



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
TESINA

TECNOLOGIE DI RELAY
PER SISTEMI MOBILI
LTE-ADVANCED E WIMAX

RELATORE: Ch.mo Prof. Stefano Tomasin

LAUREANDO: *Simone Gaiarin*

Padova, 23 Settembre 2010

“L’istruzione è cosa ammirevole, ma di tanto in tanto è bene ricordare che nulla di quanto valga la pena sapere può essere insegnato”

– Oscar Wilde

Indice

Sommario	1
Introduzione	3
1 Concetti base sulle reti 4G	5
1.1 Struttura di una rete cellulare con relay	5
1.2 IMT-Advanced	7
1.2.1 Caratteristiche generali	7
1.2.2 Requisiti tecnici	7
1.2.2.1 Efficienza spettrale della cella	8
1.2.2.2 Efficienza spettrale di picco	9
1.2.2.3 Efficienza spettrale dell'utente a bordo cella	10
1.2.2.4 Larghezza di banda	10
1.2.2.5 Latenza	11
1.2.2.6 Handover	11
1.3 LTE-Advanced	12
1.3.1 Requisiti tecnici	12
1.3.2 Tecnologie alla base dei sistemi LTE-Advanced	12
1.3.2.1 Componenti base	13
1.3.2.2 Carrier aggregation	14
1.3.2.3 Trasmissione multiantenna	15
1.3.2.4 Coordinazione dell'interferenza intercella	15
1.4 WiMax	15
1.4.1 Requisiti tecnici	16
1.4.2 Caratteristiche tecniche alla base dei sistemi Wimax	16
1.4.2.1 OFDMA scalabile	17
1.4.2.2 Tecniche multiantenna	17

1.4.2.3	Duplex	17
1.4.2.4	Mobilità	17
1.4.2.5	Powersaving	18
2	Classificazione dei relay	19
2.1	Tasparent e non-transparent relay	20
2.1.1	Transparent relay	20
2.1.2	Non-transparent relay	21
2.2	Schemi di trasmissione	22
2.2.1	Amplify-and-forward	22
2.2.2	Demodulation-and-forward	23
2.2.3	Decode-and-forward	23
3	Modifiche allo standard	25
3.1	Modifiche sul livello fisico	25
3.1.1	Struttura del frame in modalità trasparente	26
3.1.2	Struttura del frame in modalità non trasparente	28
3.2	Modifiche sul livello MAC	28
3.2.1	Scheduling	28
3.2.2	HARQ	29
3.2.3	Sicurezza	30
4	Schemi di pairing	31
4.1	Pairing centralizzato	32
4.2	Pairing distribuito	33
4.3	Pairing per trasmissioni cooperative	36
5	Valutazione delle prestazioni	43
5.1	Prestazioni degli schemi di trasmissione	43
5.2	Prestazioni degli schemi di accoppiamento	44
	Conclusioni	51
	Lista degli acronimi	53
	Bibliografia	55

Sommario

In questa tesi vengono presentate alcune tecnologie di relay che potrebbero essere incluse negli standard di telefonia cellulare di prossima generazione LTE-Advanced e Wimax. Inizialmente vengono illustrate alcune caratteristiche tecniche dei due standard menzionati. Nel capitolo successivo vengono presentati i diversi tipi di relay previsti dai due standard, tre tecniche di trasmissione utilizzabili, valutando pro e contro di ognuna, e alcune modifiche necessarie agli standard per poter supportare il relay; in particolare ci si soffermerà sulla struttura del frame. Successivamente vengono illustrati uno schema di pairing centralizzato e uno distribuito per la selezione delle stazioni partner nella fase di relay; inoltre viene descritto uno schema di pairing per la selezione dei relay ottimi per effettuare trasmissioni cooperative. Infine vengono valutate le prestazioni delle tre differenti tecniche di trasmissione in termini di efficienza di trasmissione e vengono anche valutate le prestazioni degli schemi di pairing proposti in termini di throughput raggiungibile e probabilità di accoppiamento.

Introduzione

Negli ultimi dieci anni la telefonia mobile ha subito un'enorme crescita, portando a un incremento degli utenti fino a raggiungere quasi il 70% della popolazione mondiale. Inoltre, i servizi offerti dalle compagnie telefoniche, dapprima incentrati esclusivamente sul traffico voce, sono passati al traffico dati grazie all'introduzione delle reti cellulari di seconda e terza generazione. In particolare, l'introduzione dello standard di telefonia HSPA¹, ovvero uno dei più recenti standard di telefonia 3G che permette di raggiungere velocità di trasferimento elevate, insieme alle tariffe flat offerte dagli operatori telefonici e ai nuovi servizi offerti dal web, come i social network, hanno portato a un'esplosione del traffico dati da telefoni, smartphone e dispositivi mobili di ultima generazione, come netbook e tablet. D'altro canto, le reti cellulari attualmente in funzione a volte non sono in grado di soddisfare le grosse richieste di traffico degli utenti, fornendo così basse prestazioni nei momenti di picco di traffico. Inoltre, tali reti non offrono prestazioni uniformi nell'area servita; ai bordi della cella, ad esempio, le prestazioni sono più basse rispetto al centro della stessa, a causa della maggiore attenuazione del segnale e dell'interferenza causata dalle celle adiacenti. Un'ulteriore problema è dovuto all'utilizzo di spettri sempre più larghi e a frequenze sempre più elevate che portano a un'attenuazione del segnale su distanze più brevi. Per risolvere tali problemi nelle reti attuali sarebbe necessario ridurre la dimensione delle celle e aumentarne il numero con notevoli costi. Per ovviare a ciò in maniera economicamente efficiente le associazioni di enti per le telecomunicazioni 3GPP² e Wimax Forum hanno proposto dei nuovi standard come LTE-Advanced³ o Wimax⁴ che mirano, oltre che ad aumentare ulteriormente la

¹High-Speed Packet Access

²3rd Generation Partnership Project

³Long Term Evolution Advanced

⁴Worldwide Interoperability for Microwave Access

velocità di trasmissione, a rendere in generale più robusto il sistema e a garantire un'uniformità di prestazioni per tutti gli utenti senza dover aumentare il numero delle celle. Per far ciò è necessario utilizzare nuove tecniche che permettano di raggiungere tali obiettivi mantenendo al contempo bassi i costi delle infrastrutture e dell'installazione delle stesse: le tecniche di relay possono essere un buono strumento per ottenere questo risultato.

Una rete cellulare con relay è dotata di un componente aggiuntivo rispetto a una rete cellulare convenzionale: la Relay Station (RS), ovvero una stazione radio che inoltra il traffico generato da una Mobile Station (MS) alla Base Station (BS) e viceversa. Questa tecnica permette tramite la cooperazione della BS con la RS di migliorare le prestazioni della trasmissione, in particolare al bordo della cella, e di rendere inoltre possibile la fornitura del servizio in zone remote dove la cablatura per la BS risulterebbe difficile o non economicamente conveniente. Le RS hanno il vantaggio di non necessitare di una backhaul cablata, di avere dimensioni ridotte rispetto a una BS e di avere costi contenuti, permettendo così di disporre molte sul territorio.

L'obiettivo di questa tesina è quello di dare una visione globale e qualitativa delle varie tecnologie di relay che potrebbero essere prese in considerazione per l'implementazione nelle reti cellulari del prossimo futuro, mostrando inoltre, con delle semplici analisi delle prestazioni, come queste possano effettivamente migliorare il throughput all'interno della cella. Nel seguito verranno illustrati alcuni dei requisiti tecnici dello standard per reti di quarta generazione IMT-Advanced⁵ e verranno descritti brevemente gli standard LTE-Advanced e Wimax che andranno a implementare tale standard. Nella sezione successiva verranno descritti i diversi tipi di relay e i vari schemi di trasmissione utilizzabili, valutandone vantaggi e svantaggi. Inoltre, verranno evidenziate alcune modifiche ai due standard, in particolare sulla struttura del frame, necessarie per poter supportare le trasmissioni con relay. Successivamente verrà descritto un altro componente fondamentale, ossia il meccanismo di accoppiamento (pairing) delle RS alle MS, e verranno illustrati tre diversi schemi: uno centralizzato e uno distribuito, che permettono di massimizzare il numero delle MS servite in uno scenario multi-RS-multi-MS, e uno per la selezione della coppia ottima di RS per effettuare una trasmissione cooperativa. Nell'ultima sezione verranno confrontati gli schemi di trasmissione e di accoppiamento valutandone le prestazioni.

Capitolo 1

Concetti base sulle reti 4G

1.1 Struttura di una rete cellulare con relay

Una rete telefonica cellulare è una rete di telecomunicazioni wireless che utilizza le onde radio come mezzo trasmissivo. Ciò che caratterizza questo tipo di rete è il fatto che la zona su cui la rete opera è suddivisa in piccole aree dette celle, di forma generalmente esagonale, ognuna delle quali è servita da un punto di accesso detto Base Station Subsystem (BSS). Il BSS è composto da una parte di controllo detta Base Station Controller (BSC), ovvero quella componente che gestisce tutti gli aspetti del protocollo di comunicazione radio e permette la comunicazione tra l'interfaccia radio e la rete fissa (*core network*), e di una componente detta Base Transceiver Station (BTS) o più semplicemente Base Station (BS), cioè quell'infrastruttura dotata di una o più antenne che effettua effettivamente la trasmissione radio. Ogni BS è collegata a un BSC tramite la *backhaul*, ossia un collegamento generalmente realizzato in fibra ottica, e ogni BSC può controllare molte BS. La BS può essere situata al centro della cella nel caso l'antenna utilizzata sia omnidirezionale o sull'intersezione di più celle, generalmente tre, nel caso vengano utilizzate delle antenne direzionali. Le BS effettuano le trasmissioni su alcuni canali in ogni cella facendo in modo che questi siano differenti tra celle adiacenti, evitando così interferenze tra esse. Un importante aspetto delle reti cellulari è dato dalla possibilità di riutilizzare le frequenze di celle non adiacenti; infatti essendo queste sufficientemente lontane non interferiscono tra loro. Ciò permette di sfruttare a pieno lo spettro di frequenze disponibili per le trasmissioni, aumentando così la capacità della rete. Un altro dei vantaggi dati dall'utilizzo

di una rete cellulare sta nel fatto che l'utilizzo di celle relativamente piccole permette potenze di trasmissione basse, con un conseguente risparmio energetico. All'interno della cella sono disposte le Relay Station (RS), ovvero delle stazioni radio autonome, non collegate a nessun BSC, il cui compito primario è quello di inoltrare dati provenienti dalla BS alle MS e viceversa, eventualmente effettuando alcune funzioni sui pacchetti transitanti. Inoltre, nella cella sono presenti i terminali mobili degli utenti detti Mobile Station (MS).

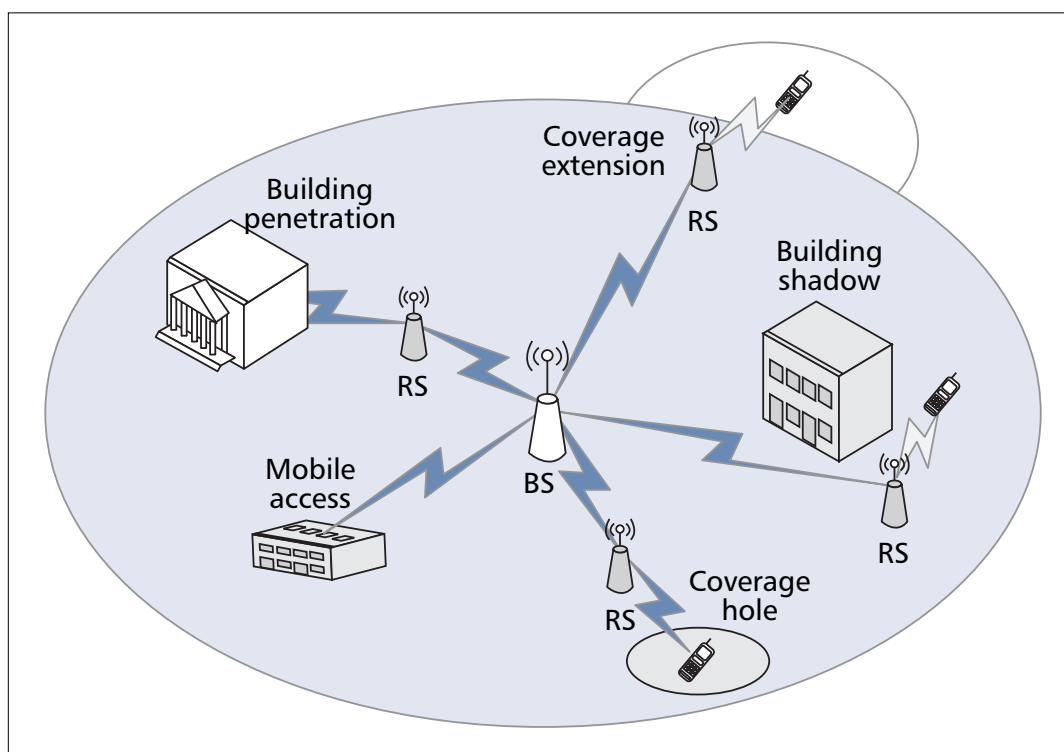


Figura 1.1: Schema di una rete cellulare con nodi relay

La stazione che comunica direttamente con la MS è detta *access station* per la MS e può essere una BS o una RS; il canale che mette in comunicazione la MS con la propria access station è detto *access link*. La stazione a cui una RS trasmette in uplink è detta stazione sovraordinata, mentre una stazione a cui la RS trasmette in downlink è detta stazione subordinata; il canale tra la RS e la propria stazione sovraordinata è detto *relay link*. La cella inerente a una BS è detta *donor cell* in modo da distinguerla da un'eventuale cella inerente una RS.

