

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRENTO
Facoltà di Ingegneria



Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria delle
Telecomunicazioni

Tesi di Laurea

SVILUPPO DI UN SIMULATORE ORIENTATO
ALL'USO DI ANTENNE INTELLIGENTI
IN RETI 802.11

Relatore:
Prof. Renato Lo Cigno
Co-relatore:
Ing. Danilo Severina

Laureando:
Matteo Nardelli

Anno Accademico 2005 – 2006

Ai miei genitori, Irma e Claudio

Indice

1	Introduzione	1
1.1	Contesto	1
1.2	Obiettivi	3
1.3	Struttura dell'elaborato	4
2	Standard 802.11	7
2.1	Introduzione alle reti WLAN	7
2.2	Il protocollo 802.11	12
2.2.1	Livello fisico	12
2.2.2	Livello MAC	15
3	Evoluzione delle reti 802.11	21
3.1	IEEE 801.11e	21
3.1.1	Enhanced Distributed Coordination Function	22
3.1.2	Hybrid Coordination Function	25
3.2	IEEE 802.11n	28
3.3	Utilizzo di antenne intelligenti	31
3.3.1	Tipologie di antenne proposte in letteratura	35
3.3.2	Posizionamento e selezione del lobo	37
3.3.3	Modellazione del canale	38
3.3.4	Canale con fading	39
4	Valutazione tools di simulazione	43
4.1	Introduzione alla simulazione di reti	43
4.1.1	Analisi dei tool di simulazione	44
4.1.2	Confronto tra i tool di simulazione	49
4.2	Physical Simulator	50
4.2.1	Funzionamento di WLAN Simulator	51
4.2.2	Architettura software dell'estensione sviluppata	53
4.2.3	Parametri descrittivi e funzionamento	57
4.2.4	Modifiche apportate a WLAN Simulator	61

5	Risultati ottenuti	65
5.1	Reti Ad-Hoc	67
5.1.1	Risultati di validazione	67
5.2	Reti infrastrutturate	73
5.2.1	Antenne omnidirezionali	73
5.2.2	Antenne <i>beamforming</i>	78
5.2.3	Antenne <i>switchedbeam</i>	83
6	Conclusioni e sviluppi futuri	87
	Appendice A	89
	Bibliografia	93

Capitolo 1

Introduzione

Questo primo capitolo ha lo scopo di fornire al lettore i concetti base riguardo al contesto in cui è inserito il presente lavoro di tesi. In primo luogo, si vuole dare un'idea di quale sia la tematica trattata, per poi scendere più in dettaglio sul lavoro svolto nei capitoli successivi, con l'intento, in tal modo, di facilitare il più possibile la comprensione di quest'elaborato.

1.1 Contesto

Il settore dell'informatica e delle telecomunicazioni è da sempre caratterizzato da un continuo processo di evoluzione e innovazione. Questo ha permesso, ad esempio, la diffusione di Internet come mezzo tramite il quale accedere ad innumerevoli informazioni e successivamente, grazie ai progressi fatti nel campo della sicurezza, l'introduzione del commercio elettronico.

Negli ultimi anni ha iniziato a diffondersi in tutto il mondo e con grande successo una nuova tecnologia per l'accesso alle reti di comunicazione: le WLAN (*Wireless Local Area Network*). Questa tecnologia si basa sul concetto di reti "senza fili" (dall'inglese *wireless*) e consente quindi a chi la utilizza di usufruire della *mobilità*, cioè di potersi muovere liberamente con il proprio dispositivo di accesso senza limitare la capacità di quest'ultimo di accedere a risorse remote o di utilizzare la rete globale. Uno dei punti di

forza delle reti wireless, rispetto alle reti cellulari, che già hanno introdotto la mobilità, consiste nella condivisione del mezzo d'accesso (l'etere) tra tutti i dispositivi. Non vi è infatti la necessità di allocare porzioni di canale per ogni singolo terminale, correndo così il rischio di esaurire le risorse disponibili, così come non servono sofisticati sistemi centralizzati per la gestione delle risorse stesse. Questo comporta una sensibile riduzione dei costi, dalla gestione alla manutenzione delle infrastrutture ed in questo modo chiunque può crearsi la propria rete wireless con un budget molto limitato.

In generale questi tipi di reti vengono utilizzate per fornire la connettività tra terminali mediante onde radio ed il loro funzionamento fa riferimento ad alcuni standard che si differenziano sia in base alla frequenza di lavoro utilizzata, sia in base alle tecniche di trasmissione e di accesso al canale. Lo standard che ultimamente si è maggiormente imposto è IEEE 802.11b e la sua successiva evoluzione IEEE 802.11g (v. cap. 2). Le reti wireless che si basano sui predetti standard sono sovente identificate anche con la sigla WI-FI (*Wireless Fidelity*).

Come detto, il settore dell'informatica e delle telecomunicazioni è caratterizzato da un continuo sviluppo e le reti wireless, data la loro recente introduzione, sono soggette a rapide evoluzioni. Dal punto di vista dell'incremento delle prestazioni di tale tecnologia si stanno percorrendo principalmente due strade: la prima volta ad incrementare la qualità del servizio e la seconda destinata al miglioramento delle prestazioni in termini di velocità di trasmissione e throughput.

Il lavoro qui presentato si focalizza su questo secondo aspetto, ponendo l'attenzione sulla valutazione del comportamento e delle prestazioni di reti wireless in cui ogni dispositivo utilizza una nuova tipologia di antenne (dette antenne intelligenti). Gli standard definiti in letteratura, come ad esempio IEEE 802.11n (v. sez. 3.2), non definiscono il tipo di implementazione delle antenne intelligenti (smart antenna), ma definiscono sviluppi dei protocolli di comunicazione e di accesso al canale, in modo da massimizzare i benefici che i nuovi tipi di antenne possono apportare

1.2 Obiettivi

Lo scopo principale di questo lavoro è la valutazione del comportamento e delle prestazioni di reti WLAN basate sullo standard IEEE 802.11, alla luce delle nuove proposte di evoluzione presentate ([7] – [9]).

Negli ultimi anni si è posta molta attenzione sull’impiego di antenne direzionali ed intelligenti nel contesto delle reti wireless, in quanto il loro utilizzo permette una diminuzione dell’interferenza di co-canale ed un aumento del range di copertura rispetto ad antenne omnidirezionali.

