo numero di slots sono destinati alla trasmissione broadcast di informazione di controllo, da parte della BS. [9] L'assegnazione dinamica degli slots consente di moltiplicare statisticamente il canale, e come in un tipico sistema TDMA, l'interferenza multiutente è limitata all'interferenza dovuta a celle adiacenti che riutilizzano la stessa banda trasmissiva. Base Stations dotate di antenne multiple possono notevolmente mitigare questi effetti tramite algoritmi di *beamforming* o più sofisticate tecniche di *space-time coding*. In ogni slot la banda può essere usata efficientemente perché tutte le sottoportanti sono sincrone tra loro. Tuttavia, interferenza intersimbolica, sotto forma di interferenza tra portanti adiacenti (ICI), è presente a causa della non perfetta sincronizzazione di portante del ricevitore, del rumore di fase degli oscillatori in trasmissione e ricezione e delle variazioni della risposta del canale in generale.

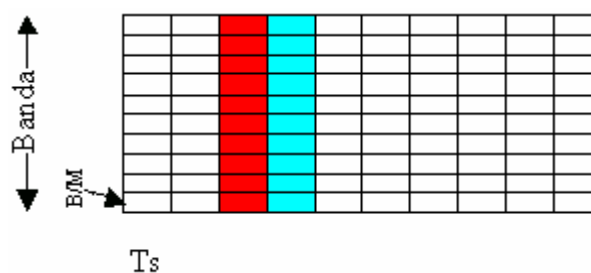


Figura 2.7 Suddivisione del canale radio nell' OFDM-TDMA

Come mostrato in figura 2.7 un accesso OFDM-TDMA è caratterizzato dalla peculiarità che ciascun utente, fissato lo slot dedicatogli, ha a sua disposizione tutta la banda.

2.3.2: OFDM-FDMA

Lo schema OFDM-FDMA è il duale dello schema OFDM-TDMA, in quanto all'utente viene assegnata una sottobanda per una durata che comprende più simboli OFDM. [11]

La durata dello slot si allunga corrispondentemente e più utenti possono contemporaneamente usare le risorse essendo suddivisi su diverse sottoportanti.

A causa dell'impossibilità di garantire perfetto sincronismo di portante tra gli utenti, le sottoportanti adiacenti non sono esattamente ortogonali e ciò provoca l'insorgere di interferenza multiutente (MUI). Pertanto OFDM-FDMA richiede l'uso di guardie in frequenza (non tutte le sottoportanti possono essere utilizzate) e richiede tecniche di controllo di potenza, poiché l'interferenza dovuta alla non esatta sincronizzazione di portante è interferenza multiutente: utenti il cui segnale sia ricevuto a livelli di potenza relativamente elevati possono mascherare utenti i cui segnali sono deboli in frequenza (l'effetto *near far*), con esiti ben peggiori della ICI presente nei sistemi OFDM-TDMA. [9]

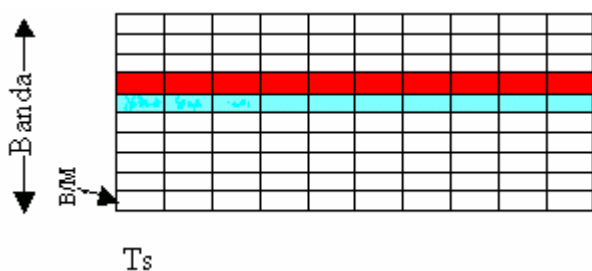


Figura 2.8 Suddivisione del canale radio nell' OFDM-FDMA

Come mostrato in figura 2.8 un accesso OFDM-FDMA è caratterizzato dalla peculiarità che ciascun utente, fissata la banda a lui dedicata, ha a sua disposizione più simboli OFDM.

Una variante dell' OFDM-FDMA è l'OFDMA. Questa tecnica di accesso multiplo assegna le varie sottoportanti agli utenti come in un sistema FDMA, con la differenza (sostanziale in termini di costo implementativo) che la mo/demodulazione è effettuata digitalmente.

OFDMA realmente utilizza tutti i tasselli della griglia come sottocanali separati ed ha la massima flessibilità nell'assegnazione delle risorse. Sfortunatamente come OFDM-FDMA non può essere efficiente. Controllo di potenza ed intervalli di guardia tra utenti sono richiesti per mitigare l'effetto della MUI.

2.3.3: OFDM-CDMA

Per mitigare l'effetto dell'interferenza multiutente e dell'ICI lo schema OFDM può essere combinato con il CDMA. [12] In OFDM-CDMA, anche detto Multi-Carrier CDMA (MC-CDMA) le sottoportanti possono essere ritenute equivalenti ai chips di un sistema spread spectrum. [9] Lo schema di base opera come segue: la sequenza di simboli da trasmettere viene espansa moltiplicando ciascun simbolo $s(n)$ per un codice $\mathbf{c}=(c_0, \dots, c_{K-1})$, che tipicamente consiste in una sequenza binaria pseudo-random di lunghezza $K \leq M$, con M pari al numero di punti della FFT:

$$\mathbf{x}(n) = \mathbf{c}s(n)$$

In pratica è come se trasmettessimo in parallelo lo stesso simbolo sulle K sottoportanti pesando ognuna con il relativo chip del codice.

La sequenza trasmessa è la successione dei vettori di dati $\mathbf{x}(n)$, cioè $(\dots, x_0(n-2), \dots, x_{K-1}(n-1), x_0(n), \dots, x_{K+1}(n), x_0(n+1), \dots)$. La sequenza da trasmettere ha un rate (chip rate) che è K volte maggiore di quello di simbolo. Un insieme di utenti diversi trasmette sullo stesso gruppo di sottoportanti contemporaneamente usando parole di codice diverse, ortogonali ai codici utilizzati da tutti gli altri utenti. Nulla vieta, ovviamente, l'uso di più codici per un singolo utente. Questa tecnica offre rispetto alle precedenti uno *spreading gain* del codice, che mitiga l'effetto sia della

MAI che della ICI. Se il canale fosse ideale sarebbe possibile ricostruire esattamente il segnale trasmesso da ciascun utente semplicemente moltiplicando ciascuna sottoportante per il rispettivo elemento di codice in questione e sommando i termini risultanti. La perfetta sincronizzazione di portante non può essere imposta in caso di utenti multipli, pertanto le bande assegnate a utenti diversi dovranno essere opportunamente separate, per mitigare l'interferenza multiutente (MAI). D'altro canto bande adiacenti assegnate allo stesso utente (nel caso estremo, tutte le sottoportanti di uno slot) possono essere utilizzate più efficientemente e/o risentono di minore interferenza. Questo aspetto va tenuto in considerazione nella definizione della strategia di suddivisione delle risorse e nel progetto del MAC

Il livello di ortogonalità è doppio:

1. le sottoportanti sono ortogonali
2. i codici di espansione sono ortogonali

Questa è la ragione per cui questa tecnica è robusta al fading in frequenza.

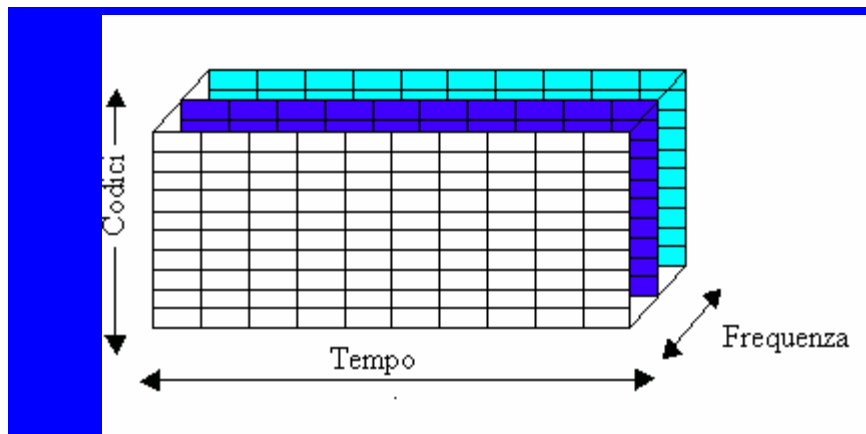


Figura 2.9 Suddivisione del canale radio per OFDM-CDMA

A differenza delle altre due rappresentazioni, l'OFDM-CDMA può essere schematizzato come una griglia codici-tempo (fig.2.9).

Il MC-CDMA può essere descritto in quattro modi equivalenti:

- 1) E' una forma di CDMA, ma applichiamo lo spreading nel dominio della frequenza invece che nel dominio del tempo.

- 2) E' una forma di DS-CDMA, ma successivamente allo spreading viene realizzata una trasformazione di Fourier (FFT).
- 3) E' una forma di OFDM, ma ai bits di utente viene applicata un'operazione di ortogonalizzazione tramite un codice.
- 4) Rappresenta una forma di diversità in frequenza. Ogni simbolo di utente, infatti, viene trasmesso in parallelo su differenti sottoportanti. Ogni sottoportante ha il proprio offset di fase, individuato dal corrispondente chip di codice, e gli insiemi di offset servono a distinguere tra loro gli utenti.

2.3.4: OFDM combinato con strategie di accesso multiplo: confronti, vantaggi e svantaggi

La relativa semplicità ed il controllo dell'interferenza (MUI) garantiti dall'OFDM-TDMA rappresentano il maggiore vantaggio di questa soluzione. Un'accurata progettazione di trasmettitore e ricevitore, infatti, può mitigare gli effetti dell'ICI. Il maggiore problema di questa soluzione è la rigidità della suddivisione delle risorse: il MAC di fatto non utilizza l'OFDM per aumentare la granularità delle risorse. Pertanto, non considerando i vantaggi dell'OFDM come tecnica di modulazione in se, l'OFDM potrebbe essere sostituito da un sistema single carrier con rate di simbolo pari ad M/T_s , rimanendo il MAC inalterato. Dunque l'OFDM-TDMA è sostanzialmente un sistema TDMA con una specifica tecnica di modulazione e ciò chiaramente fa comprendere che ci sono elementi di OFDM di cui l'OFDMA-TDMA non beneficia e che il MAC può sfruttare meglio per aumentare il throughput e la qualità di servizio.

Simili conclusioni possono essere tratte a proposito dell'OFDM-FDMA. In aggiunta, l'OFDM-FDMA con un'allocazione statica e non ottimizzata delle sottobande dedicate agli utenti è affetto da fading come un sistema di comunicazione a banda stretta, a meno che non vengano risolti adattativamente complessi problemi di ottimizzazione nell'allocare le sottobande. Una contromisura per il fading può essere l'uso dell'OFDM-FDMA in combinazione con tecniche di

Frequency Hopping. L'OFDM-FDMA è affetto da ICI ma anche da interferenza multiutente (MUI), dovuta all'asincronismo di portante tra i vari utenti.

L'OFDMA è certamente la soluzione più efficiente e flessibile, perché sfrutta ogni tassello della griglia, come una risorsa assegnabile per trasmettere informazione, lasciando la massima flessibilità al MAC. Il MAC può combinare o dividere le risorse in modo da soddisfare al meglio le necessità dell'utente. Due sono i problemi di OFDMA: [14]

1) Nello scenario ideale di perfetto sincronismo tra utenti, il fatto che ogni WTIU (Wireless Terminal Interface Units)³ abbia una diversa funzione di trasferimento del canale fa in modo che ciascun sottocanale ha un diverso rapporto segnale a rumore a seconda dell'utente. Pertanto, il problema di suddividere le risorse in modo da soddisfare le richieste delle WTIU è un complicato problema di ottimizzazione non lineare. Tuttavia l'uso di tecniche di Frequency Hopping può parzialmente compensare questo inconveniente.

2) L'OFDMA è afflitto da MUI ed ICI, per combattere le quali occorre fare affidamento su una complicazione della struttura del ricevitore notevole e che è in contrasto con la semplificazione del ricevitore a cui dovrebbe portare la scelta dell'OFDM come tecnica di modulazione e multiplexazione. Tuttavia, occorre tenere presente che l'uso di antenne multiple e beamforming potrebbe considerevolmente ridurre il MUI.

Rimanendo nello spirito OFDMA ed assumendo che lo strato fisico non sia in grado di separare altrimenti i segnali provenienti da più utenti, la soluzione auspicabile è di non utilizzare alcuni sottocanali, ponendo delle guardie tra utenti. L'interrogativo che ovviamente sorge è se invece di "spegnere" tali sottocanali non sia più opportuno usarli come fonte di diversità, come viene fatto nell'OFDM-CDMA.

Il sistema OFDM-CDMA ha due svantaggi rispetto ai precedenti due:

- richiede una complicazione dello strato fisico (lo spreading dei dati);
- se il sistema viene usato senza sovrapporre gli utenti nelle sottobande il sistema è inefficiente; viceversa, se si sovrappongono gli utenti sulle varie

³ WTIU sono i terminali fissi e mobili con interfaccia radio presenti nel sistema considerato

sottobande usando codici diversi e non si usano tecniche di joint detection o decorrelation receivers, l'interferenza degrada le prestazioni e richiede tecniche di power control, difficili da far convergere in caso di comunicazioni a pacchetto.

L'OFDM-CDMA è anche affetto da MUI ed ICI, anche se, a parità di condizioni, ne risente in misura minore di entrambi i metodi citati sopra, il che significa che la durata T_s può essere incrementata maggiormente, aumentando il numero di sottoportanti disponibili.

Altro vantaggio dell'OFDM-CDMA è che può chiaramente degenerare nei due casi precedenti, pertanto può essere usato in modalità che sono una soluzione di compromesso tra OFDM-TDMA e OFDMA. I nuovi gradi di libertà che OFDM-CDMA aggiunge, possono essere sfruttati per raggiungere buoni compromessi tra l'efficienza e la robustezza della tecnica trasmissiva che, accoppiate ad una efficace strategia MAC, determinano la capacità del sistema di fornire differenti parametri di qualità di servizio.

Un rapido confronto tra questi schemi deve essere fatto in termini di flessibilità e overhead di segnalazione, aspetto di notevole importanza nel dimensionamento della velocità di trasmissione e del ritardo.

Un efficiente schema di accesso dovrebbe garantire una elevata flessibilità nella distribuzione della risorsa disponibile tempo-banda tra tutti gli utenti. Da un lato deve essere considerato il comportamento selettivo in frequenza del canale e dall'altro le richieste degli utenti per data rate differenti (dipendenti dal tipo di servizio richiesto).

I tre schemi mostrano all'incirca lo stesso grado di flessibilità. Il numero delle sottoportanti per utente (OFDM-FDMA), o il numero di time slots (OFDM-TDMA) per utente, o il numero di codici per utente (OFDM-CDMA) possono essere adottati in accordo alle richieste correnti. L'ultima tecnica presuppone che tutti i codici siano conosciuti ad ogni utente.

Adottando una tecnica di tipo OFDM-TDMA l'accesso multiplo è garantito suddividendo l'asse temporale in trame e time-slots (TS). Ad ogni utente viene

assegnato un TS a cadenza di trama e quando è il suo turno, l'utente può trasmettere i propri pacchetti sull'intera banda disponibile (su tutte le sottoportanti), all'interno di una singola trama TDMA, che copre alcuni simboli OFDM. Il numero di simboli OFDM per trama può essere variato, in accordo alle richieste di ogni utente. Le risorse vengono così assegnate in maniera dinamica sulla base delle esigenze di ogni singolo utente ottenendo uno sfruttamento omogeneo della banda da parte di tutti gli utenti, anche se l'impiego della risorsa nel tempo potrebbe non essere ottimale, se il canale è un canale rapidamente variante nel tempo.

Nell'OFDM-FDMA tutti gli utenti accedono contemporaneamente al sistema, ma ogni utente usa un sottoinsieme di sottoportanti che gli viene assegnato in modo esclusivo. Un'allocazione efficiente deve garantire che ogni utente venga servito al meglio. La tecnica OFDM-FDMA può sfruttare il fatto che ogni utente prova un differente canale radio allocando soltanto sottoportanti "buone" con elevato rapporto segnale/rumore e aumentando con ciò la capacità di canale. Questo tipo di tecnica è però anche quella che richiede più overhead di segnalazione poiché deve essere trasmesso il numero di utenti per ogni sottoportante (vedi Tabella I).

Nell'OFDM-CDMA, [12], tutti gli utenti condividono sempre tutta la banda a disposizione (tutte le sottoportanti) usando differenti codici ortogonali. In tal modo vengono sfruttate al massimo le caratteristiche di diversità in frequenza, le proprietà Spread Spectrum e le eventuali variazioni nel tempo del canale. Con tale metodo di accesso viene assegnato un numero di parole di codice tale da poter garantire la risorsa richiesta. L'overhead di segnalazione dell'OFDM-CDMA è paragonabile a quello del TDMA. La tecnica CDMA è una buona candidata per supportare servizi multimediali, soprattutto in comunicazioni radiomobili, grazie alla sua capacità di adattarsi alla natura asincrona del traffico dati multimediale, per fornire una capacità di trasferimento informativo maggiore di quella offerta da TDMA e FDMA. Se l'allocazione delle risorse è gestita dalla base-station, l'informazione circa l'allocazione sottoportante/codice deve essere trasmessa sia per il downlink che per l'uplink.

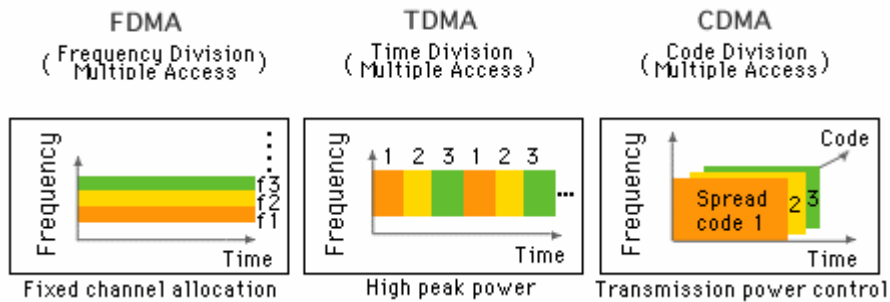


Figura 2.10 Confronto fra le tecniche di accesso multiplo

Access scheme	Kind of signalling information	Overhead (bit)
FDMA	Allocation table for all subcarriers	$K \cdot \log_2 U$
TDMA	Start/end of time slot	$2U \cdot \log_2 F$
CDMA	Start/end of code index	$2U \cdot \log_2 K$

Tabella I - Informazione di segnalazione richiesta per i diversi schemi di accesso;
 U = numero di utenti, K = numero di sottoportanti, F = numero di simboli OFDM per frame (up- e downlink).

Dall'analisi o meglio dal confronto di tali sistemi si nota come la tecnica MC-CDMA sia efficiente solo quando siamo in grado di garantire in ricezione l'ortogonalità (o almeno, la bassa correlazione) tra i codici, cosa che nella realizzazione di una tratta Downlink, data la particolarità che ogni utente riceve su un canale separato, è senz'altro assicurata. [9], [13]

Nella tratta Uplink di un sistema trasmissivo, questo non è verificato a causa di problemi che svilupperemo nel seguito, di qui, la scelta di adottare la tecnica combinata OFDM-TDMA, che è, fra l'altro, l'oggetto di studio della presente tesi.

2.4: NUOVI SISTEMI: AMOUR

Una nuova classe di codici sono stati proposti recentemente per annullare completamente l'interferenza multiutente (MUI) nei sistemi di tipo CDMA. Questi codici, detti *codici Lagrange Vandermonde(LV)* offrono una eliminazione deterministica della MUI senza necessità di stima del canale, e convertono canali selettivi in frequenza in canali di tipo “*flat-fading*” (con fading piatto).

Una delle maggiori limitazioni dei sistemi CDMA a larga banda, come già più volte detto, è l'interferenza multiutente che accade in presenza di propagazione da multipath e affligge in particolar modo la tratta di uplink.

Su questa tratta infatti, codici che sono ortogonali in partenza, non lo sono più al RN. I segnali provenienti da tutti i RT vengono moltiplicati tutti per la stessa funzione di trasferimento di canale e sommati al ricevitore. Una operazione di equalizzazione non è sufficiente a recuperare il segnale di ognuno, se non quello degradato dagli altri utenti. L'ortogonalità dei codici non può più essere utilizzata. Per distinguere gli utenti è necessario separarli in banda.

Il modello di trasmissione è caratterizzato da sottocampionatori e sovracampionatori che hanno lo scopo di fare spreading e despreading per un fattore pari a P . Ogni utente allarga la sua sequenza di informazione $s_m(n)$ tramite il sovracampionatore e la codifica usando un codice $c_m(n)$ di lunghezza P , prima di trasmetterla attraverso il j -esimo canale “non conosciuto” $h_m(j)$ che, oltre al multipath, aggiunge l'impulso (transmit spectral-shaping) e l' m -esimo asincronismo d'utente nella forma di fattori di ritardo. I dati multiplati $v(n)$ sono filtrati e campionati al chip rate. Il passaggio attraverso il filtro di ricezione $g_m(k)$ è seguito dal despreading (sottocampionamento) di un fattore P e dalla decisione per ottenere la sequenza stimata $\hat{s}_m(n)$. Si assume che:

- a. $P - M \geq L$ e $M > L$, dove L rappresenta il massimo numero di canali $\{h_m(j)\}_{m=1}^M$ tali da ottenere ISI al rate di chip ma non al rate di simbolo;

b. i codici hanno un numero di bit di prefisso ridondante (prefisso ciclico) pari a $L_g \geq L$

Basandosi sui punti a e b, i campioni ricevuti sono:

$$x(n) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=-\infty}^{+\infty} s_m(i) \cdot \sum_{j=0}^L h_m(j) \cdot c_m(n-j-iP) + v(n) \quad \text{o equivalentemente}$$

$$x(nP+k) = \sum_{m=1}^M \sum_{i=-\infty}^{+\infty} s_m(i) \cdot \sum_{j=0}^L h_m(j) \cdot c_m((n-i)P+k-j) + v(nP+k)$$

Dal momento che $c_m(i) = 0$ per $i < 0$ e $i > P-1$, il solo termine diverso da zero nella somma relativa ad i corrisponde all'indice $i=n$, e quindi si ha:

$$x(nP+k) = \sum_{m=1}^M s_m(n) \cdot \sum_{j=0}^L h_m(j) \cdot c_m(k-j) + v(nP+k)$$

Il problema risolto dal sistema AMOUR (A Mutually-Orthogonal Usercode-Receiver) si è basato sul progetto di codificatori e decodificatori in grado di eliminare l'interferenza multiutente in maniera completa, consentendo una assegnazione della risorsa all'interno della griglia tempo- frequenza in cui uno slot e l'intera banda può essere condivisa da più utenti facendo uso dei codici ora menzionati. [15], [16]

CAPITOLO 3

STRUTTURA GENERALE DEL SISTEMA

3.1: DESCRIZIONE DEL SISTEMA

Come visto nei due capitoli precedenti, il sistema preso in considerazione è una Wireless-LAN di tipo indoor che sfrutta la tecnica di multiplazione OFDM e, come tecniche di accesso multiplo al mezzo, il CDMA in downlink e il TDMA in uplink. Per lo scopo dei nostri studi abbiamo ipotizzato, in prima approssimazione, che la WLAN fosse assimilabile ad un ufficio o ad una vasta struttura ad un solo piano. Il tema in questione ipotizza lo scenario dato da una singola cella, senza quindi tenere in considerazione e sviluppare la gestione del passaggio da una cella all'altra e le problematiche relative all'handover.

La configurazione di rete che si assume è quella anche utilizzata nell'ambito delle reti cellulari. Si suppone infatti che l'area analizzata sia condivisa da una molteplicità di celle all'interno delle quali si trovano numerosi terminali fissi e mobili, i quali sono sotto il controllo di una unica stazione radio base, il Radio Node.

Lo scenario di riferimento è proprio la cella all'interno della quale si suppone che detti terminali collochino tra di loro attraverso il RN, che risulta essere la struttura cardine di un protocollo di accesso al mezzo di tipo centralizzato quale è quello sotto studio. La struttura del sistema schematizzabile come mostrato in figura rientra nella classe delle WLAN con topologia a stella.

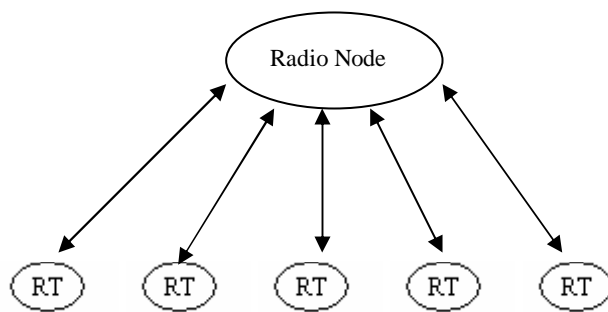


Figura 3.1 Struttura di una cella in una WLAN con topologia a stella

All'interno di questa classe, è possibile individuare due canali logici per la comunicazione delle varie entità: il canale di downlink (DL) attraverso cui il Radio Node (RN) dialoga con i vari Radio Terminal (RT) e il canale di Uplink (UL) attraverso cui, in modo condiviso, i vari RT dialogano con il RN. Per quanto riguarda il Downlink, lo scenario di assegnazione dinamica delle risorse stabilisce che un codice, tra i K disponibili per un accesso contemporaneo al canale di DL, può non essere assegnato per tutto il tempo ad un singolo RT, ma può essergli dedicato solamente per consentirgli la trasmissione di un certo numero di MAC-PDU.

In altre parole, si può pensare l'asse dei tempi suddiviso in unità temporali (*Time Slot*) la cui durata rappresenta il tempo necessario alla trasmissione di una singola MAC-PDU e sarà dimensionata nel paragrafo relativo allo strato MAC.

Gli N intervalli temporali così definiti sono stato raggruppati in un periodo di *Trama* che si ripete in modo periodico. Questo risulta utile nella gestione delle unità informative della classe di traffico che necessita di un'alta trasparenza temporale in quanto è possibile cadenzare le opportunità trasmissive, adattandosi alla natura periodica delle emissioni da parte dei trasmettitori. Inoltre, data la disponibilità di K codici, c'è un'ulteriore grado di libertà nell'accesso radio, che di fatto dà luogo ad una struttura trasmissiva di tipo "a matrice" (detta appunto "matrice dei codici") per il trasferimento di informazioni in DL, come mostrato in figura 3.2, dove K è il numero di codici utilizzabili nella trasmissione di unità informative, mentre N è il numero di TS componenti la trama.

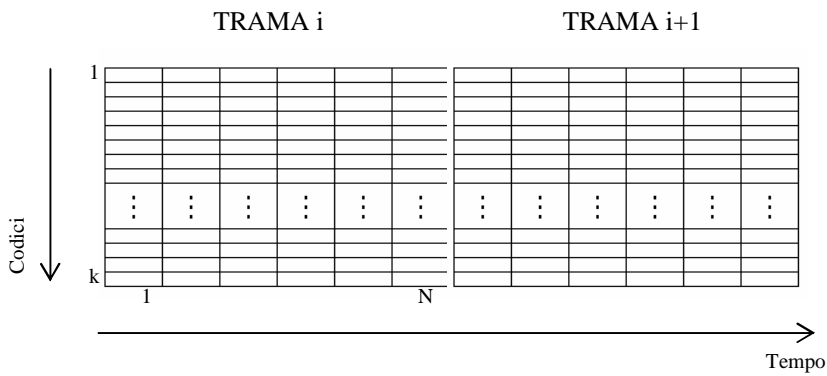


Figura 3.2 Struttura trasmissiva del sistema in downlink

La capacità minima assegnabile ad un singolo utente può essere anche molto piccola e decisa arbitrariamente: è infatti possibile assegnare anche una sola coppia <codice, TS>, che rappresenta la quantità minima di capacità assegnabile (1 MAC-PDU) in una trama ad un utente e poi attendere un numero qualsivoglia di trame prima di rassegnargli nuovamente una opportunità trasmissiva (compatibilmente con i ritardi necessari per soddisfare il trasferimento di informazioni d'utente).

Per quel che riguarda invece l'Uplink, la struttura che utilizziamo per gestire le risorse è unidimensionale anche a livello di simulatore ricorriamo, come verrà spiegato nei capitoli seguenti, ad una struttura vettoriale. Si ha un treno di TS mostrato in figura 3.3.

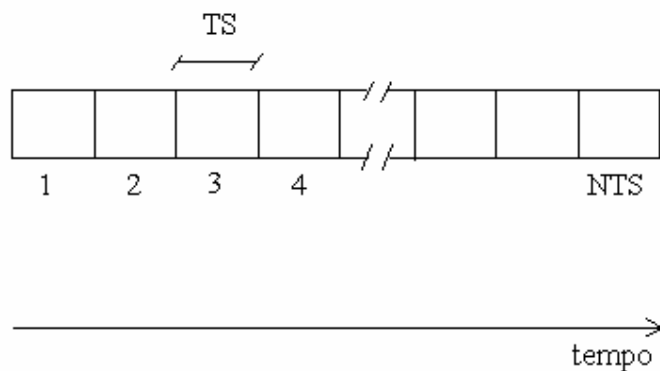


Figura 3.3: Struttura a trama in Uplink

Questa è un'ovvia conseguenza della tecnica di accesso al mezzo adottata in UL, e cioè il TDMA. La risorsa che ora viene assegnata non è più la coppia <codice, TS>, ma il solo <TS>. Ad ogni RT che deve trasmettere vengono assegnati, mediante una opportuna strategia di scheduling, i time slot nei quali trasmettere le unità informative. Il singolo TS diviene quindi la vera ed unica risorsa per trasmettere una MAC-PDU in UL e anche in questo caso, l'insieme di questi NTS time slots si ripresenta in maniera ciclica ad ogni periodo di trama.

La scelta della durata della trama, dipende da fattori tra loro contrastanti. Da un lato, si spinge verso lunghezze di trama piccole per l'esigenza di minimizzare il ritardo di accesso delle unità informative ed il loro ritardo di trasferimento, specie per quei servizi che necessitano di una alta trasparenza temporale, dall'altro, lunghezze di trama grandi comportano uno spreco percentualmente minore di banda utilizzata dai canali di segnalazione del MAC, descritti sempre nel paragrafo relativo allo strato MAC.

3.1.1:Classi di traffico

Il sistema in analisi deve essere in grado di supportare una ampia gamma di servizi con diverse caratteristiche in termini di traffico e requisiti di "Qualità del Servizio" (QoS). In particolare una prima classificazione possibile è in due classi di servizio:

- **Guaranteed Bandwidth (GB):** comprende le applicazioni con requisiti stringenti sul ritardo *end-to-end* e sul *jitter* del ritardo.
- **Best Effort (BE):** comprende quelle applicazioni che non richiedono garanzia di prestazioni.

Per meglio comprendere quali servizi siano assimilabili con l'una o l'altra classe di servizio, ci si può riferire alla classificazione dei servizi integrati in Internet 'IntServ', denominate rispettivamente "Guaranteed Services" e "Controlled Load Services" che suggerisce una suddivisione ulteriore della classe GB in due classi

GB1 e GB2; la classe GB1 è quella a più alta priorità. Si impone un requisito stringente sul ritardo e sull'assenza di *overflow* nei buffer.

La classe GB2 è caratterizzata da un ritardo massimo tollerabile ma non viene garantita l'assenza di overflow.

La tabella 3.1 mostra una caratterizzazione di queste due classi di servizio definite dallo Strato di Rete in termini di applicazioni e comportamento.

	Guaranteed Service	Controlled Load Service
Tipiche Applicazioni	<ul style="list-style-type: none"> • applicazioni in tempo reale 	<ul style="list-style-type: none"> • applicazioni sensibili alla congestione di rete • applicazioni non in tempo reale con vincoli meno stringenti sul ritardo
Comportamento end-to-end	<ul style="list-style-type: none"> • Ritirando massimo garantito • <i>throughput</i> garantito • nessuna perdita causata da overflow 	<ul style="list-style-type: none"> • approssima il <i>Best Effort</i> in una rete poco carica

Tabella 3.1 Classi di servizio a banda garantita nel modello Integrated Service

Si noti inoltre che la classe BE può essere a sua volta suddivisa in due classi BE1 e BE2 che si differenziano in termini di qualità di servizio ma per le quali non esiste comunque in genere nessuna garanzia deterministica sulle prestazioni in termini di ritardo.

Ciò nonostante, questo lavoro mira alla definizione di un MAC che supporti sia la classe di servizio a qualità garantita che quella best effort, non considerando le ulteriori due suddivisioni appena accennate.

3.1.1.1: La Classe di Traffico “Guaranteed Bandwidth”

La classe di servizio GB comprende, come già accennato prima, quelle applicazioni che hanno requisiti stringenti sia sul ritardo di trasferimento complessivo da estremo a estremo, sia sulla variazione (jitter) dei ritardi subiti dalle unità informative appartenenti a tali servizi.

Oltre a ciò, il grado di integrità informativa è un altro parametro che deve essere garantito. Voce e video sono tipicamente applicazioni che rientrano in questa classe di servizio, in quanto i rispettivi codificatori producono un flusso continuo di dati che deve essere riprodotto a destinazione in modo consecutivo ed entro un limite massimo temporale.

APPLICAZIONI REAL TIME	REQUISITI DI BANDA
Audio (downstream)	
Qualità CD stereo: 10Hz-20KHz	256Kb/s
Qualità Broadcast: 50Hz-7KHz	64/56/48 Kb/s
POTS(PCM, G 711) 0.2-3.4KHz	64 Kb/s
Low Bit Rate POTS (G 723.1)	6.4/5.3 Kb/s
Low Bit Rate POTS (G 729.A)	8 Kb/s
Video (downstream)	
HDTV (downstream)	Circa 20Mb/s

Video on Demand (MPEG2)	Circa 4-6Mb/s
Video on Demand (MPEG1)	1-2 Mb/s
Low rate videoconferencing (H263)	Ottimizzato per <28.8 Kb/s

Tabella 3.2 Esempi di applicazioni GB

Nella tabella 3.2 vengono riportati alcuni esempi di applicazioni che possono considerarsi appartenenti alla Classe GB e sono forniti per ogni servizio i requisiti minimi di banda da garantire a livello applicativo.

Questa classe di traffico deve essere trattata dal sistema al fine di soddisfare i parametri di QoS pattuiti in termini di banda , ritardo e perdita.

Per ogni flusso sarà necessario allocare un determinato quantitativo di risorse. Tali risorse, nella fattispecie, sono banda e buffer.

La maniera con cui si è provveduto a ciò è stato quella di caratterizzare ogni flusso mediante dei parametri detti “*Traffic Descriptor*” (i cosiddetti Parametri *Dual Leaky Bucket*, DLB), tramite i quali non solo è possibile allocare in maniera opportuna la risorsa, ma è anche possibile gestire meccanismi di controllo di accettazione dei flussi. Il protocollo utilizzato per conseguire la qualità di servizio è il protocollo RSVP (Resource ReSerVation Protocol). Questo è un protocollo di riservazione della risorsa, che garantisce, grazie ad uno scambio di messaggi tra sorgente e destinatario, la riservazione di una quantità di banda in ciascun ramo tale che si possa ridurre al minimo la perdita per *overflow* .