1.2 IMT-Advanced

L'ITU (International Telecommunications Union) è un'agenzia internazionale fondata nel 1865 i cui scopi principali sono quelli di creare standard per le telecomunicazioni. In particolare la sezione dell'ITU denominata ITU-R (ITU Radiocommunication) ha il compito di gestire gli standard per le telecomunicazioni mobili e di regolare l'uso delle onde radio. International Mobile Telecommunications Advanced (IMT-Advanced) è il nome dello standard per telecomunicazioni mobili a banda larga di quarta generazione (4G) definito dall'ITU. IMT-Advanced è l'evoluzione del precedente standard IMT-2000, ovvero lo standard che definisce i requisiti per i sistemi di telecomunicazione mobili di terza generazione (3G). Questi standard definiscono solo dei requisiti minimi che le tecnologie candidate a implementarli dovranno rispettare, non essendo però dei limiti.

1.2.1 Caratteristiche generali

Le principali caratteristiche dei sistemi IMT-Advanced sono:

- compatibilità a livello mondiale, in unione a una certa flessibilità per supportare una vasta gamma di applicazioni in maniera economica
- compatibilità con tutti i servizi IMT e con le reti fisse
- capacità di interoperabilità con altre reti radio
- elevata qualità dei servizi di telefonia mobile
- terminali idonei all'uso in tutto il mondo
- servizi e attrezzature user-friendly
- maggiore velocità di picco di trasferimento dati, in modo da supportare applicazioni e servizi avanzati

1.2.2 Requisiti tecnici

I requisiti presentati di seguito [1] hanno lo scopo di fissare un livello minimo di prestazioni, in modo da garantire che le tecnologie candidate a entrare in IMT-Advanced soddisfino gli obiettivi di tale standard. Questi requisiti non

vogliono essere un limite alla gamma di funzionalità e prestazioni che le tecnologie candidate possono effettivamente conseguire, nè vogliono descrivere come esse debbano funzionare sotto condizioni operative differenti da quelle presentate dalle raccomandazioni e report dell'ITU-R [2].

Di seguito riportiamo in maniera qualitativa le condizioni operative in cui verranno valutati i requisiti, riportati nelle sezioni successive, delle tecnologie candidate:

Indoor Questa condizione operativa prevede celle di piccole dimensioni situate all'interno degli edifici nei quali sono presenti terminali in movimento a basse velocità. Le caratteristiche principali sono un'elevata densità di utenti e throughput elevati.

Microcellular Questa condizione operativa prevede celle non molto grandi, atte a coprire aree densamente popolate dei centri urbani. Le caratteristiche principali sono throughput elevati e copertura esterno-interno degli edifici. Queste celle sono soggette a limiti dovuti a interferenza.

Base coverage urban Questa condizione operativa prevede celle di grandi dimensioni, atte a coprire interi centri urbani e terminali in movimento a medie velocità. Le caratteristiche principali sono la copertura totale e continua dell'area servita. Queste celle sono soggette a limiti dovuti a interferenza.

High speed Questa condizione operativa prevede celle molto grandi con terminali mobili ad alte velocità. Le caratteristiche principali sono copertura continua di aree vaste e supporto a terminali in movimento ad alte velocità. Queste celle sono soggette a limiti dovuti a interferenza.

1.2.2.1 Efficienza spettrale della cella

L'efficienza spettrale della cella è definita come il *throughput* totale di tutti gli utenti (ovvero il numero totale di bit corretti ricevuti in un certo intervallo di tempo) diviso la larghezza di banda del canale diviso a sua volta per il numero delle celle. La larghezza di banda del canale per questo scopo è definita come l'effettiva larghezza di banda per il fattore di riuso di frequenza, in cui il termine

“effettiva” sta a indicare che è la larghezza di banda di funzionamento normalizzata tenendo opportunamente conto del rapporto uplink / downlink. L’efficienza spettrale della cella si misura in bit/s/Hz/cell. I requisiti minimi per questo parametro sono riportati in Tabella 1.1. I valori indicati si riferiscono a una configurazione di antenne 4 x 2 in downlink e 2 x 4 in uplink, dove il primo numero indica il numero di antenne della BS e il secondo il numero di antenne della MS per il downlink e viceversa per l’uplink.

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^N \chi_i}{T \cdot \omega \cdot M} \quad (1.1)$$

- η = efficienza spettrale della cella
 χ_i = numero di bit ricevuti o inviati correttamente dall’utente i -esimo
 M = numero di celle
 ω = larghezza di banda
 T = tempo in cui vengono ricevuti o inviati i bit

Condizione operativa	Downlink (bit/s/Hz/cella)	Uplink (bit/s/Hz/cella)
Indoor	3	2.25
Microcellular	2.6	1.80
Base coverage urban	2.2	1.4
High speed	1.1	0.7

Tabella 1.1: Requisiti di IMT-Advanced per l’efficienza spettrale della cella

1.2.2.2 Efficienza spettrale di picco

L’efficienza spettrale di picco è il throughput massimo teorico normalizzato rispetto alla larghezza di banda, ossia il numero di bit corretti trasmessi in una direzione da una singola stazione mobile, quando tutte le risorse radio disponibili per il collegamento sono da essa utilizzate (ad esclusione delle risorse utilizzate dai segnali di controllo e sincronizzazione). I requisiti minimi per questo parametro sono:

- 15 bit/s/Hz per il downlink
- 6.75 bit/s/Hz per l’uplink

1. CONCETTI BASE SULLE RETI 4G

I valori indicati si riferiscono a una configurazione di antenne 4 x 4 in downlink e 2 x 4 in uplink.

1.2.2.3 Efficienza spettrale dell'utente a bordo cella

L'efficienza spettrale dell'utente a bordo cella è definita come il 5% della funzione di distribuzione del throughput normalizzato dell'utente. I requisiti minimi per questo parametro sono riportati in Tabella 1.2. I valori indicati si riferiscono a una configurazione di antenne 4 x 2 in downlink e 2 x 4 in uplink.

$$\gamma = \frac{\chi_i}{T_i \cdot \omega} \quad (1.2)$$

γ = efficienza spettrale dell'utente a bordo cella

χ_i = numero di bit ricevuti o inviati correttamente dall'utente i -esimo

ω = larghezza di banda

T_i = tempo in cui vengono inviati o ricevuti i bit dall'utente i -esimo

Condizione operativa	Downlink (bit/s/Hz/cella)	Uplink (bit/s/Hz/cella)
Indoor	0.1	0.07
Microcellular	0.075	0.05
Base coverage urban	0.06	0.03
High speed	0.04	0.015

Tabella 1.2: Requisiti di IMT-Advanced per l'efficienza spettrale dell'utente a bordo cella

1.2.2.4 Larghezza di banda

Le tecnologie candidate per IMT-Advanced dovranno supportare una larghezza di banda scalabile fino a 40 MHz, seppur sia consigliato l'utilizzo di una larghezza di banda più ampia (ad esempio fino a 100 Mhz). Per "scalabile" si intende la possibilità di variare la larghezza di banda di funzionamento del sistema in base alle esigenze di traffico e alle condizioni istantanee del canale.

1.2.2.5 Latenza

La latenza dovuta al cambio di modalità di connessione (*control plane latency*) è definita come il tempo di transizione da uno stato di connessione a un altro, come ad esempio da stato inattivo a stato attivo. Il ritardo di trasporto (*user plane latency*) invece è il tempo che intercorre da quando un pacchetto è disponibile al livello IP della MS/BS a quando questo pacchetto è disponibile al livello IP della BS/MS. Questo tempo include i tempi di ritardo introdotti dai protocolli di controllo, assumendo che la MS sia in modalità di connessione attiva. Tale parametro viene valutato in condizioni di basso carico, ovvero un singolo utente che trasmette un singolo flusso di pacchetti IP di dimensioni ridotte (0 byte di *payload* + IP header). I requisiti minimi per questo parametro sono:

- 100 ms per la *control plane latency*
- 10 ms per la *user plane latency*

1.2.2.6 Handover

Il tempo di *handover* è il tempo impiegato da un terminale per passare da un canale a un altro a causa di un passaggio da una cella a un'altra o da un canale a un altro all'interno della stessa cella. Questo intervallo temporale include il tempo necessario per eseguire tutte le procedure di accesso alla rete radio. Nel determinare il tempo di handover si assume che le interazioni con la rete centrale, ossia tutto ciò che sta dietro la rete radio, avvengano in tempo nullo. In Tabella 1.3 sono riportati i requisiti minimi per questo parametro:

Tipo di handover	Tempo di handover (ms)
Intrafrequenza	27.5
Interfrequenza:	60

Tabella 1.3: Requisiti IMT-Advanced per il tempo di handover

1.3 LTE-Advanced

3GPP (Third Generation Partnership Project) è un'associazione di enti per le telecomunicazioni fondata inizialmente per creare un sistema di telefonia mobile di terza generazione (3G) che implementasse i requisiti dello standard IMT-2000; questo sistema prese il nome di Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Successivamente 3GPP si occupò anche di nuove specifiche per lo standard GSM e in seguito iniziò a sviluppare lo standard LTE, ossia un'evoluzione a lungo termine di UMTS sempre facente parte della terza generazione di sistemi mobili. L'ultimo progetto a cui sta lavorando 3GPP è LTE-Advanced cioè un'estensione di LTE che andrà a implementare i requisiti di IMT-Advanced o meglio a sorpassarli. Il passaggio da LTE a LTE-Advanced avverrà in maniera graduale, essendo quest'ultimo un'evoluzione di LTE e non un nuovo standard; perciò uno degli obiettivi di LTE-Advanced è quello di garantire un alto livello di retrocompatibilità con LTE.

1.3.1 Requisiti tecnici

Di seguito, in Tabella 1.4, vengono riportati alcuni requisiti tecnici fissati come target per i sistemi LTE-Advanced [3]. I parametri sono stati valutati in una condizione operativa *base coverage urban*. Si può notare che tali requisiti in alcuni casi superano anche di molto quelli richiesti da IMT-Advanced.

1.3.2 Tecnologie alla base dei sistemi LTE-Advanced

Di seguito andremo a descrivere alcune delle tecnologie che stanno alla base di LTE (e quindi di LTE-Advanced) e altre che andranno a estendere LTE [3] per incrementare ulteriormente le prestazioni, in modo da soddisfare i requisiti di IMT-Advanced. Nello specifico, queste tecnologie dovrebbero permettere di ottenere un rapporto segnale-rumore (SNR^1) maggiore di quello attualmente raggiungibile nelle reti cellulari, il quale è necessario per raggiungere le elevate velocità di trasmissione previste da LTE-Advanced e a garantire un miglioramento di prestazioni per i terminali a bordo cella.

¹Signal-to-noise ratio

Parametro		LTE-Advanced
Velocita' di trasmissione di picco	UL	1 Gbit/s
	DL	500 Mbit/s
Larghezza di banda		Fino a 100 MHz
Latenza	User plane	10 ms
	Control plane	50 ms
Efficienza spettrale (4 x 2)	Picco	30 bit/s/Hz DL
		15 bit/s/Hz UL
	Media	2.6 bit/s/Hz DL 2.0 bit/s/Hz UL
Bordo cella		0.09 bit/s/Hz DL
		0.07 bit/s/Hz UL

Tabella 1.4: Requisiti tecnici per i sistemi LTE-Advanced

1.3.2.1 Componenti base

Il nucleo della trasmissione radio in downlink di LTE è lo schema Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), ossia un metodo di trasmissione che utilizza un gran numero di sottoportanti a banda stretta ortogonali tra loro, che rendono questo sistema intrinsecamente robusto rispetto alla dispersione temporale sul canale. Grazie a questo metodo è possibile ridurre la complessità dei ricevitori, potendo risparmiare sia in termini di energia che di costo. Per quanto riguarda le trasmissioni in uplink, che in genere dispongono di potenze decisamente inferiori rispetto a quelle in downlink, il parametro principale di cui tenere conto è l'efficienza energetica e quindi la bassa complessità del terminale. Per questo viene utilizzato uno schema Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA), in quanto questo schema permette di avere segnali trasmessi con un rapporto di potenza *peak-to-average* basso e ciò permette di aumentare il raggio di trasmissione della MS grazie a trasmissioni che utilizzano più potenza. A livello fisico i dati vengono codificati mediante turbo codici e modulati con QPSK², 16-QAM³ o 64-QAM e successivamente con OFDM. LTE può operare

²Quaternary Phase Shift Keying

³Quaternary Amplitude Modulation

sia in Frequency Division Duplex (FDD) che in Time Division Duplex (TDD). Un altro componente alla base di LTE è lo scheduler dipendente dal canale, cioè uno strumento che permette di decidere chi può trasmettere, su quale frequenza e a quale velocità in base alla qualità del canale. Lo stato del canale viene determinato istante per istante dallo scheduler attraverso dei segnali di riferimento scambiati sia in uplink che in downlink tra la BS e le MS. Si può forse affermare che questo componente, specialmente in celle a pieno carico, è quello che determina maggiormente le prestazioni di tutto il sistema. Infine, per gestire le ritrasmissioni dovute a errori occasionali LTE utilizza uno schema di ritrasmissione a due livelli: un veloce protocollo Hybrid Automatic Retransmission Query (H-ARQ) con basso *overhead*, che invia un feedback alla BS dopo ogni subframe e si occupa di correggere la maggior parte dei piccoli errori, e un protocollo ARQ più affidabile ma che necessita di più overhead per gestire alcuni particolari errori che richiedono la ritrasmissione del pacchetto. Usando questo schema combinato si utilizza meno overhead senza sacrificare l'affidabilità.