Sfortunatamente il solo utilizzo di antenne direzionali, non permette il miglioramento delle prestazioni, ma sono necessarie ridefinizioni di alcune peculiarità delle strutture di accesso e comunicazione precedentemente definite.

Il lavoro svolto in questo elaborato, non ha lo scopo di valutare le nuove estensioni di standard relativi a reti wireless, ma ha lo scopo di definire un framework simulativo. Tale framework è in grado di fornire una rappresentazione topologica della rete, di caratterizzare il canale di trasmissione ed in vari nodi presenti sulla rete, non solo tenendo in considerazione il tipo di protocollo utilizzato, ma anche le caratteristiche “fisiche” della rete, con particolare riferimento a caratteristiche di trasmissione (potenze e livelli di sensibilità) e antenne utilizzate. Il lavoro ha come scopo finale la valutazione comparativa delle prestazioni di rete con caratteristiche standard e con le nuove soluzioni proposte.

Prima di intraprendere l’implementazione di un software in grado di definire la topologia della rete e la caratterizzazione dei nodi e del canale, si sono valutati diversi simulatori per reti sia cablate che wireless presenti in letteratura. Da un’analisi comparata ed approfondita, si è deciso di utilizzare WLAN Simulator, un simulatore di ricerca sviluppato in linguaggio C++ risultato molto accurato nell’implementazione del livello MAC di IEEE 802.11. Questo simulatore è stato realizzato dalle università di Roma II e di Palermo ed è largamente utilizzato e testato per l’analisi delle prestazioni di reti wireless in diversi

articoli pubblicati da G.Bianchi, I. Tinnirello e S.Choi ed altri, che sono considerati pietre miliari della letteratura sull'argomento. La scelta di WLAN Simulator è stata dettata dall'esigenza di avere un simulatore strettamente legato allo standard senza necessità di supporto di caratteristiche evolute od opzionali, in modo da risultare veloce e leggero in fase di testing.

Lo sviluppo del software per la definizione della topologia e delle caratteristiche dei nodi presenti nella rete, denominato Physical Simulator, è avvenuto tenendo sempre presente il fatto che dovesse essere un'infrastruttura di base sulla quale fosse possibile, in futuro, estendere o aggiungere nuove caratteristiche in grado di permettere una simulazione di sistemi sempre più realistici. Inoltre, esso è stato concepito in modo che potesse essere utilizzato anche come estensione di altri simulatori; pertanto, esso non deve essere strettamente legato all'implementazione del protocollo MAC presente in WLAN Simulator. I suoi punti di forza sono la sua natura open source, la sua modularità che rende estremamente facile l'aggiunta di nuove funzionalità o la modifica di quelle presenti, la possibilità di emulare il comportamento di reti sia in configurazione infrastrutturata che ad-hoc, la possibilità di caratterizzare ogni nodo della rete e il canale trasmissivo ed, infine, la possibilità di utilizzo con altri tool simulativi senza la necessità di apportare pesanti modifiche al codice.

1.3 Struttura dell'elaborato

Nel Capitolo 2 si forniscono le informazioni necessarie alla comprensione del funzionamento delle reti wireless, soffermandosi sulle peculiarità principali del protocollo IEEE 802.11. Ci si soffermerà in dettaglio sui protocolli più diffusi, quali: IEEE 802.11b e IEEE 802.11g. Successivamente nel Capitolo 3 si presentano le principali evoluzioni dello standard che riguardano sia qualità del servizio che l'incremento delle prestazioni ed in particolare si pone l'attenzione sullo standard IEEE 802.11n (futuro standard, al momento ancora in formato draft). In seguito si riporta l'analisi di alcuni lavori, presentati

in letteratura, riguardanti l’utilizzo di antenne intelligenti nel contesto delle WLAN. Nel Capitolo 4 si esplicano le motivazioni che hanno condotto alla scelta di WLAN Simulator e si espone in dettaglio il lavoro svolto per l’implementazione di Physical Simulator. Nel Capitolo 5 si presentano i risultati ottenuti in termini di valutazione comparativa dei risultati forniti da WLAN Simulator con e senza le caratterizzazioni introdotte con l’estensione. Si presentano inoltre alcuni risultati caratteristici di reti infrastrutturate con l’utilizzo di antenne omnidirezionali ed intelligenti. Infine nel Capitolo 6 sono presenti alcune conclusioni e possibili futuri sviluppi di Physical Simulator.

Capitolo 2

Standard 802.11

Il funzionamento delle reti locali *wireless* (*WLAN*) si basa sulle specifiche dello standard IEEE 802.11 [1]. Questo capitolo fornisce una breve descrizione dei principi di funzionamento di tali reti; inoltre si introdurranno le caratteristiche generali del protocollo 802.11, ponendo particolare attenzione nella descrizione della modalità di accesso distribuita detta *Distributed Coordination Function* (*DCF*).

2.1 Introduzione alle reti WLAN

Principi di funzionamento

Il protocollo 802.11 utilizza le bande *ISM* (*Industrial Scientific and Medical*) che non sono soggette a licenza e quindi sono liberamente utilizzabili. Alle bande *ISM* si attribuisce lo status di bande “esenti da licenze” che non deve essere però considerato sinonimo di “esenti da regolamentazione.” Di norma l’utilizzo di tali bande è concesso in condizioni di limitazione sulla potenza emessa. Lo standard, inoltre, prevede la suddivisione di tale banda in più canali e la trasmissione dei dati a velocità differenti.

La versione base di 802.11 utilizza la frequenza di 2.4GHz e consente velocità di trasmissione sul canale fino ad un massimo di 2Mbit al secondo a prescindere dalla tecnica di trasmissione utilizzata. La necessità di velocità più elevate e il problema delle interferenze che si possono avere con dispositivi che lavorano sulla medesima frequenza, ad

esempio con dispositivi bluetooth, hanno portato ad un'evoluzione del canale radio e alla standardizzazione di nuovi sistemi a livello fisico:

- 802.11b [2] è lo standard più diffuso e consente velocità di trasmissione pari a: 1, 2, 5.5, 11 Mbit al secondo;
- 802.11a [3] è lo standard di trasmissione ad alta velocità fino ad un massimo di 54 Mbit, lavora a 5 GHz ed è diffuso per lo più negli Stati Uniti. Il principale problema legato a questo standard riguarda la non interoperabilità con 802.11b che ne ha causato una scarsa espansione, anche se l'utilizzo della frequenza a 5 GHz risolve molti problemi di interferenza;
- 802.11g [4] prevede la trasmissione ad alta velocità fino a 54 Mbit e la completa interoperabilità con 802.11b.