3.1.1.2: La Classe di Traffico “Best Effort”

La classe di traffico Best Effort (BE) è una classe che si adatta molto bene alla descrizione di servizi che non hanno alcun requisito di tempo reale e richiedono, solamente, il soddisfacimento dei vincoli sull’integrità informativa; infatti, in

generale l'esigenza fondamentale di tali servizi è relativa al trasporto dei dati, che deve essere il più possibile esente da errori. Di conseguenza si può dire che la rete fa "del suo meglio" per portare l'informazione a destinazione e cerca di farlo nel minor tempo possibile. Un tipico esempio è il traffico Internet (Web Browsing, trasferimento di file, posta elettronica, etc).

All'interno della classe di servizio BE è opportuno, tuttavia, fare una sottodistinzione tra applicazioni che presentano certamente requisiti meno stringenti rispetto a quelli della classe GB sul ritardo, ma che, comunque, sono molto legate al tempo con cui il servizio viene espletato e servizi per i quali il tempo necessario a trasportare l'informazione a destinazione non ha alcuna rilevanza. Appartengono alla prima delle due sottoclassi le funzioni di rete tradizionali, come il trasferimento di file, che, pur non essendo sensibili al ritardo, sono comunque legate al tempo che l'utente è disposto ad aspettare prima che il servizio sia completato. Nella seconda sottoclasse possono invece essere considerati gli usuali servizi di posta elettronica. Dal momento che, in entrambi i casi, deve essere assicurato un ottimo livello di integrità informativa e le perdite di informazioni degradano notevolmente il servizio offerto, l'obiettivo primario della classe BE è quello di assicurare un servizio che sia esente da errori. Questo scopo può essere raggiunto considerando meccanismi di FEC (Forward Error Correction) e ARQ (Automatic Repeat Request) o una combinazione tra i due in modo tale da raggiungere un compromesso tra utilizzazione della risorsa radio e vincolo sull'integrità informativa stessa. A tutt'oggi si sta cercando un modo di trattare le unità dati appartenenti ai vari servizi e che prevedano la trasmissioni di blocchi più o meno lunghi e con certi requisiti di trasferimento. Tuttavia, mentre può essere valutata seriamente l'idea di utilizzare un protocollo di riservazione delle risorse per quelle applicazioni come FTP, vincolate al ritardo di trasferimento lato utenza (tempo di espletamento del servizio), per altre applicazioni come *telnet*, invece, non ha molto senso usare procedure di segnalazione al trasmettitore e al ricevitore poiché queste richiederebbero alla rete un impegno, anche se per breve tempo, per

trasferire blocchi di dati di poche centinaia di bytes. Il sistema di accesso non può garantire alcuna qualità di servizio se non con l'instaurazione della sessione.

La classe BE, oltre a consentire un corretto trattamento delle informazioni provenienti da Internet che non impiegano RSVP, consente di ottenere un'efficiente utilizzazione della risorsa. L'algoritmo di *scheduling* proposto nel capitolo 4 consente proprio di ridurre, per quanto possibile, gli sprechi di risorsa.

In tabella 3.3 si riportano i tipi di servizio ed i requisiti delle classi di servizio a banda garantita (GB) e best effort (BE).

	3 Tipo di Servizio	4 Requisiti
Guaranteed Bandwidth (GB)	Applicazioni in tempo reale audio, video, telefonia via internet, conferenza multimediale, giochi interattivi etc.	Trasferimento in tempo reale (vincolo sul massimo ritardo e sul jitter di ritardo). Probabilità di perdita non nulla. Probabilità di errore sul bit (BER) di 10^{-3} , 10^{-5} .
Best Effort (BE)	Web browsing, trasferimento di file FTP, chatting, E-mail	Traffico senza esigenze di tempo reale o con vincoli molto larghi sul ritardo. Probabilità di perdita molto bassa (10^{-8}). Probabilità di errore sul bit (BER) di 10^{-7} .

Tabella 3.3: Servizi e requisiti delle Classi di traffico GB e BE

3.2: ARCHITETTURA PROTOCOLLARE

3.2.1: Strato di Rete e strato di Adattamento

Nella definizione del nostro sistema abbiamo ipotizzato un'architettura protocollare in cui gli strati da considerare partendo dall'alto sono lo strato IP, lo strato di Adattamento, lo strato MAC e quello Fisico.

Il protocollo IP è un protocollo di strato 3 caratterizzato dalle seguenti funzionalità:

- definisce lo schema di indirizzamento (diretto o indiretto)
- stabilisce l'unità base per il trasferimento dei dati attraverso internet, indicando il formato dei dati che attraversano l'inter-rete
- definisce il percorso dell'unità dati da sorgente a destinazione
- specifica le regole cui host e router si devono attenere per il processamento delle unità informative
- definisce le modalità di segmentazione e riassettaggio delle unità dati.

Il principale servizio offerto dall' IP è il trasferimento di unità informative. Il servizio è inaffidabile, senza sessione e basato sul paradigma Best effort, ma, negli ultimi anni, la crescita dei servizi multimediali ha reso necessario il trasferimento di flussi con vincoli sul ritardo (*time bounded*) e sull'integrità informativa, quindi su IP viaggiano anche pacchetti che possiamo definire GB.

Il sistema preso in considerazione deve essere in grado di trattare flussi di dati con vincoli sul ritardo di trasferimento ed è per questo che è stato necessario considerare il modello di servizi integrati INTSERV (Integrated Services) che è in grado di fornire sia servizi a qualità garantita sia servizi BE. Tale modello si basa sul protocollo di riservazione delle risorse RSVP, trattato nel capitolo successivo insieme alla definizione dei servizi con qualità garantita e best effort.

Il protocollo IP tratta ciascuna unità informativa come un messaggio indipendente da tutti gli altri; non esistono pertanto, in questo strato i concetti di connessione e circuito logico; il protocollo IP è senza connessione. Il trasferimento dei dati può richiedere una loro segmentazione laddove le dimensioni delle unità informative

gestite dalle sottoreti siano inferiori alle dimensioni massime consentite alle stesse unità informative del TCP-IP. A tale scopo l'IP fornisce un meccanismo specifico per la segmentazione ed il riassettaggio dei propri dati. La scelta della dimensione del pacchetto IP non è casuale. Di seguito si capirà il perché le sottoreti componenti internet possono avere diverse limitazioni circa la massima lunghezza delle loro unità dati che ad esempio in una LAN Ethernet è di 1500 bytes.

La dimensione massima dell'unità dati di una sottorete è denominata in TCP-IP, Maximum Transfer Unit (MTU). Dovendo scegliere la dimensione di un datagramma IP, una possibile soluzione potrebbe essere quella di adottare un valore pari al minimo delle MTU delle sottoreti da attraversare. Ciò richiederebbe però uno scambio di informazioni di controllo per determinare tale valore minimo e, causerebbe delle inefficienze nel trasporto attraverso sottoreti con dimensioni di MTU maggiori del valore minimo. Come per altre problematiche, si è scelta una soluzione che sia la più semplice possibile e che non sia legata a particolari tecnologie delle sottoreti componenti internet. Ogni host che emette un datagramma IP può scegliere una qualsiasi dimensione per il datagramma stesso, purché inferiore alla dimensione massima di un datagramma pari a 65536 ottetti e superiore a quella dell'intestazione, pari a 40 bytes. Tipicamente la dimensione di un datagramma viene scelta pari alla MTU della sottorete a cui è connesso il sistema mittente. Ovviamente se la quantità di dati da trasferire è inferiore alla MTU prescelta, il datagramma avrà una dimensione minore della MTU stessa. Il solo vincolo che IP pone ai sistemi connessi ad internet è che i routers debbano accettare datagrammi di dimensione pari a quelli della MTU delle sottoreti a cui sono connessi e che tutti i sistemi debbono comunque accettare e gestire datagrammi di dimensioni almeno pari a 576 ottetti.

Al di sotto dello strato di rete troviamo lo strato di adattamento.

Compito di questo strato è adattare le unità informative provenienti dagli strati superiori (nel nostro caso, datagrammi IP) al tipo di servizio di trasferimento offerto dallo strato MAC.

Nello strato di adattamento usualmente vengono svolte funzionalità che sono comuni a qualunque protocollo di livello superiore che usufruisca dell'AL-servizio, come la segmentazione e la ricostruzione dei pacchetti di strato 3, nonché tecniche di protezione e recupero d'errore differenziate per classi di servizio supportate dalla rete di accesso. Vengono svolte inoltre funzionalità specifiche del particolare protocollo che si trova sopra ad AL, come la traduzione degli indirizzi IP in indirizzi locali del sistema (indirizzi MAC dei RT su cui sono attestati gli utenti terminali IP), e questo al fine di ridurre la quantità di informazione da trasferire sull'interfaccia radio. Un'altra funzionalità altrettanto importante è la classificazione dei pacchetti in transito, al fine di effettuare un "mapping" dei flussi di datagrammi IP che supportano una propria qualità del servizio, nelle classi di traffico del MAC.

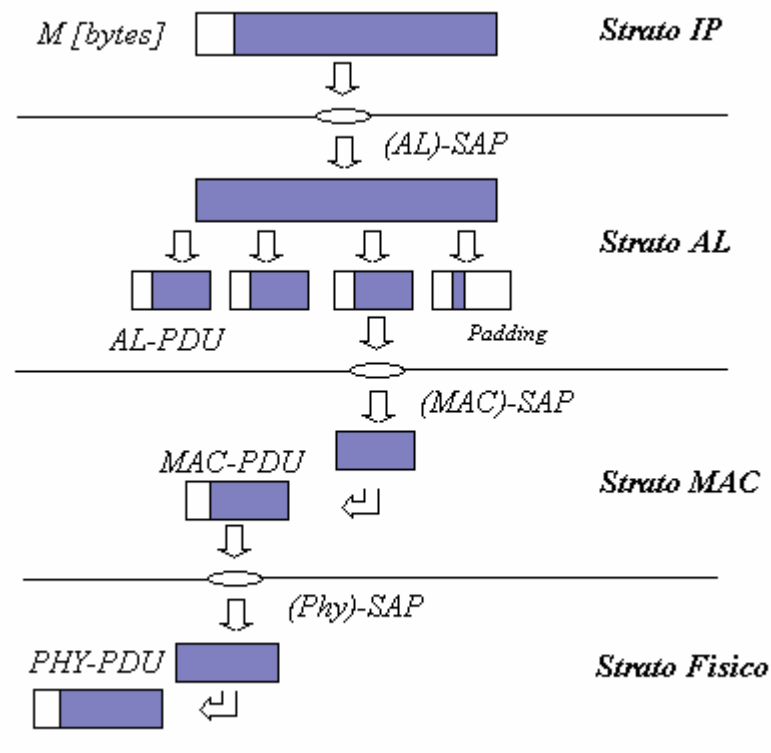


Figura 3.4 Suddivisione del pacchetto IP attraverso gli strati inferiori

3.2.1.1: Caratterizzazione delle sorgenti di traffico

Le sorgenti di traffico rappresentano il modo con cui l'utente emette l'informazione. Una sorgente, in prima istanza, può essere caratterizzata secondo due classi di parametri:

- *in base alla chiamata*: durata e tempo di presentazione della chiamata
- *in base all'emissione nell'ambito della chiamata*: capacità di emissione e caratteristiche di attività

Caratterizzare una sorgente vuol dire, quindi, definire statisticamente il comportamento della sorgente di traffico stessa.

Le sorgenti di traffico si possono raggruppare in quattro grandi famiglie:

1. Sorgenti Audio
2. Sorgenti Video
3. Sorgenti Dati
4. Sorgenti Multimediali

Una prima classificazione delle sorgenti di traffico può, dunque, essere effettuata in base alla modalità con cui i dati sono emessi dal codificatore.

Sulla base di questa premessa è importante definire i tre tipi di sorgenti sotto elencati:

- a) Sorgenti di tipo CBR (Constant Bit Rate).

Questo tipo di sorgente è caratterizzato dalla peculiarità di emettere ad un ritmo costante come si può vedere, in figura 3.5, dall'andamento "piatto", nel tempo, del rate di picco.

Un classico esempio è dato dalla voce codificata PCM.

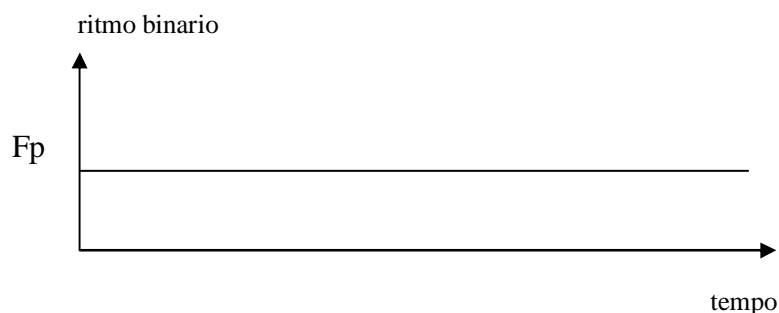


Figura 3.5: Comportamento di una sorgente CBR

b) Sorgenti di tipo VBR (Variable Bit Rate).

Questo tipo di sorgente ha un ritmo di emissione variabile nel tempo, come si deduce anche dalla figura 3.6.

Un esempio di questo tipo di sorgente è dato dalla codifica di immagini in movimento (MPEG).

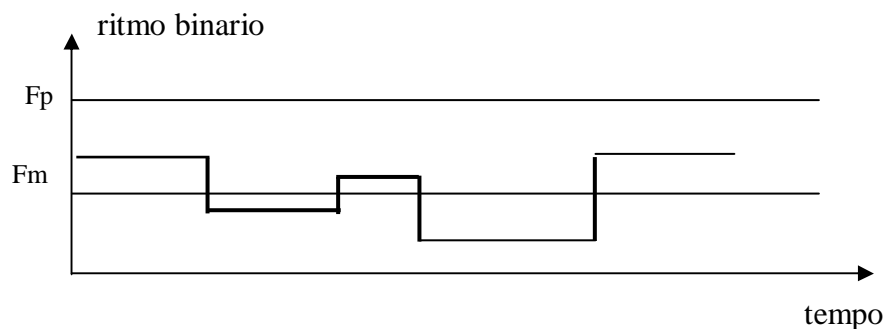


Figura 3.6: Comportamento di una sorgente VBR

c) Sorgenti di tipo VBR a due stati, anche dette sorgenti ON-OFF.

Queste sorgenti possono essere considerate come un caso particolare delle sorgenti definite al punto precedente. La caratteristica che le differenzia da queste ultime è che l'emissione o avviene al picco o non avviene.

Esempi di sorgente ON-OFF sono le sorgenti vocali con rivelazione di tratti vocali.

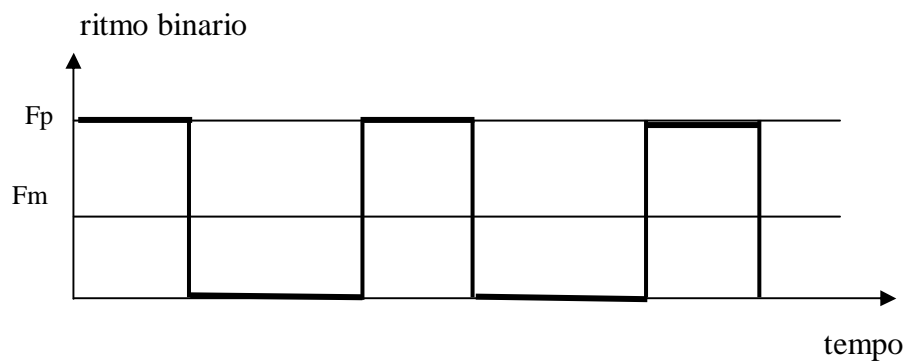


Figura 3.7: Comportamento di una sorgente VBR a due stati (ON/OFF)

I parametri necessari per poter caratterizzare un flusso sono:

- il ritmo medio r
- il ritmo di picco P
- la frequenza con cui i pacchetti si presentano al sistema, nel caso di traffico BE
- il massimo ritardo consentito t

La scelta dei parametri si è basata sostanzialmente su valori reali, presi dalla letteratura e da tabelle.

Nel pieno rispetto della suddivisione dei traffici fatta all'inizio di questo paragrafo, è stato supposto che il sistema fosse in grado di trattare sorgenti ON-OFF, sorgenti CBR e sorgenti BE; è stata inoltre considerata una ulteriore suddivisione di queste sorgenti in sottoclassi che siano rappresentative di valori tipici di traffico supportati all'interno di una rete wireless.

SORGENTI ON-OFF	SORGENTI CBR	SORGENTI BE
Sottoclassi Considerate		
FTP con qualità garantita	Audio	HTTP
Video-conferenza	Voce	FTP
Voce codificata ADPCM	Video	SMTP (e-mail)

Tabella 3.4: Classi e sottoclassi di traffico

Tra le sorgenti ON-OFF è stata individuato anche un tipo di sorgente, il trasferimento di file (FTP) che normalmente rientra tra le BE, come classe di servizio, ma che, come spiegato precedentemente, essendo vincolata da una certa integrità informativa, può essere considerata una sorgente a qualità garantita. Valori

caratteristici del ritmo medio di emissione per un tale tipo di sorgente variano nel range tra 0.1 e 10 Mbit/s.

Per quanto concerne la video-conferenza, il range di variazione dei rate va dai 28.8 Kbit/s per la video-conferenza a basso rate a valori di circa 8 Mbit/s.

Peculiarità del sistema in esame è l'aver considerato la sorgente voce rappresentata sia attraverso una modellizzazione come sorgente ON-OFF sia come sorgente CBR. Come sorgente ON-OFF si è scelta la voce codificata ADPCM avente rate di picco di circa 32 Kbit/s e un rate medio di 11.2 Kbit/s; come sorgente CBR è stata scelta la voce codificata PCM avente un rate tra i 48 Kbit/s ed i 64 Kbit/s. I ritmi di emissione relativi alle sorgenti audio, invece, variano tra i 256 Kbit/s e 1.5 Mbit/s.

Le sorgenti BE sono state identificate in base alle frequenze di arrivo dei pacchetti e rientrano tra le sorgenti di traffico poissoniane: l'arrivo dei pacchetti è infatti modellato come un processo di Poisson.

I valori presi in considerazione sono di circa 16 pacchetti/s per SMTP, circa 22 pacchetti/s per FTP e circa 15 pacchetti/s per HTTP. Tali valori sono direttamente ricavabili assumendo di conoscere il ritmo medio di emissione della sorgente (r) e la lunghezza media dei pacchetti L . Sulla base di questi due valori, è possibile calcolare il tempo medio di interarrivo dei pacchetti, pari a L/r , e da questo la frequenza media di interarrivo dei pacchetti

I ritardi ammissibili per le sorgenti *real-time* variano tra i 100 ms e qualche secondo. La tabella 3.5 mostra tipici ritardi di differenti applicazioni, sia *real-time* che non *real-time*.

Applicazione	Ritmo medio (kbps)	Ritmo di picco (kbps)	Max. ritardo (secondi)
e-mail, paging	0.01-0.1	1-10	<10-100
computer data	0.1-1	10-100	<1-10
telefonia	10-100	10-100	<0.1-1
digital audio	100-1000	100-1000	<0.01-0.1
video-conferenza	100-1000	1000-10000	0.001-0.01

Tabella 3.5: Ritmi di emissione e ritardi di varie applicazioni

3.2.2:Strato di Controllo di accesso al mezzo: MAC

La principale funzione che lo Strato MAC deve svolgere è quella di fornire un accesso multiplo agli utenti della WLAN, sfruttando in modo efficiente la risorsa radio ed implementando un adeguato meccanismo di allocazione dinamica delle risorse. Il MAC dovrà fornire sia un trasferimento ad alta trasparenza temporale per la classe di servizio a qualità garantita, tipica di applicazioni *time-bounded* come voce e video, sia un trasferimento ad alta integrità informativa per la classe BE, garantendo al tempo stesso equità di trattamento tra i vari terminali radio componenti il sistema. Tuttavia, il protocollo dovrà essere in grado di consentire la assegnazione e l'utilizzo da parte di un singolo RT di tutta la capacità disponibile all'interfaccia radio, permettendo quindi la massima flessibilità di accesso.

E' prevista una gestione differenziata delle classi di traffico a seconda della priorità attribuita a ciascuna.

Ulteriore obiettivo del MAC è quello di preservare l'ordine dei pacchetti, tentando di garantire l'assenza di fenomeni di "fuori sequenza" soprattutto per applicazioni di tipo real-time. Tale problema in questa tesi non ha ricevuto molta attenzione, dal momento che si è supposta una trasmissione ideale priva di errori per quanto concerne la ricezione dei dati e priva di errori relativamente a perdite di pacchetti: Si è supposto che tutto ciò che viene trasmesso arrivi correttamente e intatto a destinazione.

Nella fase di definizione dello strato MAC, allo scopo di poter valutare le scelte di progetto effettuate e di poter realizzare un simulatore, si è reso necessario procedere con un primo dimensionamento di massima delle risorse del sistema. Alcune delle scelte operate non riguardano esclusivamente funzionalità appartenenti allo Strato MAC, la cui definizione e progetto sono affidate all'Unità di Roma, ma anche aspetti tipici di altri strati di un'architettura di comunicazione come la WLAN in considerazione. Le scelte effettuate dall'Unità di Roma nel suo complesso possono essere considerate come una proposta per il dimensionamento di alcuni aspetti del sistema, tra cui:

- tempo di trama
- numero e durata dei Time Slot
- Sotto-portanti utili del sistema OFDM

Il primo elemento che deve essere dimensionato è la MAC-PDU utilizzata. La lunghezza della MAC-PDU dipende in generale da una serie di fattori in trade-off che richiedono da un lato di avere una lunghezza elevata per l'unità dati del MAC e dall'altro una di dimensione ridotta.

In generale, avere grandi unità informative di Strato MAC consente di ridurre il peso percentuale dell'informazione di *overhead* necessaria a gestire il protocollo, aumentandone così l'efficienza. D'altra parte in questo modo aumentano i ritardi di riempimento dell'unità dati ed i tempi di trasferimento si dilatano. Questo è dannoso per applicazioni con necessità di tempo reale. Ne segue che tale scelta deve risultare da un compromesso fra queste due esigenze.

Come accade in generale, la MAC-PDU in fase di definizione deve prevedere una parte di unità dati (*payload*) e una parte di informazione di controllo aggiuntiva (*overhead*).

Il punto di partenza verso la scelta delle dimensioni della MAC-PDU è stata la volontà di non segmentare il tipico pacchetto vocale di Strato IP (72 Byte). Fissato in questo caso un payload di 72 Byte, si è passati alla definizione dell'informazione di controllo ed al suo dimensionamento.

A questo scopo, è stata effettuata uno studio dei campi tipicamente presenti nella definizione dell'informazione di controllo degli standard IEEE 802.11 e ETSI Hyperlan 2. L'informazione di controllo aggiunta, dovrà offrire alcune funzionalità. Parte dell'*overhead* verrà dedicato all'indirizzamento, in modo che, in DL, il RN possa identificare il Radio Terminal di destinazione e, in UL, il RT possa "marchiare" la MAC-PDU così che il RN ne possa identificare la provenienza.

Un'altra funzionalità sicuramente presente è distinguere le diverse classi di servizio in modo da poter assicurare a ciascuna connessione il rispetto dei requisiti di

qualità accordati. Inoltre, le diverse classi di servizio possono avere differenti necessità di protezione (in generale, FEC nel caso di classe GB e ARQ nel caso di classe BE). Ad esempio, considerando la classe GB, se da un lato un BER pari a 10^{-4} è sufficiente a garantire l'integrità informativa per servizi come il trasferimento della voce, dall'altro non è sufficiente a garantire i parametri di qualità per quelle applicazioni ad elevato bit-rate (tipicamente video) che appartengono comunque nella classe di servizio GB. Un discorso analogo vale anche per applicazioni appartenenti alla classe BE.

Inoltre, risulterà necessario identificare con un opportuno numero di sequenza le MAC-PDU derivanti dalla segmentazione di uno stesso pacchetto IP e, utilizzando un ulteriore campo, quando la MAC-PDU in questione è l'ultima appartenente ad uno stesso pacchetto IP allo scopo di effettuare correttamente le operazioni di segmentazione e ricostruzione.

Dovrà essere definito un apposito campo per identificare la lunghezza in byte del payload, e implicitamente la lunghezza dei bit di riempimento (*padding*).

Naturalmente, l'informazione di overhead sarà protetta da un apposito campo informativo. L'informazione d'utente sarà invece protetta da un codice a rivelazione di errore (CRC), ad esempio nel caso di applicazioni dati, oppure da una codifica a correzione di errore "in avanti" (FEC), ad esempio nel caso di applicazioni con requisiti di qualità del servizio garantita. Il dimensionamento delle unità informative verrà approfondito nel prossimo capitolo.

3.2.2.1. Riservazione e allocazione della risorsa

Affinché sia possibile garantire la QoS negoziata per un determinato flusso di traffico, è necessario riservare per quel flusso un determinato quantitativo di risorse. In generale, tali risorse sono la capacità dei buffer presenti nei nodi della rete e la banda di ciascun ramo. In particolare, dato che in questa prima fase del Progetto MURST si è ritenuto di considerare una cella isolata della WLAN, non si ha visibilità delle reti esterne cui eventualmente è connesso il RN e quindi si è

interessati allo stato attuale unicamente alle regole di allocazione delle risorse all'interno della cella isolata, quindi per il RN e i diversi RT.

Per ora atteniamoci a studiare teoricamente le tecniche di assegnazione delle risorse, mentre nel prossimo capitolo, verranno descritte le procedure di scheduling implementate dal simulatore realizzato.

Allo scopo di determinare la quantità di risorse da allocare al singolo flusso di traffico, è necessario conoscere una descrizione almeno parametrica della sorgente. Una volta caratterizzata la sorgente, si è in grado di dimensionare la porzione di banda R in ogni ramo e la porzione di capacità B del buffer di ciascun nodo della rete che devono essere riservate per rispettare i requisiti di QoS accordati. In particolare, fra questi requisiti di QoS, il ritardo massimo di trasferimento di un pacchetto da estremo a estremo e la probabilità di overflow devono essere minore di valori prefissati.

3.2.2.2 Allocazione delle risorse tramite conoscenza perfetta della sorgente

Si definisce $A(t)$, con $t \geq 0$, il numero totale di bit emessi dalla sorgente nell'intervallo $[0, t]$. Una tale funzione in generale ha una forma cosiddetta a scalini e non è mai decrescente.

Ai fini dello studio delle regole di allocazione delle risorse, si è più interessati a conoscere il massimo numero di bit emessi dalla sorgente in questione in una finestra temporale di ampiezza τ . Una tale funzione $A^*(\tau)$ viene detta involucro di $A(t)$ e si ottiene da $A(t)$ immaginando di prendere una finestra temporale lunga τ , di spostarla lungo tutto l'asse positivo dei tempi e assegnare come valore alla funzione involucro quello per cui la differenza $A(t + \tau) - A(t)$ risulta massima.

In simboli:

$$A^*(\tau) = \max_{t \geq 0} \{A(t + \tau) - A(t)\}, \quad \tau \geq 0$$

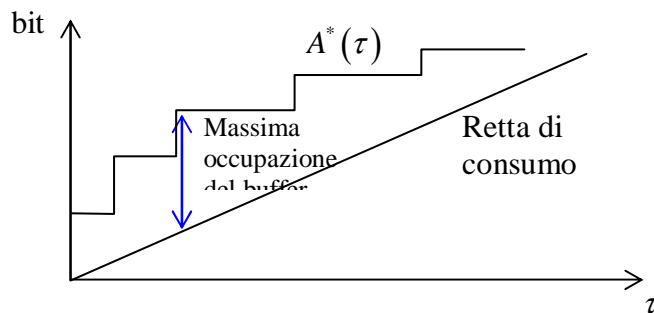


Figura 3.8: Involuppo $A^*(\tau)$ e retta di consumo

Il massimo numero di bit trasmessi da un canale di capacità R in un intervallo temporale τ è rappresentato in figura 3.8 dalla “Retta di consumo”: $R \cdot \tau$. Il numero di bit che non vengono trasmessi o persi è rappresentato dalla lunghezza del segmento differenza fra le ordinate delle due curve, avendo fissato l’ascissa τ , cioè è pari a $A^*(\tau) - R \cdot \tau$. Se si vuole evitare l’overflow del buffer e la conseguente perdita di dati, occorre evidentemente dimensionare il buffer in modo che:

$$B \geq \max_{\tau} \{A^*(\tau) - R \cdot \tau\}$$

Se B rappresenta il massimo riempimento del buffer che si verifica nelle condizioni indicate, essendo il buffer gestito in modalità FIFO, affinché l’ultimo bit presente in coda sia trasmesso da un canale di capacità R deve trascorrere un tempo:

$$t_{CODA_MAX} = \frac{\max_{\tau} \{A^*(\tau) - R \cdot \tau\}}{R}$$

Se il sistema introduce anche ulteriori ritardi di natura diversa la cui risultante è minore di $t_{SISTEMA_MAX}$ (il valore di questo tempo, pari a due volte il tempo di trama, verrà descritto nel prossimo capitolo), affinché il ritardo massimo totale introdotto

sia minore di un ritardo limite che chiamiamo Delay Max ed indichiamo con: D_{MAX} , deve essere:

$$t_{CODA_MAX} + t_{SISTEMA_MAX} \leq D_{MAX}$$

In particolare, è possibile determinare un R per cui:

$$\frac{\max_{\tau} \{A^*(\tau) - R \cdot \tau\}}{R} + t_{SISTEMA_MAX} = D_{MAX}$$

3.2.2.3: Allocazione delle risorse tramite modello DLB della sorgente

La trattazione precedente prevede la conoscenza di $A^*(\tau)$ ma risulta chiaramente improponibile trasferire attraverso i messaggi RSVP la sua intera descrizione, quindi nasce la necessità di fornirne una descrizione approssimata.

Si definisce “maschera” del flusso una qualsiasi curva $M(\tau)$ tale che sia maggiore o uguale del numero di bit emessi da quel flusso in una qualsiasi finestra temporale di dimensione τ ; in simboli risulta allora che $M(\tau) \geq A^*(\tau)$, $\forall \tau \geq 0$.

Affinché venga rispettata una condizione analoga alla precedente e dove si considera $M(\tau)$ al posto di $A^*(\tau)$, in generale dovrà essere garantita una banda

$R' \geq R$. Risulta evidente che se è verificata la condizione:

$$\frac{\max_{\tau} \{M(\tau) - R' \cdot \tau\}}{R'} + t_{SISTEMA_MAX} \leq D_{MAX}$$

è anche verificata la condizione:

$$\frac{\max_{\tau} \{A^*(\tau) - R' \cdot \tau\}}{R'} + t_{SISTEMA_MAX} \leq D_{MAX}$$

E' quindi necessario determinare una maschera dell'inviluppo sufficientemente semplice e tuttavia in grado di permettere di determinare un R' sufficientemente prossimo al valore di R che si sarebbe ottenuto considerando la vera curva di inviluppo, al fine di evitare una eccessiva sovrastima della banda e della porzione di capacità del buffer da allocare. La scelta adottata dal protocollo RSVP è quella di utilizzare come descrittori del traffico i parametri *Dual Leaky Bucket* (DLB):

- R [bit/s]
- p [bit/s]
- M [bit]
- b [bit]

Come si vede in figura 3.9, con i parametri DLB è possibile costruire un'approssimazione lineare a tratti della curva $A^*(\tau)$.

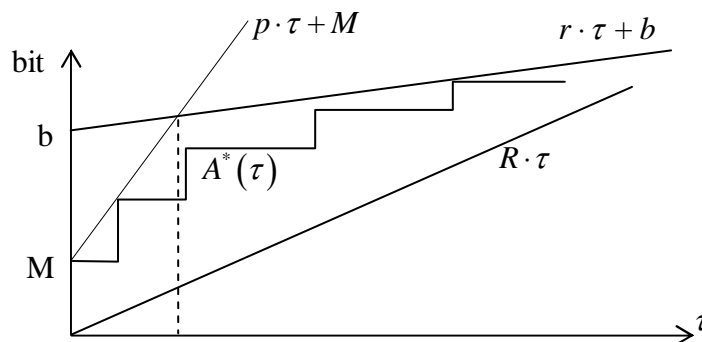


Figura 3.9: Determinazione dei parametri DLB che approssimano $A^*(\tau)$

La sorgente in considerazione si dice “coerente” con la maschera DLB se vale:

$$A^*(\tau) \leq \min(p \cdot \tau + M, r \cdot \tau + b)$$

dove $p \cdot \tau + M$ e $r \cdot \tau + b$ rappresentano le due rette in figura 3.9 e la funzione $\min(p \cdot \tau + M, r \cdot \tau + b)$ rappresenta proprio la maschera individuata dai parametri BLD con la condizione che $r < p$ e $M < b$.

Sostituendo allora l'espressione della maschera $M(\tau)$ nella condizione sui ritardi si ottiene:

$$\frac{\max_{\tau} \{ \min(p \cdot \tau + M, r \cdot \tau + b) - R' \cdot \tau \}}{R'} + t_{SISTEMA_MAX} \leq D_{MAX}$$

Come si intuisce dalla figura 3.9, La funzione *max* a primo membro restituisce un valore finito solo per $R \geq r$. In tal caso, la massima distanza tra la maschera DLB e la retta di consumo passante per l'origine di pendenza R si raggiunge nel punto di gomito della maschera:

$$\tau_G = \frac{b - M}{p - r}$$

Sostituendo τ_G , la condizione diventa:

$$\frac{M(\tau_G) - R' \cdot \tau_G}{R'} + t_{SISTEMA_MAX} \leq D_{MAX}$$

cioè:

$$\frac{\left[r \cdot \frac{b - M}{p - r} + b \right] - \left[R' \cdot \frac{b - M}{p - r} \right]}{R'} + t_{SISTEMA_MAX} \leq D_{MAX}$$

e dopo alcuni passaggi:

$$R' \geq \frac{p \cdot b - r \cdot M}{(D_{MAX} - t_{SISTEMA_MAX}) \cdot (p - r) + b - M}$$

ricordando che:

$$R' \geq r$$

si ottiene:

$$R' \geq \max \left\{ \frac{p \cdot b - r \cdot M}{(D_{MAX} - t_{SISTEMA_MAX}) \cdot (p - r) + b - M}, r \right\}$$

Come si è già evidenziato, la massima distanza fra la maschera DLB e la retta di consumo di pendenza R' rappresenta la massima occupazione del buffer. Affinché non vi siano perdite, deve allora essere allocata nel buffer una porzione di memoria B tale che:

$$B \geq \frac{p \cdot b - r \cdot M}{p - r} - R' \frac{b - M}{p - r}$$

Come chiarito in precedenza, la scelta dei parametri DLB deve essere tale che:

$$A^*(\tau) \leq \min(p \cdot \tau + M, r \cdot \tau + b)$$

ma è immediato vedere che ci sono infiniti valori dei parametri DLB b , r , p , M che soddisfano questa condizione. La scelta deve allora essere indirizzata nel trovare la coppie di valori b , r e p , M ottime. Se una maschera è interamente contenuta in un'altra è evidente che le risorse da allocare calcolate a partire da essa saranno minori o uguali di quelle calcolate a partire dalla maschera che la contiene. Osservando la figura 3.9 si deduce che deve esistere un solo punto in cui ciascuna retta che forma la maschera tocca l'involuppo $A^*(\tau)$. Chiamando quei due punti τ_1 e τ_2 , essi allora sono tali che:

$$\begin{aligned} A^*(\tau_1) &= p \cdot \tau_1 + M & \tau_1 &\leq \tau_G \\ A^*(\tau_2) &= r \cdot \tau_2 + b & \tau_2 &\geq \tau_G \end{aligned}$$

La prima equazione comporta immediatamente la determinazione del p ottimo. Infatti, poiché M può essere interpretato come numero di bit presenti nel buffer all'inizio dell'attività della sorgente, possiamo ipotizzare come valore di M la massima dimensione dei pacchetti. Detto questo, p si determina imponendo la condizione di "tangenza" fra la retta $p \cdot \tau + M$ e la curva involuppo $A^*(\tau)$.