1.3.2.2 Carrier aggregation

La flessibilità nell'utilizzo dello spettro di frequenze è una delle caratteristiche principali di LTE, che permette di gestire alcuni problemi mantenendo al contempo le prestazioni elevate. Uno di questi problemi è dovuto al fatto che lo spettro radio per reti cellulari nelle varie aree del mondo è composto da diverse bande di frequenza con differenti dimensioni. Un altro problema è dovuto al fatto che diverse tecnologie radio devono operare contemporaneamente nello stesso spettro radio. Per risolvere questi problemi LTE può operare a diverse frequenze e con larghezze di banda da 1.4 MHz a 20 MHz, dove la larghezza di banda massima è necessaria a raggiungere le velocità di trasmissione di picco. LTE-Advanced necessita di una larghezza di banda superiore a LTE per poter supportare velocità di trasmissione ancora più elevate e infatti può utilizzare uno spettro fino a 100 MHz. Per sfruttare tutta la banda, mantenendo la compatibilità con le problematiche viste prima, LTE-Advanced utilizza il *carrier aggregation*, ovvero un sistema che permette di aggregare diverse componenti di spettro per fornire la banda richiesta. Il *carrier aggregation* permette teoricamente di allocare anche componenti di spettro non contigue in frequenza, anche se ciò, da un punto di vista pratico, richiede una complessità di implementazione più elevata.

1.3.2.3 Trasmissione multiantenna

LTE-Advanced estende la trasmissione multiantenna già presente in LTE permettendo prestazioni migliori. Per garantire la diversità spaziale almeno in downlink i terminali sono dotati di un minimo di due antenne. Teoricamente i terminali possono essere dotati fino a un massimo di otto antenne per permettere schemi multiantenna più avanzati. Ad esempio, per aumentare ulteriormente la velocità di trasmissione, possono essere utilizzate tecniche di multiplocazione spaziale che permettono la trasmissione parallela di flussi di informazione, detti *layers*, fino a un massimo di otto in downlink e quattro in uplink.

1.3.2.4 Coordinazione dell'interferenza intercella

LTE prevede l'ortogonalità delle trasmissioni dei vari utenti all'interno della stessa cella garantendo, almeno in teoria, un'assenza di interferenza intracella. Un problema maggiore è dato dall'interferenza intercella, in quanto ciò limita le prestazioni dei terminali al bordo della cella. Per ovviare a ciò LTE utilizza tecniche di coordinazione dell'interferenza intercella, le quali permettono alle BS adiacenti di schedulare l'assegnazione di banda agli utenti a bordo cella in modo da non creare interferenza reciproca. In particolare, le celle adiacenti si scambiano periodicamente informazioni sulla componente di spettro che hanno intenzione di assegnare ai terminali a bordo cella e sul livello di interferenza percepita nelle varie componenti di spettro.

1.4 WiMax

Wimax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) è una tecnologia che fornisce accesso a servizi wireless a banda larga, sia a terminali mobili che a terminali fissi. Questa tecnologia è basata sullo standard 802.16 inizialmente progettato per offrire connettività solo a terminali fissi. Successivamente lo standard è stato ampliato dando origine a Mobile Wimax, il quale è basato sulla versione 802.16e (Release 1) e 802.16m (Release 2) dello standard. In particolare lo scopo della Release 2 è quello di soddisfare i requisiti dello standard IMT-Advanced per poter diventare una delle tecnologie mobili di quarta generazione.

1.4.1 Requisiti tecnici

In Tabella 1.5 si possono osservare i valori dei parametri significativi inerenti allo standard 802.16m [4].

Item	Requirements			
Carrier frequency	Licensed band under 6 GHz			
Operating bandwidth	5–20 MHz Other bandwidths can be considered as necessary			
Duplex	Full-duplex FDD, Half-duplex FDD, TDD			
Antenna Technique	Downlink \geq (2Tx, 2Rx) Uplink \geq (1Tx, 2Rx)			
Peak data rate (peak spectral efficiency)	Type	Link direction	MIMO	Normalized peak data rate (bit/s/Hz)
	Baseline	Downlink	2×2	8.0
		Uplink	1×2	2.8
	Target	Downlink	4×4	15.0
		Uplink	2×4	5.6
	Data latency	Downlink < 10 ms, Uplink < 10 ms		
State transition latency	max 100 ms			
Handover interruption time	Intra-frequency handover latency <30 ms Inter-frequency handover latency <100 ms			
Throughput			Downlink	Uplink
	Average cell throughput (bit/s/Hz/cell)		2.6	1.3
	Cell edge user throughput (bps/Hz)		0.09	0.05

Tabella 1.5: Requisiti tecnici per sistemi 802.16m

1.4.2 Caratteristiche tecniche alla base dei sistemi Wimax

Qui di seguito si descriveranno brevemente le principali caratteristiche tecniche che stanno alla base di Mobile Wimax. Molte delle tecnologie impiegate sono molto simili a quelle già presentate per LTE-Advanced, in quanto, per poter ottenere prestazioni così elevate in sistemi di comunicazione di questo tipo, alcune scelte tecnologiche sono inevitabili non essendoci nulla di più performante.

1.4.2.1 OFDMA scalabile

Wimax utilizza il metodo di accesso multiplo OFDMA basato sull'OFDM, che ha avuto molto successo nei sistemi di comunicazione wireless a banda larga grazie al fatto di poter realizzare terminali a bassa complessità, di garantire le migliori prestazioni nei canali che presentano ostacoli e di permettere un uso efficiente dello spettro a disposizione grazie alla subcanalizzazione in frequenza o nel tempo. Inoltre, il poter realizzare ricetrasmittitori a bassa complessità permette l'utilizzo di tecniche multiantenna con una ragionevole complessità. Come per LTE, è possibile scalare la larghezza di banda in modo da utilizzare bande diverse in base alle restrizioni geografiche o, cosa più interessante, in base alla necessità di banda istantanea da parte del terminale. Ciò permette di allocare la banda in base ai servizi richiesti e ai parametri di *Quality of Service* (QoS) della connessione, potendo questi essere diversi da connessione a connessione.

1.4.2.2 Tecniche multiantenna

Anche Wimax preve la possibilità di trasmissioni multiantenna per ottenere throughput più elevati e migliore copertura della cella. La tecnologia Wimax è stata la prima tecnologia per reti cellulari a implementare degli schemi di trasmissione multiantenna.

1.4.2.3 Duplex

Wimax Release 2 supporterà sia TDD che FDD, seppur si ritiene che il TDD sia decisamente migliore. Infatti, essendo il traffico in upload decisamente minore di quello in download, grazie a TDD è possibile assegnare in maniera dinamica le risorse per l'uplink solo quando è necessario, potendo sfruttare la banda al meglio e non dovendo riservare parte dello spettro per l'uplink anche quando non necessario.

1.4.2.4 Mobilità

Un'altra caratteristica di Wimax è la possibilità di collegare dispositivi in movimento ad alte velocità. Il sistema può rilevare la velocità del terminale e in funzione di questa può operare in maniere differenti. Inoltre, l'utilizzo del protocollo H-ARQ permette di gestire gli errori dovuti al veloce cambiamento del canale

migliorando così le prestazioni. Perché il supporto alla mobilità sia funzionale bisogna far in modo che i tempi di handover siano sufficientemente contenuti, in particolare per un dispositivo Wimax operante in condizioni ideali si può far in modo che questo tempo rimanga sotto i 5 ms. Per raggiungere tale obiettivo si utilizzano delle procedure che permettono al terminale di analizzare il mezzo radio per cercare le BS vicine quando ancora è collegato alla BS corrente; così facendo è possibile recuperare alcuni parametri che permettono di ridurre i tempi dell'effettivo handover. Un metodo alternativo invece fa sì che sia la BS corrente a fornire periodicamente questi parametri al terminale. Infine, per ridurre il tempo di registrazione del terminale alla BS adiacente, la BS corrente passa gli attuali dati di registrazione del terminale alla BS vicina evitando che sia il terminale a dover fare tale operazione.

1.4.2.5 Powersaving

I terminali Wimax possono utilizzare delle procedure di risparmio energetico quando non sono operativi per un certo tempo; queste procedure si attivano quando il terminale passa negli stati di sleep mode o idle mode. Nel primo stato il terminale rimane registrato alla BS ma spegne parte dei circuiti mentre nel secondo stato il terminale non è più registrato alla BS e si ricollega quando ricomincia a essere operativo.

Capitolo 2

Classificazione dei relay

In questa sezione si andrà a descrivere come è possibile classificare i diversi tipi di relay in base a diverse caratteristiche e si descriveranno i relay che LTE-Advanced e Wimax stanno prendendo in considerazione per includerli nei rispettivi standard.

Le RS possono essere classificate in base a diversi parametri:

- rispetto all'uso che fanno dello spettro
 - *inband* Il link BS-MS condivide la stessa frequenza portante con il link RS-MS
 - *outband* Il link BS-MS utilizza una frequenza portante diversa dal link RS-MS
- rispetto a come appaiono alla MS
 - *transparent* La MS non è a conoscenza di comunicare o no attraverso una RS
 - *non-transparent* La MS vede la RS come una nuova entità e quindi è a conoscenza di comunicare o no attraverso di essa
- rispetto al controllo della cella
 - *controllo della propria cella* La RS controlla la propria cella estendendo così la copertura della BS sovraordinata
 - *parte di una donor cell* La RS migliora le prestazioni della BS sovraordinata senza però estenderne la copertura

- rispetto al livello OSI in cui il traffico è inoltrato
 - *L1 relay* La RS lavora sul livello fisico (PHY)
 - *L2 relay* La RS lavora sul livello MAC¹
 - *L3 relay* La RS lavora sul livello IP
- rispetto alla modalità di scheduling utilizzata
 - *Centralized* Lo scheduling è effettuato completamente dalla BS
 - *Distributed* Parte dello scheduling è affidato alla RS

2.1 Transparent e non-transparent relay

Gli standard LTE-Advanced e 802.16j definiscono due principali tipi di RS che hanno rispettivamente le stesse finalità in entrambi gli standard. LTE-Advanced definisce i due tipi di RS come Type-I RS (o non-transparent) e Type-II (o transparent) [5], mentre 802.16j li definisce come non-transparent e transparent [6].

2.1.1 Transparent relay

Una transparent RS ha il principale scopo di migliorare le prestazioni di una MS situata all'interno della donor cell, che quindi ha una connessione diretta con la BS e non necessita di estensioni di copertura a differenza del caso precedente. Quindi questo tipo di RS non ha bisogno di trasmettere i segnali di sincronizzazione e gli altri segnali di controllo, che sono trasmessi dalla BS direttamente alla MS, ma i suoi obiettivi sono solo quelli di migliorare il throughput globale del sistema e renderlo meno soggetto agli errori attraverso una diversità spaziale e di migliorare il guadagno in trasmissione della MS.

La Type-II RS definita da LTE-Advanced ha le seguenti caratteristiche principali:

- uso dello spettro inband

¹Medium Access Control

- nessuna nuova cella creata, la RS è parte della donor cell e non possiede nessun cell ID (codice univoco di identificazione della cella), ma possiede solo un relay ID (codice univoco di identificazione della RS)
- possibilità di trasmettere solo alcuni segnali di controllo
- trasparenza rispetto ai terminali LTE, tali terminali non sono consapevoli della presenza della RS

Anche qui la transparent RS definita da Wimax ha sostanzialmente le stesse caratteristiche della Type-II RS ed entrambi supportano una sola RS intermedia per questa modalità di relay.

2.1.2 Non-transparent relay

Una non-transparent RS ha lo scopo principale di estendere la copertura di una BS in modo da offrire copertura per quelle MS situate in zone remote rispetto alla BS. Per poter far ciò è necessario che tale RS inoltri i segnali di sincronizzazione e le informazioni di controllo della BS alla MS.

Per quanto riguarda LTE-Advanced, le caratteristiche principali delle Type-I RS sono:

- uso dello spettro inband (è previsto anche una Type-Ia RS che opera outband)
- controllo della propria cella con un proprio cell ID, che quindi appare alla MS come una cella distinta dalla donor cell
- trasmissione dei propri segnali di sincronizzazione
- invio diretto delle informazioni di scheduling e gli HARQ feedback dalla RS alla MS e ricezione diretta dei messaggi di controllo dalla MS
- retrocompatibilità con i terminali LTE, ossia la RS deve apparire a tali terminali come una BS LTE
- miglioramenti nelle prestazioni per i terminali LTE-Advanced, ossia la RS deve poter apparire in maniera differente rispetto a una BS LTE ai terminali LTE-Advanced per poter offrire funzionalità aggiuntive

Per quando riguarda Wimax invece la principale differenza con LTE-Advanced sta nel fatto che quest'ultimo supporta per questo tipo di relay una sola RS intermedia tra la BS e la MS (*two-hop relay transmission*), mentre Wimax ne supporta più di una (*multihop relay transmission*) con un conseguente aumento del ritardo nella trasmissione.