È bene precisare che la velocità massima di trasmissione raggiungibile in una WLAN non dipende solo dallo standard che si sta utilizzando, ma è fortemente correlata con la distanza che deve percorrere il segnale, e quindi con la dimensione della cella. Più lontano deve arrivare il segnale, più lentamente deve essere trasmesso. In Tabella 2.1 è riportato un esempio di specifiche per un AP che utilizza 802.11b e supporta quindi le velocità di 1, 2, 5.5, 11 Mbit al secondo.

Campo	11 Mb/s	5.5 Mb/s	2 Mb/s	1 Mb/s
Ambiente aperto	160 m	270 m	400 m	550 m
Ambiente semi-aperto	50 m	70 m	90 m	115 m
Ambiente chiuso	25 m	35 m	40 m	50 m

Tabella 2.1. Velocità di trasmissione di un AP in relazione alla distanza.

Come si può notare in ambiente chiuso l'influenza del fattore distanza è ancora più marcata, in quanto il segnale deve passare attraverso le pareti e questo comporta perdita di potenza. Infine c'è da aggiungere che maggiore è la frequenza del segnale trasmesso,

maggiore risulta essere la perdita di potenza nell'attraversare pareti; per questo, se si utilizza la frequenza di 5 GHz (come nello standard 802.11a), si risolvono i potenziali problemi di interferenza con altri apparecchi, ma è più difficile costruire una WLAN che trasmetta alla massima velocità a parità di distanza.

È da considerare infine che le distanze riportate sono ottenute utilizzando una potenza di trasmissione pari a 100 mW. Le potenze di trasmissione non sono standardizzate, ma variano da paese a paese così come la dimensione della larghezza di banda utilizzata. In Tabella 2.2 sono specificate le diverse potenze rispetto alle varie aree geografiche mentre in Tabella 2.3 vengono riportate le larghezze di banda utilizzate in reti IEEE 802.11b/g [2] in diversi stati.

Regione	Potenza massima
USA	1000 mW
Europa	100 mW
Giappone	10 mW

Tabella 2.2. Potenza massima di trasmissione per dispositivi 802.11 in alcuni paesi

Regione	Frequenze
USA	2.4000 – 2.4835 GHz
U.E	2.4000 – 2.4835 GHz
Francia	2.4465 – 2.4835 GHz
Spagna	2.4450 – 2.4750 GHz
Giappone	2.4450 – 2.4750 GHz 2.4710 – 2.4970 GHz

Tabella 2.3. Range di frequenze disponibili per l'uso di 802.11 in alcuni paesi occidentali

In Europa la larghezza di banda di 802.11b viene suddivisa in 13 canali di 24 MHz, e la frequenza centrale di ogni canale è distanziata da quella del successivo di 5 MHz, in questo modo per non avere *overlapping* è necessario utilizzare canali distanziati tra

loro di almeno 25 MHz. In Figura 2.1a è riportata la rappresentazione grafica dei tre canali non sovrapposti in frequenza (1, 7, 13), mentre in Figura 2.1b è rappresentata la configurazione che prevede l'utilizzo di sette canali con overlapping minimo.

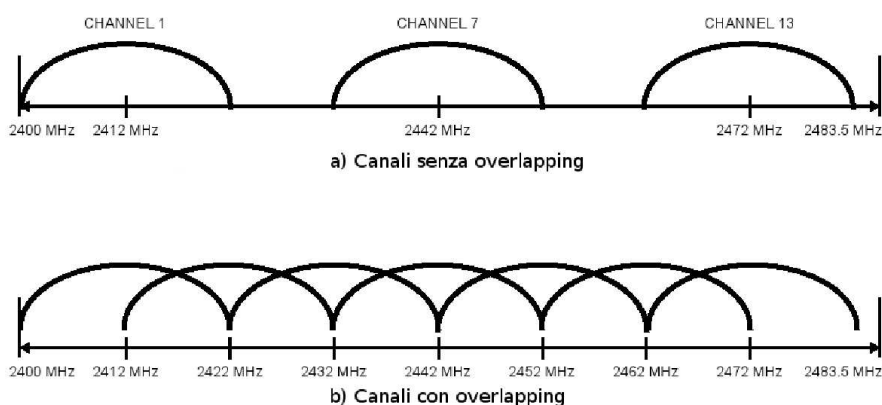


Figura 2.1. Disposizione dei canali in frequenza

Struttura fisica della rete

L'elemento fondamentale di una *WLAN* è il *Basic Service Set (BSS)*, definito come un'insieme di stazioni che possono essere sia mobili che fisse, collocate topologicamente all'interno di una *cella*. Tali stazioni possono stabilire connessioni tra loro in modo diretto o con l'ausilio di più componenti intermedie poste tra loro. Nel caso di stazioni mobili, l'architettura di una rete wireless 802.11 prevede che la mobilità di tali stazioni sia trasparente ai livelli superiori dello stack protocollare.

Se le stazioni poste all'interno della *cella* stabiliscono connessioni in modo diretto tra loro, l'architettura della rete *WLAN* è chiamata *ad-hoc*. In questo caso tutte le stazioni wireless poste all'interno della stessa area hanno la medesima importanza e possono comunicare direttamente l'una con l'altra. Per questo motivo non si parla più di *BSS* ma di *Independent BSS (IBSS)*. Un esempio di tale architettura è riportato in Figura 2.2.

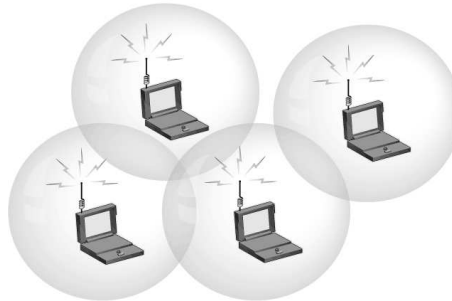


Figura 2.2. Esempio di *Independent Basic Service Set*

Nel caso in cui la comunicazione tra le varie stazioni avviene tramite l'ausilio di componenti intermedie, definite *Access Point (AP)*, l'architettura di una rete è chiamata *infrastrutturata*. Gli *AP* hanno il compito di connettere tra loro le stazioni presenti all'interno della medesima cella e più *AP* possono essere interconnessi tra loro, tale connessione viene definita *Distribution System (DS)*. In questo modo è possibile ottenere reti *WLAN* formate da più celle che vanno sotto il nome di *Extended Service Set (ESS)*. La modalità di interconnessione del *DS* non viene definita all'interno dello standard IEEE 802.11, di conseguenza può essere di tipo *wireless*, *wired*...; l'unico vincolo è che usi l'architettura protocollare di IEEE 802 (Figura 2.3).