La determinazione dei parametri b e r è più complessa. Infatti per ogni valore $b > M$ è possibile determinare un valore r per cui è soddisfatta la seconda equazione.

Occorre quindi individuare un ulteriore criterio di ottimizzazione al fine di ricavare i valori ottimi di r (r_{OTT}) e b (b_{OTT}). In questo studio, si è adottato il criterio di rendere minima la banda R allocata al fine di ottenere un ritardo massimo inferiore a D_{MAX} come calcolato in precedenza.

Se consideriamo di esprimere allora la banda da allocare come una funzione del parametro b :

$$R = R(p, M, r_{OTT}(b), b, D_{MAX})$$

b_{OTT} viene scelto tale che la funzione R raggiunge il suo minimo:

$$R_{MIN} = \min_b R(p, M, r_{OTT}(b), b, D_{MAX})$$

da cui:

$$r_{OTT} = r_{OTT}(b_{OTT})$$

E' importante infine notare che nella maggior parte dei casi la dinamica di generazione di una sorgente non è perfettamente nota ma si conosce di questa una descrizione statistica il più della volte approssimativa. Infatti, a meno che non si tratti di una sorgente precedentemente registrata, tipo un filmato MPEG memorizzato in un archivio, non si ha modo di calcolare a priori la curva di involuppo e quindi i parametri DLB ottimi.

In questi casi i parametri DLB vengono associati a classi generiche di traffico che comprendono un' ampia gamma di sorgenti, spesso anche notevolmente differenti. Questo comporta in generale un sovradimensionamento delle risorse allocate.

3.2.3: Strato fisico

Attraverso la descrizione fatta nel capitolo 2, delle diverse tecniche di modulazione combinate con i differenti schemi di accesso, si è giunti alla conclusione che la migliore scelta per ottenere un buon compromesso tra flessibilità, complessità e prestazioni, è quella della tecnica di modulazione OFDM-CDMA nella tratta di Downlink e della tecnica di modulazione OFDM-TDMA nella tratta di Uplink. Confrontiamo le due strategie. La modulazione OFDM è stata scelta per limitare la selettività in frequenza del canale radio, del resto l'emissione in parallelo di segnali a banda stretta, implica uno spettro suddiviso in più sottocanali affetti da fading piatto. Numerose considerazioni a riguardo sono già state fatte nel precedente capitolo.

La tecnica CDMA è stata considerata come schema d'accesso ideale per supportare servizi multimediali, grazie alla sua capacità di adattamento alla natura asincrona del traffico multimediale, che consente di fornire un trasferimento informativo maggiore di quello offerto dalle altre tecniche di accesso.

Ulteriore vantaggio conseguente alla scelta di OFDM-CDMA è relativo al fatto che i segnali usati possono essere facilmente trasmessi e ricevuti usando la FFT (Fast Fourier Transform) senza aumentare la complessità del ricevitore e del trasmettitore ed ottenendo contemporaneamente un'alta efficienza spettrale dovuta alla minima spaziatura tra le sottoportanti.

Il sistema OFDM-CDMA si presta bene quindi ad un accesso multiplo poiché utenti diversi usano lo stesso insieme di frequenze ma un codice diverso che sarà ortogonale a tutti gli altri.

Da quanto appena detto risulta ben visibile la caratteristica importantissima dell'OFDM-CDMA che consiste in un più facile recupero del segnale in condizione di canale non buone. Nella figura sotto vengono messi a confronto gli spettri di

densità di potenza di un segnale proveniente da un DS-CDMA e quello di un MC-CDMA.

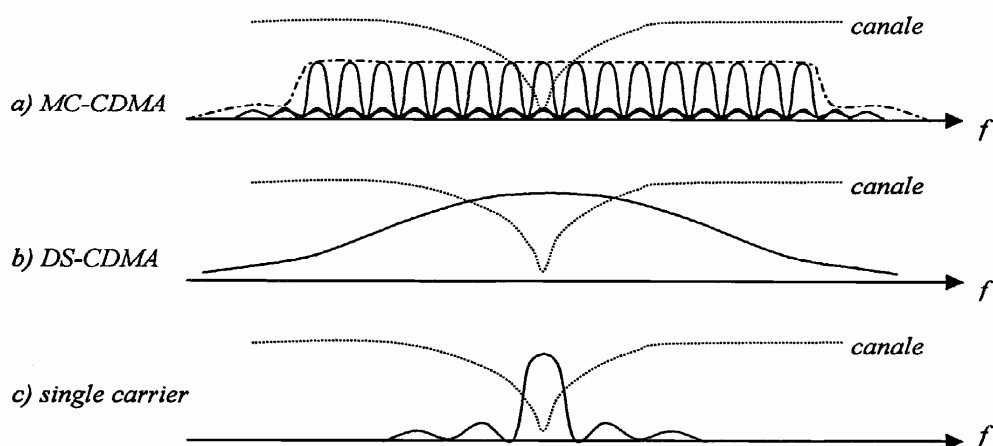


Figura 3.10 Spettro di a) Segnale proveniente da MC-CDMA (multiportante a banda larga); b) segnale proveniente da un DS-CDMA (singola portante a banda larga); c) Segnale a singola portante a banda stretta.

Come si nota facilmente, mentre nel caso DS-CDMA, l'aver usato un codice in tempo che modula il simbolo porta ad avere un unico lobo principale molto largo intorno all'unica portante del sistema, nel MC-CDMA lo stesso simbolo è ripetuto su tutte le sottoportanti del sistema. Un eventuale *notch*, come mostrato in figura, cancellerebbe il segnale nel caso DS-CDMA ma non nel caso MC-CDMA, in cui può essere recuperato entro un certo limite di rapporto segnale a rumore, dalle altre sottoportanti.

Per quanto riguarda l'Uplink, invece, l' OFDM viene combinato con il TDMA: questa tecnica ha il vantaggio di un ridotto consumo di energia in quanto ogni ricevitore lavora solamente quando è il suo "turno", temporalmente parlando. L'elaborazione del segnale avviene in istanti ben precisi seguiti da periodi di

riposo, e tali istanti sono individuati dal Paging Channel, per la ricezione, e dall' Allocation Channel, per la trasmissione. Tale tecnica di modulazione è la più semplice da implementare in quanto tutti i sottocanali in ogni simbolo OFDM hanno la stessa origine e questo evita problemi che potrebbero insorgere da una mancata sincronizzazione. Questo, del resto, è il motivo per cui in Uplink adottiamo l' OFDM-TDMA, anziché altre tecniche come l'OFDM-CDMA o l'OFDM-FDMA: in questi casi, più utenti contribuirebbero ad un singolo simbolo OFDM e la mancata sincronizzazione tra le sorgenti determinerebbe un sistema instabile. [9] Altre problematiche a riguardo verranno affrontate in seguito.

L'ultimo aspetto da considerare è la scelta del numero di risorse da utilizzare nelle strutture che abbiamo definito come “matrice dei codici” per il DL e “vettore dei time slot” per l'UL. Rifacendoci agli standard IEEE 802.11 e HIPERLAN2, in entrambi, il numero di sottoportanti considerate è 52, di cui 48 utili al trasferimento dati e 4 cosiddette “pilota”, utilizzate per la segnalazione ed il controllo; da qui la scelta di considerare 52 codici per la struttura matriciale che permetteranno di trasmettere in downlink 52 MAC-PDU in parallelo in ogni TS e, quindi, 312 unità informative per trama. Le scelte fatte per la gestione dell'Uplink, già descritte precedentemente, derivano e dipendono direttamente dalle decisioni prese per il Downlink.

CAPITOLO 4

LO STRATO MAC

4.1: OBIETTIVI DELLO STRATO MAC

La principale funzione che lo Strato MAC deve svolgere è quella di fornire un accesso multiplo agli utenti della WLAN in considerazione, sfruttando in modo efficiente la risorsa radio ed implementando un adeguato meccanismo di allocazione dinamica delle risorse.

Il MAC dovrà fornire sia un trasferimento ad alta trasparenza temporale per la classe di servizio a qualità garantita, tipica di applicazioni *time-bounded* come voce e video, sia un trasferimento ad alta integrità informativa per la classe BE, garantendo al tempo stesso equità di trattamento tra i vari terminali radio componenti il sistema per quanto riguarda tale classe di traffico. Nel presente lavoro verrà presa in considerazione solamente una categoria BE, senza specificare i vari livelli di priorità interni ad una stessa classe di sorgenti e quindi senza soffermarsi sui requisiti richiesti da alcuni servizi o vincoli temporali e qualitativi imposti. Tuttavia, il protocollo dovrà essere in grado di consentire la riservazione e l'utilizzo da parte di un singolo RT di tutta la capacità disponibile all'interfaccia radio, permettendo quindi la massima flessibilità di accesso.

Oltre ai servizi "time-bounded" nominati in precedenza, il MAC deve essere in grado di supportare differenti tipologie di traffico con diverse priorità.

Altro requisito da imporre al MAC è quello di consentire un trasferimento robusto e ad alto *throughput* delle unità informative, al fine di utilizzare in modo efficiente la risorsa di trasferimento, limitando al tempo stesso la segnalazione necessaria a raggiungere questo scopo.

Il MAC deve essere in grado di preservare l'ordine dei pacchetti, garantire cioè l'assenza di fenomeni di "fuori sequenza", il che è importante per applicazioni tipo voce, audio e video. E' da ricordare che le nostre ipotesi di lavoro includono un canale privo di errori e una probabilità nulla di perdere pacchetti.

Una caratteristica importante del traffico sulle wireless LAN è che il traffico sulla tratta di downlink, in generale, è molto più pesante di quello che si registra sulla tratta di uplink. Un progetto di un buon MAC non può prescindere da questo.

Il protocollo di accesso al mezzo deve supportare anche comunicazioni multicast e broadcast.

Dal momento che lo scopo primario di una WLAN è offrire un servizio a dei terminali mobili e poiché i terminali mobili tipicamente sono svincolate dalla rete energetica tradizionale, ma utilizzano fonti di energia finite, il MAC deve poter operare in trasmissione e ricezione in modo efficiente. A questo proposito si sente l'esigenza di una qualche forma di *handshake* fra terminali (Radio Terminal, RT) e stazione radio-base (Radio Node, RN) allo scopo di ottenere sincronizzazione, controllo di potenza, scambio di informazioni di stato. In effetti, si vedrà in questo capitolo come il MAC definito preveda appositi "Canali di Segnalazione" a questo scopo (Paging Channel, Allocation Channel, Request Channel). Il controllo e la gestione della potenza è un aspetto molto importante nelle W-LANs, sia per il motivo appena detto, sia, e le due cose sono interallacciate, per non incidere negativamente sull'ambiente a causa dell'inquinamento elettromagnetico.

Infine, il protocollo di accesso al mezzo deve essere strutturato in modo tale da mantenere bassa la complessità hardware e software dei terminali per renderli poco costosi e di semplice realizzazione.

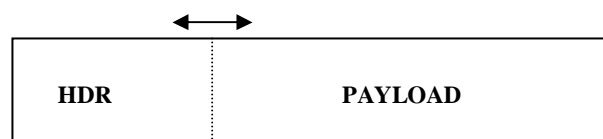
4.2: DIMENSIONAMENTO UNITÀ INFORMATIVE E CONTROLLO CENTRALIZZATO

Nelle classe delle WLAN con topologia a stella, cui appartiene anche la Wireless LAN in esame in questo studio, è possibile individuare due canali logici: il canale

di downlink (DL) attraverso cui il Radio Node (RN) dialoga con i vari Radio Terminal (RT) e il canale di Uplink (UL) attraverso cui, in modo condiviso, i vari RT dialogano con il RN.

Per il dimensionamento della MACPDU si è preso come riferimento il tipico pacchetto IP vocale (72 bytes), per il quale si è verificato che l'informazione di controllo può essere contenuta agevolmente in *0dB*.

Il protocollo utilizza comunque una MAC-PDU di formato fisso, la cui dimensione è stata allora fissata a 90 Byte, indipendentemente dalla particolare connessione. Le dimensioni relative del payload e dell'header non sono però fisse e dipendono dal tipo di sorgente (voce, dati, ...), allo scopo, fra gli altri, di garantire una diversa codifica di canale in funzione dei requisiti di qualità accordati alle diverse connessioni.



A questo punto è importante sottolineare che, allo scopo di realizzare il simulatore, si è ipotizzato che la dimensione del payload sia effettivamente di 72 Byte per ogni tipo di sorgente e, di conseguenza, quella dell'overhead di 18 Byte.

Il passo successivo è la definizione del Periodo di Trama. In questo caso la scelta è stata operata introducendo il concetto di *sorgente elementare*. Si definisce "sorgente elementare" la tipica codifica PCM del segnale vocale che corrisponde a considerare un flusso CBR a 64 Kb/s.

Si vuole che la sorgente elementare generi una MAC-PDU vocale per ogni periodo di Trama T , che quindi vale:

$$T = \frac{72 \cdot 8bit}{64000bit / sec} = 9ms$$

A questo punto, si passa a definire il numero globale di risorse da allocare all'interno della singola trama. Il numero di risorse allocabili dipende da quanti Time Slot sono contenuti in una Trama e quanti codici (quante sottoportanti) sono supportati dal sistema di trasmissione. Si è scelto di dimensionare il sistema introducendo 6 Time Slot per trama in DL, con un utilizzo di 52 codici per ogni TS, e, conseguentemente, 312 in UL, così da avere lo stesso numero di risorse allocabili e quindi equilibrare la capacità nei due versi di comunicazione.

Per ciò che riguarda il DL, consideriamo un sistema che supporta 52 codici differenti (vedi figura 4.1):

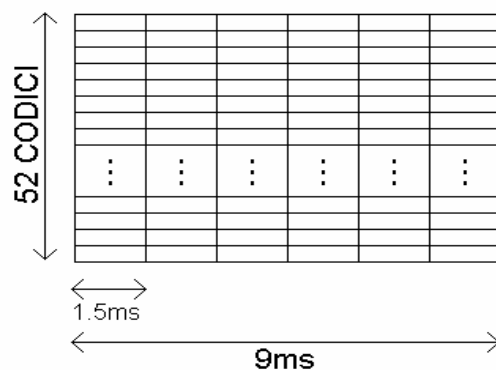


Figura 4.1: Dimensionamento della struttura a trama in downlink

In base alle scelte operate, per ogni trama è possibile trasmettere 312 MAC-PDU. Pertanto, per ogni trama è allocabile una capacità lorda equivalente a 312 sorgenti elementari. Si tratta di una capacità lorda poiché, nell'assegnare le risorse agli utenti MAC, occorre riservare, per ogni trama, alcune PDU per i canali di segnalazione broadcast (ad esempio il Canale di Paging, il canale di Allocazione). All'interno di una determinata coppia <Time Slot, Codice> viene trasmessa una MAC-PDU codificata (l'utilizzo dei codici permette la trasmissione contemporanea di 52 MAC-PDU nello stesso Time Slot).

Si può allora ricavare il ritmo binario del segnale aggregato:

$$720\text{bit} \times 52 = 37440\text{bit} \quad \text{in } 1.5\text{ms}$$

corrispondenti a:

$$R = \frac{37440 \text{ bit}}{0.0015 \text{ s}} = 24.96 \text{ Mb/s}$$

Questo è il ritmo binario del segnale aggregato in aria.

Il dimensionamento della trama per l'Uplink è mostrato in figura 4.2 e si nota che, a parità di durata della trama e di numero di risorse allocabili, la durata del singolo TS risulta essere 52 volte minore di quella relativa al DL.

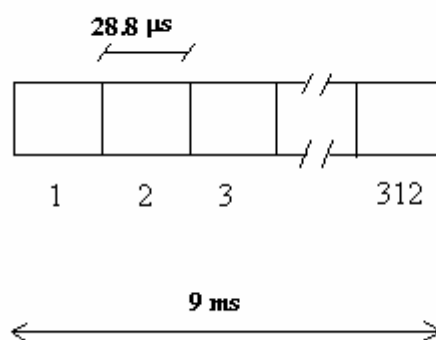


Figura 4.2: Dimensionamento della struttura a trama in Uplink

Ipotizzando, così come per il DL, che la singola risorsa sia sufficiente ad un RT per trasmettere l'unità informativa, a parità di durata della trama (9ms) e di ritmo binario aggregato in aria, si vede che la durata del singolo TS per l'UL vale:

$$T_{\text{Time-Slot}_{UL}} = \frac{(90 \times 8) \text{ bit}}{24.96 \text{ Mb/s}} = 28.846 \mu\text{s}$$

I risultati ottenuti, in realtà, sono in difetto poiché non è stata considerata l'estensione ciclica di ogni simbolo OFDM, che, d'altra parte, non può essere dimensionata senza una stima del massimo valore di *delay spread*.

A questo punto è possibile ricavare la capacità che lo Strato MAC è in grado di assegnare per la trasmissione di unità informative. Poiché la capacità corrispondente all'assegnazione di un elemento della matrice dei codici è pari a 64 Kb/s, in totale il MAC può allocare:

$$C = 64Kb/s \times 52 \times 6 = 19.968Mb/s$$

la medesima cosa vale per l'UL considerando un numero totale di risorse sempre pari a 312:

A questa capacità lorda va sottratta la capacità utilizzata dal sistema, in DL per i canali di segnalazione broadcast, che sono il canale di Paging (Paging Channel, PagCh) ed il canale di allocazione (Allocation Channel, AlCh) ed in UL dove il canale logico di segnalazione è rappresentato dal canale delle richieste (Request Channel, ReqCh). Vengono considerati questi canali dal momento che sono gli unici necessari per effettuare lo scheduling.

Il canale di Paging è trasmesso in DL e consente di comunicare al generico RT quali sono le risorse trasmissive all'interno della prossima trama, sulle quali ci sono delle unità dati a lui indirizzate (dal RN al RT).

L'ovvio vantaggio di questo metodo di accesso al mezzo utilizzato per la tratta in DL è che i terminali in ricezione devono "ascoltare" solo in determinati periodi di tempo (in particolare, in determinati TS) utilizzando solo determinati codici, in aggiunta ad una certa flessibilità di allocazione delle risorse con qualsiasi criterio

Il Request Channel, utilizzato in UL, serve ai RT per fare richiesta di risorse al fine di poter trasmettere le MAC-PDU. Sarà proprio l'Allocation Channel a comunicare a ciascun RT quanti e quali sono i TS in cui trasmettere.

In fase di progettazione si sono confrontate due modalità di controllo: una centralizzata, l'altra distribuita.

Nella modalità *centralizzata*, le informazioni sulle richieste di capacità sono comunicate dai RT al RN, il quale decide le allocazioni per poi comunicarle ai RT sull' AlCh.

Nella modalità *distribuita*, le informazioni sulle richieste di capacità sono rese note dal RN a tutti i RT. Ogni terminale attestato sull'interfaccia radio esegue un algoritmo distribuito di allocazione delle risorse basato sulle richieste di tutti gli altri RT e determina in modo autonomo la propria assegnazione di capacità.

Pur riconoscendo una buona dinamicità al secondo meccanismo, ci si è orientati verso la soluzione centralizzata per una maggiore semplicità nella gestione della segnalazione e l'ovvia maggior semplicità, hardware e software, dei terminali. In tale ottica, il ReqCh è utilizzato dai RT per effettuare le richieste di capacità, mentre l' AlCh è utilizzato dal RN per comunicare ai diversi RT quali sono le risorse loro assegnate per trasmettere sull'interfaccia radio in UL.

Le informazioni d'utente sono trasferite sull'interfaccia radio in modalità "senza collisioni". Queste sono fondamentalmente un problema dell' UL e dovrebbero essere evitate non solo per riuscire a raggiungere un alto throughput sull'interfaccia radio ma soprattutto al fine di rispettare i vincoli sul ritardo di trasferimento per il traffico GB. Per questo motivo, si è scelto per il sistema in esame un approccio senza collisioni per tutte le classi di traffico considerate.

Così come per i dati, anche per la segnalazione emessa dai RT sono possibili due approcci diversi: uno *senza collisione*, l'altro ad *accesso casuale*.

Il primo approccio è quello classico, nel quale la capacità di segnalazione è associata staticamente ad ogni RT, che periodicamente accede o ascolta un canale di segnalazione a lui dedicato, mentre il secondo si adatta bene al caso di segnalazione orientata al messaggio e guidata dagli eventi. Nella definizione della segnalazione utilizzata dal protocollo MAC, nell'ambito di questa tesi, è stato considerato solamente il primo approccio.

4.3: CANALI LOGICI E STRUTTURE UTILIZZATE

A questo punto bisogna entrare più in dettaglio nella struttura delle trame.

In quella di DL, mostrata in figura 4.3, parte del primo TS è occupata dai canali di segnalazione definiti precedentemente.

In fase di progettazione, si è scelto di costruire un canale di Paging a lunghezza fissa, che obbliga il RN a trasmettere l'informazione di segnalazione verso tutti i RT, anche se alcuni di essi sono inattivi. Sebbene questa soluzione sia inefficiente in termini di banda richiesta rispetto ad un canale di segnalazione a lunghezza variabile dove vengono trasmesse solo le informazioni relative ai RT attivi, è stata preferita la semplicità della prima scelta, anche perché scopo di questo lavoro non è valutare l'efficienza della segnalazione relativa alla allocazione delle risorse.

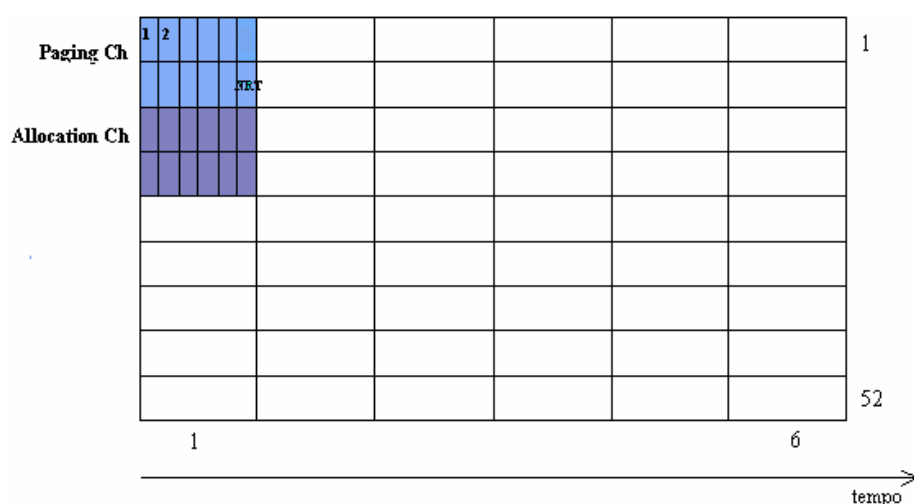


Figura 4.3: Struttura della Trama di Downlink

Il canale di Paging è distribuito su un solo TS e su un insieme di codici (in figura 4.3 si è immaginato fossero 2, ma la scelta è meramente progettuale e facilmente modificabile). Ognuna delle MAC PDU impiegate per la trasmissione del Paging Channel contiene un numero s di *minislot* i quali, trasportano l'informazione relativa ad un singolo RT. Il RN, una volta deciso, attraverso un apposito algoritmo di scheduling, il numero di MAC-PDU che intende dedicare a ciascuna connessione

nella prossima matrice di trama, deve decidere come posizionare queste MAC-PDU all'interno della trama. Le risorse disponibili in una trama sono "tutte uguali", poiché è stato ipotizzato un canale radio privo di errori. L'assegnazione di una risorsa ad una determinata connessione RN-RT comporta che la MAC-PDU trasmessa su quella risorsa venga ricevuta correttamente dal RT, qualunque sia la sua posizione all'interno della trama.

In considerazione di questo, per non dare nessuna preferenza nell'assegnazione delle risorse della matrice dei codici ai vari RT, la disposizione effettuata dal RN delle MAC-PDU all'interno della trama è *casuale*; in altre parole, dopo aver stabilito il numero di MAC-PDU che saranno dedicate ad ogni connessione, il riempimento della trama è effettuato tramite estrazione di una variabile aleatoria a distribuzione uniforme.

Di conseguenza ogni minislot deve essere in grado di comunicare al RT corrispondente le coordinate delle risorse della prossima trama dove dovrà "ascoltare" MAC PDU a lui dirette.

La soluzione adottata per la trasmissione del Paging Channel "in parallelo", cioè su un solo TS ma utilizzando H codici, risulta più efficiente rispetto alla soluzione cosiddetta "in serie", cioè su un solo codice ma su H TS, poiché riduce il tempo necessario ad effettuare l'allocazione, a parità di banda utilizzata dall'intero Paging Channel.

In fase di progettazione, è stato considerato che una volta che il RN ha trasmesso il canale di Paging, esso deve essere correttamente ricevuto ed interpretato dai terminali; al fine di permettere ai RT di capire da dove leggere le informazioni a lui dirette, si è considerato di lasciare 1 Time Slot fra il termine del Paging Channel e il primo Time Slot in cui effettivamente potrebbe trovarsi una MAC PDU diretta a uno dei RT attivi e che ha "ascoltato" il Paging Channel. Dunque l'informazione trasportata dal Canale di Paging si riferisce ad una struttura che ha la stessa dimensione di una trama di DL, a meno di una traslazione fissa di due Time Slot, come si può vedere in figura 4.4:

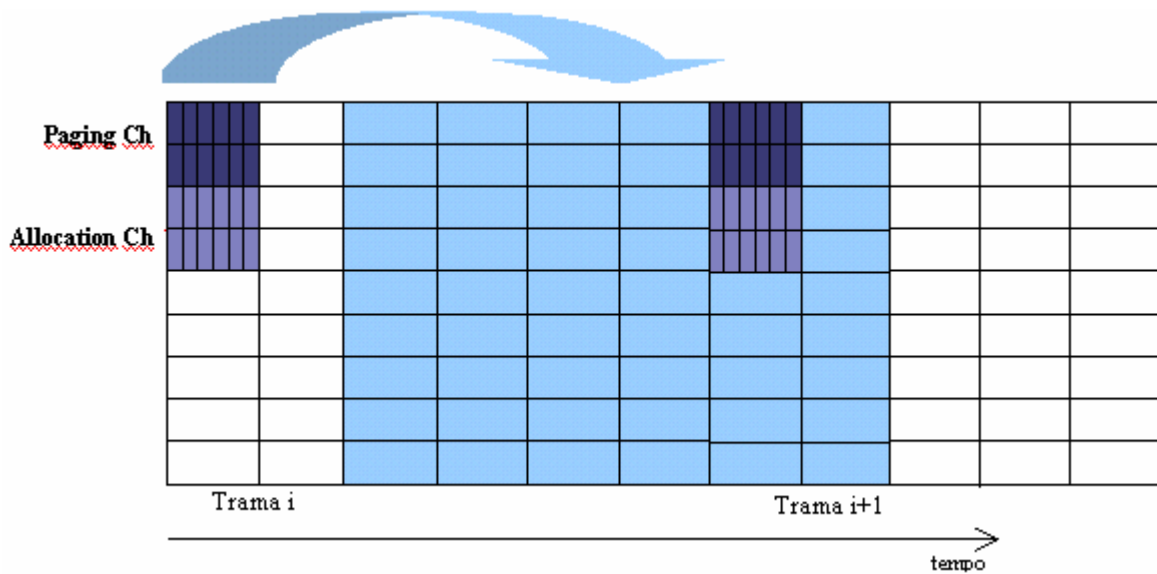


Figura 4.4: Struttura a Trama e Matrice dei Codici sulla Tratta in Downlink

L'informazione trasportata dal Paging Channel si riferisce all'area evidenziata sulla destra della figura 4.4.

Questa zona è chiamata "*Matrice dei Codici*" e, all'interno del simulatore, risulterà assai importante la distinzione fra le due strutture, Trama e Matrice dei Codici.

Qualcosa di analogo è stata concepita in UL: il TS utilizzato per la segnalazione delle richieste (ReqCh) è il primo e al suo interno troviamo dei mini time-slot, ognuno dei quali trasporta le informazioni relative ad un RT, ma questi aspetti verranno approfonditi nel seguito, parlando del simulatore. Come si può vedere in figura 4.5, i RT fanno richiesta di poter trasmettere comunicando al RN lo stato delle code, GB e BE, ma l'Allocation Channel è temporalmente sfasato, per cui la allocazione delle risorse, e quindi la posizione del Vettore dei TS, risulta essere traslato in tempo di 2 TS della trama di DL corrispondenti a 104 TS in uplink (vedere anche figura 6.7). Questi parametri possono essere modificato senza perdita di significato, ma la loro scelta non è casuale: tale dimensionamento è il frutto di un'attento studio sui tempi necessari per un dialogo fra il RN ed i RT e verrà ben illustrato nel Capitolo 6. La zona colorata indica i TS in cui si andrà a trasmettere

ed è quindi l'insieme dei TS a cui si riferisce l'Allocation Channel, tale vettore fittizio prende il nome di "Vettore dei Time Slot".

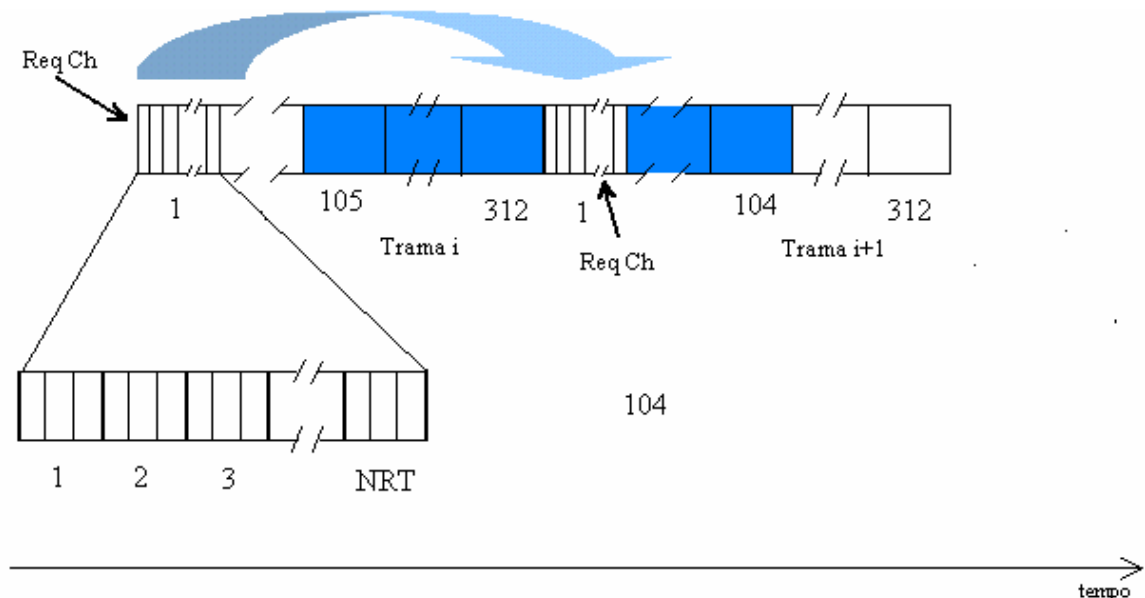


Figura 4.5: Struttura a trama e Vettore dei Time Slot nelle tratta in Uplink

Il canale di richiesta ReqCh consente ai vari RT di inviare le richieste di allocazione di opportunità di trasmissione al RN. Questo significa che ogni RT, sulla base dello stato delle proprie code di traffico, tramite l'accesso al ReqCh, chiede l'assegnazione di una quota parte della capacità disponibile all'interfaccia radio.

Esistono diverse alternative per la struttura del ReqCh:

- accesso *dinamico* al canale delle richieste (cioè con collisione) per tutte le classi di servizio supportate dal MAC;
- accesso *statico* al canale delle richieste (cioè senza collisione) per tutte le classi di servizio supportate dal MAC;
- accesso *ibrido* al canale delle richieste che corrisponde ad un accesso *statico* per la classe GB ed ad un accesso *con collisione* per la classe BE

In generale il vantaggio di un accesso dinamico sta nel risparmio di banda, poiché il ReqCh deve essere dimensionato in modo da garantire un certo "grado di accesso" e può essere variato dinamicamente dal RN e comunicato su un canale diffusivo a

tutti i RT in accordo al numero di collisioni riscontrate.

La controparte di tale meccanismo di accesso dinamico, sta nel fatto di degradare, per alti carichi offerti, le prestazioni del sistema di accesso in termini di *throughput* e di ritardo di trasferimento, e può causare problemi di stabilità a lungo termine.

Al contrario, un accesso statico implica che una certa quantità di banda, nota a priori e costante nel tempo sia completamente dedicata al ReqCh anche se i RT componenti il sistema non sono attivi in un certo istante.

Per queste ragioni, almeno in questa fase dello studio e per quanto concerne questo lavoro è possibile immaginare un ReqCh ad accesso senza collisione e di dimensione fissata.

Data una panoramica di entrambe le tratte è a questo punto opportuno chiarire quanto vale il ritardo di accesso subito da una MAC-PDU di classe GB (ricordiamo che si tratta del contributo di ritardo dovuto al solo scheduling). In DL, tale valore è composto da due termini (si ricorda che questo ritardo non comprende il tempo di attesa nei buffer):

- il tempo di attesa per la prossima occorrenza di un Paging Channel (nel caso peggiore questo tempo è pari ad una trama: $6 \times 1.5 \mu s = 9 ms$)
- l'opportunità di trasmissione che nel caso peggiore può essere assegnata ad una MAC-PDU che riesca a partire nella prima matrice dei codici disponibile e, che è rappresentata dall'ultimo TS della matrice stessa, ovvero in termini analitici da:
 $6 \times 1.5 \mu s = 9 ms$.