2.2 Schemi di trasmissione

Entrambi i precedenti tipi di RS possono utilizzare differenti schemi di trasmissione che differiscono principalmente dal livello OSI² in cui avviene l'inoltro dei dati con una conseguente differenza a livello di prestazioni. Infatti, più basso è il livello in cui i dati vengono processati minore sarà il ritardo introdotto ma dall'altra parte si avrà una minore robustezza agli errori. Al contrario, se i dati vengono inoltrati nei livelli superiori, si avrà una maggiore robustezza agli errori ma anche un maggiore ritardo dovuto alla maggiore complessità della RS, il che implica anche un impatto maggiore sulle specifiche dello standard in alcuni casi. Di seguito descriveremo tre differenti schemi di ritrasmissione e valuteremo i principali vantaggi e svantaggi di ognuno [7] [8] .

2.2.1 Amplify-and-forward

Una RS che utilizza uno schema *amplify-and-forward* amplifica il segnale ricevuto e il rumore associato e successivamente li inoltra alla MS (o alla BS). Questo schema di relay è quello con minor complessità e ciò fa sì che il ritardo introdotto sia minimo. Lo svantaggio è legato al fatto che non è possibile sopprimere il rumore ricevuto che anzi viene amplificato dalla RS. Nel processo di standardizzazione di LTE-Advanced è stata presa in considerazione una tipologia di relay, detta L1 relay, che utilizza questo semplice schema, ma in aggiunta è anche in grado di effettuare alcune semplici funzioni, come ad esempio un controllo sulla potenza di trasmissione e la possibilità di disattivarsi quando necessario. La bassa complessità di questo schema permette una semplice implementazione rendendo quindi possibile una realizzazione a basso costo e un minore impatto sulle specifiche dello standard.

²Open Systems Interconnection

2.2.2 Demodulation-and-forward

Una RS che utilizza uno schema *demodulation-and-forward* demodula il segnale ricevuto ed effettua una *hard decision* sul simbolo rilevato senza decodificarlo e successivamente lo modula e lo inoltra alla MS (o alla BS). Questo schema non garantisce l'assenza di propagazione degli errori in quanto il segnale non viene decodificato, ma almeno rigenera il segnale non propagando il rumore ricevuto. Questo schema presenta una complessità non elevata il che fa sì che il ritardo introdotto non sia troppo alto.

2.2.3 Decode-and-forward

Una RS che utilizza una schema *decode-and-forward* demodula il segnale ricevuto ed effettua una decodifica di canale di questo, successivamente verifica i dati decodificati tramite *cyclic redundancy check* (CRC) e, se questi sono corretti, effettua la codifica di canale e la modulazione e poi inoltra il segnale ottenuto alla MS (o alla BS). I principali vantaggi di questo schema è che il segnale viene completamente rigenerato, quindi il rumore ricevuto non viene amplificato e inoltrato ed inoltre viene effettuato un controllo per la presenza di errori che quindi non vengono inoltrati. Dall'altra parte però questa elaborazione aggiuntiva richiede un tempo maggiore e quindi deve esserci almeno un frame di ritardo nel pacchetto di dati da quando il segnale è ricevuto a quando è ritrasmesso, il che implica un ritardo maggiore di uno schema *amplify-and-forward*. Anche per questo schema LTE-Advanced definisce due tipologie di RS dette L2 relay e L3 relay che ne fanno uso. Uno schema di relay L2 permette di effettuare alcune funzioni più avanzate rispetto a uno schema di relay L1, come ad esempio:

- cambiare il tipo di codifica e modulazione e variare la potenza di trasmissione prima di ritrasmettere il segnale
- effettuare un proprio scheduling, per esempio per evitare interferenza

Ovviamente, per poter eseguire queste funzioni avanzate, saranno necessari nuovi segnali di controllo tra BS e RS e tra RS e MS, il che rende il processo di standardizzazione molto più complesso e dispendioso. Una tipologia di relay più interessante è lo schema L3 relay; infatti una RS che utilizza questo schema è a livello logico quasi uguale a una BS con la differenza che questa RS usa il

2. CLASSIFICAZIONE DEI RELAY

link wireless per effettuare il backhauling. Inoltre tale RS può avere dimensioni fisiche minori e utilizzare una potenza di trasmissione inferiore rispetto a una convenzionale BS. Queste caratteristiche permettono di realizzare queste RS con un costo molto inferiore a una BS e in particolare l'assenza della backhaul cablata permette un notevole risparmio, essendo l'operazione di posatura delle fibre ottiche molto costosa; infine l'impatto sulla standardizzazione sarà molto basso in quanto si usano funzionalità simili a un componente già previsto dallo standard, ossia la BS, e si garantisce così la retrocompatibilità con i terminali LTE.

Capitolo 3

Modifiche allo standard

3.1 Modifiche sul livello fisico

Per poter supportare un architettura di rete con relay sia lo standard 802.16 che lo standard LTE devono subire alcune modifiche sulle specifiche relative al livello fisico (PHY). Di seguito illustreremo i cambiamenti che sono stati fatti allo standard 802.16, i quali sono precisati dalla parte 802.16j dello standard stesso [6] [9] [10]. In particolare sono stati fatti alcuni cambiamenti riguardanti la struttura del frame; infatti, nelle reti *single hop* sono presenti solo la BS che può trasmettere solo in downlink e la MS che può trasmettere solo in uplink, mentre nelle reti con relay è presente anche la RS che può trasmettere sia in downlink che in uplink. Lo scheduling è effettuato tramite MAP (Media Access Protocol), ossia un segnale di controllo che alloca la banda e definisce l'istante di inizio di trasmissione di un nodo in un sistema che utilizza sia time division multiplex che time division multiple access. Sebbene tale segnale sia retrocompatibile con lo standard 802.16e alcune voci nel segnale MAP sono relative allo scheduling della RS. Assumendo che la RS abbia una capacità di buffering, i due salti tramite il relay possono essere schedulati in frame differenti. Ad esempio, i dati possono essere trasmessi dalla BS alla RS in un frame e successivamente inoltrati dalla RS alla MS nel frame successivo. Considerando una modalità operativa decode-and-forward si ha che il frame è diviso in due subframe: downlink subframe (DL) e uplink subframe (UL). Per poter supportare il relay lo standard 802.16j divide ulteriormente questi subframe in *zone* per permettere la comunicazione tra BS e RS e tra RS e MS. Di seguito viene illustrata la struttura del frame per la modalità trasparente e

3. MODIFICHE ALLO STANDARD

per la modalità non trasparente.

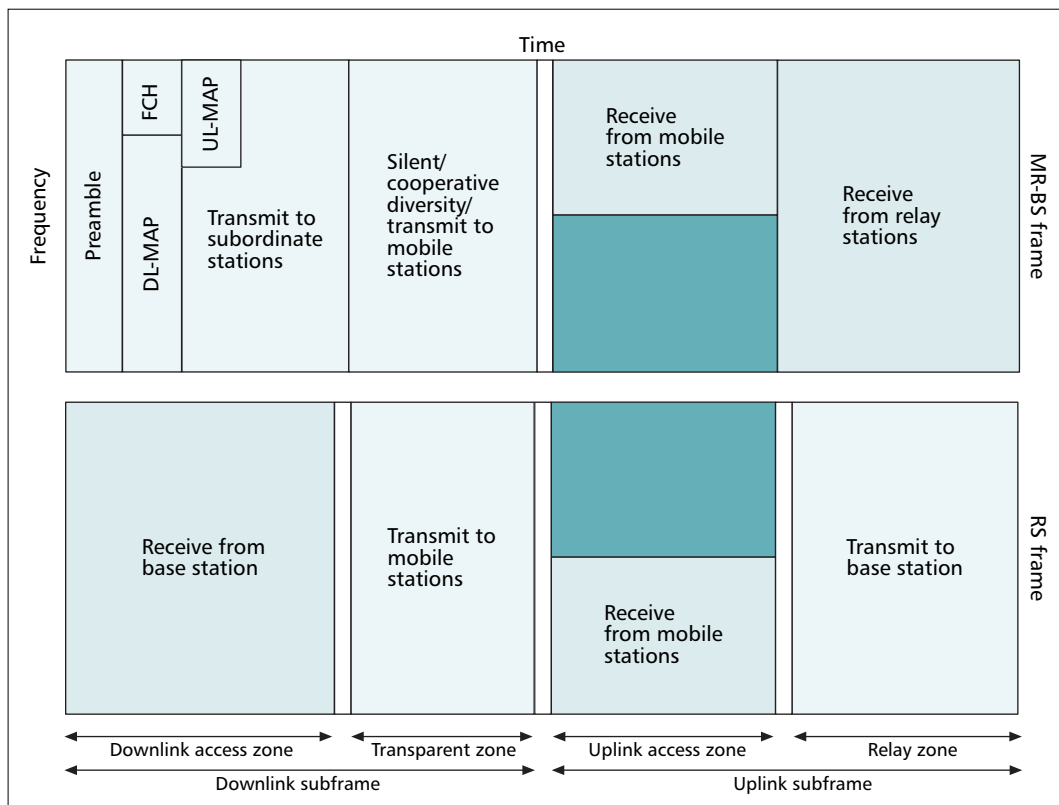


Figura 3.1: Frame trasparente per la BS (sopra) e per la RS (sotto) relativi allo standard 802.16j

3.1.1 Struttura del frame in modalità trasparente

Il frame per la modalità trasparente, rappresentato in Figura 3.1, non risulta particolarmente complesso in quanto questa modalità supporta solamente una RS intermedia. Il frame inizia con il downlink subframe che come detto è diviso in due zone:

- la *downlink access zone* in cui la BS trasmette alle MS servite direttamente e alle RS subordinate
- la *transparent zone* in cui le RS trasmettono alle proprie MS. La BS può trasmettere alle MS servite, rimanere in silenzio o trasmettere in maniera cooperativa con le RS

Alla fine di questo subframe è presente un gap temporale per permettere alle RS di passare da modalità di trasmissione a ricezione e viceversa.

Sucessivamente inizia l'uplink frame, diviso anch'esso in due zone:

- la *uplink access zone* dove le MS trasmettono alle loro access station
- la *uplink relay zone* dove le RS trasmettono alle BS

Siccome la modalità trasparente supporta solo una RS, è necessario avere un'unica access zone e un'unica transparent zone sia in downlink che in uplink.

Se si considera invece una RS operante in modalità demodulation-and-forward il frame conterrà una zona detta *direct relay zone*, dove la RS riceve e demodula il segnale e lo rimodula e inoltra senza decodificarlo. In questo caso non essendo necessario il processo di decodifica, che richiede più tempo, è possibile ricevere e inoltrare i dati nello stesso frame. Questa modalità è possibile solo in modalità trasparente.

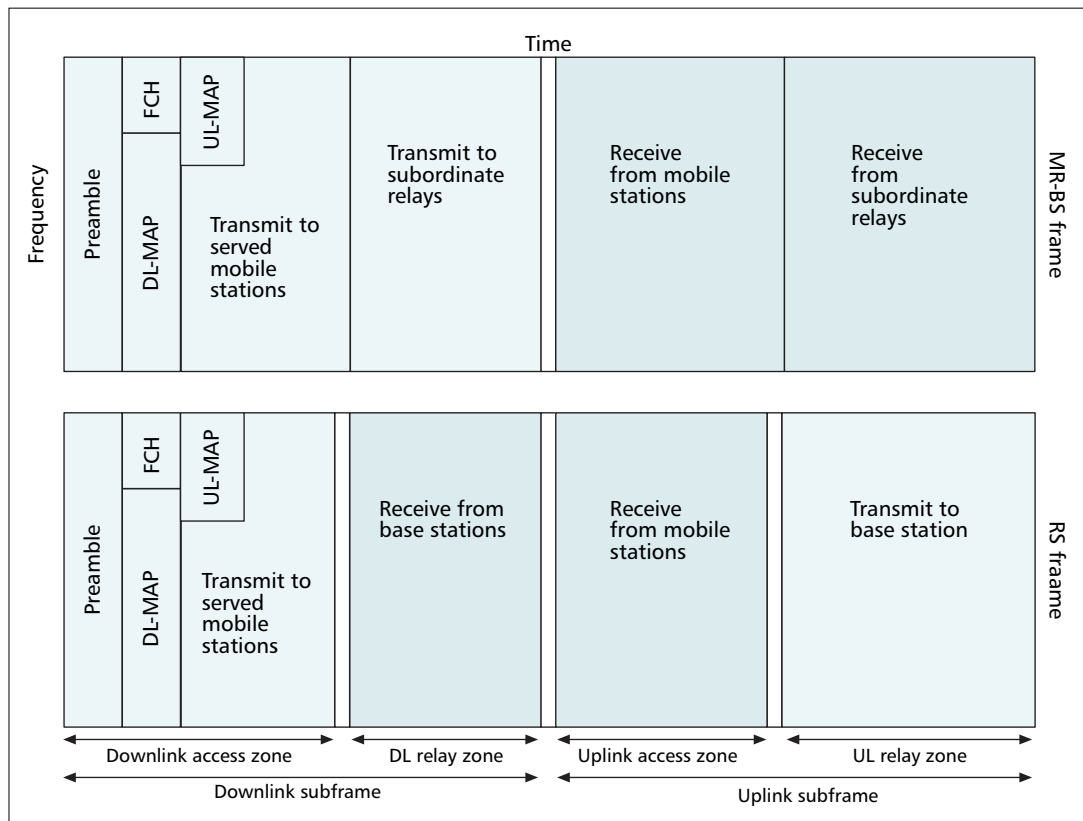


Figura 3.2: Frame non trasparente per la BS (sopra) e per la RS (sotto) relativi allo standard 802.16j

3.1.2 Struttura del frame in modalità non trasparente

La struttura del frame nella modalità non trasparente, mostrata in Figura 3.2, è più complessa. In questo caso sia la BS che la RS trasmettono le informazioni di controllo in modo che le MS siano sincronizzate con la RS, che a sua volta è sincronizzata con la BS.