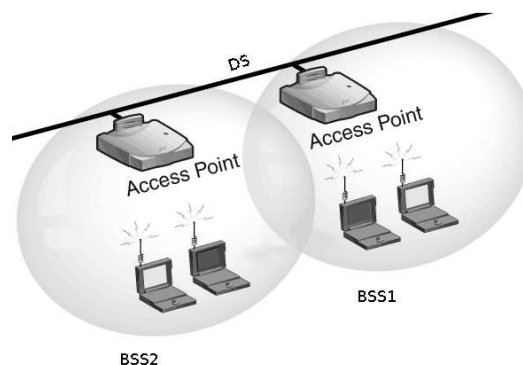


Figura 2.3. Esempio di *Extended Service Set*

2.2 Il protocollo 802.11

Come tutti i protocolli della famiglia 802.x, anche lo standard IEEE 802.11 definisce i due livelli logici più bassi del modello *OSI* (Open System Interconnection): il livello fisico (PHY - Physical Layer), che si occupa di trasmettere i dati sul canale e il livello *Data Link*, che gestisce l'accesso al mezzo trasmissivo da parte dei livelli superiori. Questo secondo livello è suddiviso in due sottolivelli: il *Logical Link Control* (LLC) e il *Medium Access Control* (MAC) (Figura 2.4). Lo standard 802.11 definisce solamente il secondo sottolivello, mentre il primo è di competenza dello standard 802.2.

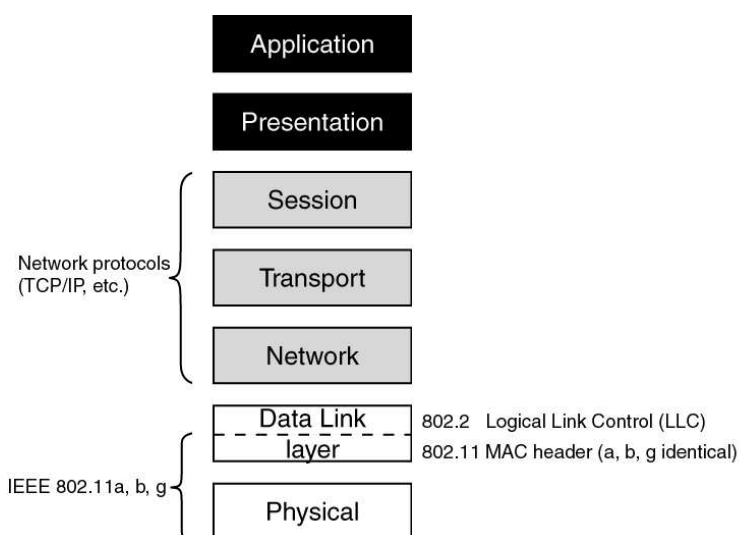


Figura 2.4. Architettura tipica di una WLAN 802.11 nel modello OSI

2.2.1 Livello fisico

Nel luglio 1992 il gruppo di lavoro di IEEE ha deciso di standardizzare tre tipi di trasmissioni: infrarossi (IR), radiofrequenza con *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) e radiofrequenza con *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) nelle bande ISM. Queste due tecniche di modulazione sono utilizzate sia nella versione base di 802.11 sia in

802.11b, mentre gli standard 802.11a e 802.11g per le trasmissioni ad elevato rate prevedono la tecnica di modulazione OFDM. La tecnica di trasmissione IR non è di interesse per questo lavoro di tesi pertanto la sua descrizione verrà tralasciata.

Il termine *Spread Spectrum* indica una tecnica di trasmissione (analogica o digitale), che distribuisce lo spettro di densità di potenza del segnale trasmesso su una banda molto larga, in modo tale che la potenza per unità di frequenza (misurata in [watt/Hz]) del segnale inviato sul canale sia molto piccola. La densità di potenza media del segnale rimane però inalterata rispetto al caso in cui non si effettui nessuna dispersione dello spettro. Le tecniche *Spread Spectrum* comportano diversi vantaggi: i) lo spettro del segnale trasmesso viene “disperso” su una larga porzione di banda, tramite un pattern pseudo casuale, tale pattern è noto soltanto al ricevitore pertanto il pattern di spreading può essere visto come una chiave crittografica; ii) la densità spettrale di potenza essendo molto bassa per un ascoltatore casuale è indistinguibile dal rumore termico di fondo e quindi non rilevabile; iii) sempre in virtù della bassa densità spettrale il segnale SS disturba in maniera tendenzialmente ridotta le trasmissioni di altri utenti.; iv) le tecniche SS riducono gli effetti del *multipath fading*, fenomeno di auto-interferenza provocato dalla ricezione di echi ritardati del segnale.

Tecniche di accesso

FHSS: prevede spreading del segnale fatto nel dominio delle frequenze mediante una variazione pseudo casuale (sequenza di salto) della frequenza di portante del segnale modulato . In pratica tutta la banda disponibile è divisa in un insieme di canali di uguale larghezza, la trasmissione avviene su di un canale per un dato periodo di tempo (dwell time) poi, in base alla sequenza di salto, passa su di un altro canale. La sequenza pseudo casuale deve comunque garantire un ugual uso di tutti i canali. Questa tecnica è la più datata ed ormai è poco utilizzata.

DSSS: il segnale trasmesso viene modulato con una sequenza pseudo casuale binaria detta *chipping sequence* . Per trasmettere un 1 si invia la sequenza di chipping positiva, per trasmettere uno zero la sequenza negativa. Il ricevitore, per ricostruire l'informazione, esegue un'operazione inversa alla precedente applicando la stessa sequenza al segnale ricevuto. Lo spreading del segnale è operato nel dominio del tempo tramite moltiplicazione diretta del segnale che porta informazione per la sequenza di chipping a banda larga.

OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*): è un tipo di modulazione spread spectrum multiportante dove lo stream di simboli in trasmissione viene parallelizzato mediante un convertitore seriale parallelo (S/P) e trasmesso su N portanti ortogonali tra loro (sotto-portanti o sotto-canali). Le portanti sono spaziate in frequenza di un multiplo intero del rate di segnalazione della modulazione. Il segnale trasmesso è caratterizzato dalla sovrapposizione spettrale dei singoli sottocanali, ma in fase di demodulazione l'ortogonalità delle portanti consente di recuperare i simboli senza ISI (Inter Symbol Interference). L'utilizzo della modulazione OFDM rende la trasmissione ancora più robusta ai fenomeni di multipath.

Le caratteristiche principali di funzionamento del livello fisico possono essere rappresentate graficamente come mostrato in Figura 2.5:

Il livello fisico, quando riceve un pacchetto dal livello MAC, prima di trasmetterlo sul canale aggiunge in testa ad esso dati necessari ad una corretta trasmissione. In particolare aggiunge bit di preambolo e un header fisico, le cui dimensioni variano a seconda della tecnica di accesso utilizzata e sono riportate in Tabella 2.4.

PHY	Preambolo	Header fisico	Totale
FHSS	96 bit	32 bit	128 bit
DSSS	144 bit	48 bit	192 bit

Tabella 2.4. Numero di bit aggiunti ai pacchetti a livello fisico per le due principali tecniche d'accesso.

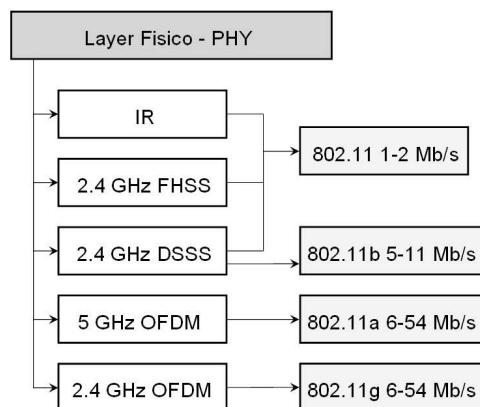


Figura 2.5. Caratteristiche del livello fisico

2.2.2 Livello MAC

Il livello MAC definisce il meccanismo di accesso al canale, lo standard prevede due differenti modi di accesso al canale, detti *funzioni di coordinamento*: *Distributed Coordination Function (DCF)* (l'unico attualmente obbligatorio nelle implementazioni) e *Point Coordination Function (PCF)*. Essi determinano le tempistiche in cui una stazione può trasmettere o deve essere pronta per ricevere dati.

DCF è un servizio *best effort* e si basa sulla tecnica *Carrier Sense Multiple Access (CSMA)*. La base su cui si fonda CSMA è il *listening before talk*; le informazioni date dal livello fisico fanno sì che una stazione può accorgersi se il canale è libero e quindi può decidere di trasmettere i dati. La differenza con le reti cablate, che implementano il *Collision Detection (CSMA/CD)*, risiede nella natura del canale wireless che preclude la possibilità di utilizzare meccanismi affidabili di rilevamento delle collisioni. Per questo motivo nelle reti wireless si utilizza il meccanismo detto *Collision Avoidance (CSMA/CA)*, per ridurre al minimo la probabilità che si verifichino collisioni.

PCF è una funzione opzionale che definisce regole di accesso al canale basate sul *polling* delle stazioni da parte di un *Point Coordinator (PC)* che risiede nell'AP. In questo

modo è l'AP che mantiene il controllo della rete decidendo periodicamente a quale stazione assegnare il canale in base alla sua *polling list*. In questo lavoro di tesi non verrà utilizzato PCF e pertanto la sua descrizione non sarà ulteriormente approfondita.

Distributed Coordination Function (DCF)

Il principio base di DCF prevede che ciascuna stazione possa inviare pacchetti, detti *MAC Protocol Data Unit (MPDU)*, dopo aver verificato che il canale sia libero. Tuttavia risulta facile immaginare che se due stazioni iniziano a trasmettere nello stesso istante, perché entrambe hanno sentito il canale libero, avverrà una collisione. Per diminuire tale probabilità IEEE 802.11 utilizza una procedura detta di *backoff*. Quando una stazione vuole trasmettere un MPDU, dopo aver trovato il canale libero deve attendere un ulteriore intervallo di tempo fissato detto *Distributed InterFrame Space (DIFS)* in modo tale da evitare potenziali collisioni. Trascorso DIFS la stazione inizia un conto alla rovescia di durata casuale detto *backoff*, al termine del quale la stazione può trasmettere il pacchetto. DCF quantizza il tempo in intervalli detti *slot*, di durata variabile a seconda della modulazione utilizzata (Tabella 2.5), che scandiscono il conto alla rovescia. Se durante il *backoff* il canale diventa nuovamente occupato il *backoff* viene fermato (congelato) e ripreso dall'ultimo valore calcolato solo quando il canale diventa nuovamente libero per un tempo maggiore di DIFS. In questo modo stazioni che avevano un *backoff* maggiore di altre con il passare del tempo vedono aumentare la probabilità di accedere al canale.

Lo schema di *backoff* implementato in DCF è esponenziale; ad ogni trasmissione di MPDU il *backoff* è scelto in maniera uniforme nell'intervallo di interi $[0, CW - 1]$. CW è detto *Contention Window* e il suo valore dipende dal numero di trasmissioni fallite di ciascun pacchetto. Alla prima trasmissione di un pacchetto CW è fissato ad un valore minimo pari a: CW_{min} . Se la trasmissione non ha buon esito viene ricalcolato un nuovo valore di *backoff* utilizzando il valore di CW raddoppiato, per diminuire la probabilità di collisioni con altre stazioni. Nel caso di ripetuti insuccessi il valore di massimo di CW

ottenibile è definito $CW_{max} = 2^m CW_{min}$ i valori di CW_{max} e CW_{min} sono specificati dallo standard e riportati in Tabella 2.5 .