In UL accade la stessa cosa: ci sono due contributi (dovuti allo scheduling) al ritardo della MAC-PDU:

- il tempo di attesa per l'occorrenza del prossimo Allocation Channel che, al peggio, è pari alla durata di una trama: $312 \times 28.8 \mu s = 9 ms$.
- l'istante di trasmissione della MAC-PDU che potrebbe essere l'ultimo TS del vettore dei time slot.

Ne deriva che il ritardo massimo totale di accesso sarà dato dalla somma dei due termini appena descritti:

$$T_{SISTEMA_MAX} = 2 \times T_{TRAMA} = 18 ms$$

4.4: ASSEGNAZIONE DELLE RISORSE : ALGORITMO DI SCHEDULING

Nel sistema preso in considerazione, per il progetto della nostra Unità di ricerca, le sorgenti a cui si fa riferimento, vengono distinte, inizialmente, in due classi, la classe GB (Guaranteed Bandwidth) e la classe BE (Best Effort). Di seguito presenteremo l'algoritmo di *scheduling* definito nella prima fase dello studio, considerando un ambiente di lavoro statico.

La riservazione delle risorse (BANDA) è fatta esclusivamente per i due tipi di sorgente a qualità garantita : sorgenti ON-OFF e sorgenti CBR.

Le risorse sono rappresentabili, all'interno dell'algoritmo di scheduling, in MAC-PDU/TRAMA. Questo valore è ricavabile a partire dal valore della banda RSVP calcolata nel paragrafo 3.2, sulla base delle caratteristiche della sorgente presa in considerazione.

Come già mostrato nella definizione del sistema, si è ipotizzata una architettura a strati in cui il MAC opera anche funzionalità di Strato di Adattamento e si trova logicamente sotto lo Strato di Rete (IP). Per poter mappare la banda calcolata dal Protocollo RSVP nella banda necessaria a Strato MAC è necessario tenere presenti le lunghezze dei pacchetti nei diversi Strati, comprensive dell' overhead di strato. Questo porta ad un valore di banda a strato MAC ricavabile dalla seguente formula iterata due volte, per tenere in considerazione anche l'overhead dovuto alle funzionalità di Strato di Adattamento:

$$BW_n = BW_{n+1} * \left\{ \left[L_{n+1} PDU / L_n SDU \right] * (L_n PDU / L_{n+1} PDU) \right\} \quad \text{bytes/s}^1$$

Tale banda, in bytes/s, deve essere convertita nell'unità di misura usata nello scheduling, MAC-PDU /TRAMA. Ciò è ottenuto, ponendo pari a BW il risultato della formula precedente, con il seguente calcolo:

¹ $n+1$ ed n , a pedice della lunghezza dei pacchetti, indicano l'appartenenza di un pacchetto allo Strato logicamente superiore o a quello sottostante.

$$BW_{MAC} = \frac{BW * NumeroTS * DurataTS}{L_{MACPDU}} \quad Mac - Pdu / Trama$$

Una volta stabilita la quantità di risorse da assegnare ad ogni flusso, bisogna accertarsi che queste risorse siano effettivamente consegnate a questo. La quantità di Banda assegnabile al traffico a qualità garantita è imposta indipendentemente dall'algoritmo di scheduling vero e proprio, infatti all'atto dell'ingresso nel sistema delle differenti sorgenti, il fornitore del servizio può decidere fino a quando inserire sorgenti di traffico a qualità garantita essendo vincolato ad un massimo consentito, imposto dalla capacità disponibile.

Questa operazione si riflette direttamente nell'implementazione della prima versione del simulatore e di quello relativo alla sola tratta di UL, dove l'utente ha la possibilità di fissare un valore per la variabile "CAPACITA'_DISPONIBILE", che regola, appunto, il limite massimo di MAC-PDU per trama assegnabili alle sorgenti GB.

Lo scheduling preso in considerazione è di tipo centralizzato e l'entità preposta all'allocazione delle risorse, il Radio-Node (RN), servirà in primo luogo la classe GB, che rappresenta la classe con priorità più alta e, solo successivamente quella BE, che rappresenta la classe a priorità più bassa.

Quella appena descritta è la linea generale seguita dalla procedura di scheduling, ma di essa abbiamo due varianti: la prima è quella applicata alla versione 1.0 del simulatore e al suo duale, quello relativo alla sola tratta di uplink, la seconda è quella utilizzata dal simulatore completo, UL_DL_FDD.

Le due versioni dello scheduling verranno descritte in dettaglio nel Capitolo 6.

4.4.1 Accettazione di Chiamata a Strato MAC per classe GB

Nel sistema che si sta descrivendo, le applicazioni che ricadono nella classe GB necessitano di limitazioni sia sui ritardi di trasferimento che sulle loro variazioni;

ciò implica la necessità di effettuare una riservazione di risorse (banda e locazioni di memoria) che sia in grado di garantire i requisiti prestazionali dichiarati.

Nel caso in esame si è assunto che tale funzionalità sia espletata tramite il protocollo RSVP.

Le applicazioni che in Internet richiedono un servizio a qualità garantita per svolgersi correttamente e che in accordo al paradigma degli IntServ ricadono nelle classi di servizio definite come Guaranteed Services e Controlled Load Services, sono a loro volta classificabili in due categorie:

- INTERACTIVE
- BUFFER-CONSTRAINED

Nel primo caso le applicazioni sono vincolate da un ritardo di riproduzione (*playback*) non adattativo che non può essere più piccolo del vincolo di ritardo da estremo a estremo. L'esatto valore del vincolo di ritardo dipende dalle caratteristiche interattive dell'applicazione.

Nel secondo caso le applicazioni sono vincolate dalla dimensione del buffer di ricezione, che non deve andare né in *overflow* né in *underflow*. Queste applicazioni possono non essere interattive e di conseguenza il vincolo di ritardo da estremo a estremo può essere relativamente grande.

Nel nostro caso consideriamo solo il primo tipo di applicazioni.

Per selezionare i parametri DLB necessari al calcolo della banda RSVP, il trasmettitore può usare diversi schemi di calcolo, alcuni dei quali sono per esempio:

- Schema Ideal OptRate
- Schema Practical OptRate
- Schema MaxRate

-Schema AvgRate (simile al " Sustainable Cell Rate" dell'ATM)

e ad ognuno di essi corrisponde una diversa scelta dei parametri b ed r già descritti nel capitolo precedente.

Una volta che il trasmettitore ha ricavato questi due parametri con uno degli schemi sopra riportati, si passa alla fase di allocazione di banda RSVP necessaria per soddisfare i requisiti imposti dall'applicazione.

L'allocazione della banda RSVP, sulla tratta radio della WLAN che stiamo descrivendo, è determinata tramite uno scambio informativo tra l'entità preposta al controllo di accettazione e l'entità di strato MAC che possiede la visione globale della banda allocata su tutta l'interfaccia radio.

In tal modo, affinché l'instaurazione di un nuovo flusso vada a buon fine, la procedura di Admission Control (AC) dovrà accertarsi che gli strati inferiori dispongano di una banda che può ricavarsi servendosi delle seguenti relazioni:

$$R_{AL} = R \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{L_{IP}}{L_{PAYLOAD_AL}} \right] \cdot (L_{PAYLOAD_AL} + L_{HEADER_AL})}{L_{IP}} \right\} \quad \text{byte/s}$$

$$R_{MAC} = R_{AL} \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{L_{AL_PDU}}{L_{PAYLOAD_MAC}} \right] \cdot (L_{PAYLOAD_MAC} + L_{HEADER_MAC})}{L_{AL_PDU}} \right\} \quad \text{byte/s}$$

$$R_{PHY} = R_{MAC} \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{L_{MAC_PDU}}{L_{PAYLOAD_PHY}} \right] \cdot (L_{PAYLOAD_PHY} + L_{HEADER_PHY})}{L_{MAC_PDU}} \right\} \quad \text{byte/s}$$

che rappresentano rispettivamente le bande che devono essere disponibili agli strati AL, MAC e allo Strato Fisico affinché un flusso per cui il AC ha calcolato una banda da riservare pari ad R, possa essere effettivamente accettato.

Valgono inoltre le seguenti relazioni sulle lunghezze delle unità informative appartenenti agli strati AL, MAC e fisico:

$$L_{AL_PDU} = L_{PAYLOAD_AL} + L_{HEADER_AL}$$

$$L_{MAC_PDU} = L_{PAYLOAD_MAC} + L_{HEADER_MAC}$$

$$L_{PHY_PDU} = L_{PAYLOAD_PHY} + L_{HEADER_PHY}$$

Nelle relazioni ora scritte, $L_{PAYLOAD}$ rappresenta la lunghezza in byte del carico utile dell'unità informativa che compete allo strato in esame, mentre L_{HEADER} rappresenta l'informazione di controllo aggiunta dallo strato considerato.

Tuttavia, l'insieme delle equazioni precedenti si modifica se si tiene conto dell'operazione di segmentazione illustrata nel Capitolo 3.

Infatti, la segmentazione interessa solo lo strato AL poiché vi è una corrispondenza uno ad uno tra unità informative di strato AL e quelle di strato MAC e di strato fisico.

In tal caso, le bande che dovranno essere disponibili agli strati AL, MAC e fisico per accettare un flusso per cui RSVP ha calcolato una banda R, si modificano nel seguente modo:

$$R_{AL} = R \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{L_{IP}}{L_{PAYLOAD_AL}} \right] \cdot (L_{PAYLOAD_AL} + L_{HEADER_AL})}{L_{IP}} \right\} \quad \text{byte/s}$$

$$R_{MAC} = R_{AL} \cdot \left\{ \frac{(L_{PAYLOAD_MAC} + L_{HEADER_MAC})}{L_{PAYLOAD_MAC}} \right\} = R_{AL} \cdot \left\{ 1 + \frac{L_{HEADER_MAC}}{L_{PAYLOAD_MAC}} \right\} \quad \text{byte/s}$$

$$R_{PHY} = R_{MAC} \cdot \left\{ \frac{(L_{PAYLOAD_PHY} + L_{HEADER_PHY})}{L_{PAYLOAD_PHY}} \right\} = R_{MAC} \cdot \left\{ 1 + \frac{L_{HEADER_PHY}}{L_{PAYLOAD_PHY}} \right\} \text{ byte/s}$$

Noto quindi R, l'entità preposta alle operazioni di AC interroga gli strati inferiori sulle rispettive disponibilità di banda.

Se le rispettive risposte dagli strati inferiori sono positive, allora potranno verificarsi le seguenti due situazioni:

- il flusso potrà essere instaurato, semplicemente verificando che la banda ancora disponibile all'interfaccia radio sia maggiore o uguale a quella calcolata nel suddetto modo, non preoccupandosi di riservare anche una certa quantità di memoria. In tal modo si garantisce il vincolo sul ritardo massimo, ma nulla si può dire sulla perdita di unità informative derivante da overflow dei buffer.
- il flusso potrà essere instaurato, verificando che la banda ancora disponibile all'interfaccia radio sia maggiore o uguale a quella calcolata nel suddetto modo, ma ponendo un ulteriore vincolo sulla quantità di memoria da riservare per il singolo flusso. In tal modo si garantisce non solo il vincolo sul massimo ritardo di trasferimento tollerabile dal flusso, ma si può controllare anche l'integrità informativa derivante da trabocco dei buffer.

Considerando poi quest'ultima situazione, sono possibili due ulteriori alternative:

- imporre perdita nulla nei buffer, cosicché per accettare un flusso si deve soddisfare un sistema di equazioni che assicura sia il ritardo massimo sia l'assenza di perdita per overflow.

- imporre una perdita non nulla nei buffer, il che consente quindi di poter accettare in generale un numero superiore di flussi visto il vincolo più lasco sulla quantità di memoria necessaria ad ogni flusso, ma che tuttavia non degrada, entro certi limiti, la qualità del servizio di trasferimento offerta dal sistema.

Noi prendiamo in considerazione la prima alternativa, definendo quindi, in base alla capacità dei buffer, se un flusso può essere accettato o meno, evitando a priori controlli successivi, congestioni e smistamento problematico dei pacchetti.

CAPITOLO 5

NECESSITA' E PROBLEMATICHE CONNESSE ALL'UTILIZZO DI UN SISTEMA ASIMMETRICO

5.1: NECESSITA' DI UTILIZZARE UN SISTEMA ASIMMETRICO

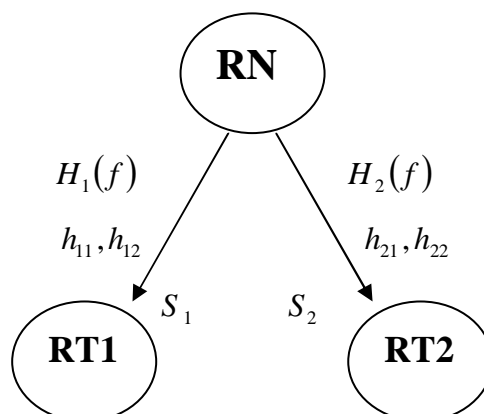
Nell'introduzione è stato illustrato l'obiettivo del progetto, cioè quello di definire uno strato MAC che supporti una trasmissione basata sulle tecniche OFDM-CDMA. E' stato già accennato il fatto che in realtà l'utilizzo del CDMA nella tratta di uplink potrebbe essere poco efficiente a causa della venuta meno dell'ortogonalità tra i codici. Questo è un problema prettamente di strato fisico, ma, essendo i vari strati, si, separati, ma interagenti ed interfaccianti, tale problema si ripercuote sull'intera pila protocollare e sulla trasmissione in generale.

E' necessario quindi aprire una parentesi sullo strato fisico e vedere in dettaglio cosa accade.

Ricordiamo innanzitutto che se si hanno a disposizione N codici, affinché essi siano ortogonali, la loro lunghezza deve essere almeno pari a N .

Per capire facilmente come vanno le cose, facciamo l' esempio di due utenti coperti dallo stesso RN e due codici a disposizione:

Tratta di Downlink:



dove con $H_1(f)$ $H_2(f)$ abbiamo indicato le funzioni di trasferimento relative ai due canali, con S_1 e S_2 i simboli che il RN deve trasmettere verso i corrispondenti RT e con h_{ij} il coefficiente che moltiplica il simbolo i tenendo presente l'influenza del canale j -esimo con l'ipotesi di attenuazione piatta nella sottobanda.

Consideriamo ora i codici di lunghezza due che dobbiamo utilizzare:

$$\begin{aligned} C_1 &: C_{11}, C_{12} \\ C_2 &: C_{21}, C_{22} \end{aligned}$$

dove i pedici hanno lo stesso significato di quelli dei coefficienti h .

Avremo allora che, sul primo canale, verrà trasmesso il simbolo:

$$S_1 \cdot C_{11} + S_2 \cdot C_{21}$$

mentre sul secondo canale avremo:

$$S_1 \cdot C_{12} + S_2 \cdot C_{22}$$

Considerando l'effetto della presenza di due canali e quindi tenendo in conto le funzioni di trasferimento, il RT1 riceverà il simbolo complessivo:

$$\begin{aligned} (S_1 \cdot C_{11} + S_2 \cdot C_{21}) \cdot h_{11} & \quad \text{sulla frequenza } f1 \\ (S_1 \cdot C_{12} + S_2 \cdot C_{22}) \cdot h_{12} & \quad \text{sulla frequenza } f2 \end{aligned}$$

mentre il RT2 riceverà:

$$\begin{aligned} (S_1 \cdot C_{11} + S_2 \cdot C_{21}) \cdot h_{21} & \quad (f1) \\ (S_1 \cdot C_{12} + S_2 \cdot C_{22}) \cdot h_{22} & \quad (f2) \end{aligned}$$

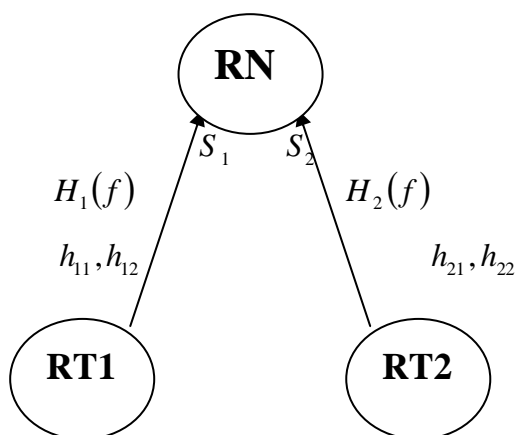
Supponendo che i RTs abbiano una certa conoscenza del canale tale da permettere una equalizzazione corretta, accade che i coefficienti h vengono elisi e resta:

$$(S_1 \cdot (C_{11} + C_{12})) = S_1 C_1 \quad (f1)$$

$$(S_2 \cdot (C_{21} + C_{22})) = S_2 C_2 \quad (f2)$$

A questo punto, sfruttando l'ortogonalità tra i codici, ogni RT può ricostruire correttamente il simbolo a lui trasmesso dal RN.

In Uplink le cose vanno diversamente; consideriamo lo scenario illustrato:



Accade che, focalizzando l'attenzione sul primo canale, il RN riceverà il simbolo:

$$S_1 \cdot C_{11} \cdot h_{11} + S_2 \cdot C_{21} \cdot h_{21}$$

che una volta equalizzato darà come risultato:

$$S_1 \cdot C_{11} + S_2 \cdot C_{21} \cdot \underbrace{\frac{h_{21}}{h_{11}}}_{C'_{21}}$$

La stessa cosa vale per il secondo canale in cui avremo:

$$S_1 \cdot C_{12} + S_2 \cdot C_{22} \cdot \underbrace{\frac{h_{22}}{h_{12}}}_{C'_{22}}$$

Come si vede, i codici in questione sono diventati:

$$C_1 : C_{11}, C_{12}$$

$$C_2 : C_{21}, C_{22}$$

che possono non essere ortogonali.

Lo stesso discorso si ripete se si analizza il secondo canale.

Questa non ortogonalità determina, in sede di ricezione, una non corretta rivelazione del simbolo che dà come risultato una parte utile, che è proprio il simbolo da rivelare, ed un termine aggiuntivo che sta a rappresentare l'interferenza multi utente (MUI).

Questa è la dimostrazione analitica del fatto che il MC-CDMA in UL perde di efficienza e qualità, di qui la necessità di utilizzare un'altra tecnica di accesso multiplo combinata con l'OFDM. Nel capitolo 2 sono già state illustrate e confrontate le varie strategie ed in particolare, al fine di eliminare il MUI, una valida alternativa è l'utilizzo del TDMA. Con tale tecnica ogni utente trasmette durante un ben preciso periodo di tempo, appunto il time slot, e nessun altro utente starà inviando dati contemporaneamente. La gestione corretta dei TS e la coordinazione tra i vari RT è affidata al RN. Il tipo di controllo considerato è infatti centralizzato, questo vuol dire che i terminali sono "passivi" e ricevono e trasmettono in base alle informazioni inviategli dal RN.

5.2: INSERIMENTO DELLE SORGENTI INDOTTE E VERIFICA SULLA BANDA

Come già chiarito precedentemente, questo lavoro di ricerca ha come obiettivo quello di definire un protocollo per lo strato MAC che riesca ad implementare una comunicazione, in downlink ed in uplink, e quindi un dialogo completo fra Radio Node ed i vari Radio Terminals. Per poter far questo è necessario chiarire una cosa:

una comunicazione non è mai “unidirezionale”, nel senso che, anche in caso di sola trasmissione o sola ricezione, in realtà avviene uno scambio reciproco di informazioni tra i due terminali. Questo vuol dire che anche il terminale che erroneamente viene considerato “inerte” o passivo, trasmette una certa quantità di dati proporzionalmente a quanto ricevuto. Tale proporzione dipende dal tipo di servizio, si va da un minimo che potrebbe essere quello dovuto ai riscontri durante un FTP o un SMTP ad un massimo che abbiamo nel caso di una comunicazione vocale: durante una telefonata, infatti, è corretto considerare la quantità totale di dati trasferita mediamente ripartita in parti uguali nei due versi.

Chiarito questo, è facilmente comprensibile che nel momento in cui nasce una sorgente, sia essa nel RN o nel RT, contemporaneamente nasce una sorgente “*indotta*” nel terminale corrispondente e la struttura che si viene a delineare è quella di una struttura cosiddetta “asimmetrica”.

Per evitare confusioni, d’ora in avanti chiameremo “*sorgenti originarie*” quelle attive, che instaurano la comunicazione, e “*sorgenti indotte*” quelle passive, che rispondono e forniscono i riscontri.

Come esempio limite consideriamo il caso in cui non esistano sorgenti originarie nel RN, ma che in ogni RT connesso a quel RN ci siano delle sorgenti originarie; paradossalmente, il RN, che può essere visto come il terminale passivo, potrebbe dover gestire un traffico in uscita molto maggiore di quello gestito da un singolo RT, e cioè dal terminale attivo.

Il protocollo MAC in esame deve essere in grado di adattarsi ad una situazione di questo tipo ed implementare comunicazioni downlink/uplink il più verosimili possibile. Gli elementi che ci fanno discostare da una condizione reale sono, da un lato, l’aver considerato un canale ideale e privo di errori, per questo non prendiamo in considerazione procedure di rivelazione o recupero di pacchetti persi, dall’altro, l’aver ipotizzato che le sorgenti nascono tutte insieme all’inizio della comunicazione e non viene presa in considerazione la possibilità di nascita e morte casuale e reale delle stesse. Questi due aspetti sono oggetto di altre due tesi di ricerca [39][38].

Il problema principale che deriva da tutto ciò è la continua verifica di poter accettare o meno una connessione: nel momento in cui si vuole inserire una sorgente in un terminale, non è sufficiente controllare che ci siano abbastanza risorse da poter assegnare e quindi una banda disponibile sufficiente per accettare la richiesta, ma è necessario fare una verifica anche sulla banda da assegnare alla sorgente speculare. Una prima osservazione potrebbe essere che la banda di una sorgente speculare sarà senz'altro minore o, al massimo, uguale a quella relativa alla corrispondente sorgente originaria e quindi non dovrebbero esserci problemi a riguardo. In realtà non dobbiamo dimenticare che un RN copre una cella all'interno della quale possono esserci molti RT. Questo vuol dire che nel momento in cui si volesse instaurare una connessione in DL verso un determinato RT, potrebbe accadere che la banda da assegnare alla sorgente speculare sia insufficiente dal momento che tutte, o quasi, le risorse per la tratta di UL sono già state assegnate ad altre sorgenti nate precedentemente. Allo stesso modo, se un RT volesse instaurare una connessione con un RT remoto, passando per il RN a cui è collegato, potrebbe succedere che il RN, dovendo gestire diversi terminali, abbia già instaurato diverse connessioni e si trovi con una banda residua tale da non poter soddisfare il RT. In questi casi la connessione viene rifiutata e, se ci sono comunque risorse disponibili, si può tentare di instaurarne una per un servizio che richieda una banda inferiore. Solamente nel caso in cui la verifica su entrambe le bande disponibili abbia dato esito positivo si può accettare la connessione tra i due terminali, RN e RT, e considerare la simultanea nascita di due sorgenti, una per ogni capo, che trasmetteranno e riceveranno ambedue.

Parallelamente alla definizione del protocollo MAC, questo lavoro ha lo scopo di realizzare un simulatore che riesca a riprodurre fedelmente il funzionamento del MAC definito ed a simulare così una trasmissione completa caratterizzata da un continuo dialogo tra i terminali in gioco.

Tale simulatore (Appendice B) prevede l'inserimento, fatte le opportune verifiche appena citate, di tutte le sorgenti, originarie e indotte, nell'immediato precedente l'inizio della simulazione e solamente alla fine di tutto si avrà la loro morte e quindi

le dovute disconnessioni. I dettagli sul simulatore e sul suo funzionamento verranno presentati nel prossimo capitolo.

5.3: TEMPI E GESTIONE DELLE TRAME TEMPORALI

Particolare attenzione deve essere riservata alla gestione delle trame nei due versi e alle differenti durate dei TS. Abbiamo già visto che le due trame hanno la stessa durata, ma la durata dei singoli TS nei due versi è molto differente, in particolare ad ogni TS in downlink corrisponde un numero di TS in uplink pari a:

$$N = \frac{312}{6} = 52$$

e a parità di durata di trama, il rapporto che intercorre tra i tempi dei TS è dato da:

$$\frac{T_{TS_DL}}{N} = \frac{1.5ms}{52} = 28.846\mu s = T_{TS_UL}$$

La figura 5.1 mostra bene ciò.

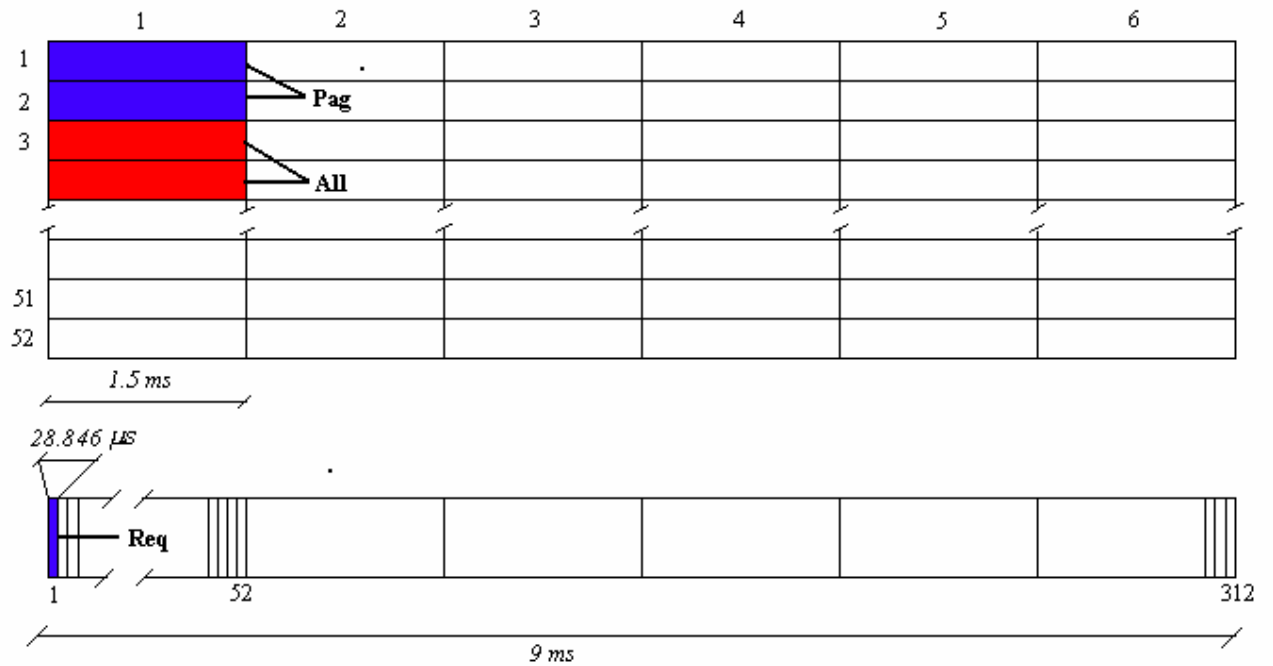


Figura 5.1: Confronto dei tempi e delle trame di UL e DL

Si vede come, tenuti fissi due parametri, tempo di trama e numero totale di risorse allocabili, le diverse tecniche di accesso adottate comportano una durata del TS ben 52 volte superiore in DL rispetto all'UL. Questo comporta una differente trattazione delle informazioni ai due capi della comunicazione. Le operazioni che vengono svolte lato RN e lato RT sono logicamente le stesse, a meno di particolari funzioni, quali il Paging, l'Allocazione o le Richieste, che sono appannaggio o dell'uno o dell'altro terminale, quello che cambia, sono i tempi di elaborazione dei dati e gestione dei tempi.

Da segnalare il fatto che i tempi assegnati alle operazioni delle suddette funzioni, sono dovuti ad una mera scelta progettuale che può essere cambiata in qualunque momento senza alcun problema, anzi, un opportuno studio sui reali tempi necessari per le varie operazioni potrebbe essere oggetto di una nuova ricerca.

5.4: FDD E TDD

Esistono due possibilità sul come trattare le trame durante una comunicazione, la prima è utilizzare la tecnica *Frequency Division Duplexing*, la seconda è considerare la *Time Division Duplexing*.

Il Frequency Division Duplexing, utilizzato da svariati anni nelle trasmissioni aeree, nasce come metodo valido per gestire traffico vocale per poi essere applicato anche alla trasmissione dati.

La FDD utilizza due bande di frequenza ciascuna dedicata ad uno dei due versi di trasmissione; le due bande hanno generalmente la stessa larghezza e sono separate da un certo intervallo di guardia che impedisce che ci sia interferenza.

C'è un'alternativa emergente, ed è il TDD. In questo caso le trasmissioni, in uplink e downlink, utilizzano la medesima frequenza, ma in tempi differenti all'interno di un intervallo fisso. Il Time Division Duplexing ha origine dalla necessità di combinare il traffico vocale, statisticamente simmetrico, con quello dati, generalmente asimmetrico. La sua superiore affidabilità nel trattare traffico dati è dovuto alla capacità di una risposta istantanea ai cambiamenti di simmetria.

FDD è agevole e necessaria per quegli utenti che richiedono una banda dedicata, TDD, d'altra parte permette di utilizzare qualsiasi parte del canale, sia esso in ricezione che in trasmissione. Ad esempio, ad utenti che necessitano di un rapido download di grandi quantità di dati, farebbe comodo utilizzare l'intera capacità del canale e quindi una divisione in tempo, mentre ad utenti che ignorano la quantità di dati trattati, ma necessitano di una certa banda assegnata, farebbe più comodo la divisione in frequenza.

5.5: CONFRONTO TRA LE TECNICHE DI ACCESSO ADOTTATE NEI DUE VERSI

Un'ispezione visiva della figura 5.1 evidenzia le conseguenze dovute dall'aver adottato CDMA in downlink e TDMA in uplink.

La tecnica CDMA, grazie all'utilizzo dei codici, permette di elaborare più unità informative in parallelo, a tal proposito si veda il capitolo 2, e quindi sia il Paging sia l'Allocation possono essere trattati entrambi nel primo time slot con un tempo utile di 1.5 ms . Inoltre nello stesso tempo, simultaneamente, possono essere trattate diverse MAC-PDU. Queste unità informative, a differenza del caso di OFDM-TDMA in cui se trasmesse nel nullo del canale hanno un'alta probabilità di errore rispetto a quelle trasmesse nel picco, godono del vantaggio apportato da tutti i picchi in frequenza presenti nel canale. Si deduce che il rapporto *bits ricevuti corretti/bits inviati* è molto più alto col CDMA che utilizzando il TDMA.

Per quel che riguarda la trama in uplink, è possibile estendere le operazioni di Request su più TS, ma in sede di progetto la sua elaborazione viene concentrata nel solo primo time slot con un tempo di 0.028846 ms e, dato che si utilizza il TDMA, in tale TS non possono essere trattate altre unità informative in parallelo: le informazioni sono elaborate in maniera seriale, in tempo.

Prescindendo dall'estensione temporale delle suddette operazioni, si nota come, la maggior "comodità" dei tempi che troviamo in DL, viene pagata in termini di maggior complessità dell'accesso al mezzo per mezzo dei codici, mentre la nota semplicità di implementazione del TDMA ha come controparte una certa "ristrettezza" temporale e quindi una necessaria maggior velocità nell'elaborazione dei dati. Lo svantaggio principale del TDMA è che i dati sono spediti a *burst* e ciò potrebbe causare problemi per sistemi con vincoli stringenti sui ritardi.

Ulteriori e più dettagliati confronti verranno commentati nel capitolo riservato alle simulazioni e quindi ai diversi risultati, prestazioni e ritardi ottenuti utilizzando l'una o l'altra tecnica.

CAPITOLO 6

SIMULATORE

6.1: REALIZZAZIONE DEL SIMULATORE PER IL DOWNLINK

Il gruppo di lavoro dell'Unità di Roma1 ha completato nel mese di Luglio 2001 la realizzazione della prima versione di questo simulatore (MAC-SIM versione 1.0), di cui è importante evidenziare alcune caratteristiche generali prima di passare ad una descrizione più accurata del suo funzionamento.

La versione 1.0 del simulatore ([38][39]) implementa solamente la tratta *downlink* del sistema in questione (collegamento dal Radio Node ai Radio Terminal). La scelta di implementare dapprima questa tratta è stata presa in considerazione del fatto che è la tratta su cui normalmente c'è un maggiore traffico. Inoltre, è rilevante evidenziare che, in prima approssimazione, si è assunto che il sottostante canale di trasmissione sia ideale (cioè privo di errori) e che le sorgenti di traffico presenti all'inizio della simulazione restino attive per tutto il periodo preso in considerazione.

Infine, è di notevole importanza notare che sia la versione 1.0 del simulatore, sia le versioni successive, che integrano e arricchiscono la versione base in determinati aspetti, sono realizzate utilizzando come linguaggio di programmazione il C (C++), con l'ottica di poter utilizzare in un prossimo futuro il simulatore realizzato all'interno del simulatore di rete realizzato dall'Università di Berkeley e denominato Network Simulator (*NS*). D'altra parte, poiché l'interesse primario inizialmente è stato sviluppare un simulatore di Strato MAC per poter testare fin da subito le scelte di progetto effettuate, si è proceduto ad implementare un simulatore che, almeno inizialmente, fosse in grado di funzionare come entità a sé stante, senza la necessità di essere inserito nell'architettura prevista da *NS*. Per questo motivo, sono presenti procedure che simulano la presenza degli Strati che logicamente confinano con lo Strato MAC. Fin dalla versione 1.0, infatti, la

generazione del traffico IP in entrata al Protocollo di accesso al mezzo è simulata da apposite procedure.

La versione 1.0 del simulatore prevede che le sorgenti presenti e attive nella WLAN all'inizio della simulazione restino attive per tutto il periodo preso in considerazione. Per questo motivo, la simulazione inizia con l'inserimento delle informazioni riguardo il numero delle sorgenti attive presenti al Radio Node e del terminale (RT) di destinazione dei pacchetti dati che le sorgenti emetteranno.

L'inserimento delle sorgenti avviene quindi all'inizio della simulazione e può essere effettuato da tastiera o tramite il file "terminali.txt". Quest'ultima modalità è stata inserita per permettere all'utente di lanciare delle simulazioni su computer remoti.

Effettuata questa operazione, il simulatore provvede autonomamente a prelevare, per ciascuna sorgente inserita, le caratteristiche di emissione dai file descrittori delle sorgenti ("sorgentitipo1.txt", "sorgentitipo2.txt", "sorgentitipo3.txt"). I file descrittori delle sorgenti sono tre poiché la versione 1.0 definisce tre classi di traffico principali (ON/OFF, CBR, BE) e quindi a seconda del tipo di sorgente che è stata inserita dall'utente, il simulatore preleva i parametri descrittori dal relativo file. Inoltre, per ciascuna classe di traffico sono definite tre sottoclassi (vedi figura 6.1) e quindi, sempre in riferimento alla descrizione dell'utente, vengono scelti i parametri della particolare sottoclasse.