Anche in questo caso il downlink subframe è diviso in zone:

- una *access zone* in cui sia la BS che la RS trasmettono alle proprie MS
- una *downlink relay zone* in cui la BS trasmette informazioni di controllo e dati alle RS subordinate

Se i salti sono più di due la complessità aumenta, infatti la RS si aspetta di ricevere dati dalla sua stazione sovraordinata nella downlink relay zone, ma la stazione sovraordinata può essere una RS a sua volta che quindi si aspetta di ricevere dati in quella zona e non di trasmetterne. A questo punto sono possibili due approcci: il primo, illustrato in Figura 3.3, prevede di inserire più relay zone nello stesso frame e far in modo che le RS trasmettano e ricevano in maniera alternata; il secondo approccio prevede invece di raggruppare più frame in un cosiddetto multiframe e coordinare le RS in modo che trasmettano nella relay zone adeguata. Ad esempio, considerando un multiframe composto da due frame è possibile far trasmettere le RS corrispondenti a salti pari nelle relay zone dei frame pari e le RS corrispondenti a salti dispari nelle relay zone dei frame dispari. Questa tecnica può essere applicata sia in downlink che in uplink. Il principale svantaggio dello schema di relay non trasparente è dovuto al fatto che le BS e le RS trasmettono simultaneamente nel tempo ed eventualmente anche in frequenza, dando origine a un aumento di interferenza. Ovviamente il controllo di potenza e il riuso in frequenza sono aspetti cruciali per il corretto funzionamento delle RS non trasparenti.

3.2 Modifiche sul livello MAC

3.2.1 Scheduling

Il principale compito del livello MAC è quello di effettuare lo scheduling, ovvero di pianificare quali ricetrasmittitori possono trasmettere in un determinato istante.

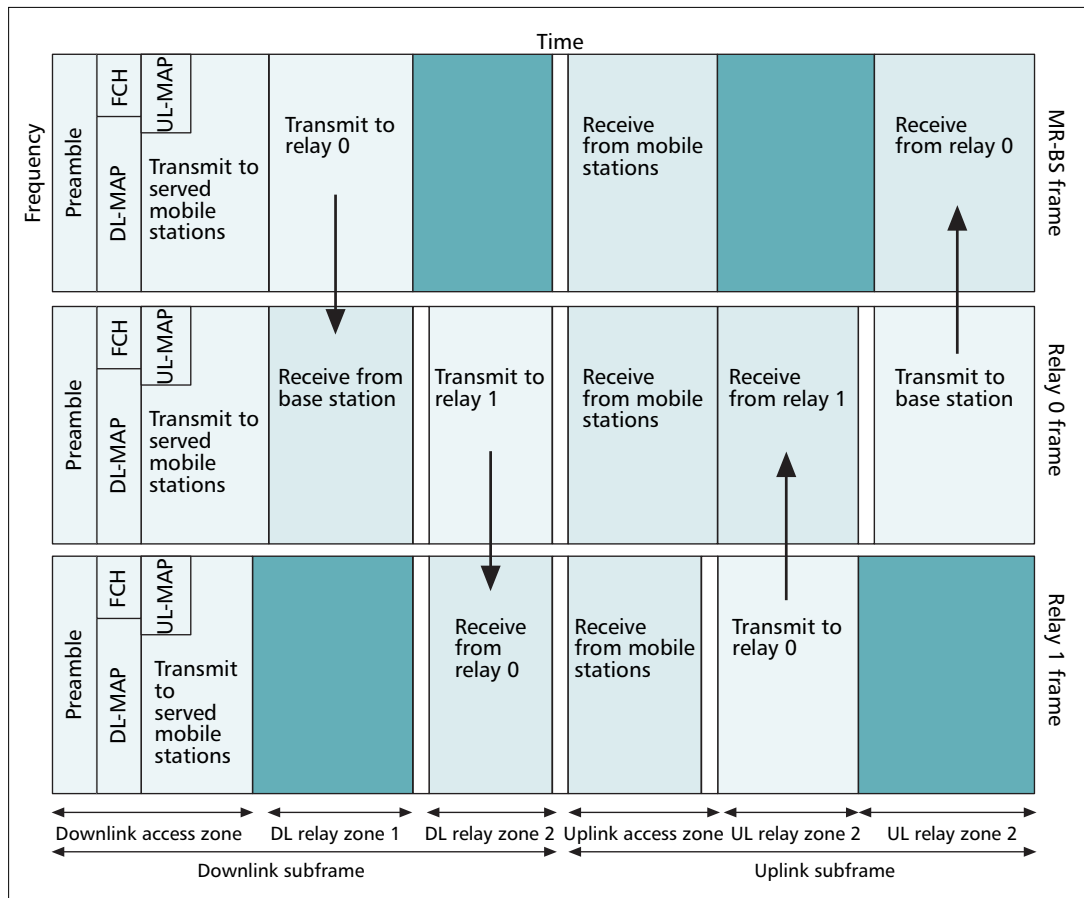


Figura 3.3: Un esempio di frame non trasparente per la BS e due RS relativi allo standard 802.16j in una rete multi-hop

In un sistema centralizzato single hop la BS prende queste decisioni riguardanti l'allocazione delle risorse e le comunica alle MS subordinate. In un sistema multihop alcune di queste decisioni possono essere prese dalle RS. In particolare, in una modalità operativa di scheduling distribuito, le non transparent RS possono allocare le risorse per le proprie MS subordinate possibilmente in maniera coordinata con la BS. Al contrario, le transparent RS devono (e le non transparent possono) operare in maniera centralizzata lasciando alla BS ogni tipo di decisione sull'allocazione delle risorse.

3.2.2 HARQ

Il supporto al protocollo HARQ è stato esteso per supportare le modalità di relay e di scheduling illustrate in precedenza. Ad esempio, una RS operante in

3. MODIFICHE ALLO STANDARD

modalità non trasparente a scheduling centralizzato salva il pacchetto di dati che ha trasmesso alla sua stazione subordinata finché non riceve un *acknowledgment* (ACK) da questa. Se un pacchetto non viene ricevuto correttamente dalla stazione k -esima viene generato subito un negative acknowledgment (NAK) da questa e viene passato indietro fino alla BS che provvederà a schedulare la ritrasmissione del pacchetto dalla stazione $(k-1)$ -esima. L'ACK generato dalla MS viene passato all'indietro attraverso le RS fino a raggiungere la BS.

3.2.3 Sicurezza

Come per lo scheduling, anche l'aspetto inerente alla sicurezza può essere gestito in maniera centralizzata dalla BS o distribuita sulle RS. Quando si opera in maniera centralizzata solo la BS e le MS possiedono le chiavi per decriptare i pacchetti MAC mentre, quando si opera in maniera distribuita, è presente un link sicuro tra BS e RS e un'altro link sicuro instaurato con ogni nuova MS.

Capitolo 4

Schemi di pairing

Considerando una rete con relay in cui sono presenti più RS e MS all'interno di una cella, una delle questioni principali da gestire è l'accoppiamento (*pairing*) delle RS con le MS vicine per ottenere il maggior guadagno dall'utilizzo dei relay. Infatti, la scelta corretta della RS partner è fondamentale al fine di sfruttare in maniera ottimale l'intero sistema di relay. In pratica, è essenziale sviluppare schemi di accoppiamento efficienti in modo da migliorare il throughput globale e la copertura. Questa procedura di accoppiamento può essere eseguita sia in modalità centralizzata che in modalità distribuita. Quando si opera in modalità centralizzata la BS opera da nodo di controllo e raccoglie tutte le informazioni riguardanti lo stato del canale e la localizzazione delle RS e delle MS nelle vicinanze. Successivamente la BS effettua le decisioni di accoppiamento e le comunica a tutti i nodi subordinati. Al contrario quando si opera in modalità distribuita ogni RS seleziona in maniera opportuna le MS vicine con cui accoppiarsi attraverso un meccanismo *contention-based* MAC, ossia quel meccanismo che permette a più utenti di condividere lo stesso canale radio senza una pre-coordinazione. In generale, la modalità centralizzata necessita di maggiore *overhead*, ma può ottenere migliori prestazioni rispetto alla modalità distribuita. Alcuni schemi di accoppiamento centralizzato e distribuito sono stati sviluppati per scenari multi-RS-single-MS e single-RS-multi-MS con lo scopo di migliorare il throughput globale di un singolo link two hop. Per quanto riguarda invece lo scenario più generale multi-RS-multi-MS la letteratura è meno ricca. In particolare, nel documento [11] troviamo uno schema di accoppiamento centralizzato basato su un criterio min-max e sulla teoria dei grafi bipartiti che permette di

minimizzare la massima probabilità di interruzione del servizio (*outage*) per le MS, pur mantenendo un'equità di prestazioni tra esse. Nel documento [12] troviamo un altro schema di accoppiamento centralizzato che permette a ogni MS di misurare la qualità del canale attraverso i nodi vicini e successivamente di identificare una lista di nodi vicini, per i quali la qualità del canale supera una certa soglia, che possano effettuare il relay. Queste informazioni vengono inviate alla BS, la quale prende le opportune decisioni di accoppiamento. Di seguito verranno illustrati uno schema di accoppiamento centralizzato e uno distribuito che permettono di ottimizzare le prestazioni globali del sistema attraverso la diversità spaziale (*multipath diversity*) in uno scenario multi-RS-multi-MS.

4.1 Pairing centralizzato

In un contesto operativo centralizzato ogni RS identifica un gruppo di MS nelle vicinanze che è in grado di servire (*service set*) e verifica le condizioni del canale tra RS e BS e dei canali tra RS e ogni MS nel gruppo. Queste informazioni devono essere periodicamente aggiornate e inoltrate alla BS sovraordinata in modo che questa sia sempre informata riguardo le condizioni dei canali di ogni RS e delle variazioni riguardanti le MS, come ad esempio l'entrata e l'uscita delle MS dalla cella o il passaggio di una MS da un service set a un altro. Dopo aver ricevuto queste informazioni da ogni RS nella cella la BS genera una matrice bidimensionale $C = [c_{i,j}]$ in cui le righe corrispondono ai MS ID e le colonne ai RS ID. L'elemento della matrice $c_{i,j}$ ($c_{i,j} \geq 0$) rappresenta la velocità di trasmissione raggiungibile lungo il link two hop quando l' i -esima MS è servita dalla j -esima RS; se l' i -esima MS non appartiene al service set della j -esima RS l'elemento $c_{i,j}$ è posto a zero. L'elemento $c_{i,j}$ può essere calcolato basandosi sulla condizione istantanea del canale tra l' i -esima RS e la j -esima RS e tra la j -esima RS e la BS. Sotto la condizione che ogni RS possa servire un'unica MS alla volta, lo scopo è quello di massimizzare il numero di MS servite, cercando secondariamente di servire le MS con la massima velocità di trasmissione raggiungibile. Per ottenere questo risultato la BS manipola la matrice C in modo da mantenere il minor numero di righe a zero e allo stesso tempo un unico elemento diverso da zero per ogni colonna, non potendo una RS servire più di una MS contemporaneamente. La BS prima cerca le righe con un unico elemento diverso da zero, ossia quelle

corrispondenti alle MS che hanno un'unica RS a disposizione nelle vicinanze, e assegna a esse una priorità di accoppiamento maggiore. Se esiste più di una MS ad alta priorità di accoppiamento, viene scelta la MS con la velocità di trasmissione raggiungibile maggiore e vengono eliminate dalla matrice C le righe relative alle altre eventuali MS ad alta priorità che disponevano solo della RS appena accoppiata, non potendo essere servite da nessun'altra RS. Una volta accoppiata una RS con una MS, la RS non può servire nessun'altra MS e quindi gli elementi della colonna corrispondente alla RS vengono posti a zero, a eccezione dell'elemento corrispondente alla MS accoppiata; anche i rimanenti elementi nella riga in questione vengono azzerati assumendo che una MS non possa essere servita da più di una RS contemporaneamente. Procedendo in questo modo, la BS processa iterativamente le righe ad alta priorità rimanenti. Successivamente vengono processate le righe con il minor numero di elementi diversi da zero e visto che una MS ha più RS con cui essere accoppiata, viene scelto sempre l'elemento corrispondente alla coppia MS-RS con la più alta velocità di trasmissione raggiungibile. Alla fine, la matrice C risultante ha ogni colonna contenente un unico elemento diverso da zero e viene inoltrata a tutte le RS e MS nella cella procedendo così all'operazione di accoppiamento effettiva. Il throughput globale per le MS servite può essere calcolato sommando tutti gli elementi diversi da zero nella matrice C . In figura Figura 4.1 viene mostrato un possibile algoritmo in pseudocodice che effettua questa procedura di accoppiamento, mentre in figura Figura 4.2 è mostrato un esempio di applicazione dell'algoritmo.