In Figura 2.6 sono rappresentate due stazioni che condividono il medesimo canale wireless. La Stazione 1 quando sente il canale libero aspetta un tempo DIFS, decrementa il suo valore di *backoff* e appena questo arriva a 0 inizia a trasmettere un MPDU. Si può notare che l'ACK viene trasmesso (dal destinatario) dopo un intervallo SIFS (*Short InterFrame Space*) dal termine del MPDU, in questo modo nessun'altra stazione sente il canale libero per un tempo superiore a DIFS. Se la stazione trasmittente non riceve un ACK entro uno specificato tempo chiamato *ACK timeout* viene rischedulata la trasmissione del MPDU e il pacchetto viene trasmesso in accordo con le regole di *backoff*. I valori di SIFS e DIFS sono riportati in Tabella 2.5, il tempo DIFS viene calcolato come: $2 * (\text{slot time}) + SIFS$.

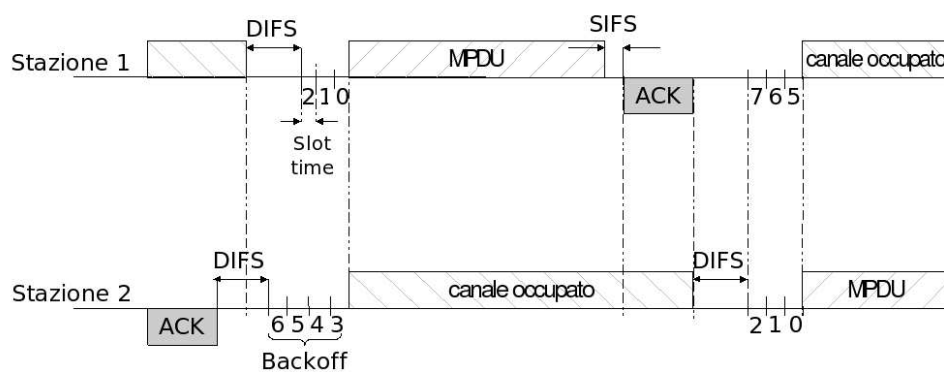


Figura 2.6. Versione base di DCF

PHY	Slot Time	SIFS	DIFS	CW_{min}	CW_{max}	MPDUMaxL
FHSS	$50\mu s$	$28\mu s$	$128\mu s$	16	1024	$2^{12} - 1$ bit
DSSS	$20\mu s$	$10\mu s$	$50\mu s$	32	1024	$2^{13} - 1$ bit

Tabella 2.5. Valori di slot time, SIFS, DIFS, Contention Window e lunghezza massima consentita di una MPDU in relazione ai due tipi di livello fisico principali.

Lo standard prevede inoltre che tra l'invio di due pacchetti consecutivi ciascuna stazione debba effettuare almeno una procedura di *backoff*, in modo tale che se la stazione stessa stava trasmettendo in precedenza, alla schedulazione di un nuovo pacchetto, debba comportarsi come se il canale fosse occupato. Per garantire questo è necessario che ogni stazione che entra nello stato di inattività, dopo aver trasmesso l'ultimo pacchetto, debba effettuare comunque una ulteriore procedura di *backoff* con CW pari a CW_{min} .

Uno dei principali svantaggi della tecnica descritta è dato dall'inefficacia delle tecniche di *carrier sensing* nel determinare se il mezzo sia accessibile. Due sono i principali problemi noti in letteratura: il problema della *stazione nascosta* e della *stazione esposta*.

In Figura 2.7a è rappresentato il problema della stazione nascosta (*hidden terminal*). Tale problema si esplica nel seguente modo: date tre stazioni A, B, C con i raggi d'azione raffigurati, assumendo che A stia trasmettendo a B, se C sonda il canale lo riterrà disponibile e alla fine del *backoff* inizierà a trasmettere andando però in collisione con la stazione A. In questo modo sia A che C dovranno rischedulare la trasmissione.

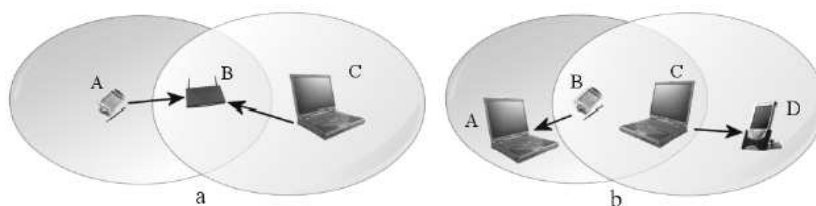


Figura 2.7. a) stazione nascosta; b) stazione esposta

Il problema del terminale esposto è raffigurato in Figura 2.7b: si supponga che B stia trasmettendo ad A e che C voglia trasmettere a D. Sondando il canale C sentirà la trasmissione di B e quindi concluderà di non poter trasmettere; invece, essendo D fuori dalla portata di B, e A fuori da quella di C, le due trasmissioni potrebbero avvenire parallelamente senza collidere.

Per ovviare al problema del *hidden terminal* è stata elaborata una tecnica d'accesso

con un *handshake* iniziale per la prenotazione della trasmissione dei dati. L'idea di base consiste nello stimolare il destinatario ad emettere un breve *frame* al fine di informare le stazioni ad esso vicino di non interferire per la durata della trasmissioni che sta per aver luogo. Il funzionamento di questa di questa tecnica è il seguente ed è raffigurato in Figura 2.8:

- quando A vuole trasmettere a B, invia un frame *RTS* (*Request To Send*), al quale B risponde con un pacchetto *CTS* (*Clear To Send*);
- alla ricezione di *CTS*, A può iniziare a trasmettere. Entrambi i frame contengono informazioni sulla durata della trasmissione, in questo modo ogni stazione nel raggio d'azione di A o B riceverà uno o entrambi i frame e imposterà il proprio indicatore di Carrier Sensing virtuale, chiamato *Network Allocator Vector* (*NAV*) in funzione della durata della trasmissione indicata nel frame *RTS* o *CTS*. Il *NAV* è un contatore che viene decrementato nel tempo, fintanto che è diverso da 0 vuol dire che una trasmissione è in atto nelle vicinanze.