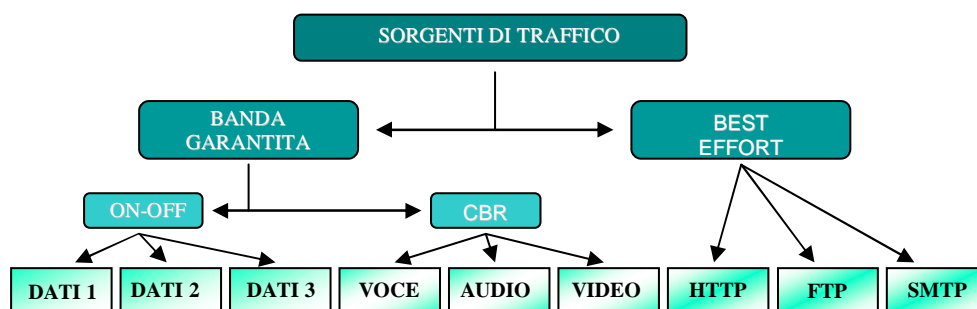


Figura 6.1: Sorgenti di traffico implementate nel simulatore (versione 1.0)

Per le sorgenti ON/OFF e CBR i parametri descrittivi sono i parametri Dual Leaky Bucket (rate di picco, rate medio, Token Buffer Dimension) oltre che la dimensione del pacchetto IP tipicamente usata da quel particolare tipo di traffico e il massimo ritardo accettabile per quella connessione. Si noti che, naturalmente, per le sorgenti CBR il rate di picco coincide con il rate medio.

Per le sorgenti BE i parametri descrittivi sono la frequenza media di arrivo dei pacchetti (i tempi di inter-arrivo dei pacchetti del traffico BE sono generati secondo il modello di Poisson) e la dimensione tipica del pacchetto IP per quel particolare traffico.

Classe di Traffico	Parametri
ON/OFF	<ul style="list-style-type: none"> • Rate di picco • Rate medio • Token Buffer Dimension • Lunghezza pacchetto IP • Massimo ritardo tollerabile
CBR	<ul style="list-style-type: none"> • Rate • Lunghezza pacchetto IP • Massimo ritardo tollerabile
BE	<ul style="list-style-type: none"> • Frequenza media di emissione dei pacchetti IP • Lunghezza pacchetto IP

Tabella 6.1: Parametri delle sorgenti presenti nei tre file sorgenti tipo 1, 2, 3

I parametri descrittivi delle connessioni attive sono raccolte e ordinate per terminale di destinazione in una struttura dinamica che assicura la possibilità di gestire ogni sorgente come un elemento indipendente (vedi figura 6.2).

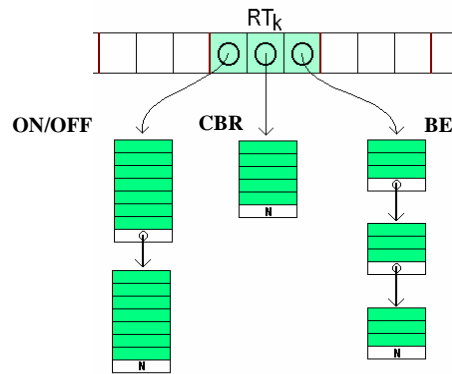


Figura 6.2: Sorgenti ON/OFF, CBR e BE attive al RT_k

Per quanto riguarda le sorgenti GB (cioè sia le ON/OFF che le CBR), la versione 1.0 assume che l'emissione del traffico sia coerente con la maschera individuata dai parametri DLB. In particolare si sceglie, tra tutte le sorgenti ON/OFF (o CBR) che rispettano la maschera DLB individuata, la sorgente ON/OFF (o CBR) che in media emette lo stesso numero di bit/s che sarebbero emessi dalla sorgente DLB vera e propria. Per il Dual Leaky Bucket si veda il paragrafo 3.2.

In questo modo si determinano i periodi di emissione (T_{ON}) e di silenzio (T_{OFF}) della sorgente ON/OFF scelta fra quelle compatibili con la maschera DLB. In altre parole si sceglie quella sorgente ON-OFF che emette per un certo periodo (T_{ON}) al rate di picco, finché non raggiunge la maschera DLB e successivamente rispetta un periodo di silenzio (T_{OFF}) sufficientemente lungo da permetterle di ricominciare subito dopo ad emettere al rate di picco (successivo T_{ON}). Per quanto riguarda le sorgenti CBR, essendo il rate di picco coincidente per definizione con il rate medio, tra tutte le sorgenti CBR che hanno una maschera di emissione compatibile con quella descritta dalla maschera DLB (cioè la cui curva di emissione è costantemente “sotto” la maschera DLB) si sceglie la sorgente CBR che emette al rate medio previsto dalla maschera DLB.

Per le sorgenti GB, quindi, l'emissione è perfettamente nota e descritta dalla maschera DLB, quindi è possibile calcolare le risorse che devono essere assegnate al particolare flusso affinché siano rispettati i predefiniti requisiti di qualità del servizio. Quindi, la caratteristica della versione 1.0 è una conoscenza perfetta dell'emissione nel tempo delle sorgenti GB; questo è il motivo per cui all'inizio

della simulazione è possibile associare a ciascuna connessione GB la banda minima che deve essergli garantita (in termini di MAC PDU / Trama).

A questo punto, oltre alla inizializzazione delle strutture usate dal simulatore, viene inizializzato il traffico per preparare le successive chiamate alle procedure di generazione del traffico.

Il traffico GB è generato su base Time Slot ed assume che i pacchetti IP vengano passati agli strati sottostanti solo quando sono completi. Quindi un pacchetto IP proveniente da una sorgente di classe ON/OFF o CBR si assume generato nel Time Slot in cui cade l'istante di fine generazione del pacchetto. Questo permette di operare la segmentazione di interi pacchetti IP in MAC PDU e di operare funzionalità di Strato di Adattamento su tutto il pacchetto, volte a garantire i parametri di QoS richiesti dalle diverse sorgenti da cui provengono i pacchetti IP.

Per le sorgenti ON/OFF, la fase di inizializzazione controlla se la sorgente si trova attualmente in un periodo di attività o di silenzio e calcola l'istante in cui emetterà il primo pacchetto IP. La fase di generazione del traffico ON/OFF prosegue aggiornando l'istante di arrivo del successivo pacchetto IP ogni volta che sia stato generato un pacchetto. Naturalmente, il calcolo dell'istante di generazione del pacchetto successivo è rispettoso dei periodi di inattività (T_{OFF}) della sorgente.

Per le sorgenti CBR, la fase di inizializzazione calcola l'istante in cui verrà generato il prossimo pacchetto IP e la fase di generazione del traffico CBR prosegue aggiornando l'istante di arrivo del prossimo pacchetto IP.

La generazione del traffico BE è anche essa effettuata su base Time Slot e si trascura il tempo di pacchettizzazione. La fase di inizializzazione genera l'istante di arrivo del primo pacchetto IP basandosi su una estrazione di una variabile aleatoria (V.A.) a distribuzione esponenziale negativa.

La procedura di generazione del traffico BE genera tutti gli istanti di nascita dei pacchetti IP che cadono nel Time Slot corrente calcolando i tempi di interarrivo come realizzazione della stessa V.A. esponenziale negativa.

Inoltre prepara l'istante di generazione del prossimo pacchetto IP che verrà generato nel successivo o nei successivi TS.

Dopo l'inizializzazione del traffico, inizia la simulazione vera e propria. Si tratta di un ciclo che si ripete per quante sono le trame prese in considerazione nella simulazione. Come è stato detto in precedenza, ogni trama si compone di N_{TS} Time Slot (le simulazioni sono state effettuate con $N_{TS}=6$). Ciascun Time Slot è caratterizzato da alcune operazioni comuni a tutti i TS e, eventualmente, da altre operazione tipiche del particolare TS. Ad esempio, in tutti i TS viene generato il traffico e vengono trasmesse delle MAC PDU.

Nel primo TS di ogni trama, il RN trasmette ai RT tramite il Canale di Paging, le informazioni su dove ascoltare all'interno della Matrice dei Codici le unità dati a loro dirette. Naturalmente, prima di emettere il Paging Channel, il RN effettua l'algoritmo di scheduling descritto nel paragrafo 4.4. Per attivare lo *scheduler*, il RN ha bisogno di conoscere lo stato delle code (la loro lunghezza). Dopo aver assegnato una percentuale della prossima trama di DL a ciascuna connessione attiva, il RN posiziona le MAC PDU di tutte le connessioni nella Matrice dei Codici.

Nella versione 1.0, essendo un problema tipicamente di Strato Fisico, la scelta istante per istante dei codici migliori per effettuare la trasmissione avviene in maniera randomica e quindi si ha un riempimento *casuale* della Matrice dei Codici, come mostrato in figura 6.3:

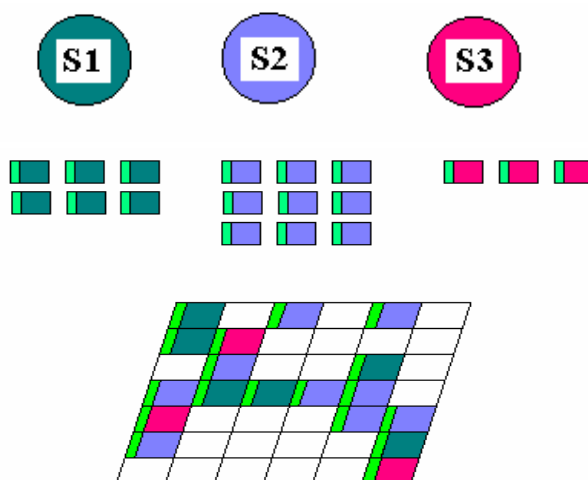


Figura 6.3: Riempimento della Matrice dei Codici

Come si è accennato, in ogni TS vengono trasmesse delle unità dati. Nella versione 1.0, poiché il canale è ipotizzato ideale, una volta individuate le MAC PDU che vengono trasmesse nel TS in considerazione, la trasmissione si riduce semplicemente a togliere quelle MAC PDU dal relativo buffer.

In realtà, in occasione della trasmissione, se la trama corrente appartiene all'insieme di trame da considerare nelle statistiche, vengono calcolate e aggiornate le statistiche di rilievo che riguardano la trasmissione delle MAC PDU:

- Ritardo min e max per le sorgenti ON-OFF per ogni RT
- Ritardo min e max per le sorgenti CBR per ogni RT
- Ritardo min e max per le sorgenti BE per ogni RT
- Stime dei valori medi e delle varianze dei ritardi per ogni sorgente attiva
- Istogramma del ritardo per le sorgenti BE
- Istogramma del numero di MAC PDU presenti nel buffer GB in un TS
- Istogramma del numero di MAC PDU presenti nel buffer BE in un TS
- Istogramma dei codici che vengono assegnati per trasmissioni GB
- Istogramma dei codici che vengono assegnati per trasmissioni BE

L'altro TS dove il simulatore compie operazioni straordinarie, oltre alla generazione del traffico, alla trasmissione e all'incremento dei contatori del tempo è il terzo ("T_DL" è il valore assoluto dei tempi mentre "Contatore_TS_in_DL" individua il TS corrente all'interno della matrice dei codici).

Osservare la figura 6.4 per avere un'idea grafica di cosa accade in downlink.

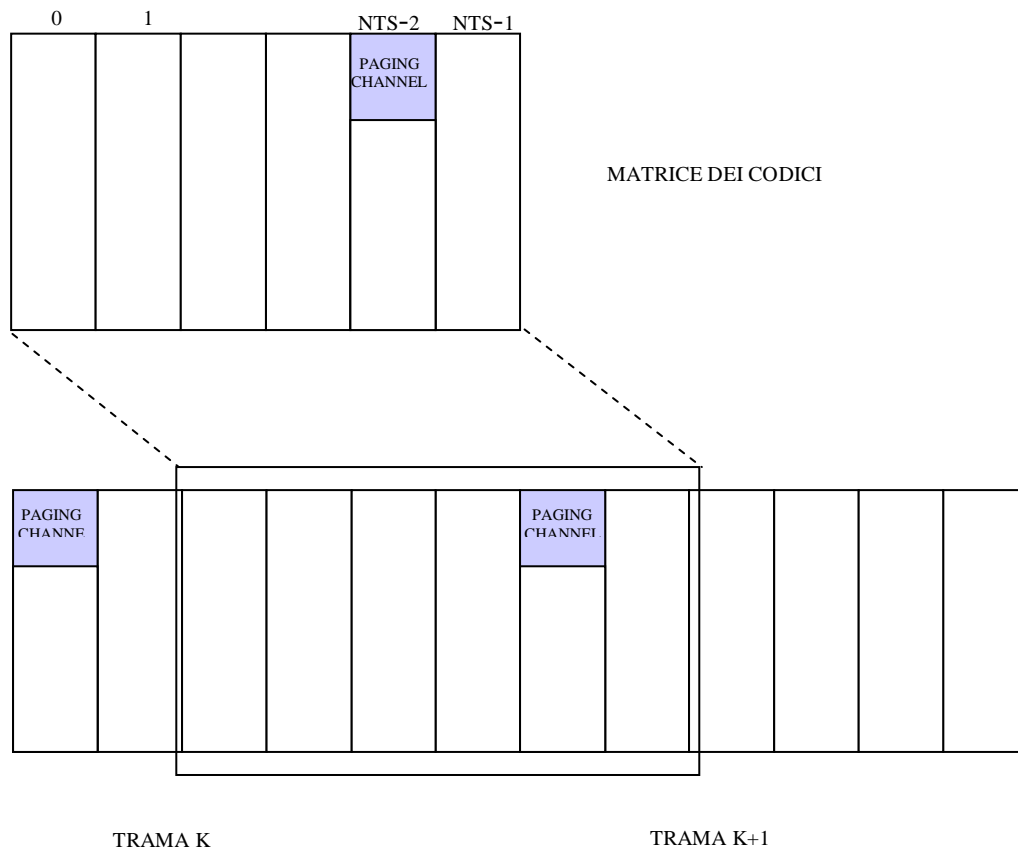


Figura 6.4: Relazione fra Matrice dei Codici e Struttura a Trama

Come si può vedere in figura 6.4, la definizione della matrice dei Codici non corrisponde alla trama a causa di una traslazione temporale. Il motivo di ciò è che si deve dare tempo ai RT di ricevere correttamente il Paging Channel e di interpretare le informazioni che trasporta. Questo significa che il Paging Channel porta informazione su dove i terminali devono ascoltare le unità dati loro indirizzate all'interno della zona evidenziata in figura 6.4 (zona che corrisponde alla definizione di matrice dei codici utilizzata nel simulatore).

Le operazioni eseguite per la prima trama vengono eseguite tante volte quante sono le trame considerate nella simulazione. Inoltre, alla fine di ciascuna trama, se essa appartiene all'insieme di trame da considerare nelle statistiche, vengono calcolate e aggiornate ulteriori statistiche:

- Istogramma del numero di MAC PDU ON/OFF trasmesse per trama
- Istogramma del numero di MAC PDU CBR trasmesse per trama
- Istogramma del numero di MAC PDU GB trasmesse per trama
- Istogramma del numero di MAC PDU BE trasmesse per trama

Per quanto riguarda lo scheduling utilizzato da questo simulatore, sulla base di quanto detto nel paragrafo 4.4, esso si sviluppa in tre passi fondamentali:

- 1° STEP: viene calcolata l'assegnazione delle MAC-PDU "dovute" alle connessioni GB dirette ai vari RT. Ciò viene fatto stabilendo il minimo tra quanto presente nella coda di quel RT e quanta banda gli è stata concessa, sulla base delle sue caratteristiche di traffico (BW_{MAC})
- 2° STEP: Una volta calcolato il numero di MAC-PDU assegnate, viene decrementato un contatore che tiene conto del numero delle MAC-PDU disponibili in quella trama, nonché lo stato delle code per quel RT. Questo secondo step rappresenta quindi una scansione delle GB, una volta assegnate quelle dovute, che fornisce una sorta di doppia garanzia per il traffico a qualità garantita. A questo punto, si procede iterativamente con l'assegnazione di una MAC-PDU ad ogni RT finché non ci siano più risorse da assegnare o non ci siano più richieste GB in attesa. L'assegnazione di queste risorse alla classe GB avviene in modalità Round Robin, assegnando una MAC-PDU alla volta ad ogni RT, qualora questo presenti ancora uno stato delle code diverso da zero, e decrementando, per ogni assegnazione, il valore delle MAC-PDU ancora disponibili nonché lo stato code relativo al RT considerato. Si prosegue in questa maniera finché o il numero delle PDU assegnabili diventa 0 oppure non ci sono più richieste GB da soddisfare. In questo secondo caso, si entra nel terzo step dello scheduling in cui cominciano ad essere assegnate MAC-PDU per la classe BE, aventi priorità più bassa di quelle della classe GB.

3° STEP: Il meccanismo è identico a quello descritto nella seconda fase: si ha l'assegnazione di una MAC-PDU ad ogni RT finché non ci siano più MAC-PDU da assegnare o non ci siano più richieste BE pendenti. Anche in questo caso, man mano che avviene l'assegnazione delle MAC_PDU, viene decrementato il numero delle PDU dallo stato code per la classe BE e decrementato il numero delle risorse ancora assegnabili.

La procedura di scheduling appena descritta mostra una scelta ben precisa per il trattamento delle MAC-PDU di classe GB. Queste sono caratterizzate da una doppia priorità; ciò si riscontra nella doppia scansione delle code GB effettuata nel 2° step dello scheduling. Questo chiaramente va a scapito di eventuali richieste BE, che aspettano in coda, e vengono allocate solo in assenza di richieste GB pendenti.

Questa versione base del simulatore di DL, versione 1.0, è stata poi arricchita e sviluppata in due versioni successive. In particolare, una prima versione, oggetto del tema di ricerca [38], prevede l'introduzione dei processi di nascita e morte delle sorgenti nonché uno scheduling di tipo avanzato. L'altra versione prevede invece una certa probabilità di perdita dei pacchetti, rimuovendo quindi l'ipotesi di idealità del canale, e il conseguente inserimento di operazioni di recupero (ARQ) e correzione in avanti (FEC). Questa seconda versione è descritta e studiata in [39].

6.2: REALIZZAZIONE DEL SIMULATORE PER L'UPLINK

In parallelo alla realizzazione del simulatore di downlink, mi sono occupato della realizzazione del duale, e cioè, quello relativo all'*uplink*. In realtà, quest'ultimo simulatore non è il punto di arrivo di un tema di ricerca, ma una tappa intermedia necessaria e utile per la realizzazione del primo simulatore di un protocollo MAC che tenga conto sia dell'UL sia del DL, e che è l'obiettivo della presente tesi.

Anche per il simulatore in questione si è ipotizzato che il sottostante canale di trasmissione sia ideale e quindi privo di errori e che le sorgenti di traffico presenti

all'inizio della simulazione restino attive fino alla fine della simulazione. In questo caso, ovviamente, le sorgenti vengono assegnate esclusivamente ai radio terminals e tale assegnazione può avvenire da tastiera o da remoto utilizzando il file "terminali_UL.txt" che imposta, mediante i dati contenuti, un certo "ambiente" o situazione di simulazione. Per quel che riguarda le sorgenti, la trattazione delle loro caratteristiche, la gestione dei parametri associate a ciascuna di esse, l'inizializzazione delle strutture necessarie e la generazione del traffico, sia per la classe GB sia per la BE, tutto va come già descritto nel paragrafo precedente in quanto questi sono aspetti che stanno ad un livello superiore e prescindono dal verso di trasmissione o dal tipo di tecnica di accesso multiplo utilizzata. La grande differenza di fondo, è che invece di utilizzare strutture bidimensionali e matriciali al fine di gestire contemporaneamente *codici e TS*, si utilizzano strutture vettoriali in quanto le uniche risorse utili sono i *time slots*.

E' da ricordare inoltre il discorso delle sorgenti indotte e cioè che ad ogni sorgente che viene inserita, corrisponde una sorgente nell'altro capo della connessione che rappresenta l'"interlocutore" della sorgente originaria. Si ha insomma una gestione duplicata per quanto riguarda le sorgenti a una conseguente duplicazione di tutte le operazioni relative a queste (creazione strutture e generazione del traffico). Comunque una dettagliata trattazione di questo aspetto è già stata affrontata nel Capitolo 5.

A questo punto comincia la simulazione: consiste in un ciclo che si ripete tante volte quante sono le trame da considerare e, per ogni ciclo, vengono analizzati tutti i TS di uplink che sono 312. Ogni TS è caratterizzato da operazioni che si ripetono ogni volta, quali la generazione del traffico e la trasmissione delle unità informative, ed in alcuni istanti particolari avvengono altre operazioni fondamentali. Nel primo TS di ogni trama (scelta progettuale), ad esempio, ogni RT trasmette, attraverso il Request Channel, le informazioni sulle richieste da fare al RN e sullo stato delle code presenti nei buffer in cui vengono fatte attendere le MAC-PDU. A questo punto, il RN, esegue lo scheduling ed assegna, con il metodo Round Robin, le risorse, e cioè i TS, ai vari RT che richiedono il servizio. Così

come per i codici in downlink, la scelta dei time slots migliori avviene in modo randomico e il riempimento del Vettore dei TS è casuale (vedi fig. 6.5).

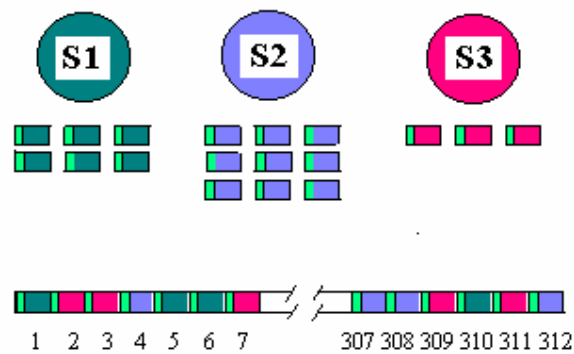


Figura 6.5: Riempimento Vettore dei TS

Durante la simulazione, viene presa in considerazione una finestra temporale di un certo numero di trame e per queste vengono create ed aggiornate delle statistiche quali:

- Ritardo min e max per le sorgenti ON-OFF per ogni RT
- Ritardo min e max per le sorgenti CBR per ogni RT
- Ritardo min e max per le sorgenti BE per ogni RT
- Stime dei valori medi e delle varianze dei ritardi per ogni sorgente attiva
- Istogramma del ritardo per le sorgenti BE
- Istogramma del numero di MAC PDU presenti nel buffer GB in un TS
- Istogramma del numero di MAC PDU presenti nel buffer BE in un TS
- Istogramma dei TS che vengono assegnati per trasmissioni GB
- Istogramma dei TS che vengono assegnati per trasmissioni BE

Oltre al primo TS, l'altro momento cruciale per la gestione del traffico è il TS relativo alla "riallocazione". Si vede in figura 6.6 che dopo aver fatto richiesta, si

deve attendere un certo periodo prima che avvenga l'assegnazione delle risorse e questo tempo, la cui scelta è puramente di tipo progettuale e modificabile, determina una certa relazione temporale fra la trama ed il Vettore dei TS. In questo TS viene portata avanti la funzione di “costruzione” della trasmissione perché è da questo momento in poi che, per la trama corrente, i vari time slots sono impegnati.

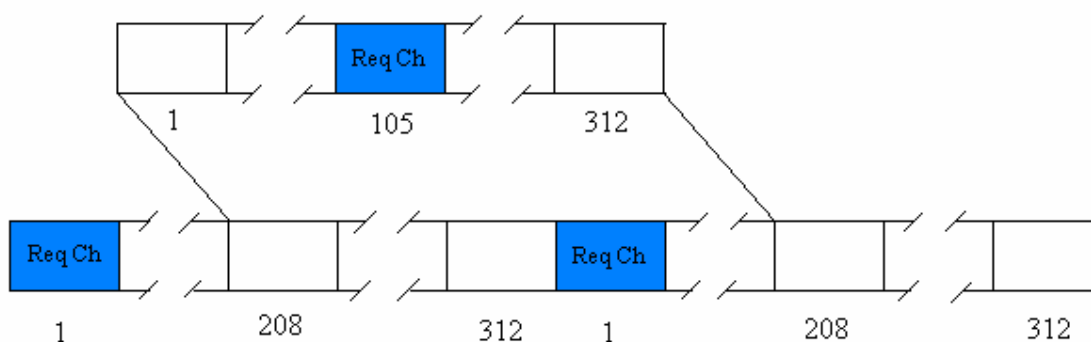


Figura 6.6: Relazione fra Vettore dei TS e Struttura a Trama

La scelta dei tempi e le decisioni prese sugli sfasamenti verranno chiarite nella sezione riguardante il simulatore completo.

Alla fine di ciascuna trama, se essa appartiene all'insieme di trame incluse nella finestra temporale, vengono calcolate e aggiornate ulteriori statistiche:

- Istogramma del numero di MAC PDU ON/OFF trasmesse per trama
- Istogramma del numero di MAC PDU CBR trasmesse per trama
- Istogramma del numero di MAC PDU GB trasmesse per trama
- Istogramma del numero di MAC PDU BE trasmesse per trama

Per ciò che riguarda lo scheduling, si è rispecchiato in pieno quello già adottato per la sola tratta di downlink, ma, come verrà spiegato nel prossimo paragrafo, nel momento della creazione del simulatore “1.0 UL_DL_FDD”, attente osservazioni a riguardo hanno spinto a considerare un'altra strategia.

Come già detto, questo simulatore di UL non è fine a se stesso, ma la sua integrazione con quello di DL ha dato vita al simulatore versione “1.0 UL-DL_FDD” descritto nel successivo paragrafo.

6.3: SIMULATORE COMPLETO UPLINK-DOWNLINK

Questo simulatore è il primo ad implementare il funzionamento dello strato MAC durante una trasmissione dati reale e completa, in DL ed in UL. La sua realizzazione è stata possibile grazie ad una corretta integrazione dei due codici sopradescritti. Tale integrazione consiste nell'utilizzo di tutte le strutture già utilizzate e necessarie per gestire le due differenti tecniche di accesso, tutte le procedure finalizzate alla gestione delle sorgenti e tutte quelle procedure e funzioni necessarie ad operazioni che prescindono dal verso della trasmissione, quali lo spaccettamento e la ricomposizione delle unità informative, lo scheduling, le inizializzazioni e così via. E' stato poi necessario aggiungere delle procedure che permettessero la fusione dei due codici e che quindi implementassero quelle operazioni relative al “colloquio” del RN coi RT e che fin'ora erano state ignorate, perché non necessarie, o ipotizzate.

In particolare, già prima che inizi la simulazione si rende necessaria una conoscenza esatta di entrambi i terminali. Infatti, nel momento in cui si inseriscono le sorgenti, apposite funzioni vanno a verificare che ci sia banda sufficiente tanto al RN quanto al RT corrispondente e solamente in quel caso avviene la connessione e l'assegnazione delle unità informative. Nel capitolo precedente si è affrontata e spiegata la questione delle sorgenti indotte: nel momento in cui la procedura “*inserisci_sorgente...*” assegna al RN o ad un RT una certa banda e gestisce la creazione delle MAC-PDU, la procedura “*inserisci_sorgente_simm....*” assegna, rispettivamente al RT associato o al RN, una certa banda che sarà una ben precisa percentuale del valore della banda originaria. Queste percentuali sono modificabili senza perdita di significato e sono immagazzinate nel vettore “*VECT_PERCENT*”

avente dimensione pari al numero di servizi. Tali percentuali andranno a modificare dei parametri differenti per ciascun tipo di sorgente: per le sorgenti ON-OFF sarà il tempo di attività T_{ON} ad essere ridotto, mentre i periodi di silenzio, T_{OFF} , si allungheranno in proporzione; per le CBR è proprio il rate a diminuire percentualmente, mentre per le BE, a diminuire sarà il tempo di interarrivo dei pacchetti. A questo punto, modificati questi parametri, si capisce come ad ogni sorgente inserita se ne considera automaticamente un'altra caratterizzata da un traffico ridotto che permette un dialogo continuo tra i terminali fino alla fine della simulazione. Così come sono nate, le due sorgenti connesse moriranno insieme. Nella tabella 6.2 vengono forniti i valori delle percentuali, relative alle sorgenti indotte; sono valori verosimili, ma modificabili in qualsiasi momento a seconda dei requisiti di qualità che si vogliono associare ai vari servizi.

ON-OFF	Dati ad alta velocità	10%
	Dati a media velocità	10%
	Dati a bassa velocità	10%
CBR	Voce	100%
	Video ad alta velocità	6%
	Video a bassa velocità	6%
BEST EFFORT	HTTP	2%
	FTP	2%
	SMTP	2%

Tabella 6.2: Percentuali del traffico indotto

Da notare che la sorgente vocale è l'unica che ne induce una con la stessa quantità media di pacchetti da trasmettere, come è ovvio fra l'altro; per gli altri servizi si parla di veri e propri riscontri più o meno corposi a seconda dei vincoli cui sono soggetti i pacchetti.

6.3.1 Strategia di scheduling nella versione “1.0 UL_DL_FDD”

In questa versione, la strategia di scheduling non è quella presa in considerazione dalle versioni precedenti: nella versione 1.0, come già spiegato, si arriva a concepire una doppia priorità per le sorgenti a banda garantita nel senso che lo scheduling effettua una seconda scansione sulle GB che non sono state soddisfatte con la prima e, in un certo senso, diventano delle “pseudo-best effort” con una priorità superiore alle BE ordinarie. Questo comporta un pieno, o quasi, soddisfacimento delle GB a discapito delle BE la cui considerazione viene fortemente penalizzata.

Si è pensato allora di trattare le GB in un altro modo:

In un primo momento viene effettuato il primo step dello scheduling sulle sorgenti a banda garantita facendo il possibile per soddisfare le richieste, poi, invece di trattare un'altra volta le GB, vengono trattate le Best Effort e, solamente se restano ancora risorse disponibili si prendono in considerazione quelle a Banda Garantita non potute elaborare in un primo momento. La sequenza dei passi diventa allora:

- 1° STEP: viene calcolata l'assegnazione delle MAC-PDU “dovute” alle connessioni GB con i vari RT. Ciò viene fatto stabilendo il minimo tra quanto presente nella coda di quel RT e quanta banda gli è stata concessa, sulla base delle sue caratteristiche di traffico (BW_{MAC}) Una volta calcolato il numero di MAC-PDU assegnate, viene decrementato un contatore che tiene conto del numero delle MAC-PDU disponibili in quella trama, nonché lo stato delle code per quel RT.
- 2° STEP: si passa a scandire le BE, vengono elaborate le singole MAC-PDU e viene decrementato il contatore relativo e lo stato delle code per il RT interessato. Data la loro natura, non ci sono garanzie sulla sorte che gli toccherà, esse vengono considerate solamente e finché si hanno risorse a disposizione.
- 3° STEP: solamente se i due passi precedenti sono stati effettuati con un avanzo di risorse si può andare a considerare le GB non potute trasmettere in un primo momento e vengono ripetute le operazioni del primo step.

Si nota come, utilizzando questo scheduling, invece dell'altro, le GB che non vengono soddisfatte con la prima scansione diventano automaticamente delle best effort con priorità inferiore alle BE vere e proprie. In questo modo è vero che alcune GB diventano BE di seconda priorità e rischiano di non venir prese in considerazione, ma riusciamo a soddisfare le BE, che nonostante la loro natura, potrebbero essere caratterizzate da vincoli e requisiti stringenti tali da richiedere una loro elaborazione quanto prima. Le GB trattate in un secondo momento verrebbero ad avere ritardi maggiori rispetto a quelle elaborate con la prima versione dello scheduling e questo fatto si riscontrerà nel seguito osservando i risultati, graficati, delle simulazioni relativi ai ritardi dei singoli tipi di sorgenti. Si riesce insomma a bilanciare i ritardi evitando di far ricadere il lato negativo di una certa strategia di scheduling interamente sulle BE, semplicemente abbassando momentaneamente la priorità di alcune GB, quelle non trattate nel primo step, per poi riconsiderarle in seguito.

6.3.2: Gestione degli “stream” nei due versi

Per quanto riguarda la gestione delle trame, in questo lavoro si è adottata la tecnica FDD (vedasi paragrafo 5.4). Anche sulla base degli standard osservati, HiperLAN e 802.11, si è ipotizzato di lavorare con due bande differenti, una per l'uplink, l'altra per il downlink, senza soffermarsi su quali frequenze usare dal momento che questo parametro viene scelto a livello fisico. Il concetto fondamentale è che le due trame vengono elaborate in parallelo e time-slot per time-slot vengono svolte tutte le operazioni necessarie già descritte nei paragrafi precedenti.

Il punto cruciale è che, dal punto di vista del simulatore, non si ha a che fare con tempi continui, si dovrebbe ricorrere alle equazioni differenziali, ma con tempi discreti: si lavora con macchine sequenziali di Mealy o Moore per cui si passa da uno stato all'altro al verificarsi di una condizione o meno. Questo vuol dire che

l'analisi in parallelo delle due trame comporta delle approssimazioni temporali tanto necessarie quanto inevitabili: l'analisi completa delle due avviene in $9ms$, appunto la durata di una trama, ma bisogna ricordare che la durata dei time-slot vale $1.5ms$ per la trama di downlink e $0.02884ms$ per quella di uplink. A questo punto appare lampante che l'elaborazione delle trame riguarderà dapprima il TS iniziale della trama di DL e, contemporaneamente, i 52 TS di quella per l'UL; si passerà subito dopo al secondo TS della trama in DL e quindi al secondo gruppo di 52 TS in UL e così via per tante volte quanti sono i TS di DL da analizzare, nel nostro caso 6. Volta per volta verrà verificata la "natura" del TS corrente e verranno eseguite tutte le operazioni associategli in sede di progetto.

6.3.3: Dimensionamento dello sfasamento fra le trame delle due tratte in un sistema FDD

Un punto fondamentale per la definizione di un protocollo che implementi il "dialogo" e il corretto scambio di informazioni tra RN e RT, è il dimensionamento dei tempi necessari all'elaborazione dei messaggi ricevuti e degli intervalli temporali ottimali che devono intercorrere tra una richiesta da parte del RT, la allocazione delle risorse e la richiesta successiva. Non focalizziamo l'attenzione sul Paging Channel dal momento che, essendo esso il canale utilizzato per segnalare in quali istanti il generico RT deve "ascoltare" ciò che gli è stato trasmesso, operando in FDD, la ricezione dei dati avviene su una frequenza diversa da quella di trasmissione. Ricordiamo che il controllo è centralizzato, quindi, il RT è passivo e deve solamente ricevere questa informazione dal RN senza "dire la sua" a riguardo. Non si ha insomma la necessità di uno studio accurato sui tempi necessari all'arrivo e all'elaborazione di queste informazioni.