4.2 Pairing distribuito

Per ridurre il periodico scambio di informazioni e quindi ridurre l'overhead rispetto a uno schema di accoppiamento centralizzato, è possibile utilizzare uno schema di accoppiamento distribuito basato su un meccanismo contention-based MAC. Questo schema prevede che gli slot temporali, in cui è suddiviso il canale condiviso dalle RS, vengano raggruppati in gruppi di N , in quella che è chiamata sezione di accoppiamento (*pairing section*). Una procedura di accoppiamento completa comprende M pairing section. I parametri N e M possono essere regolati in base alla densità delle RS e delle MS all'interno di ogni cella in modo da ottenere il miglior compromesso tra collisioni e ritardo nello schema di accoppiamento

```
repeat
  elimina eventuali righe nulle
  if righe con un unico elemento diverso da zero > 0 then
    seleziona tutte le righe con un unico elemento diverso da zero
    if righe selezionate > 1 then
      seleziona l'elemento maggiore tra le righe selezionate
      if esistono elementi diversi da zero nella colonna dell'elemento
      selezionato then
        elimina le righe degli altri elementi diversi da zero in questa colonna
      end if
    else
      seleziona l'elemento della riga selezionata
    end if
  else
    seleziona le righe con meno elementi diversi da zero
    seleziona l'elemento maggiore nelle righe selezionate
  end if
  poni a zero tutti gli elementi sulla riga e sulla colonna dell'elemento
  selezionato, tranne l'elemento stesso
until ogni RS non è stata accoppiata quando ciò è possibile
```

Figura 4.1: Algoritmo che realizza lo schema di pairing centralizzato

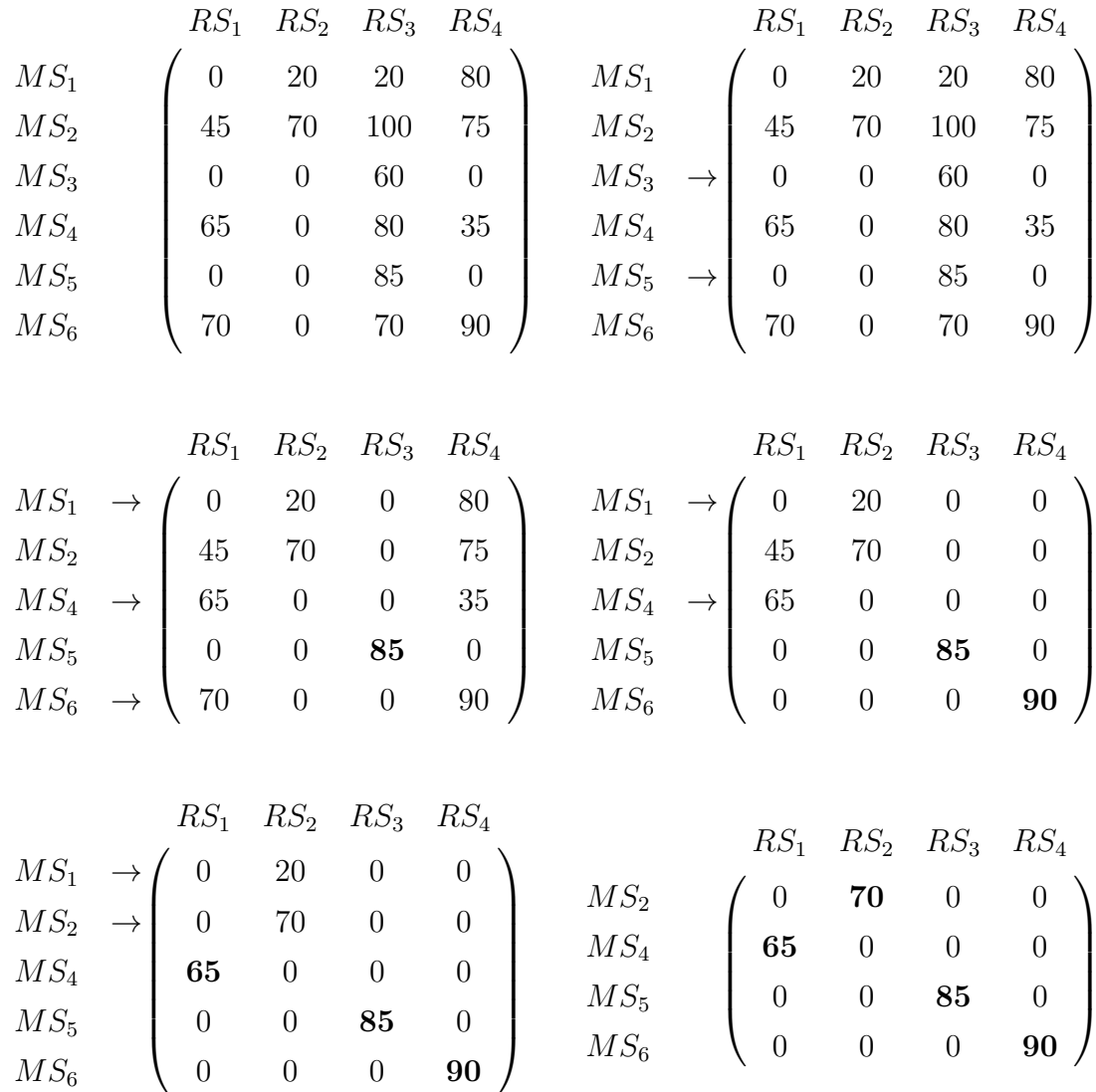


Figura 4.2: Esempio di pairing centralizzato. Le velocità di trasmissione raggiungibili sono indicate con valori da 1 a 100 per semplicità. L'insieme delle MS il cui elemento corrispondente nella colonna j -esima è diverso da zero è il service set corrispondente alla j -esima RS. Le righe contrassegnate dalle frecce sono quelle elaborate durante la fase corrente. La MS corrispondente all'elemento in grassetto è quella che è stata associata alla RS corrispondente alla colonna dell'elemento stesso.

proposto. Lo schema prevede che inizialmente ogni RS identifichi le MS nelle vicinanze creando il proprio service set. Successivamente la RS deve valutare le condizioni del canale tra se stessa e la BS e tra essa e le MS nel service set. Nella prima parte della procedura di accoppiamento, ogni RS con una sola MS nel proprio service set seleziona in maniera casuale uno slot temporale tra gli N disponibili nella pairing section corrente e trasmette in broadcast il MS ID della MS che si è deciso di servire. Se un'altra RS utilizza lo stesso slot temporale per annunciare la propria MS servita si verifica una collisione di accoppiamento (*pairing collision*) e le RS coinvolte dovranno tentare l'annuncio nella successiva sezione. Le RS con un service set composto da più di una MS stanno in ascolto degli annunci di accoppiamento durante la prima pairing section ed eliminano dal proprio service set le MS che vengono accoppiate. Nella seconda pairing section, le RS che hanno avuto una collisione nella prima sezione (se presenti) e le RS con un'unica MS nel service set aggiornato rieseguono la procedura, ossia selezionano a caso uno slot temporale ed effettuano l'annuncio. Anche qui possono avvenire delle collisioni, mentre gli annunci andati a buon fine portano di nuovo all'aggiornamento dei service set delle altre RS. Questa procedura viene iterata fino alla M -esima pairing section nella quale ogni RS non ancora accoppiata seleziona a caso una MS nel proprio service set e annuncia in uno slot casuale la sua decisione. Se in questa sezione avvengono delle collisioni queste non vengono risolte. Una nuova procedura di accoppiamento ricomincia quando una RS rileva dei cambiamenti nell'ambiente circostante dovuti alla mobilità delle MS o alle condizioni dinamiche del canale. Utilizzando questo sistema, che assegna maggiore priorità alle RS con una singola MS nel service set durante la procedura di accoppiamento, si riduce in maniera significativa la probabilità di pairing collision, aumentando di conseguenza la probabilità di successo nell'accoppiamento e raggiungendo quindi l'obiettivo di servire il maggior numero di MS in uno scenario multi-RS-multi-MS. Anche per questo metodo di accoppiamento è riportato un esempio in figura Figura 4.3.

4.3 Pairing per trasmissioni cooperative

Di seguito verrà descritto uno schema di pairing per un sistema di relay cooperativo in cui il relay è possibile sia attraverso un'unica RS che attraverso due RS

che agendo in maniera cooperativa servono un'unica MS [13]. In particolare, si descriveranno più dettagliatamente i vari segnali di controllo (indicati con il loro nome) scambiati nel tempo tra le varie stazioni e l'algoritmo di selezione delle RS ottime per effettuare il relay. Per operare la scelta ottima la BS utilizza dei parametri che determinano la qualità dei vari link: il Carrier to Interference and Noise Ratio (CINR) utilizzato per il downlink, il quale utilizza la modulazione multiportante OFDM, e il Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) per l'uplink, il quale utilizza una modulazione Single Carrier. Per ottenere tali valori la BS trasmette periodicamente dei segnali di controllo alle RS e alle MS e allo stesso modo le RS trasmettono questi segnali alle MS sottoposte. Inoltre, ogni MS utilizza queste informazioni per decidere indipendentemente se tentare una trasmissione tramite uno o più relay o se collegarsi direttamente alla BS (se possibile).

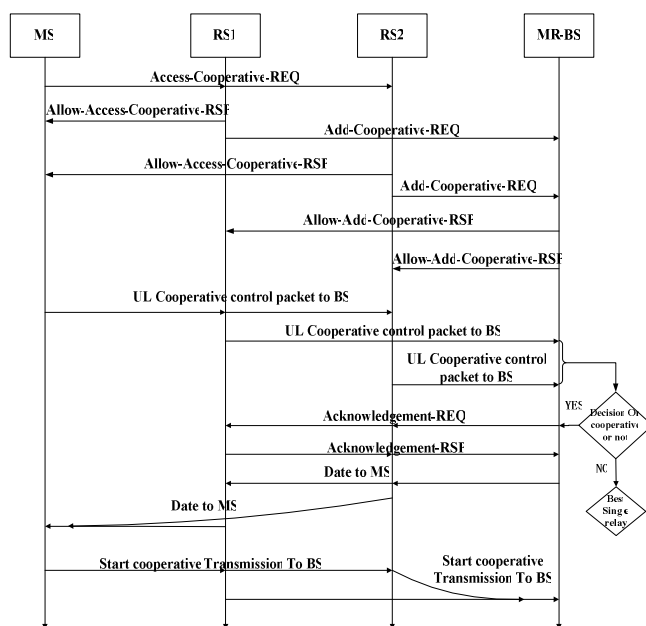


Figura 4.4: Flusso dei messaggi di controllo durante la fase di connessione della procedura di pairing

Fase di connessione In questa fase iniziale si descrivono tutti gli scambi di messaggi di controllo necessari a instaurare la connessione richiesta dalla MS che vuole trasmettere. In Figura 4.4 è rappresentato il diagramma temporale che illustra i vari scambi di segnali di controllo tra le stazioni.

1. La MS che vuole effettuare una trasmissione cooperativa trasmette in broadcast un Access-Cooperative-REQ alle RS che possono comunicare con essa, questo messaggio include l'indirizzo MAC della MS, la banda richiesta ed eventuali parametri di QoS. Se la RS che riceve tale messaggio è in grado di soddisfare i requisiti richiesti, in base al carico di traffico e alla qualità del canale, risponde alla MS con un Allow-Access-Cooperative-RSP e inserisce un Cooperative Indicator (CI) nel segnale downlink MAP per inizializzare la connessione per la trasmissione cooperativa. Dopo aver ricevuto questa conferma dalla RS, la MS misura il downlink CINR tra essa e la RS.
2. Dopo aver accordato la richiesta alla MS, la RS trasmette un Add-Cooperative-REQ alla BS sovraordinata, notificando la possibilità di effettuare il relay e richiedendo l'autorizzazione a effettuare la trasmissione cooperativa. Se l'operazione può essere effettuata la BS risponde con un Allow-Add-Cooperative-REQ e fornisce nel segnale downlink MAP delle istruzioni per instaurare la connessione per la trasmissione cooperativa. La RS misura il downlink CINR tra essa e la BS.
3. La MS invia un Uplink Cooperative Control Packet alla RS contenente il downlink CINR appena misurato. Quando la RS riceve questo pacchetto misura l'uplink SINR tra essa e la MS; questo parametro, insieme al downlink CINR tra essa e la BS misurato in precedenza, vengono aggiunti all'Uplink Cooperative Control Packet, il quale viene inoltrato alla BS. La BS riceve questo pacchetto e misura il SINR con la RS sottoposta, ottenendo infine tutti i parametri relativi alla qualità dei quattro link.
4. Dopo aver ottenuto tutte le informazioni la BS calcola la durata della trasmissione attraverso tutte le possibili RS, decide se effettuare o no la trasmissione cooperativa e seleziona uno o più relay attraverso cui fare la trasmissione.

Fase di selezione Al passo 4 viene eseguito l'algoritmo di scelta delle RS che ora verrà illustrato nel dettaglio. In Figura 4.5 è rappresentato il diagramma di flusso dell'algoritmo.