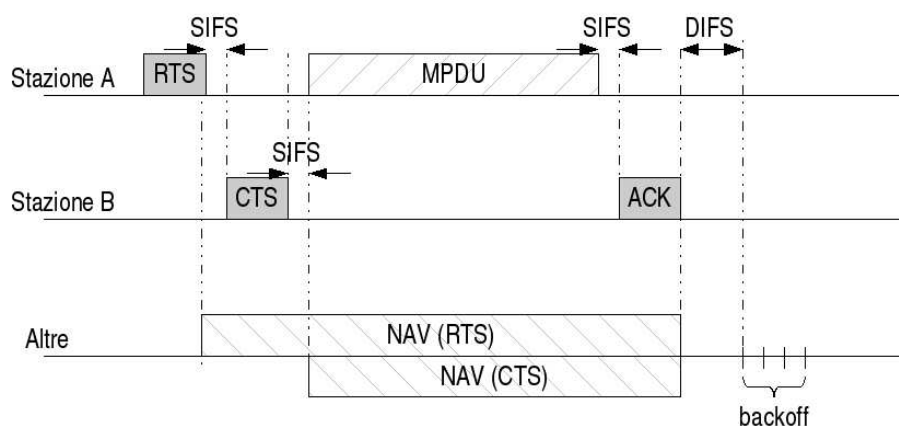


Figura 2.8. DCF con *handshake*

Il protocollo descritto funziona bene solo nel caso teorico in cui tutte le stazioni abbiano il medesimo raggio d'azione e i frame *RTS* e *CTS* possano essere scambiati in un

tempo infinitesimo. In caso contrario possono avvenire collisioni tra i frame RTS e CTS. Tale protocollo viene quindi affiancato dalle tecniche di Carrier Sensing tradizionali e acknowledgement a livello MAC.

Per concludere, anche il livello MAC, come quello fisico, aggiunge al pacchetto di dati proveniente dai livelli superiori dei campi per la gestione della frammentazione e per il controllo dell'integrità. Questi campi sono:

- header MAC di 240 bit;
- un campo FCS contenente un CRC a 32 bit.

Inoltre la lunghezza del pacchetto ACK è pari a 112 bit.

A prescindere dalla versione del protocollo utilizzata e dalla velocità di trasmissione raggiungibile sul canale, il preambolo, header PHY, header MAC e ciascun frame RTS, CTS e ACK devono essere sempre trasmessi alla velocità di 1 Mbps per consentire a tutte le stazioni di poterli ricevere correttamente. In pratica solo il *payload* del frame può essere trasmesso a velocità superiori ad 1 Mbps.

Capitolo 3

Evoluzione delle reti 802.11

In questo capitolo saranno illustrate le due principali evoluzioni di 802.11: 802.11e, definito come standard nel 2005, che grazie a modifiche al livello MAC garantisce la qualità del servizio (*Quality of service* – QoS) e 802.11n, ancora in versione *draft*, che ha come obiettivo principale la modifica del livello fisico per ottenere throughput elevati. Tale incremento è ottenuto introducendo l'uso di antenne intelligenti (*smart antennas*) che permette più accessi simultanei al canale con l'utilizzo di tecniche di *Space Division Multiple Access* – (SDMA). Infine si descriveranno le principali tipologie di antenne intelligenti, i pregi ed i difetti che porta l'utilizzo di questa tecnologia.

3.1 IEEE 801.11e

Da un punto di vista della rete ad alto livello, fornire QoS significa essere in grado di controllare il traffico in modo da permettere il corretto funzionamento delle applicazioni che richiedono garanzia di determinati parametri, quali *throughput*, *delay*, *loss* e *jitter*. Tali parametri di traffico sono specificati a livello end-to-end; poiché i dati, durante il loro percorso tra due punti, possono attraversare segmenti di rete costituiti da architetture differenti con gestioni di QoS differenti, ognuna di esse dovrà trattare in maniera opportuna le richieste di QoS. Il problema principale da risolvere è quindi quello di tradurre in maniera efficace e funzionale i parametri di QoS tra le varie architetture.

Nello standard IEEE 802.11e [5] vengono riviste le funzioni di coordinamento DCF e PCF definite in 802.11, ed introdotte nuove funzionalità a livello MAC e nuove terminologie: una stazione e un AP che operano con il protocollo IEEE 802.11e vengono detti, rispettivamente, *QoS Enhanced Station* (QSTA) e *QoS Access Point* (QAP). QSTA e QAP operano all'interno di un *QoS Basic Service Set* (QBSS).

Le due funzioni di coordinamento originali, DCF e PCF vengono sostituite con una unica funzione detta *Hybrid Coordination Function* (HCF), la quale però mantiene compatibilità con gli standard precedenti. HCF include in un unico protocollo due meccanismi differenti di accesso al canale: uno basato sulla contesa (EDCF) e uno controllato senza contesa basato sul *polling*. All'interno di uno stesso QBSS è necessaria inoltre la presenza di un controllore centralizzato per tutte le altre stazioni, detto *Hybrid Coordinator* (HC), che normalmente risiede nel QAP. Un HC ha il compito di suddividere il tempo in due fasi, che si alternano continuamente, dette rispettivamente *Contention Period* (CP) (in cui le stazioni che vogliono trasmettere si contendono il canale) e *Contention-Free Period* (CFP) (in cui l'HC stabilisce chi può utilizzare il canale e per quanto tempo).

3.1.1 Enhanced Distributed Coordination Function

L'*Enhanced Distributed Coordination Function* (EDCF) è una parte costituente di HCF che fornisce accesso differenziato e distribuito al canale basato sulla contesa. Come si può intuire dal nome stesso, si tratta di un'evoluzione del meccanismo originale CSMA/CA DCF, con l'aggiunta del supporto alla QoS.

EDCF è disegnato per gestire frame con quattro possibili differenti priorità. Ciascun frame del livello MAC proveniente da un livello superiore, presenta un proprio identificativo di priorità (da 0 a 4), detto *Traffic Category Identification* (TCID). IEEE 802.11e prevede la memorizzazione dell'informazione di QoS anche nell'*header* MAC di ciascun frame e prevede, per ogni stazione, quattro categorie d'accesso al canale, dette AC (*Access Channel*). Ciascuna AC corrisponde ad una singola coda FIFO di trasmissione DCF

(Figura 3.1), con priorità differente di accesso al canale, in base ai meccanismi che verranno discussi in seguito. Ciascun frame che arriva al livello MAC con un proprio TCID viene quindi marcato con una AC (da 0 a 3), secondo le regole mostrate in Tabella 3.1 e inserito nella coda corrispondente.

priorità TCID	categoria d'accesso	designazione traffico
0	0	Best effort
1	0	Best effort
2	0	Best effort
3	1	Video probe
4	2	Video
5	2	Video
6	3	Voce
7	3	Voce