In un primo momento si è ipotizzato di utilizzare, per il Request Channel, il primo TS perché sembra una situazione facile da implementare e semplice da accettare concettualmente. E' evidente, però, che, in questo modo, si rende disponibile molto

tempo per l'arrivo a destinazione, troppo in anticipo, del Req Ch con una conseguente riduzione del tempo utile per la comunicazione dell'Allocation Channel determinando uno squilibrio di tempi tanto ingiustificato quanto inutile. Inoltre, come si deduce osservando la figura 6.7, dopo il primo Req Ch dovremmo attendere la Allocazione che, riferendosi al successivo Vettore dei TS, verrebbe a cadere immediatamente dopo il successivo Req Ch che non avrebbe senso di esistere dal momento che non sono state trasmesse unità informative.

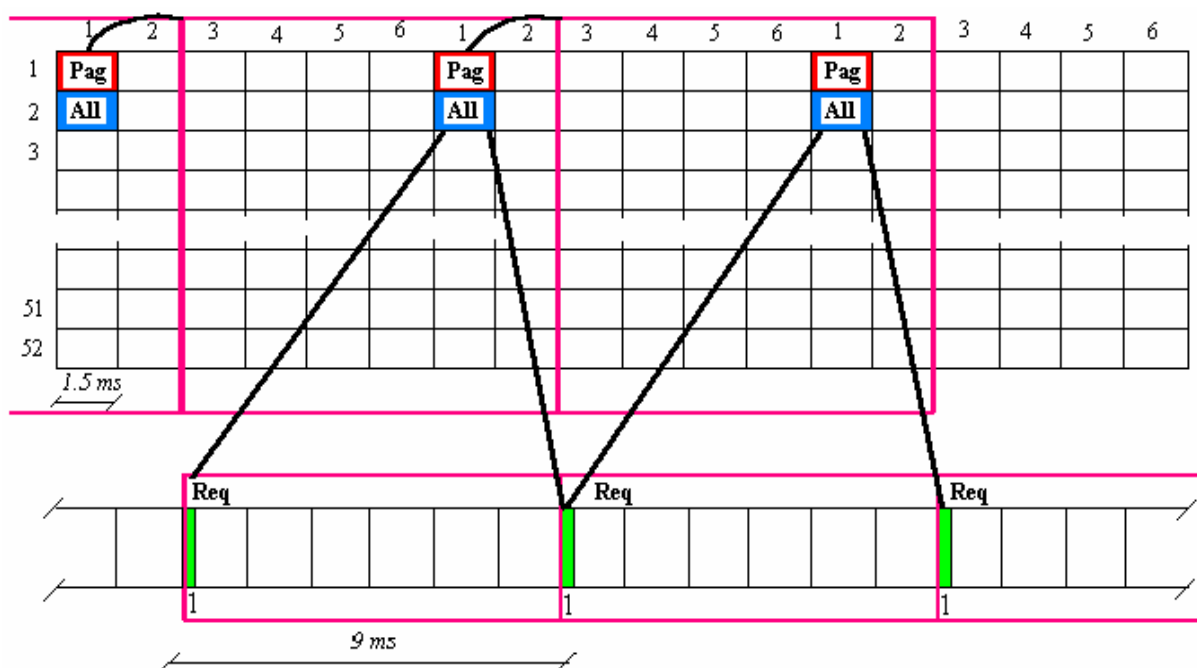


Figura 6.7: Sfasamento nel caso di ReqCh posto nel primo TS

E' insomma opportuno che la nuova richiesta avvenga un certo tempo dopo aver ricevuto l'allocazione e aver trasmesso un certo numero di MAC-PDU con conseguente aggiornamento delle code.

A questo punto si potrebbe pensare di utilizzare, come TS per segnalare le richieste, un intervallo temporale il più possibile vicino al margine destro del Vettore dei TS, ma in questo modo non si darebbe tempo necessario all'elaborazione del Req Ch; addirittura, se posizionassimo tale TS a partire dal quinto TS della Matrice dei codici, l'allocazione delle risorse avverrebbe ben due trame dopo con una ovvia conseguente perdita di efficienza..

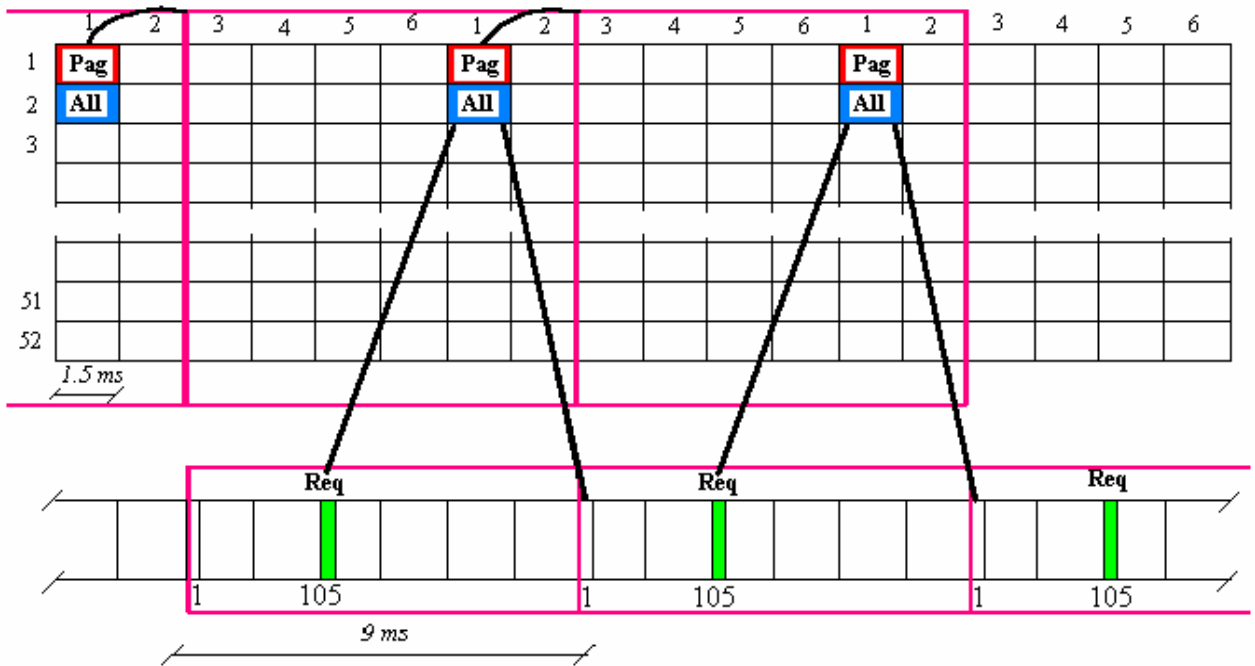


Figura 6.8: Dimensionamento dello sfasamento delle le trame di UL e DL

Osservando attentamente la figura 6.8, ci si rende conto che, data la struttura della trama di DL, organizzata in 6 TS, e visto che la Matrice dei Codici viene sfasata (scelta progettuale) di 2 TS, la scelta migliore da fare è quella di utilizzare come TS di Richiesta quello posto all'inizio del quinto TS della trama di DL, cioè sfasato di 2 TS rispetto alla Matrice dei Codici. Tale time slot, corrispondente al numero 105 nel Vettore dei TS risulta sfasato di $3ms$ rispetto all'inizio del vettore, $3ms$ in anticipo rispetto all'All Ch che a sua volta ha a disposizione $3ms$ per allocare le risorse.

Appare chiaro allora che bisogna tenere a sotto controllo due parametri:

- il tempo per elaborare le richieste
- il tempo per allocare le risorse

Non vogliamo fare nuove richieste prima di aver saputo come è andata la richiesta precedente, e da questo punto di vista è preferibile avere il Req Ch il più possibile vicino al limite destro del Vettore dei TS, ma più ci avviciniamo alla fine del

Vettore, e quindi anche della Matrice, più riduciamo il tempo per l'elaborazione delle richieste.

Il *trade-off* ideale appare proprio quello per cui il TS delle richieste si trovi a metà “strada”, e quindi equispaziato temporalmente, tra l'inizio della Matrice dei codici e l'inizio della Trama di downlink. In questo modo si soddisfano entrambe le condizioni suddette e si ha la soluzione ottima per il dimensionamento degli sfasamenti.

Quella appena proposta è una delle possibili strategie per disporre i canali di segnalazione. Gli sforzi fatti per rendere il simulatore il più parametrico possibile lasciano le porte aperte a future strategie alternative.

CAPITOLO 7

SIMULAZIONI

In quest'ultima sezione del lavoro, vengono illustrate le simulazioni eseguite utilizzando il simulatore UL_DL_FDD 1.0, considerando un particolare insieme di sorgenti e fissando l'attenzione su alcuni parametri di interesse. Sono state fatte numerose simulazioni cambiando di volta in volta il numero di ogni tipo delle sorgenti, i parametri relativi ad ogni classe di servizio e per dare un'idea di come vadano le cose, si osserveranno tre simulazioni significative:

- La prima simulazione è stata fatta considerando una situazione in cui le sorgenti vengono inserite solamente al RN con una conseguente nascita di sorgenti indotte ai RT verso cui si deve trasmettere. Le sorgenti sono state scelte in modo da interessare tutti i servizi considerati in sede di progetto con una occupazione delle risorse del canale, da parte dei pacchetti a banda garantita, di circa il 34% in downlink e di circa il 10% in uplink, ed in più una certa quantità di traffico best-effort.
- La seconda è la duale della prima: le stesse sorgenti, nello stesso ordine, vengono inserite solamente ai RT determinando un certo traffico indotto lato RN, ovviamente con le stesse percentuali già date.
- Infine la terza: in questa simulazione viene considerato un traffico misto dato dall'inserzione di sorgenti, sia GB sia BE, al RN e al RT, con le relative sorgenti indotte all'altro capo della connessione. In realtà sono state prese le stesse sorgenti considerate per le simulazioni precedenti e sono state separate in modo da avere lo stesso traffico, in quantità e tipo, in entrambi i versi di comunicazione, valutato percentualmente intorno al 22 % sia in UL che in DL.

I parametri posti sotto controllo sono 5:

- La media, eseguita sul totale delle MAC-PDU trasmesse e su tutti i RTs interessati, dei ritardi massimi, medi e minimi di tutte e tre le categorie di traffico al fine di avere un'idea di quale trattamento subiscono le PDU dallo schedatore e le differenze apportate dalla tecnica di accesso al mezzo utilizzata.
- I ritardi subiti dalle PDU delle sorgenti Best-Effort: dal momento che questo simulatore, come già spiegato nel Capitolo 6, utilizza una strategia di scheduling differente da quella della versione 1.0 [38] [39], è interessante studiare i ritardi subiti da questo tipo di sorgente.
- Il numero di MAC-PDU trasmesse: questo viene esaminato sia per le sorgenti GB sia per le BE, sia per quelle originarie sia per quelle indotte. Si possono fare dei confronti per valutare le prestazioni delle due tecniche di accesso in termini di banda occupata.
- Il riempimento dei buffer per la classe GB.
- Il riempimento dei buffer per la classe BE.

Questi ultimi due parametri ci daranno un'idea del diverso trattamento che le MAC-PDU subiscono in Uplink ed in Downlink.

E' superfluo sottolineare che questi parametri, essendo osservati per entrambe le tratte e quindi frutto di due differenti tecniche di accesso al mezzo, offrono un ottimo strumento per evincere delle conclusioni che metteranno in luce le differenze, i pro ed contro relativi all'utilizzo del CDMA e del TDMA.

7.1: PRIMA SIMULAZIONE

In questa prima parte riporteremo tutti i risultati ottenuti considerando sia le sorgenti originarie sia quelle indotte. Negli istogrammi sottostanti si riportano le tre terne di colonne, una colonna per ogni tipo di ritardo ed una terna per ogni categoria di traffico, che forniscono i ritardi massimi, medi e minimi mediati su tutte le PDU trasmesse dai RTs interessati. Sull'asse delle ordinate riportiamo il ritardo calcolato in millisecondi.

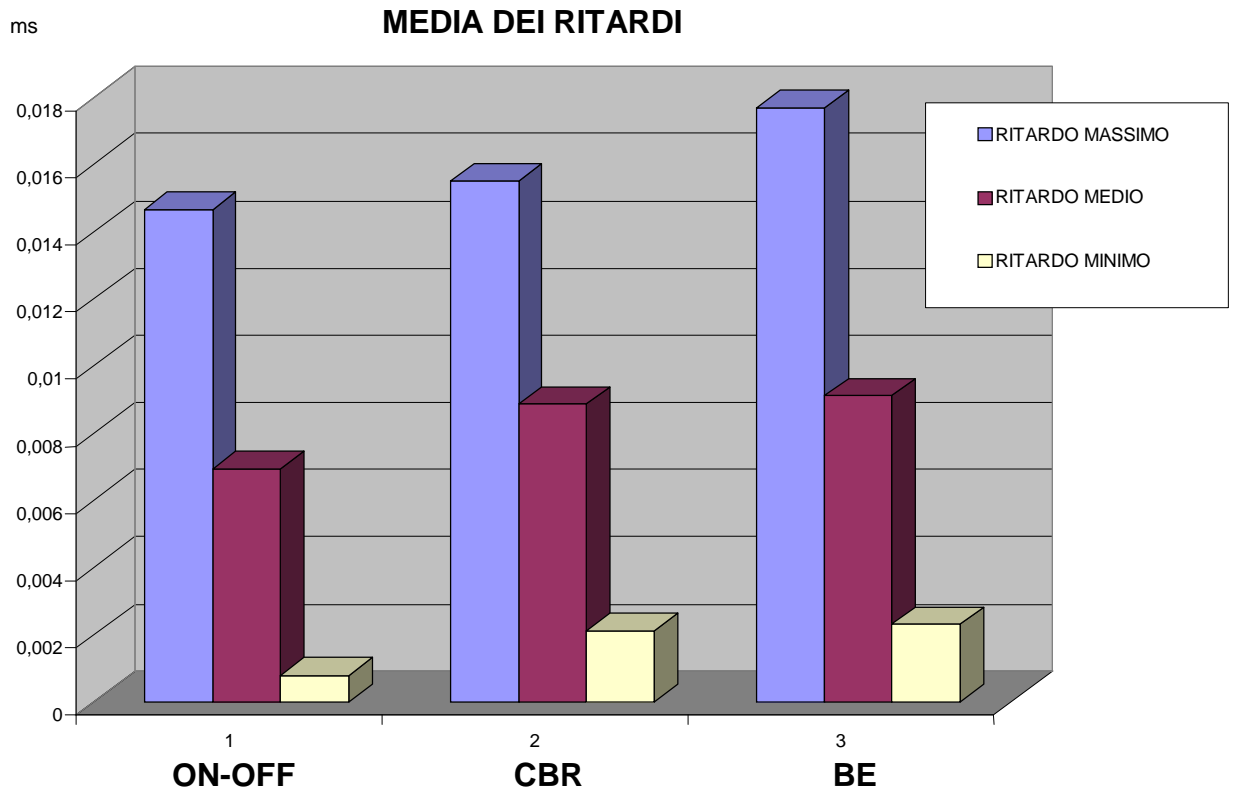


Figura 7.1: Media dei ritardi-Sorgenti originarie

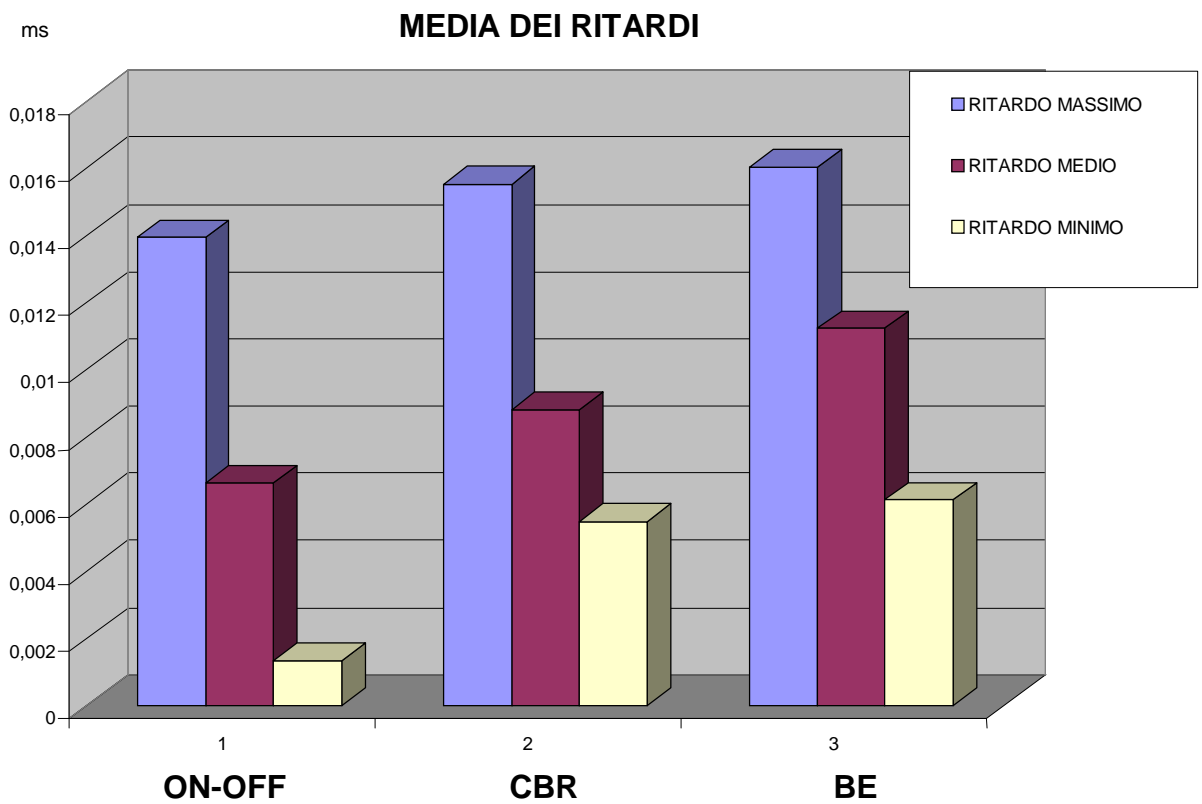


Figura 7.2: Media dei ritardi-Sorgenti indotte

E' da notare che gli andamenti delle colonne sono molto simili nei due grafici. Dall'analisi di altre simulazioni, non riportate qui, e da quelle relative al simulatore 1.0, che utilizzava un'altra strategia di scheduling, si è visto che la nuova versione dello schedulatore favorisce in una certa misura le BE a discapito di un riversamento dei tempi di latenza delle MAC-PDU sulle GB come già spiegato nel capitolo 4. Questo schedulatore tiene, però, sempre in considerazione il fatto di avere a che fare con GB e BE facendo le opportune distinzioni e, come si vede, le GB presentano dei valori inferiori di ritardo rispetto alle BE.

Un'importante cosa da rilevare è che i ritardi minimi sono abbastanza diversi nei due casi, in particolare in uplink assistiamo quasi ad un raddoppio. Questo risultato era prevedibile dal momento che in UL, prima di poter trasmettere una MAC-PDU, bisogna aspettare che il RN comunichi l'allocazione, mentre in DL le cose vanno molto più rapidamente dal momento che la trasmissione avviene direttamente senza aspettare segnalazioni dall'esterno; ricordiamo a tal proposito che il controllo è centralizzato. Da notare che invece i ritardi massimi sono maggiori in DL a causa del maggior carico di traffico che il RN deve smaltire.

Passiamo ora ad analizzare i ritardi per le sorgenti Best Effort senza considerare le GB perché sono proprio le BE a subire le conseguenze peggiori a causa dell'intrinseca bassa priorità.

Sull'asse delle ordinate abbiamo il numero di volte, in scala di 10^{-3} , che una MAC-PDU subisce un determinato ritardo e in ascissa si ha l'entità di tale ritardo e cioè il numero di time slot di latenza. Il ritardo è considerato a partire dal momento di generazione di un pacchetto e, dato il particolare dimensionamento degli sfasamenti fatto nel capitolo precedente, è chiaro che si avrà un certo offset iniziale per i pacchetti che devono essere trasmessi in DL, mentre per quelli che devono essere trasmessi in UL, oltre al tempo necessario per l'allocazione bisogna considerare anche quello per la richiesta.

DELAY BE

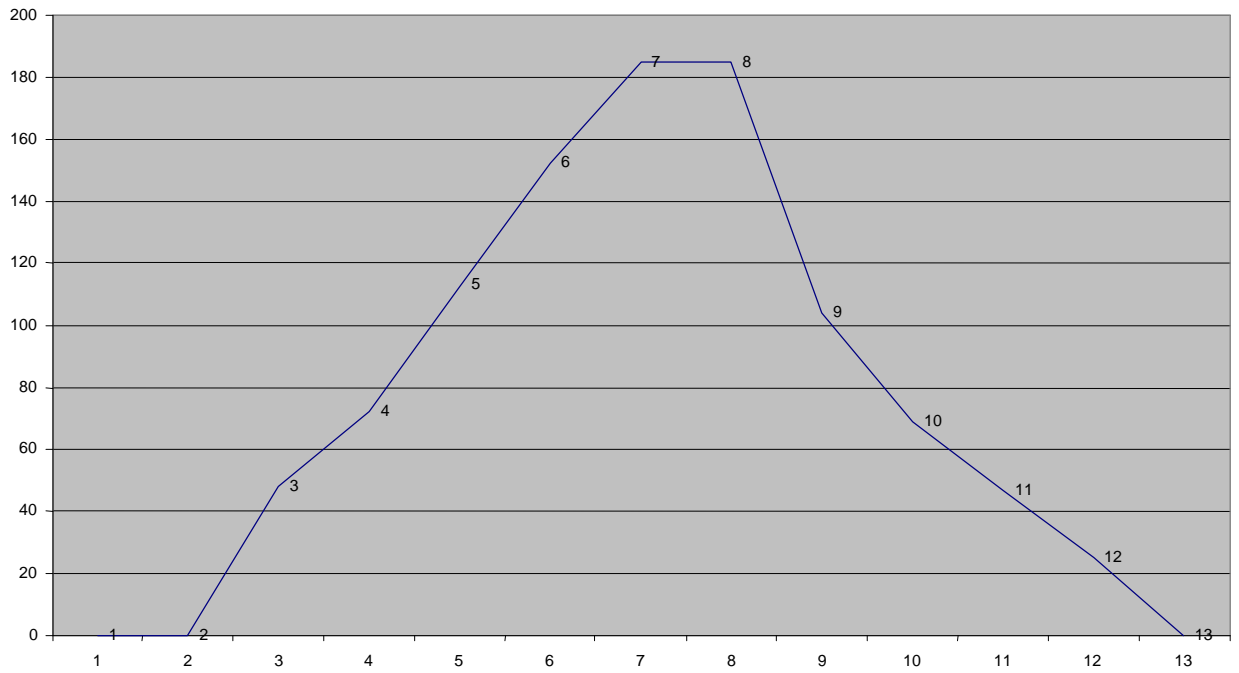


Figura 7.3: Ritardi Best Effort-Sorgenti Originarie

DELAY BE

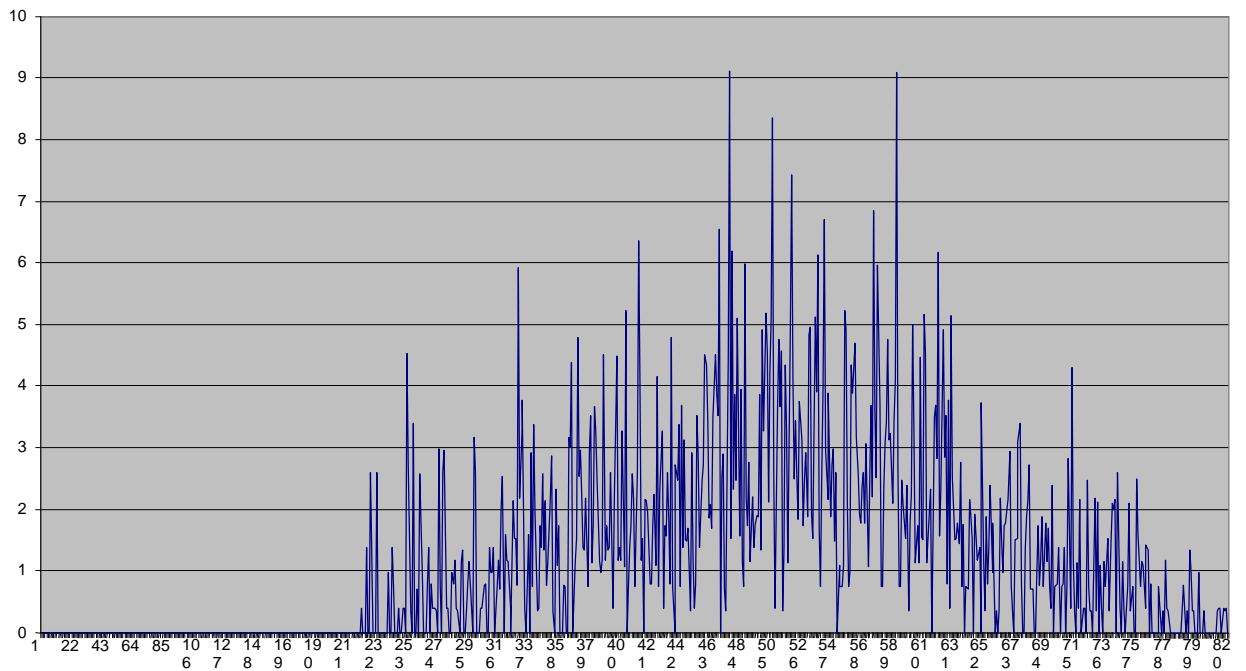


Figura 7.4: Ritardi Best Effort-Sorgenti Indotte

Trascurando l'offset iniziale nei due grafici, si può notare che l'andamento generale delle due curve è abbastanza simile. La cosa interessante è che in entrambi i casi, partendo dall'inizio della spezzata, il ritardo maggiore è di quasi due trame, cioè di circa 18 *ms*. Si vede infatti che in Uplink il massimo ritardo è di circa 620 TS (624 corrispondono a due trame) e in Downlink è di 11 TS (12 TS sono due trame). Inoltre la concentrazione dei ritardi si attesta intorno ad un numero di TS che in tutt'e due i casi corrisponde a circa una trama. Si può affermare che mediamente le unità informative, dal momento dell'allocazione, subiscono ritardi di una trama con una escursione massima di due, e questo è stato verificato anche aggiungendo ulteriori sorgenti. Questo è dovuto al fatto che sia la Matrice dei Codici sia il Vettore dei TS sono sfasati di circa metà trama rispetto alle trame temporali vere e proprie e quindi sono a cavallo di due trame. L'allocazione delle risorse interessa maggiormente tale zona (si veda la figura 6.8). Gli offset iniziali dei grafici sono la conseguenza del dimensionamento degli sfasamenti rappresentati in figura 6.8 in cui si vede come in UL si fa richiesta delle risorse e poi si attende l'allocazione, mentre in DL è il RN stesso che alloca le risorse (il controllo è centralizzato).

Passiamo a vedere cosa accade nel riempimento dei buffer e cioè alla quantità di MAC-PDU che devono essere trasmesse e le percentuali di occorrenza che un certo numero di unità informative si trova in coda per essere trasmesso.

Va detto che i grafici riguardano solamente il caso di presenza di elementi da trasmettere, mentre la percentuale di volte che non c'è coda viene tagliata dal grafico altrimenti si avrebbe una compressione esagerata delle fette di torta sotto riportate.

Cominciamo col considerare le sorgenti a banda garantita.

Nelle torte illustrate di seguito si riporta la percentuale di volte che un certo numero di unità informative si trova in coda per essere trasmesso. Non sono interessanti i valori in sé, ma la similitudine delle situazioni che ricorrono in UL ed in DL così da avere un'idea di come due differenti tecniche di accesso trattino le risorse. E' inoltre curioso notare come le torte per le sorgenti indotte siano caratterizzate da valori che scaturiscono dalla presenza di quelle sorgenti con un'alta percentuale di riscontri.

RIEMPIMENTO GB

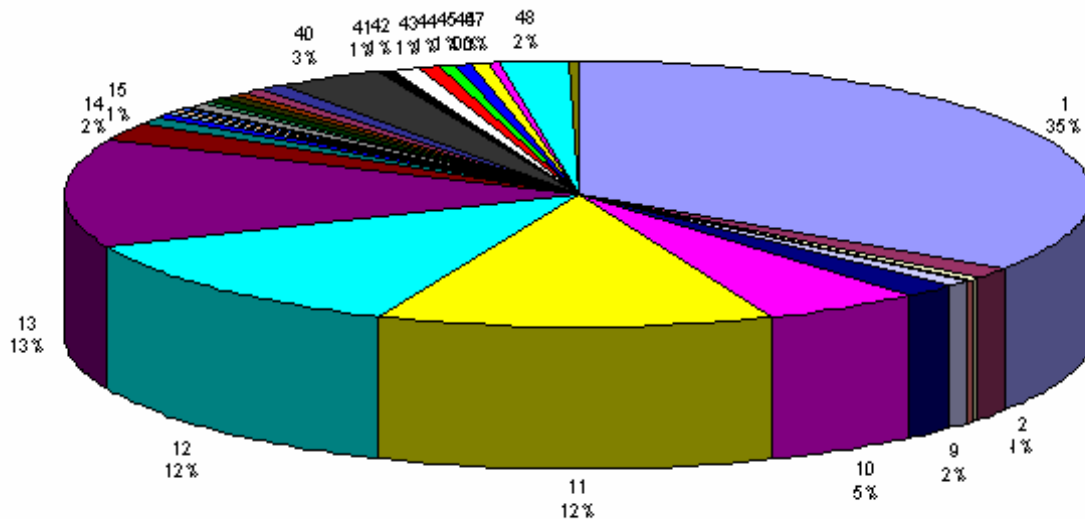


Figura 7.5: Riempimento GB-Sorgenti Originarie

RIEMPIMENTO GB

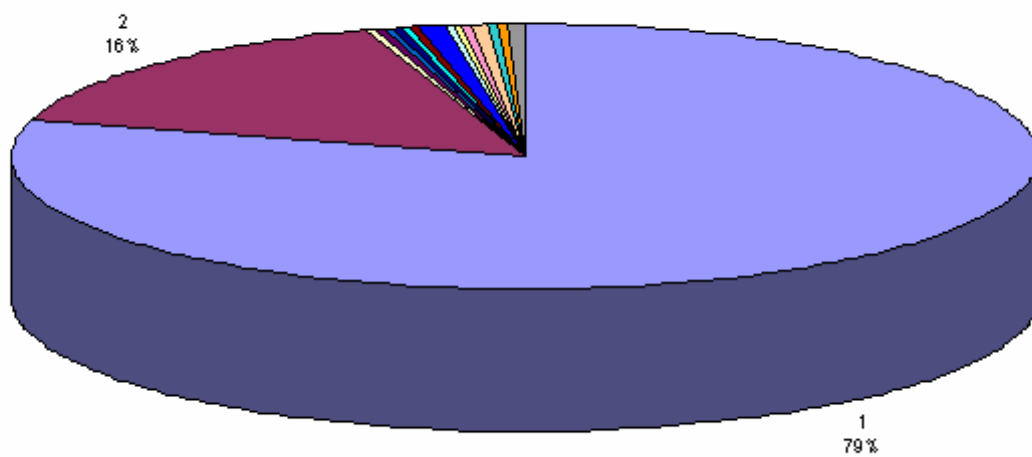


Figura 7.6: Riempimento GB-Sorgenti Indotte

Consideriamo ora le sorgenti Best Effort.

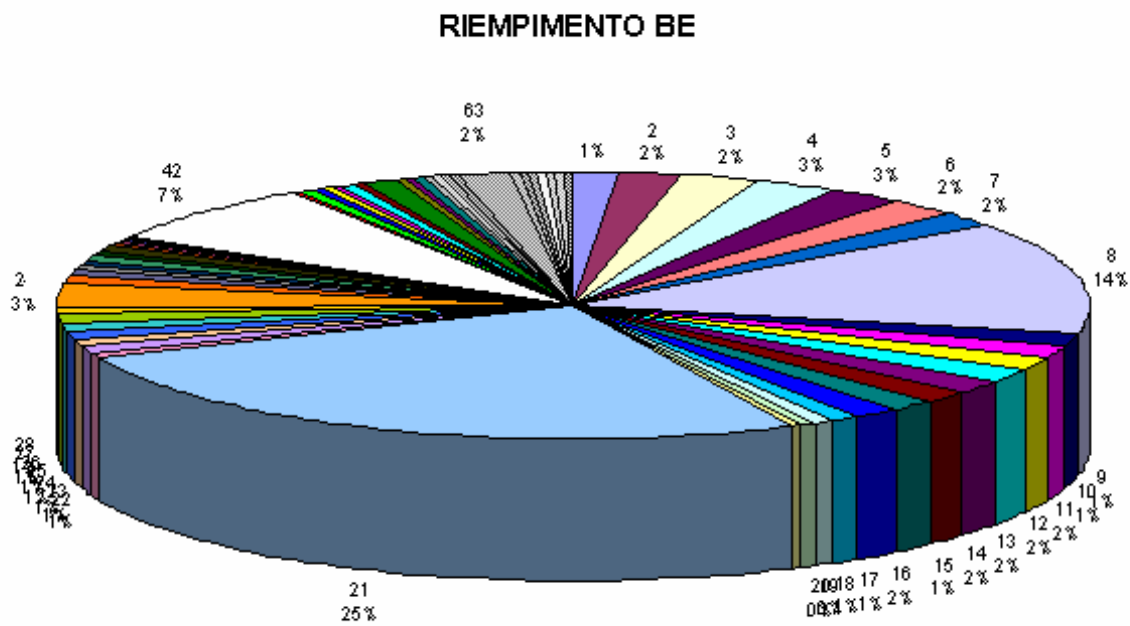


Figura 7.7: Riempimento BE-Sorgenti Originarie

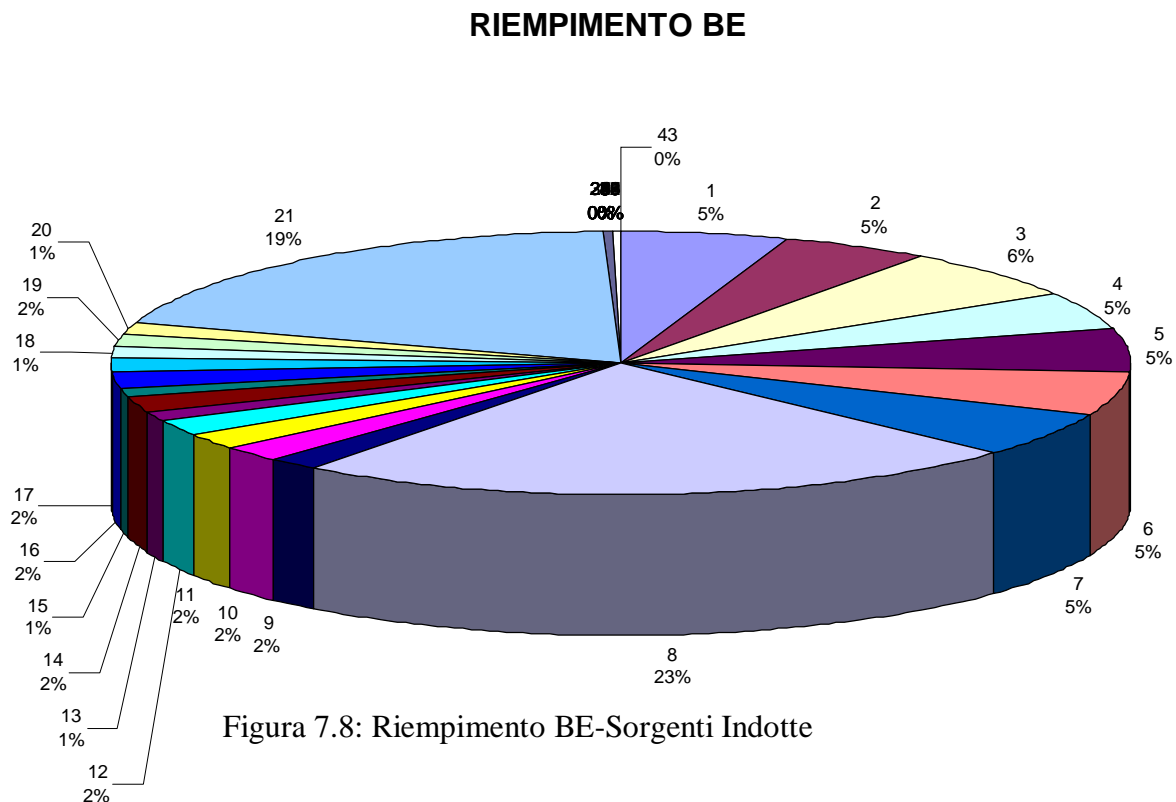


Figura 7.8: Riempimento BE-Sorgenti Indotte

Una prima analisi delle due coppie di torte ci fa vedere come alte percentuali di presenza nei buffer di MAC-PDU riguardino un certo valore che si ripete e che è evidenziato da un dato colore. Questo fatto dipende molto dal numero e dal tipo di sorgenti introdotte, ma quello che importa è la coerenza di questi valori sia nella torta riferita alle sorgenti originarie sia in quella relativa alle sorgenti indotte. Una analisi più accurata verrà fatta dopo aver analizzato la seconda simulazione.