- a. Dopo aver ricevuto il pacchetto dalla RS, la BS decide se effettuare la trasmissione cooperativa o no in base al pacchetto ricevuto.

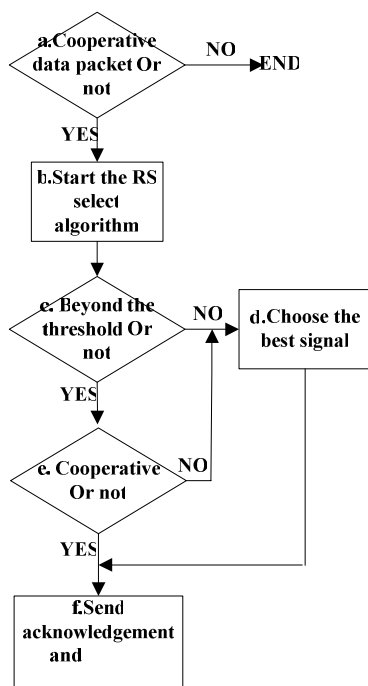


Figura 4.5: Algoritmo di selezione delle RS ottime

- b. A questo punto la BS dispone, per ogni RS candidata a effettuare il relay, di una quaterna di parametri, ovvero il CINR e il SINR sia dell'access link che del relay link. Supponendo che ci siano N di queste RS (dette $1...i...j...N$), la prima operazione che viene eseguita è quella di sottrarre ogni parametro riguardante la RS i da quello corrispondente della RS j , considerando il valore assoluto del risultato ottenuto. Questa operazione viene ripetuta per ogni possibile coppia di RS ottenendo $\frac{N(N-1)}{2}$ quaterne di parametri inerenti ad altrettante coppie di RS.
- c. Successivamente viene verificato per ogni quaterna di parametri che ognuno di questi sia inferiore a una certa soglia stabilita; infatti se la differenza di potenza ricevuta tra le due RS fosse troppo elevata il miglioramento di prestazioni risulterebbe minimo e pertanto sarebbe inutile se non svantaggioso impiegare le due stazioni nell'operazione di trasmissione cooperativa. Se anche solo uno dei quattro parametri supera la soglia fissata si procede al punto d, altrimenti si procede al punto e.
- d. Se la trasmissione cooperativa non è possibile si procede selezionando un'unica RS per effettuare il relay. Essendo le RS fisse, il relay link risulta più

stabile e quindi la scelta della RS ottima viene effettuata dando priorità a quella con la qualità dell'access link maggiore. Inoltre, essendo la larghezza di banda relativa al downlink generalmente maggiore di quella relativa all'uplink si sceglie la RS con il miglior down access link CINR.

- e. Se la trasmissione cooperativa è possibile la BS seleziona la migliore coppia di RS utilizzando le quaterne di parametri precedentemente calcolati. Per quanto riguarda la trasmissione in uplink il parametro da considerare per primo è quello relativo al relay uplink; infatti i segnali trasmessi dalle due RS alla BS non possono essere troppo ritardati uno rispetto all'altro, dovendo questi essere ricevuti dalla BS quasi contemporaneamente, mentre il segnale trasmesso dalla MS alle RS può pervenire a esse anche in istanti diversi. Viene quindi impostata una soglia δ_1 per l'up access link e successivamente viene selezionata la coppia di RS con il parametro relativo all'up relay link più piccolo; se il parametro relativo all'up access link di questa coppia supera la soglia fissata la coppia di RS deve essere rimossa dall'insieme delle RS candidate. Si processa allo stesso modo la coppia di RS con il secondo valore più basso relativo all'up relay link e così via fino a ottenere un insieme R_1 di coppie di RS candidate. Si procede in maniera analoga per quanto riguarda il downlink; in questo caso si fissa una soglia δ_2 per il down relay link, si seleziona la coppia di RS con il parametro più piccolo relativo al down access link e si verifica che il parametro relativo alla coppia per il down relay link non superi la soglia fissata altrimenti lo si elimina dall'insieme. Procedendo così si ottiene un secondo insieme R_2 di coppie di RS candidate. Infine si procede a calcolare l'intersezione dei due insiemi trovati, ottenendo così delle coppie di RS che soddisfano i requisiti necessari per effettuare la trasmissione cooperativa. Se più coppie di RS soddisfano tali requisiti viene selezionata la coppia con il parametro relativo al down access link più basso per le ragioni spiegate al punto d e si procede al punto e; se invece non è stato possibile trovare nessuna coppia di RS che soddisfi tutti i vincoli si procede al punto d.

- f. La BS accoppia effettivamente la coppia di RS appena trovata con la MS inviando a queste un segnale di acknowledge e infine si procede con la trasmissione dei dati.

Capitolo 5

Valutazione delle prestazioni

In questa sezione mostreremo alcuni risultati ottenuti da diverse simulazioni al computer, le quali mostrano come l'utilizzo di nodi relay possa effettivamente portare a dei miglioramenti delle prestazioni globali dell'intero sistema. Nello specifico, verranno confrontate le diverse prestazioni ottenibili con i tre schemi di trasmissione illustrati nelle sezioni precedenti e verranno valutate le prestazioni degli schemi di accoppiamento sopra proposti.

5.1 Prestazioni degli schemi di trasmissione

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando un modello di canale attenuante, codifica tramite turbo codici, decodifica tramite la regola Max-Log-MAP (maximum a posteriori), quattro schemi di modulazione per adattarsi dinamicamente al canale (BPSK, QPSK, 16-QAM e 64-QAM) e un *transport block size* (il numero di bit che vengono codificati contemporaneamente dal livello fisico) di 240 bit. In Figura 5.1 possiamo osservare le prestazioni in termini di efficienza di trasmissione misurata in bit/simbolo dei differenti schemi di trasmissione a confronto, ovvero amplify-and-forward (AF) demodulation-and-forward (DMF) e decode-and-forward (DCF) soggette a quattro differenti condizioni del canale: (SNR + 15 dB, SNR), (SNR + 10 dB, SNR), (SNR + 16 dB, SNR) e (SNR + 6 dB, SNR - 6 dB). Il primo e il secondo elemento tra parentesi rappresentano rispettivamente il rapporto segnale rumore (SNR) sul primo e secondo salto della rete di trasmissione con relay. Il valore dell'SNR varia da 2 a 30 dB come mostrato sull'asse X. Dai risultati della simulazione possiamo osservare come

5. VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

lo schema amplify-and-forward sia molto più sensibile alle variazioni di SNR lungo i due salti; infatti si nota come si raggiunga un guadagno elevato quando le condizioni del canale passano da $(\text{SNR} + 6 \text{ dB}, \text{SNR} - 6 \text{ dB})$ a $(\text{SNR} + 15 \text{ dB}, \text{SNR})$. Tra i tre schemi di relay presentati si vede che lo schema decode-and-forward offra sempre le migliori prestazioni sotto tutte le condizioni di canale, questo perché effettuando la decodifica di canale è possibile mitigare completamente l'attenuazione introdotta nel primo salto, ripristinando completamente il segnale che viene inviato nel secondo salto.

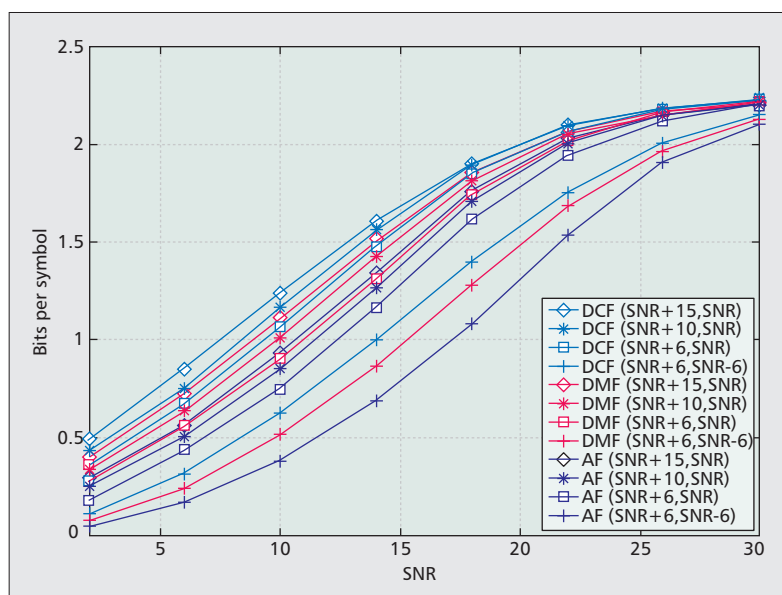


Figura 5.1: Efficienza di trasmissione a confronto per gli schemi AF, DMF e DCF rispetto a tre diverse condizioni di canale

5.2 Prestazioni degli schemi di accoppiamento

Prestazioni degli schemi di accoppiamento centralizzato e distribuito

Modello del sistema Le performance degli schemi di accoppiamento centralizzato e distribuito sopra proposti, sono state valutate tramite una simulazione al computer in uno scenario realistico a singola cella così definito:

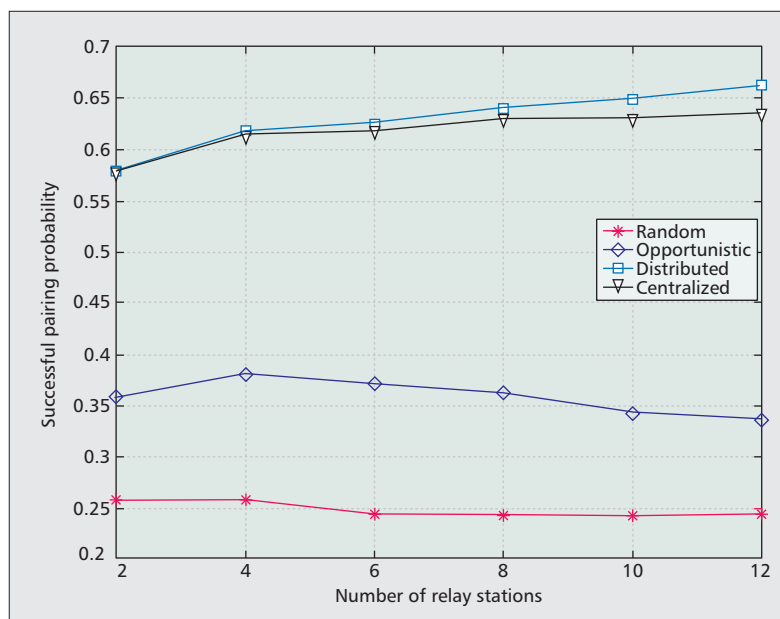


Figura 5.2: Probabilità di corretto accoppiamento delle MS in una cella per gli schemi casuale, opportunistico, distribuito e centralizzato

- un modello di canale SUI-3 (Standfor University Iterim) con fattore di attenuazione 2, a log-normal *shadow fading* con varianza di 8 dB e un rumore additivo gaussiano bianco (AWGN) con media nulla e varianza 0.01
- le RS e MS sono disposte casualmente nella cella in un numero che varia da 4 a 14 per le RS e da 2 a 12 per le MS
- ogni MS necessita di una velocità di trasmissione arbitraria tra $0.75R$, $1.5R$, o $3R$, dove R denota la velocità di trasmissione media tra tutte le MS e le RS. Il valore di R non influisce sulla comparazione delle prestazioni tra diversi schemi di accoppiamento
- per quanto riguarda lo schema di accoppiamento distribuito, vengono utilizzate tre sezioni ($M = 3$) composte da quattro slot temporali ciascuna ($N = 4$)
- lo schema di relay utilizzato è selective decode-and-forward

Come benchmarks di comparazione con i due schemi proposti, vengono inoltre valutate le prestazioni di uno schema di accoppiamento casuale e di uno opportunistico. Lo schema casuale prevede che ogni RS selezioni in maniera del tutto

casuale una MS nel suo service set con cui accoppiarsi, senza considerare né la posizione della MS né la velocità di trasmissione raggiungibile. Lo schema di accoppiamento opportunistico invece prevede che ogni MS si accoppi con la RS con il segnale più forte finché tutte le RS sono accoppiate. In Figura 5.2 vengono confrontate le diverse probabilità di successo di accoppiamento dei diversi schemi. Il numero di MS nella cella cresce all'aumentare delle RS ed in particolare è uguale al numero di RS meno due. La probabilità di accoppiamento è definita come il numero di MS accoppiate diviso il numero totale di MS.

Valutazione delle prestazioni Come possiamo osservare dalla Figura 5.2, i due schemi proposti raggiungono l'obiettivo di servire il maggior numero possibile di MS in maniera simile ma decisamente migliore degli schemi casuale e opportunistico. Inoltre si può notare come la probabilità di accoppiamento aumenti in maniera lineare con l'aumentare del numero delle RS. Questo dimostra che gli schemi proposti permettono effettivamente di ottenere un miglioramento nelle prestazioni di accoppiamento sfruttando le nuove RS introdotte.