L'analisi dell'occupazione di banda verrà fatta nella sezione relativa ai confronti dopo aver avuto una panoramica dei valori anche delle altre simulazioni.

7.2: SECONDA SIMULAZIONE

Ci riferiamo ora al caso di inserimento delle sorgenti solamente ai radio terminal. Diamo un'occhiata alle medie dei ritardi calcolati sempre in millisecondi.

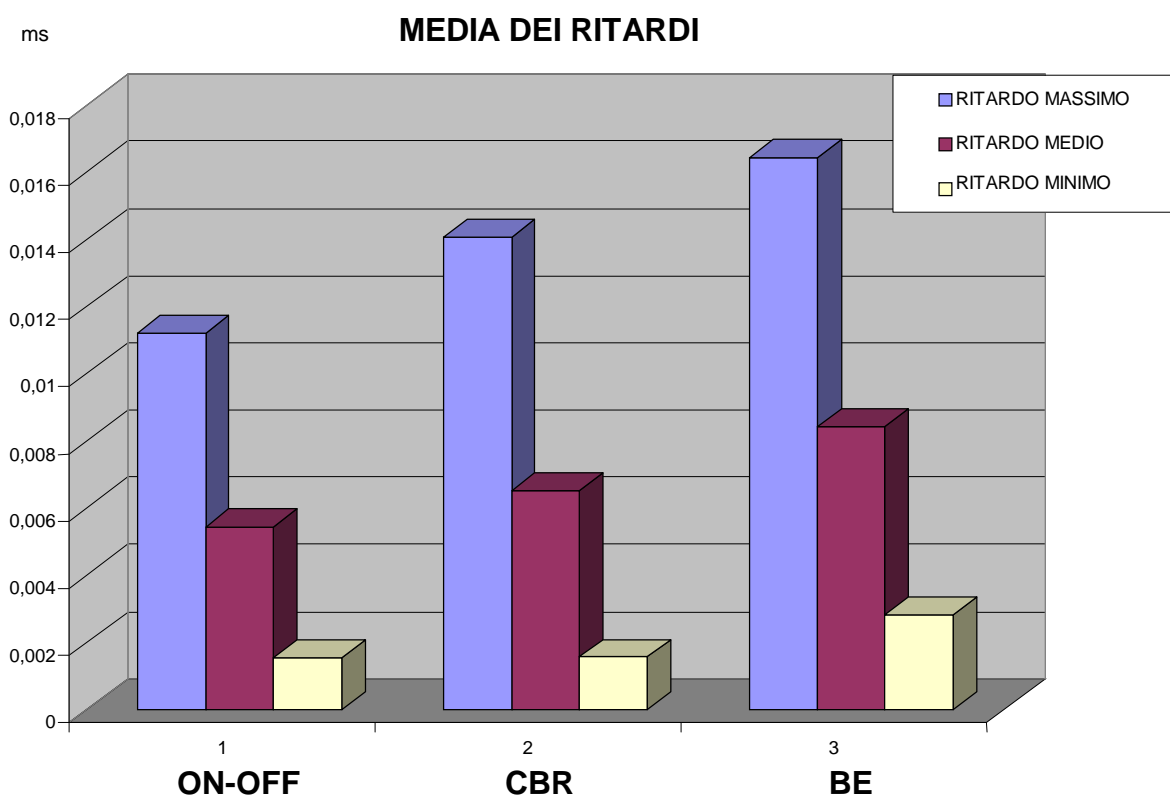


Figura 7.9: Media dei ritardi-Sorgenti Originarie

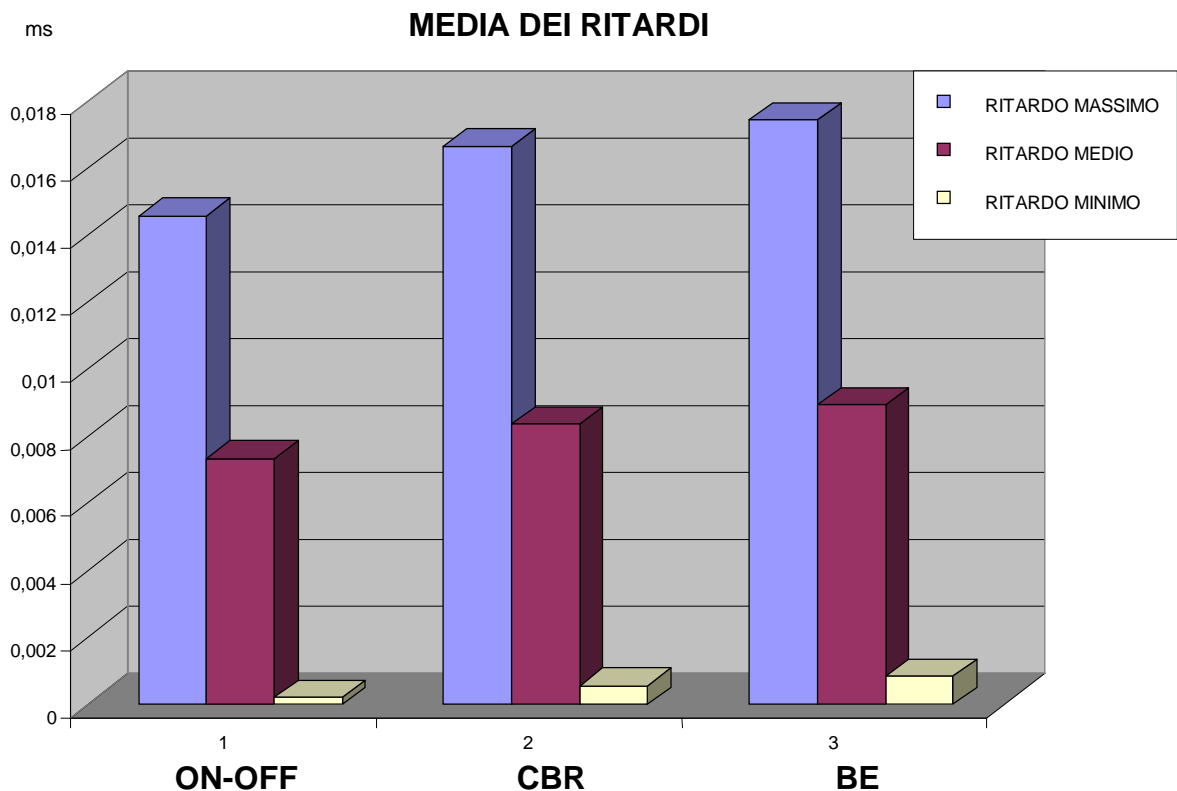


Figura 7.10: Media dei ritardi-Sorgenti Indotte

Come si vede valgono le stesse considerazioni fatte nel caso della prima simulazione. I ritardi crescono a partire dalle ON-OFF per passare alle CBR fino ad arrivare alle BE. Le priorità differenti tra sorgenti GB e sorgenti BE si riflettono chiaramente su questi ritardi. Come per il primo caso i ritardi minimi in downlink sono minori che in uplink.

Ulteriori confronti verranno fatti nel seguito.

Passiamo a vedere i ritardi delle sorgenti Best Effort ricordando che sull'asse delle ordinate si ha il numero di volte in scala di 10^{-3} che una unità informativa subisce un ritardo pari al numero di TS dati sull'asse delle ascisse.

DELAY BE

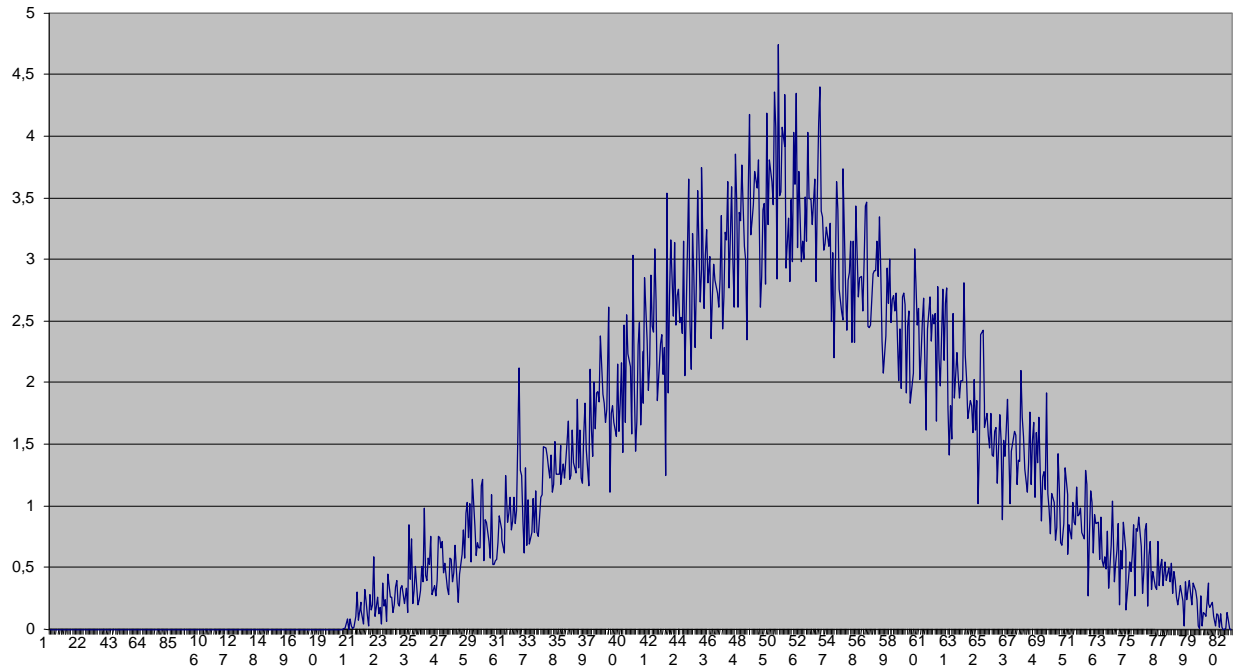


Figura 7.12: Ritardi Best Effort-Sorgenti originarie

DELAY BE

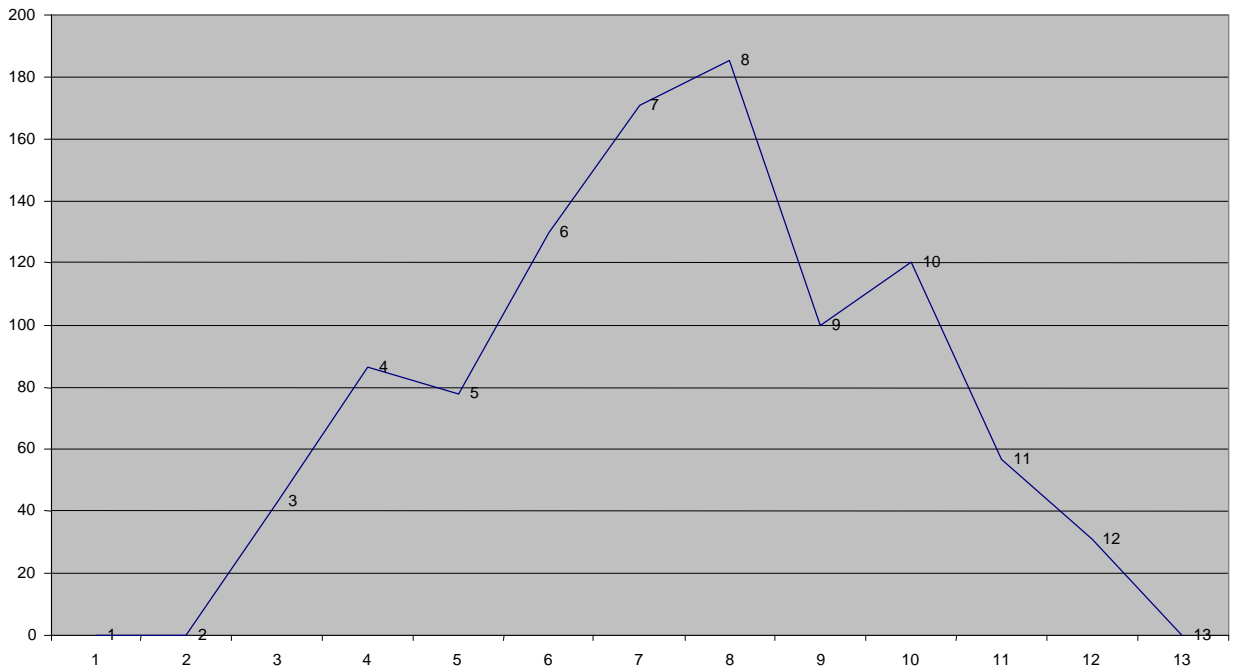


Figura 7.12: Ritardi Best Effort-Sorgenti Indotte

Anche per quel che riguarda i ritardi relativi alle best effort, si possono ripetere le considerazioni fatte nel caso precedente.

Andiamo ad esaminare il riempimento dei buffer.

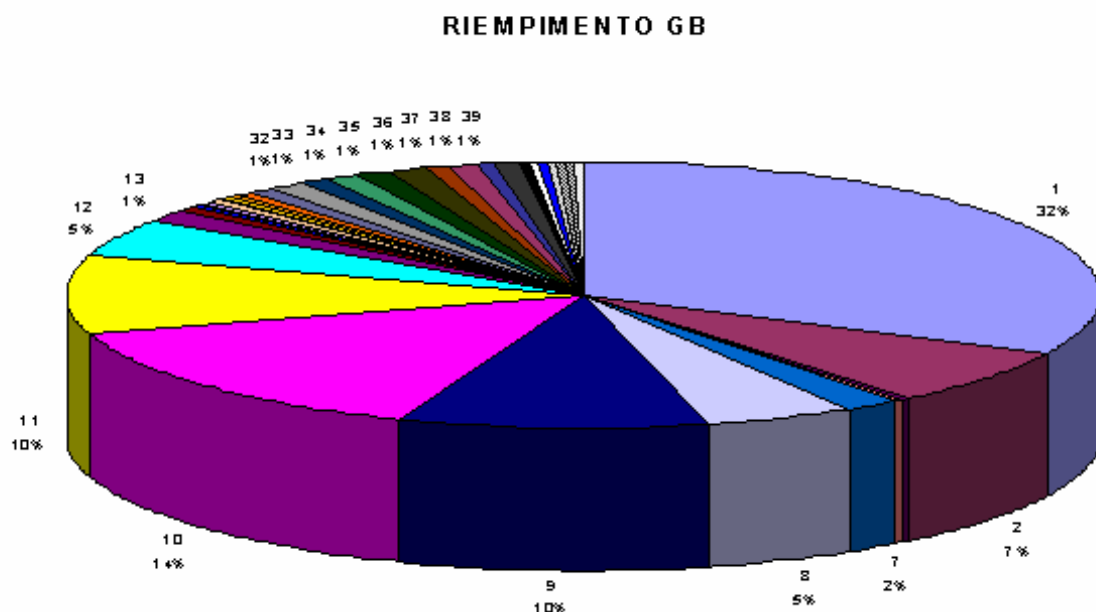


Figura 7.13: Riempimento GB-Sorgenti Originarie

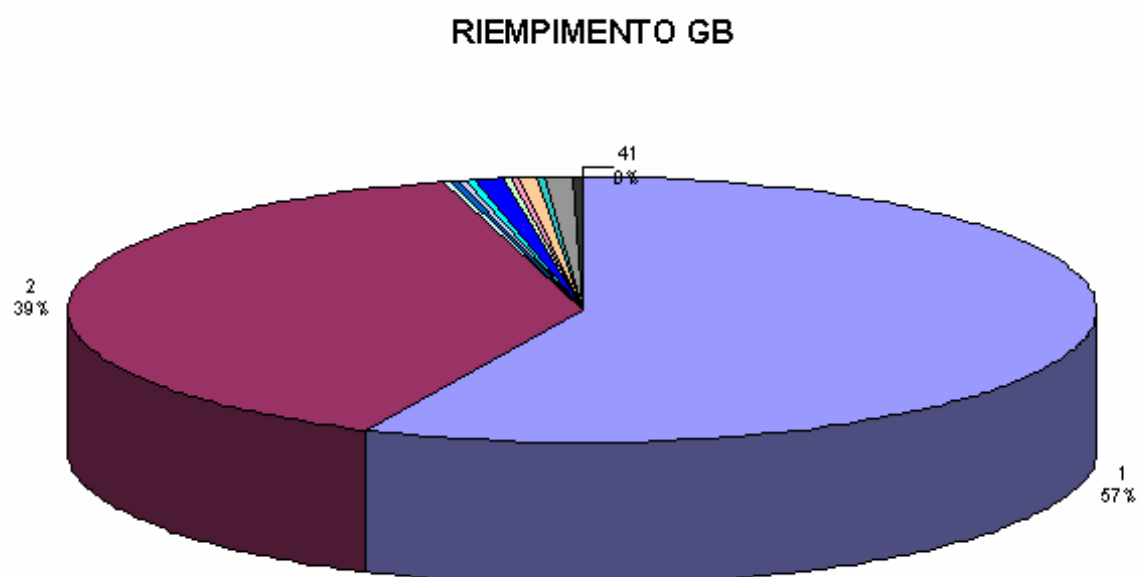


Figura 7.14: Riempimento GB-Sorgenti Indotte

Ora consideriamo le sorgenti Best Effort.

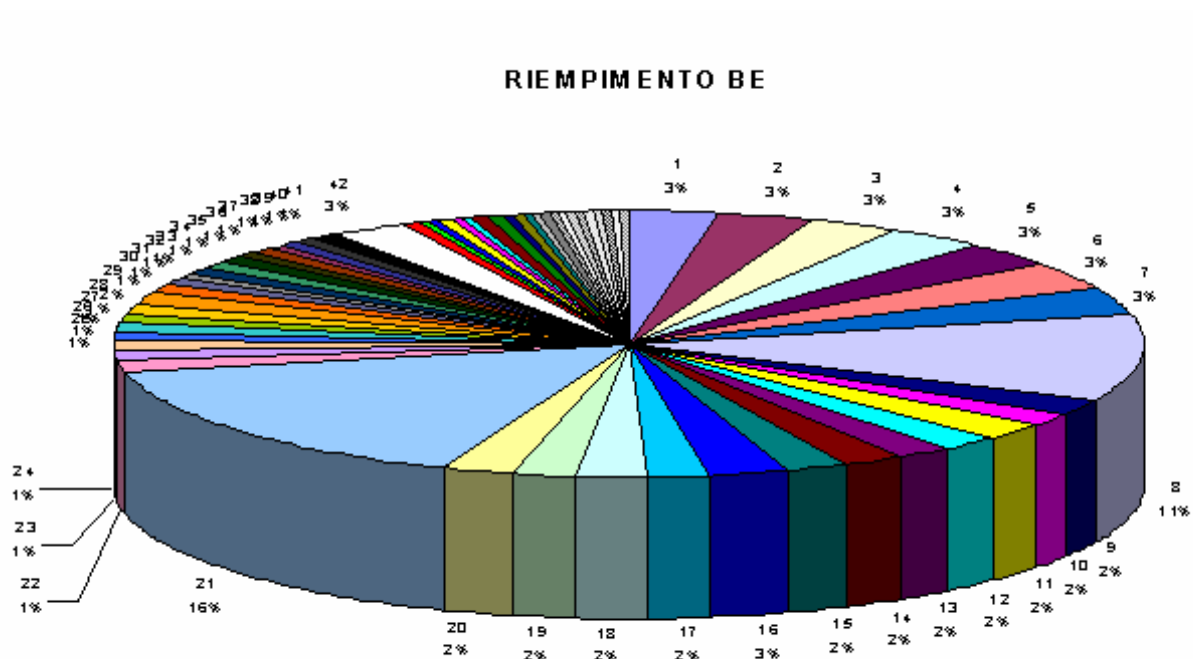


Figura 7.15: Riempimento BE-Sorgenti Originarie

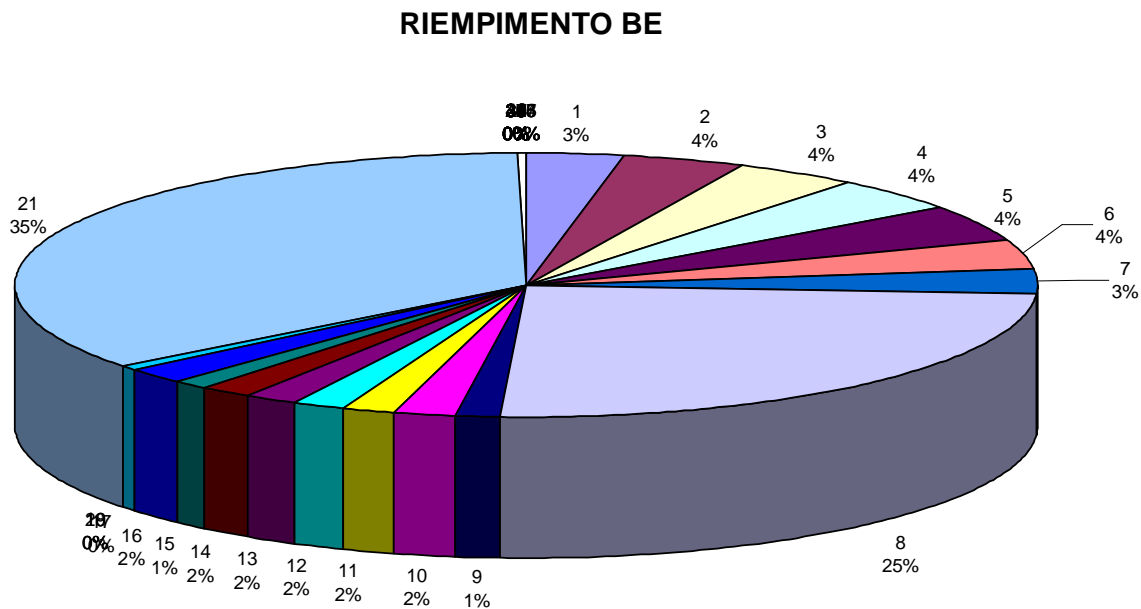


Figura 7.16: Riempimento BE-Sorgenti Indotte

Anche in questo caso possiamo trarre la stessa conclusione del caso precedente , o meglio, si ha la situazione complementare: si vede bene come le sorgenti con una maggior percentuale di riscontri determinano certi valori nelle torte delle sorgenti indotte che implicano una certa dissimilitudine fra le due coppie di torte.

7.3 TERZA SIMULAZIONE

Per questa simulazione si è considerato un traffico inserito sia al RN sia ai RT, più i relativi traffici indotti. Per semplicità sono state prese le stesse sorgenti dei casi precedenti, in cui per ogni tipo di servizio considerato erano state inserite due sorgenti, e sono state sdoppiate così da avere le stesse caratteristiche di traffico nei due versi e poter fare confronti con le prime due simulazioni. Come si vedrà, il fatto di sdoppiare le sorgenti non determina un dimezzamento del carico trasmissivo nelle due tratte, ma una semplice diminuzione tanto minore quanto più alte sono le percentuali dei riscontri.

E' stata poi fatta una quarta simulazione utilizzata in cui sono state inserite sorgenti al RN ed ai RTs senza sdoppiare quelle inserite nei casi precedenti. In pratica, in questo caso, abbiamo un numero di sorgenti totale pari alla somma di considerate nelle prime due simulazioni con una percentuale banda allocata alle GB pari a circa il 44 % in entrambe le tratte, più un certo numero, abbastanza elevato, di sorgenti BE. Con questa quarta simulazione andremo solamente a fare un confronto per l'occupazione media di banda.

Andiamo a considerare le medie dei ritardi massimi, medi e minimi in UL e DL basandoci quindi sulla sola terza simulazione.

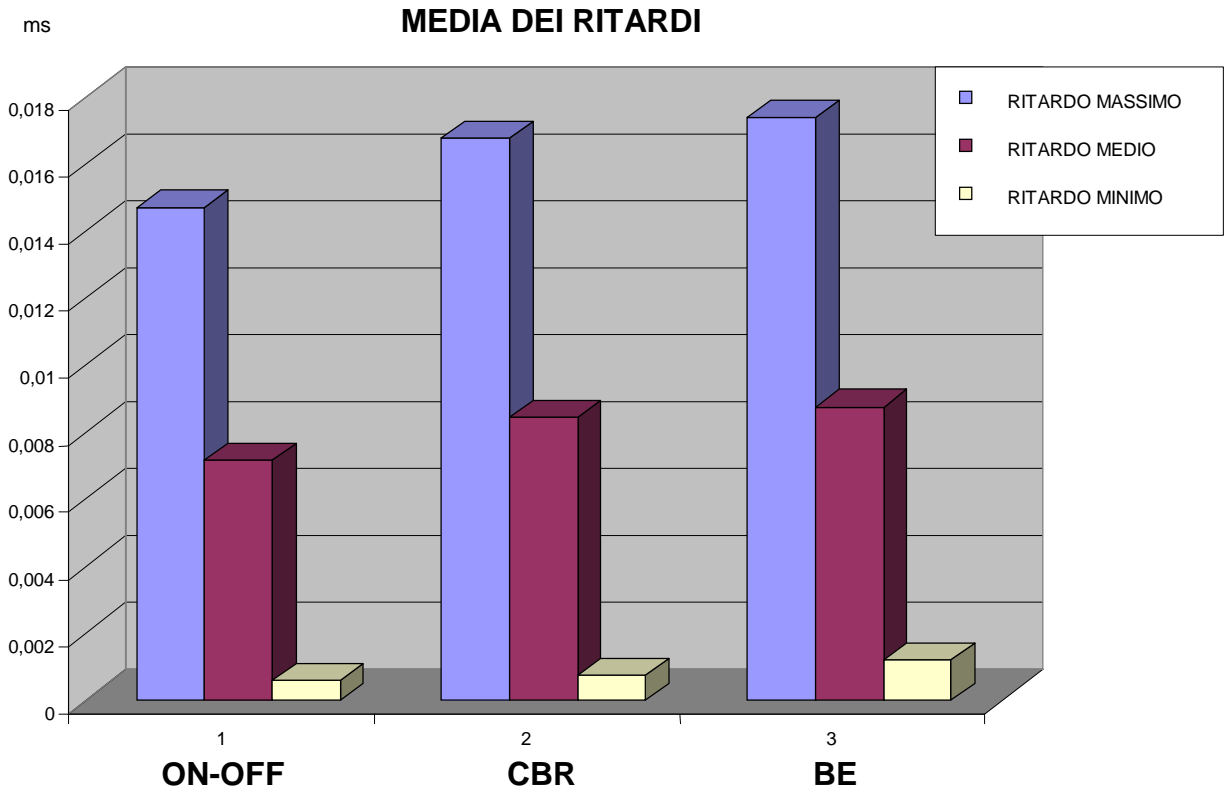


Figura 7. 17: Media dei ritardi in Downlink

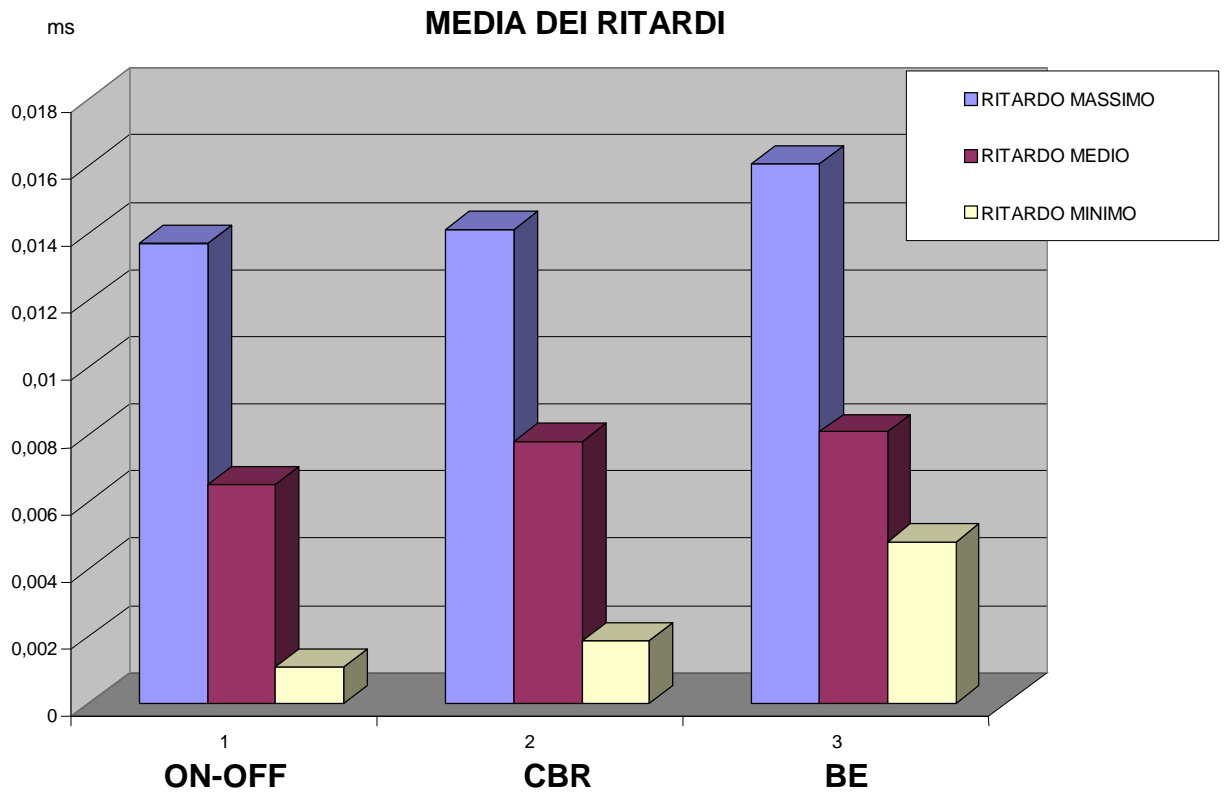


Figura 7.18: Media dei ritardi in Uplink

Si vede bene come i discorsi fatti in precedenza si ripetono e valgono anche in questo caso in cui il traffico per ogni tratta è leggermente superiore della metà di quello considerato nei due casi precedenti. Nelle due tratte e quindi con due differenti tecniche di accesso al mezzo si hanno gli stessi risultati. La stessa cosa si può dire riguardo il ritardo delle sorgenti Best Effort calcolato su base trama. Osserviamo i grafici seguenti.

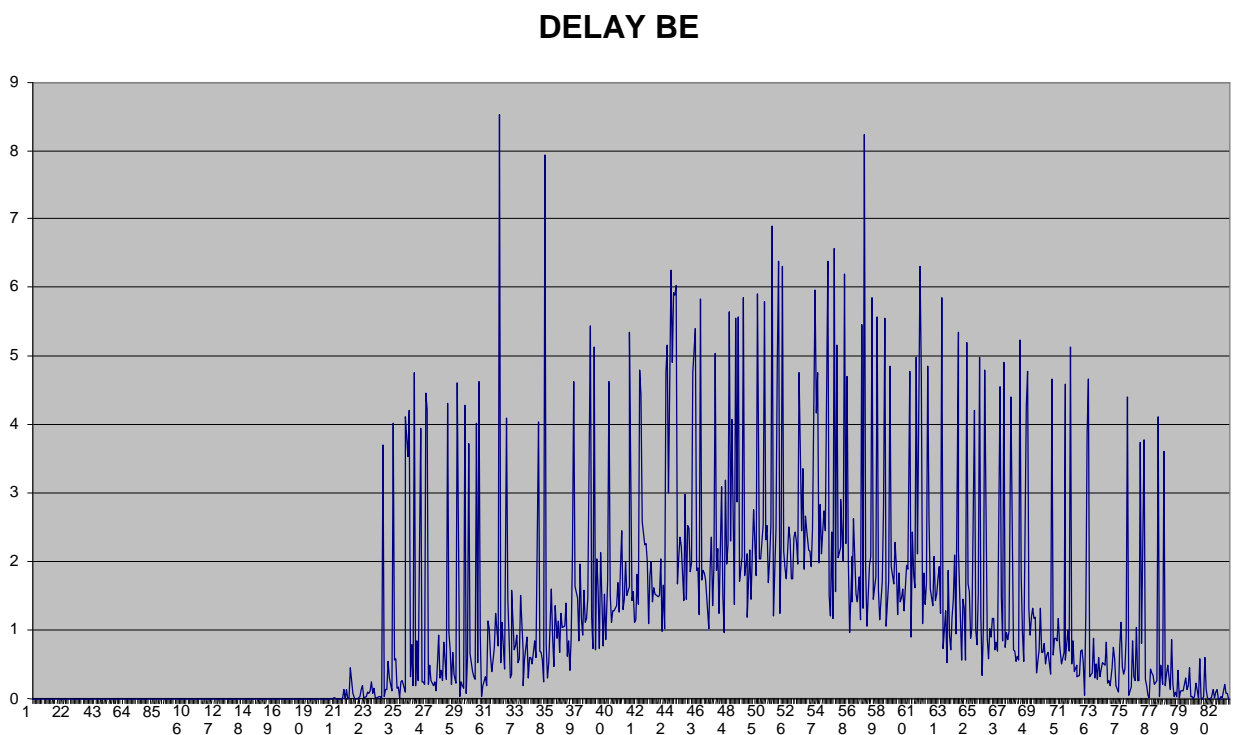


Figura 7.19: Ritardi Best Effort in Uplink

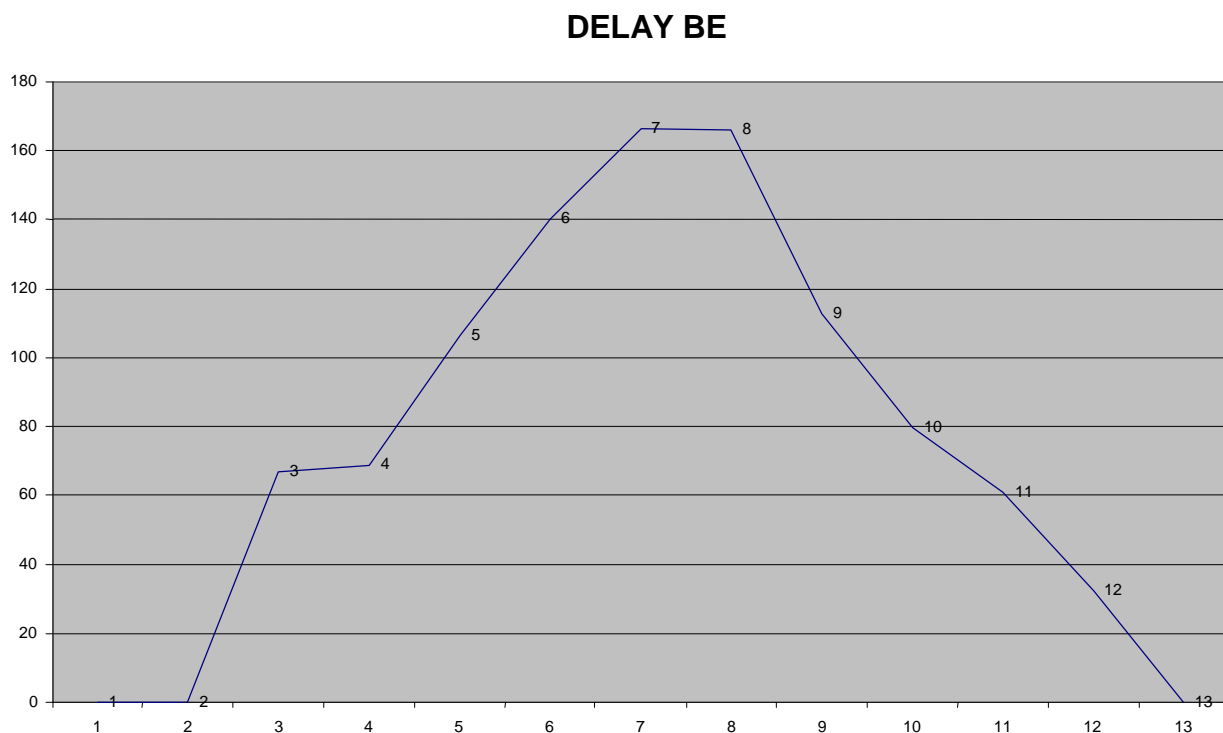


Figura 7.20: Ritardi Best Effort in Downlink

Anche per i ritardi BE quindi valgono le cose già dette in precedenza: dato il particolare sfasamento della Matrice dei Codici e del Vettore dei TS, la allocazione delle risorse cade a cavallo di due trame e la cosa si ripercuote sui ritardi subiti che è generalmente di una trama a partire dalla fine dell'offset dato dal tempo necessario all'allocazione.

Da sottolineare il fatto che lo sdoppiamento delle sorgenti considerato non implica necessariamente un dimezzamento delle risorse e quindi dell'occupazione dei buffer, ma dipende tutto dalle percentuali di riscontri relative ad un particolare servizio.

Le percentuali associate alle sorgenti indotte sono quindi determinanti per la quantità di carico interessato e si può ben capire, ora, le riflessioni fatte nel Capitolo 5 riguardo il controllo da svolgere contemporaneamente sulla banda da assegnare alle sorgenti originarie e a quelle indotte nel momento di ogni inserzione.

Vediamo infine come vanno le cose alle code delle unità da trasmettere.

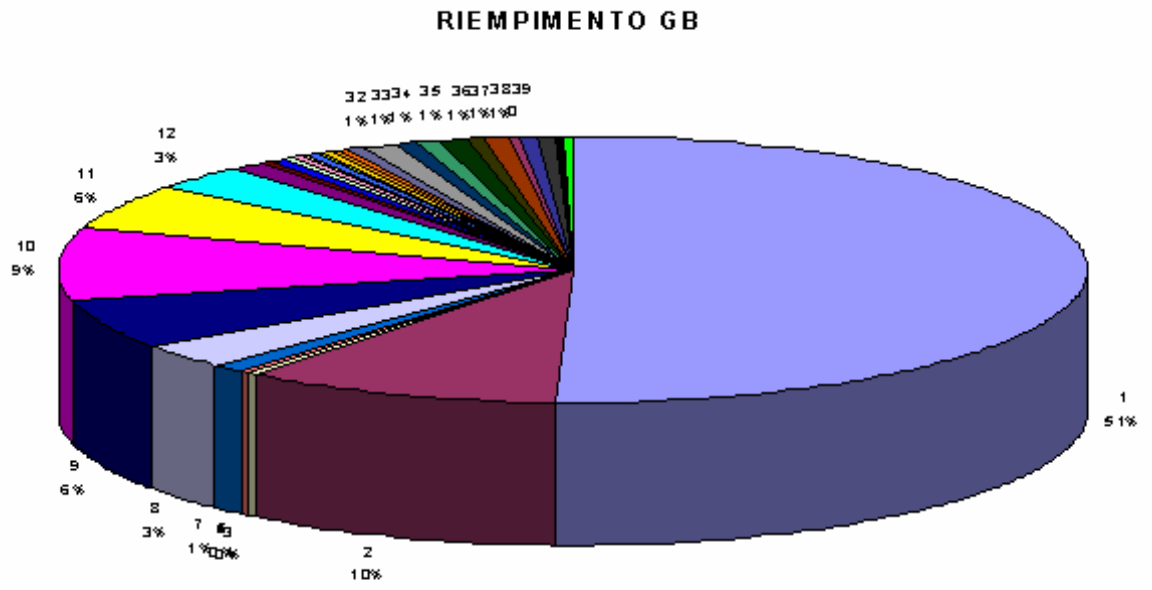


Figura 7.21: Riempimento GB in Uplink

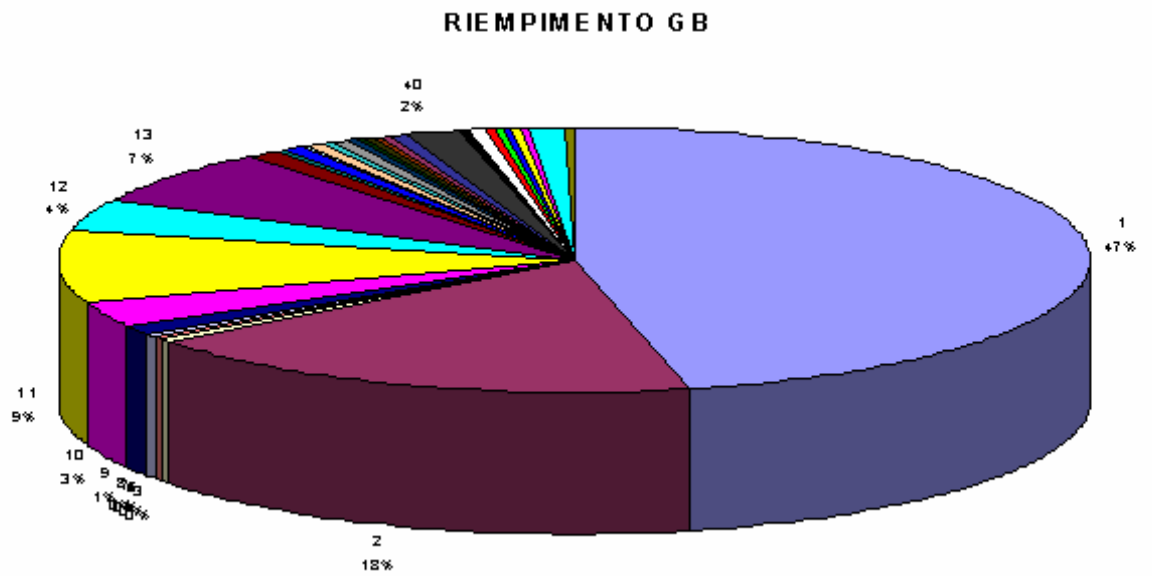


Figura 7.22: Riempimento GB in Downlink

RIEMPIMENTO BE

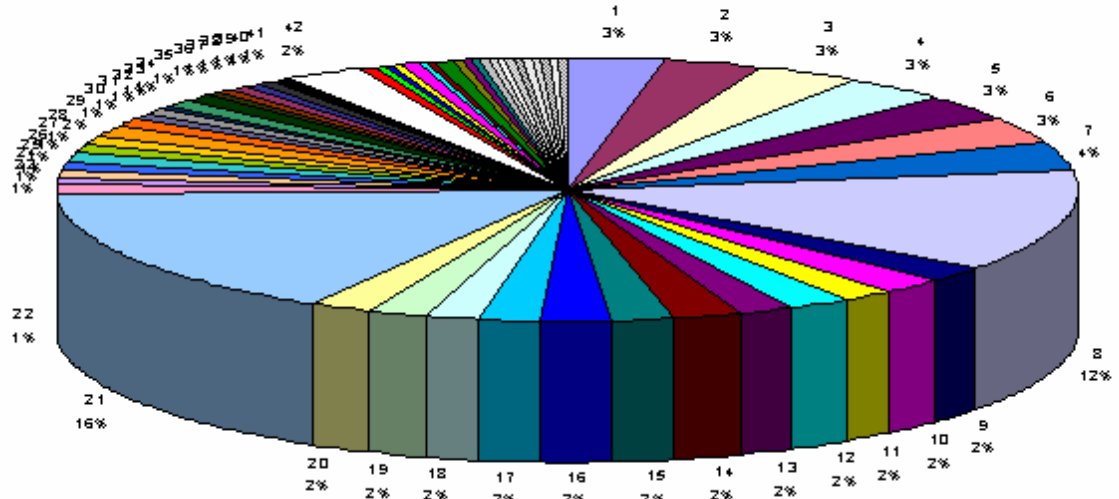


Figura 7.23: Riempimento BE in Uplink

RIEMPIMENTO BE

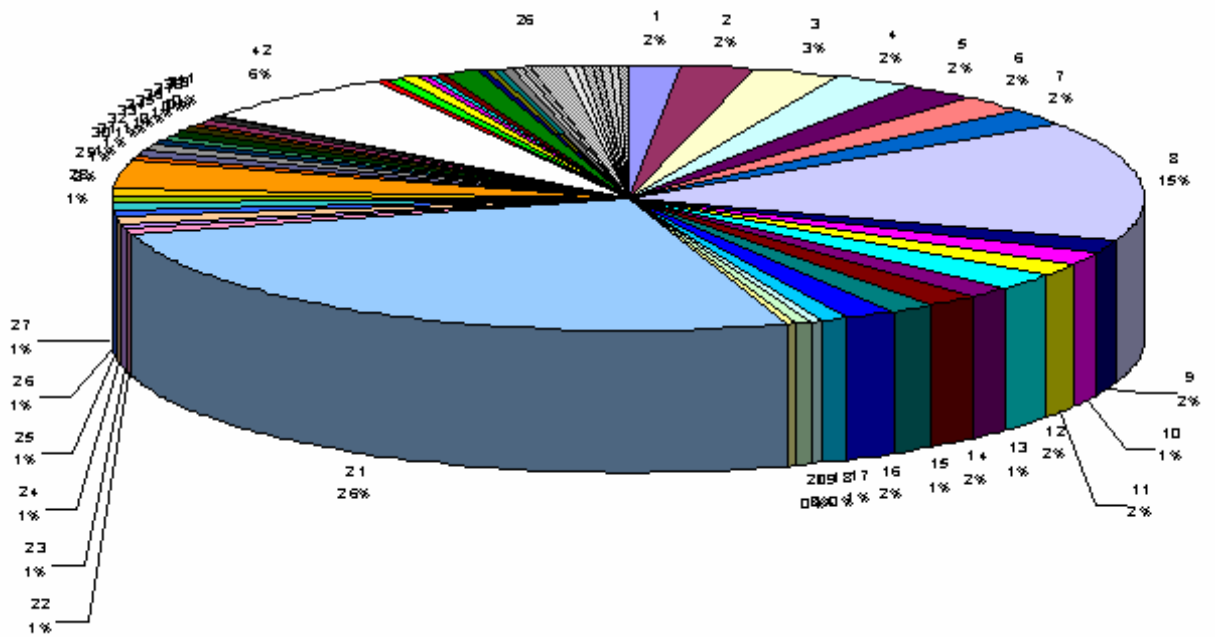


Figura 7.24: Riempimento BE in Downlink

Osservando i grafici riportati sopra si vede come non ci siano grandi differenze tra il trattamento delle sorgenti GB nei due versi così come la gestione delle best Effort; la cosa interessante è che, su base trama, il trattamento subito dalle MAC-PDU è abbastanza simile in Uplink ed in Downlink e quindi dovuto dalle due differenti tecniche di accesso. I risultati ottenuti mostrano una chiara via di mezzo dei primi due casi.

7.4 CONFRONTI SULLA BANDA OCCUPATA

Per fare un confronto in questo senso, durante le simulazioni, sono state calcolate le MAC-PDU trasmesse trama per trama, riportate in ordinata, e poi ne è stata fatta una media. Osserviamo il primo grafico.

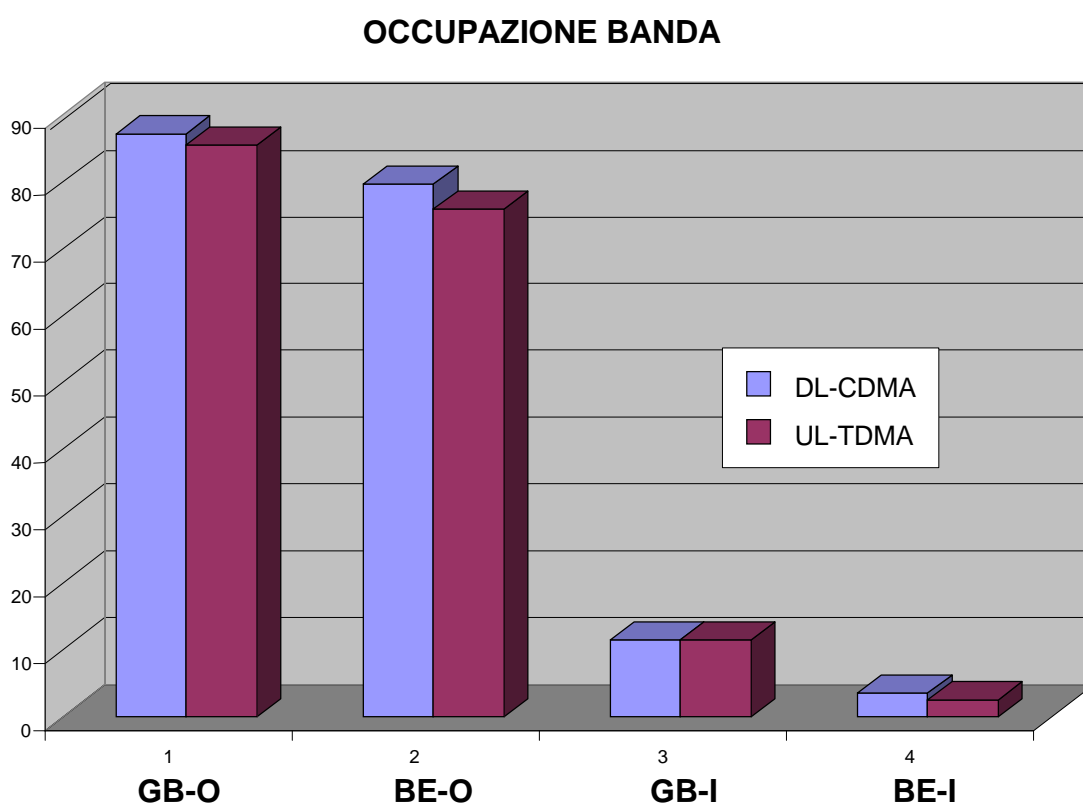


Figura 7.25: Occupazione della banda-Prime due simulazione

La prima coppia di colonne si riferisce all'occupazione di banda determinata dalle sorgenti GB originarie nel caso di solo inserimento delle sorgenti al RN (colore blu) e nel caso di inserimento ai RTs (colore rosso). L'occupazione di banda determinata dalle sorgenti GB indotte viene descritta dalla terza coppia di colonne. Lo stesso discorso vale per la seconda e quarta coppia, ovviamente riferita alle Best Effort.

Si può vedere come il CDMA e i TDMA forniscano risultati molto simili in tal senso; per far questo basta confrontare le altezze delle colonne. Facciamo la stessa analisi nel caso di inserimento simultaneo (terza simulazione) sia in UL che in DL e confrontiamo il caso in cui sdoppiamo le sorgenti inserite nei primi due casi, con quello in cui inseriamo tutte quelle sorgenti sia al RN che ai RTs determinando un'allocazione doppia di risorse.

Ricordiamo che in ordinata abbiamo il numero di MAC-PDU trasmesse.

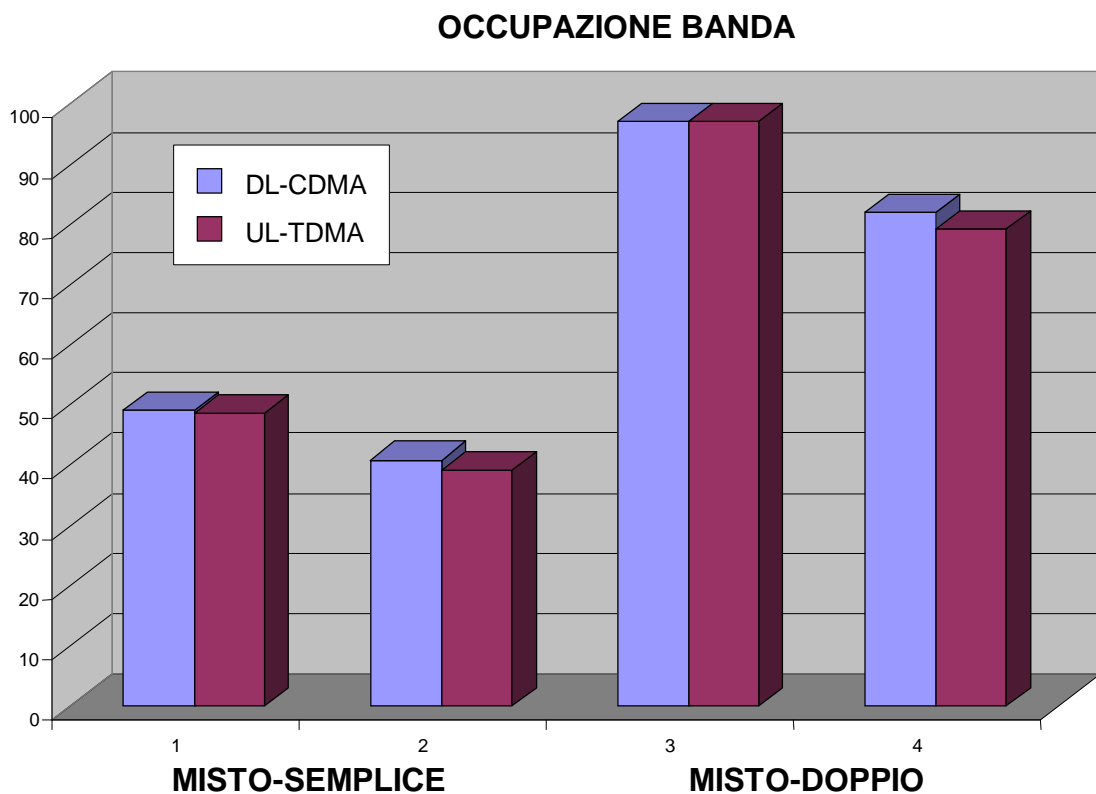


Figura 7.26: Occupazione della banda_Terza e quarta simulazione

Le prime due coppie di colonne si riferiscono al caso di sorgenti sdoppiate e, rispettivamente, alle sorgenti GB e a quelle BE, mentre le altre due coppie di colonne riguardano il caso di sorgenti inserite senza lo sdoppiamento.

Quest'ultimo caso determina un raddoppiamento delle risorse allocate ed un quasi raddoppiamento delle unità informative trasmesse e quindi della banda occupata.

Si nota ancora una volta come le cose vadano abbastanza similmente nei due versi di comunicazione con un soddisfacimento delle richieste che cresce abbastanza linearmente fino a quando si hanno risorse disponibili da allocare, ma con prestazioni che degradano nel caso di sovraccaricamento del canale soprattutto per quanto riguarda le best effort a causa dell'overflow che potrebbe implicare la loro perdita.

CONCLUSIONI

Nel presente lavoro di ricerca viene proposto un simulatore che realizza, a livello di strato MAC, la gestione di un insieme di terminali che comunicano con un radio node, in un ambiente Wireless, trattando in maniera differente l'Uplink dal Downlink.

Nella tratta di DL si è presa in considerazione la combinazione OFDM-CDMA dalla quale si possono trarre notevoli vantaggi ed alte prestazioni ben descritte nel Capitolo 2 mentre, per le ragioni illustrate nel Capitolo 5, in UL si è deciso di ricorrere alla combinazione OFDM-TDMA. Riferendoci a quest'ultimo caso, dal momento che il controllo è centralizzato, il RN gestisce i momenti di attività e di silenzio dei vari Radio Terminals elidendo del tutto l'Interferenza Multi-Utente al costo di una maggior velocità nell'eseguire tutte le operazioni e ad una maggior complicatezza degli apparati di sincronizzazione.

Ricordiamo che, a parità di trama, i tempi da gestire per l'Uplink sono dell'ordine del *micron* mentre in Downlink abbiamo un ordine di grandezza superiore: il *millisecondo*.

Ipotizzando di poter sopportare agevolmente una situazione di questo genere, si è visto, dai risultati delle simulazioni nel Capitolo 7, che le prestazioni delle due tecniche in termini di ritardi dei pacchetti e di gestione degli stessi, considerato un ugual numero di risorse allocabili in entrambi i versi, si assomigliano abbastanza.

Da sottolineare il fatto che in uplink, dovendo richiedere ed aspettare la risposta dal RN, si hanno valori di ritardi minimi maggiori di quelli riscontrati in downlink. Per quel che riguarda i ritardi massimi e medi, le cose vanno in maniera molto simile nei due casi. Questo fatto si riscontra sia trattando le sorgenti originarie quando le inseriamo ai RTs, sia trattando quelle indotte quando l'inserimento avviene al RN.

Per quello che riguarda il progetto in questione, possiamo dire che, a livello MAC e con le ipotesi fatte sull'ambiente di lavoro, le differenze fra i due sistemi

considerati, OFDM-CDMA in DL e OFDM-TDMA in UL, si riflettono esclusivamente nelle strutture utilizzate per l'allocazione delle risorse di strato: strutture matriciali per il CDMA e strutture vettoriali per il TDMA.

Questo fa sì che, prescindendo dalle prerogative intrinseche delle due tecniche, i due metodi adottati portano a risultati, in termini di ritardi mediati su tutte le trame considerate e su tutti i RTs interessati, di allocazione delle risorse e di ritardi subiti dalle best effort, confrontabili fra loro.

E' indubbio che l'MC-CDMA offre prestazioni mediamente superiori rispetto alle altre tecniche possibili e l'idea di poterlo considerare anche nella tratta di Uplink non è poi così utopica: per poter far questo sicuramente bisognerà aggiungere qualche grado di libertà rispetto all'usuale MC-CDMA così da ritrovarci con un sistema più complesso, ma potendo sfruttare tutte, o quasi, le prerogative dell'uso dei codici per accedere al mezzo.

Un ulteriore spunto di ricerca potrebbe essere quello di studiare i reali tempi dovuti per effettuare tutte le operazioni necessarie al corretto "dialogo" fra RN e RTs. Questo sarebbe un elemento fondamentale per decidere quali e quante risorse riservare ai canali di segnalazione ed anche per verificare la possibilità, senza grandi problemi, dell'utilizzo di una tecnica basata sulla divisione di tempo oppure se sono necessari tempi più lunghi così da dover utilizzare tecniche basate sui codici, sempre tenendo presente l'interferenza multi-utente e altre problematiche simili.

Alla luce dei risultati ottenuti fino ad ora e dei suggerimenti appena dati, ritengo che fra breve, dopo le ricerche attualmente in atto, sarà possibile, in base ai costi progettuali da sostenere, dare una forma significativa ed una soluzione ottimale a quello che è lo scopo del progetto PRIN 2000 almeno per ciò che riguarda lo strato MAC, oggetto di studio dell'Unità di Roma 1.

APPENDICE A

GUIDA ALL'USO DEL SIMULATORE

L'utilizzo del simulatore è molto semplice ed è possibile farlo girare sia su Linux sia su Windows. Durante la sua realizzazione sono state fatte delle prove e delle simulazioni incrociate con "Visual C++", compilatore di Windows, e con "XWPE" che permette di compilare programmi scritti in C e C++ sul sistema Linux.

Per fare le simulazioni è necessario essere in possesso dei files dai quali il programma legge le informazioni sulle sorgenti inserite e sono:

- "sorgentitipo1.dat"
- "sorgentitipo2.dat"
- "sorgentitipo3.dat"

Questi tre archivi contengono i parametri relativi ai tre tipi di sorgenti: ON-OFF, CBR, BEST-EFFORT. Nel Capitolo 3 sono state illustrate nel dettaglio tali sorgenti di traffico.

E' possibile inserire le sorgenti sia da tastiera sia da remoto:

Nel primo caso basta seguire le indicazioni che, di volta in volta, vengono fornite durante l'esecuzione del programma, in particolare viene chiesto se si vuole inserire le sorgenti al RN; se ciò accade, verso quali RT, di che tipo e, per ogni tipo, a quale sottoclasse appartengono.

Quindi viene ripetuta la procedura riferendosi ai RT e, ogni volta che si inserisce una sorgente, è possibile tenere sotto controllo la percentuale di capacità del canale utilizzata.

Nel secondo caso si possono lanciare le simulazioni da un terminale remoto, via TELNET o SSH, inserendo una serie di terzine, rappresentanti il numero del RT, il tipo di sorgente e la sottoclasse, in due files:

- “terminali_UL.txt”
- “terminali_DL.txt”

Per lanciare le simulazioni da remoto è però necessario eliminare ogni interazione fra utente e programma, in particolare si deve commentare tutta la sezione riguardante l’inserimento delle sorgenti da tastiera (dalla riga 4000 alla riga 4325) e togliere i commenti, rendendola attiva, dalla sezione relativa al remoto (dalla riga 4325 alla riga 4455), inoltre bisogna commentare l’istruzione alla riga 3896 (dopo la “presentazione”).

A questo punto l’esecuzione del programma produrrà una serie di risultati illustrati nel capitolo 6 e li andrà a scrivere nei files:

- “risultati_UL.dat”
- “risultati_DL.dat”

Verrà inoltre prodotto un file, “matricecodici.dat”, in cui viene stampata la Matrice dei Codici, utilizzata per implementare il CDMA.

La struttura del programma è molto modulare e flessibile, ogni parametro fissato dalle “define” può essere modificato a seconda delle decisioni che, in fase dei progetti futuri, verranno prese.

APPENDICE B

PROGRAMMA VERSIONE “1.0 UL_DL_FDD”

In questa appendice viene fornito il simulatore vero e proprio, “UL_DL_FDD.cpp”, versione 1.0, realizzato in C/C++ e stampato con Editor Avanzato dal sistema Linux.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Martin Johnsson: HiperLAN/2-The Broadband Radio Transmission Technology Operating in 5 GHz Frequency Band. HiperLAN/2 Global Forum, 1999.
- [2] European Telecommunications Standard Institute (ETSI) , 300 652, Ottobre 1996
- [3] Broadband Radio Access Networks (BRAN) , ETSI TS 101 761-1 V1.1.1 (2000-04)
- [4] Broadband Radio Access Networks (BRAN) , ETSI TS 101 761-2 V1.1.1 (2000-04)
- [5] Broadband Radio Access Networks (BRAN) , ETSI TS 101 761-3 V1.1.1 (2000-04)
- [6] Broadband Radio Access Networks (BRAN) , ETSI TS 101 761-4 V1.1.1 (2000-04)
- [7] Broadband Radio Access Networks (BRAN) , ETSI TS 101 475 V1.1.1 (2000-04)
- [8] G. Anastasi, L. Lenzini, E. Mingozzi: “Stability and Performance Analysis of HiperLAN”.
- [9] Tom Bruns, Stanford University, “Performance Comparison of Multiuser OFDM Techniques”
- [10] Paul J.M. Havinga & Gerard J.M. Smith, ”Energy-efficient TDMA Medium Access Control”
- [11] Jihoon Choi, Changoo Lee, Hae Jung & Yong Hoon Lee, “Carrier Frequency Offset Compensation for Uplink of OFDM-FDMA”, IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL 4, NO 12, DECEMBER 2000
- [12] Francesca Cuomo, Andrea Baiocchi, Roberto Cautelier, University of Rome “La Sapienza”, “A MAC Protocol for a Wireless LAN based on OFDM-CDMA”
- [13] Christiana Richards and Scott Creque, “CDMA versus TDMA”, EE 4984: Telecommunication Networks, April 11, 1996

- [14] Heidi Steendam, Marc Moeneclaey, University of Ghent, Belgium, "The Effect of Carrier Phase Jitter on the Performance of OFDM Multiple Access System"
- [15] Georgios B. Giannakis, Zhengdao Wang, Anna Scaglione, Sergio Barbarossa, "AMOUR-Generalized Multicarrier Transceiver for Blind CDMA Regardless of Multipath", IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL 48, NO 12, DEC 2000
- [16] Sergio Barbarossa, Anna Scaglione, "Fading Resistent and MUI Free codes for CDMA Systems"
- [17] A. Baiocchi, F. Cuomo, L. Dell'Uomo, U. Teloni, "A MAC Protocol Supporting IP with QoS Guarantees in a Wireless Local Loop", Global Telecommunications Conference-Globecom 1999.
- [18] N. Blefari-Melazzi, M. Listanti, A. Roveri, "Reti per Applicazioni Telematiche", dispense del corso di "Reti di Telecomunicazioni" dell'Università "La Sapienza" di Roma
- [19] J.C. Chuang, N.R. Sollenberger, "Spectrum Resource Allocation for Wireless Packet Access with Application to Advanced Cellular Internet Service", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 16 n° 6 August 1998.
- [20] Figueira N.R., Pasquale J., "Providing "Quality of Service For Wireless Links: Wireless/Wired Networks", IEEE Personal Communications, October 1999.
- [21] Giannakis G.B., Z.Wang, A.Scaglione, S.Barbarossa, "AMOUR - Generalized Multi-Carrier Transceivers for Blind CDMA Irrespective of Multipath", IEEE Transactions on Communications, April 1999a.
- [22] Giannakis G.B., Z.Wang, A.Scaglione, S.Barbarossa, "AMOUR: Generalized Multicarrier CDMA Irrespective of Multipath", IEEE Global Telecommunications Conference, Globecom'99, Rio de Janeiro, Dec.1999b.
- [23] Li Y., Sollenberger N. R., "OFDM based high-speed wireless access for Internet applications", Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000. PIMRC 2000.
- [24] White P.P., "RSVP and Integrated Services in the Internet: A Tutorial" IEEE Communication Magazine.

- [25] Yee N., Linnartz P. "Multicarrier-CDMA in Indoor wireless Radio Networks", PIMRC'93, Yokohama.
- [26] Zahedi A., Pahlavan K., "Capacity of a Wireless LAN with Voice and Data Services", 1160 IEEE Transaction on Communications, Vol. 48, n° 7, July 2000.
- [27] Zahedi A., Pahlavan K., "Traffic Engineering for the wireless LAN Access Point", Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 1998
- [28] Zahedi A., Pahlavan K., "Wideband Local Access-Wireless LAN e Wireless ATM", IEEE Communications Magazine 1997.
- [29] Acampora A.S.; Naghshineh M., "Qos provisioning in Micro-Cellular Network supporting multiple classes of traffic", INFOCOM 1995; Fourteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings., IEEE,1995.
- [30] Cao Y., Li K., "Scheduling Algorithms in Broad-Band Wireless Networks", IEEE Proceedings of the IEEE, vol.89,n°.1,January 2001.
- [31] Chen H., Goyal P. "Start-time Fair Queueing : A scheduling algorithm for integrated services", in Proceedings of the ACM-SIGCOMM 96, pp. 157-168, Palo Alto, CA, August 1996.
- [32] IEEE Std 802.11-1997 Information Technology- Telecommunications and Information exchange between Systems - Local And Metropolitan Area Networks - Specific Requirements-part 11: Wireless Lan Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications; www.ieee.org
- [33] ISO/IEC 8802-11; ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 edn , 20 Aug. 1999 Information technology - Telecommunications and Information exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [34] Mowbray M. "Capacity Reservation for Multimedia Traffic", IEEE Communication Magazine, September 1998.

- [35] Nieminem T., “Report on WWW traffic modelling and Wavelan Measurements”, Project: Mobile ATM, Helsinki University of Technology Communication Laboratory, 1998.
- [36] Oliveira C., Kim J.B, Suda T., “Quality-of-Service Guarantee in Multimedia Wireless Network”, Communications, 1996. ICC '96, Conference Record, Converging Technologies for Tomorrow's Applications.
- [37] Rohling H., Grunheid R. “Performance of an OFDM-TDMA Mobile Communication System” Vehicular Technology Conference, 1996. Mobile Technology for the Human Race., IEEE 46th, vol.:3.
- [38] A. De Luca “Gestione del traffico e allocazione delle risorse nella realizzazione di un protocollo MAC a QoS garantita per una W-LAN con accesso OFDM-CDMA”, Tesi di laurea, Università “La Sapienza”, 2001.
- [39] F. Passi, “Controllo di errore in Protocolli MAC per reti W-LAN con tecnica di accesso OFDM-CDMA”, Tesi di laurea, Università “La Sapienza”, 2001.