In Figura 5.3 si possono osservare i throughput massimi ottenibili dalla cella quando vengono usati i diversi schemi di accoppiamento. Grazie all'elevata probabilità di accoppiamento corretto, dovuta ai due schemi proposti, è possibile sfruttare a pieno le RS, permettendo così throughput globali nella cella più elevati rispetto agli schemi casuale e opportunistico in uno scenario multi-RS-multi-MS. Con l'aumentare del numero di RS e MS nella cella le RS tendono ad avere un service set più grande, il che porta a un minor numero di accoppiamenti nella prima e seconda sezione e molte collisioni nella terza e ultima sezione se si utilizza lo schema di accoppiamento distribuito; come conseguenza si ha una saturazione del throughput quando il numero di RS e MS è elevato. Questo problema può essere risolto aggiustando in maniera dinamica i parametri N e M in base al numero di RS e MS nella cella.

Prestazioni dello schema di accoppiamento cooperativo

Modello del sistema Lo schema di accoppiamento cooperativo viene valutato considerando una rete cellulare 802.16j TDD-ODFMA con sistema di relay two hop [13]. Le RS sono di tipo non-transparent, operanti in modalità di scheduling distribuita e con schema di trasmissione decode-and-forward. La topologia

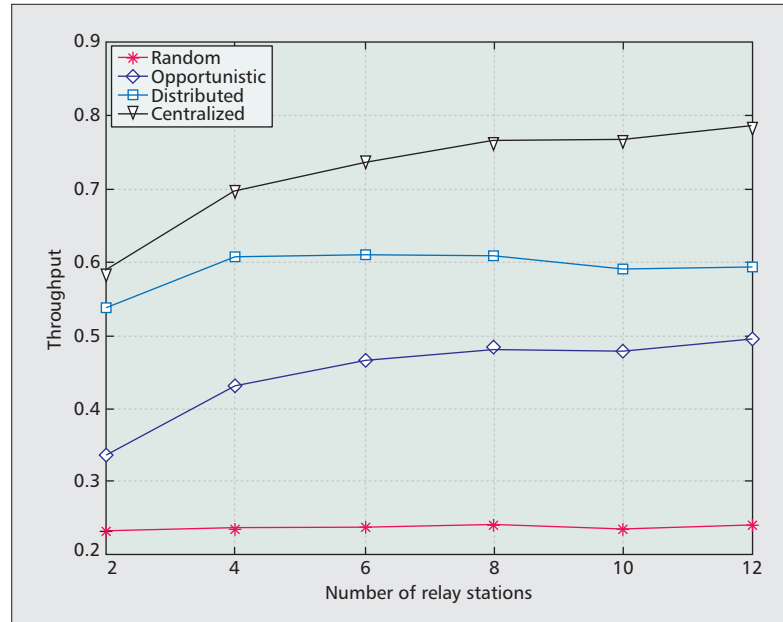


Figura 5.3: Throughput globale della cella a confronto per gli schemi casuale, opportunistico, distribuito e centralizzato

Parametro	Valore
Raggio di comunicazione BS (m)	3000
Raggio di comunicazione RS (m)	800
Frequenza operativa (GHz)	5
Larghezza di banda del canale (MHz)	20
Potenza di trasmissione BS (dBm)/Altezza (m)	40/35
Potenza di trasmissione RS (dBm)/Altezza (m)	30/25
Potenza di trasmissione MS (dBm)/Altezza (m)	20/2
Rumore (dBm)	-100.98

Tabella 5.1: Parametri della cella utilizzata per la simulazione

della rete è costituita da una BS situata al centro della cella con le RS distribuite all'interno dell'area di copertura della BS e le MS disposte anch'esse all'interno della copertura della BS in maniera casuale secondo una distribuzione uniforme. La potenza di trasmissione della BS è fissata a 40 dbm mentre quella delle RS a 30 dBm. In Tabella 5.1 sono riportati gli altri parametri della rete. Il modello di canale Erceg-Greestein viene utilizzato per calcolare l'attenuazione di canale delle trasmissioni.

Calcolo della capacità di una MS con due RS La capacità del canale dalla MS alla BS è dato dal valore di C_{SINR} il quale è ottenuto dalla (5.1). I parametri C_1 e C_2 rappresentano le capacità del primo tratto dei due canali che collegano la MS alla BS tramite le due RS. Il primo tratto di canale è il link dalla MS alla RS_i se si considera la trasmissione in uplink e il link dalla BS alla RS_i se si considera la trasmissione in downlink. Il parametro C_3 rappresenta la capacità del secondo tratto del canale; questo tratto è visto come un'unico canale seppur le trasmissioni avvengano da due RS distinte; questo secondo tratto è il link dalle RS_1 e RS_2 alla BS per la trasmissione in uplink e dalle RS_1 e RS_2 alla MS per la trasmissione in downlink. B rappresenta la larghezza di banda del canale. SNR_1 e SNR_2 sono gli SNR del primo tratto dei link mentre SNR_3 e SNR_4 sono gli SNR del secondo tratto dei link per la RS_1 e per la RS_2 rispettivamente.

$$C_{SINR} = \min\{C_1, C_2, C_3\} \quad (5.1)$$

$$C_1 = B \log_2(1 + SNR_1) \quad (5.2)$$

$$C_2 = B \log_2(1 + SNR_2) \quad (5.3)$$

$$C_3 = B \log_2(1 + SNR_3 + SNR_4) \quad (5.4)$$

Calcolo della capacità di una MS con una RS La capacità del canale quando la trasmissione avviene tramite un'unica RS è data dalla (5.5). Il parametro C_4 rappresenta la capacità del primo tratto del canale mentre il parametro C_5 quella del secondo tratto. I due tratti del canale sono definiti come in precedenza con la differenza che il secondo tratto è composto da un unico link. SNR_5 e SNR_6 sono gli SNR del primo e del secondo tratto del canale rispettivamente.

$$C_{CINR} = \min\{C_4, C_5\} \quad (5.5)$$

$$C_4 = B \log_2(1 + SNR_5) \quad (5.6)$$

$$C_5 = B \log_2(1 + SNR_6) \quad (5.7)$$

Valutazione delle prestazioni Di seguito si valuteranno le prestazioni di tre schemi di relay: uno schema utilizzante un'unica RS, uno dotato di due RS scelte in maniera non ottimale e uno dotato di due RS scelte in maniera ottimale tramite l'algoritmo presentato. In Figura 5.4 è rappresentato il grafico che mostra la capacità di canale in uplink ottenibile dai tre schemi in funzione di diverse soglie del SINR. La capacità di canale raggiungibile attraverso lo schema di relay cooperativo utilizzante due RS, sotto la condizione che le RS disposte nell'area di copertura siano sufficienti, è sostanzialmente maggiore rispetto agli altri due schemi per qualsiasi scelta della soglia del SINR. Inoltre, si può vedere come sopra una soglia di 11 dBm lo schema non ottimo a doppio relay raggiunga prestazioni migliori dello schema a singolo relay, dimostrando che in ogni caso l'utilizzo di più RS può aumentare il guadagno della trasmissione. Anche per quanto riguarda la capacità di canale in downlink i risultati ottenuti sono analoghi, come si può osservare in Figura 5.5. In questo caso, sebbene la capacità ottenibile mediante lo schema di relay ottimo si superiore a quella ottenibile con gli altri due schemi di relay, queste diverse capacità non differiscono in maniera sostanziale le une dalle altre. Ovviamente aumentando il numero delle RS nell'area di copertura è possibile scegliere in maniera migliore le RS da accoppiare ottenendo così migliori prestazioni.

5. VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

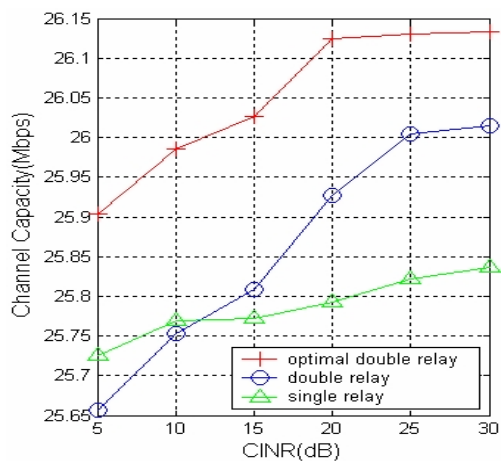
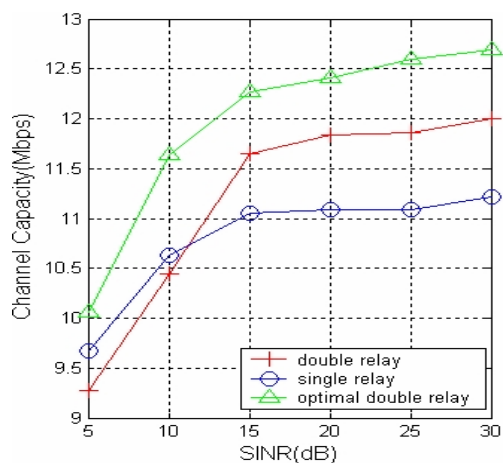


Figura 5.4: Capacità di canale in downlink di tre differenti schemi di relay per differenti soglie del SINR

Figura 5.5: Capacità di canale in uplink di tre differenti schemi di relay per differenti soglie del CINR

Conclusioni

In questa tesi si è data una descrizione generale delle varie tipologie di relay che verranno implementate negli standard LTE-Advanced e Wimax e si è cercato di spiegare come queste tecnologie possano effettivamente migliorare il throughput e la copertura in una rete cellulare. In particolare, si è visto come il throughput possa effettivamente aumentare tramite l'utilizzo di RS, specialmente quando più RS sono disposte all'interno della cella. Si è visto inoltre come l'utilizzo di una schema di trasmissione decode-and-forward possa sempre offrire prestazioni migliori degli altri schemi presentati sotto diverse condizioni di canale. Successivamente sono stati illustrati e valutati due schemi di pairing che permettono di ottenere il massimo numero di MS servite ottimizzando il throughput in maniera decisamente migliore di schemi più semplici come quello casuale o opportunistico. Infine, è stato descritto uno schema di pairing per la selezione ottima delle RS per una rete che permette la trasmissione coordinata da due RS contemporaneamente e si è visto tramite una valutazione delle prestazioni come l'utilizzo di più RS possa migliorare la capacità del canale. Concludendo si può affermare che le tecnologie di relay sono uno strumento che potrebbe portare ampi benefici alle attuali reti cellulari, rendendole più robuste e rendendo possibile un ampliamento della copertura sul territorio facendo sì che l'esperienza utente risulti generalmente migliore.

Lista degli acronimi

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AF	Amplify-and-Forward
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BSC	Base Station Controller
BS	Base Station
BSS	Base Station Subsystem
BTS	Base Transceiver Station
CINR	Carrier to Interference and Noise Ratio
CRC	Cyclic Redundancy Check
DCF	Decode-and-forward
DMF	Demodulation-and-Forward
FCH	Frame Control Header
FDD	Frequency Division Duplex
H-ARQ	Hybrid Automatic Repeat-reQuest
HSPA	High-Speed Packet Access
IMT-Advanced	International Mobile Telecommunications Advanced
ITU	International Telecommunications Union
LTE	Long Term Evolution

5. VALUTAZIONE DELLE PRESTAZIONI

LTE-Advanced	Long Term Evolution Advanced
MAC	Medium Access Control
MAP	Media Access Protocol
MS	Mobile Station
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OSI	Open Systems Interconnection
QAM	Quaternary Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
RS	Relay Station
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SNR	Signal-to-noise ratio
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
TDD	Time Division Duplex
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
Wimax	Worldwide Interoperability for Microwave Access

Bibliografia

- [1] ITU-R Report M.2134, “Requirements Related to Technical Performance for IMT-Advanced Radio Interface(s)”, 2008.
- [2] ITU-R Report M.2135, “Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced”
- [3] S. Parkvall and D. Astely, “The Evolution of LTE towards IMT-Advanced”, *Journal of communications*, vol. 4, no. 3, April 2009
- [4] W. Roh and V. Yanover, “Introduction to WiMAX Technology”
- [5] 3GPP TR 36.814 V9.00, “Further Advancements for E-UTRA: Physical Layer Aspects”, *Tech. Spec.n Group Radio Access Network Rel. 9*, June 2009.
- [6] S. W. Peters and R. W. Heath Jr., “The Future of WiMAX: Multihop Relaying with IEEE 802.16j”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 1, Jan. 2009, pp. 104–11.
- [7] Y. Yang and H. Hu, J. Xu and G. Mao, “Relay Technologies for WiMAX and LTE-Advanced Mobile Systems”, *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 10, Oct. 2009, pp. 100–105.
- [8] Zheng Juan, Philippe Sartori and Bai Wei, “Performance Analysis of Layer 1 Relays”, *ICC Workshops*, June 2009
- [9] V. Genc et al., “IEEE 802.16j Relay-Based Wireless Access Networks: An Overview”, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 5, Oct. 2008, pp. 56–63.

BIBLIOGRAFIA

- [10] “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. Amendment 1: Multihop Relay Specification”
- [11] J. Shi et al., “Partial Channel State Information Based Cooperative Relaying and Partner Selection”, Proceedings. IEEE WCNC ‘07, Mar. 2007, pp. 975–79.
- [12] Y. S. Jung and J. H. Lee, “Partner Assignment Algorithm for Cooperative Diversity in Mobile Communication Systems”, Proceedings. IEEE VTC-Spring, May 2006, pp. 1610–14.
- [13] Z. Liu, C. Chen, Y. Li, Q. Liu, H. Zhuang, “Cooperative relay selection strategies in two-hop IEEE 802.16 relay networks”, ICFCC, 2010