Tabella 3.1. Esempi di mapping tra priorità di traffico e categorie d'accesso

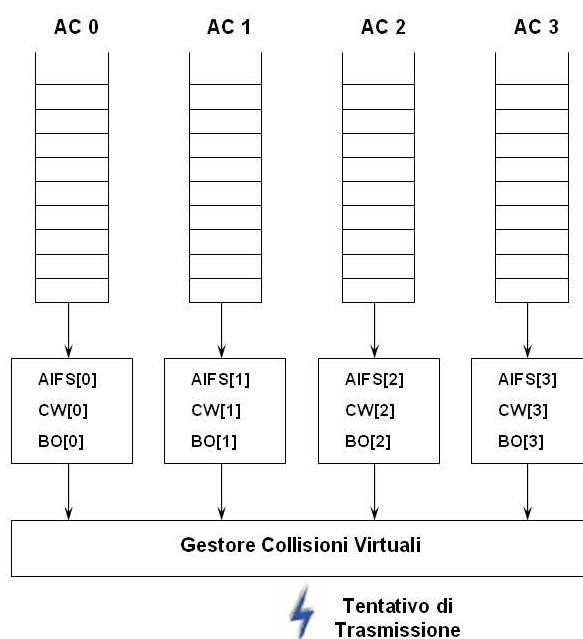


Figura 3.1. Quattro categorie d'accesso (AC) per EDCF

Ad una AC con maggiore priorità è assegnata una CW più corta, in modo da assicurare

che nella maggior parte dei casi le AC con maggior priorità trasmettano prima delle altre. Questo viene fatto fissando i valori limite $CW_{min}[AC]$ e $CW_{max}[AC]$ e mantenendo separate le gestioni della CW per le varie AC ($CW[AC]$). In questo nuovo standard non solo le *contention window* sono gestite separatamente per ogni AC; di seguito si utilizzerà la notazione $xx[AC]$ per indicare un parametro xx dipendente da AC.

Per introdurre un'ulteriore differenziazione, gli intervalli di tempo di attesa DIFS, utilizzati da DCF alla fine di ogni trasmissione, vengono sostituiti con degli *Arbitration InterFrame Space* (AIFS). Ciascun AIFS è lungo almeno quanto DIFS e la sua durata dipende dalla AC alla quale fa riferimento. Non appena il canale è libero, prima di iniziare la procedura di backoff, ciascuna stazione deve quindi attendere un periodo pari ad $AIFS[AC]$, anziché solo DIFS.

Ciascuna AC all'interno di una stessa stazione si comporta come se fosse una stazione virtuale: la contesa del canale avviene sia con le altre stazioni "fisiche" (QSTA) sia con le code delle differenti AC della stessa stazione fisica ed effettua la procedura di backoff indipendentemente dalle altre utilizzando i propri parametri $AIFS[AC]$ e $CW[AC]$ (Figura 3.1). Le collisioni tra AC interne ad una stessa stazione vengono risolte in maniera virtuale: l'accesso al canale viene consentito a quella con priorità maggiore, mentre le altre sono obbligate a comportarsi come se fosse avvenuta una normale collisione esterna (incremento della $CW[AC]$ e ricalcolo del backoff). Le relazioni temporali per EDCF sono schematizzate in Figura 3.2.

Un ulteriore miglioramento introdotto con EDCF rispetto a DCF riguarda il concetto di opportunità di trasmissione (*Transmission Opportunity* - TXOP). Una TXOP rappresenta l'intervallo di tempo in cui una stazione ha il diritto di trasmettere, definita da un istante di partenza e una durata massima. Quando invece una stazione ottiene accesso al canale tramite contesa si parla di *EDCF-TXOP* ed in questo caso l'istante di partenza è rappresentato dalla vittoria della contesa stessa, mentre la durata di trasmissione non può superare il limite specificato nel *beacon frame*, inviato periodicamente dall'HC (QAP) a

tutte le stazioni. Quando l'accesso al canale è assegnato direttamente dall'HC tramite il meccanismo di *polling* si parla di *polled-TXOP*; in questo caso la durata della trasmissione è specificata all'interno del *poll frame*.

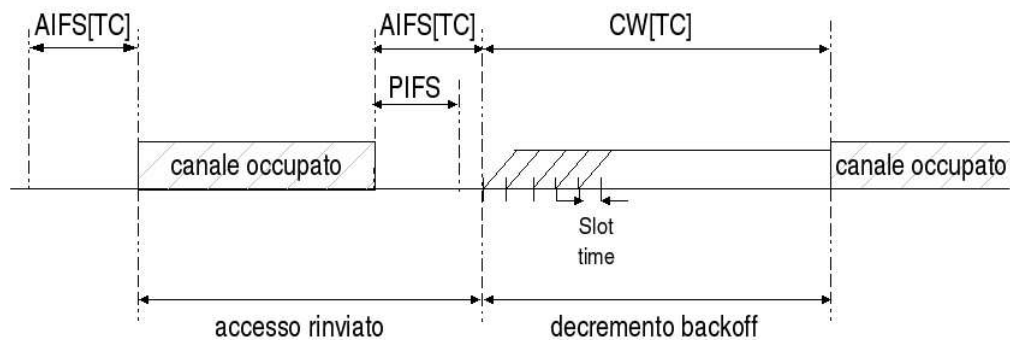


Figura 3.2. Meccanismo base di accesso EDCF

3.1.2 Hybrid Coordination Function

In questa sezione verranno presentate le regole previste da HCF che integrano i meccanismi già descritti definiti da EDCF.

L'HC può allocare delle TXOP per se stesso ogni volta che deve trasmettere delle MSDU. Questo può farlo tuttavia solo dopo aver determinato il canale libero per una durata di tempo più breve rispetto a DIFS, detta *Point coordination InterFrame Space* (PIFS) (Figura 3.2). In questo modo l'HC gode di massima priorità rispetto a tutte le altre stazioni.

Come già menzionato nella sezione 3.1, il tempo viene suddiviso in un periodo senza contesa (CFP) e un periodo con contesa (CP), che si susseguono ciclicamente. Ciascuna coppia CFP - CP definisce un *Superframe periodico* IEEE 802.11e, un modello del quale è rappresentato in Figura 3.3. È importante sottolineare che un *polled-TXOP* si trova sia nella fase CP che nella fase CFP.

Durante un CP, ciascuna opportunità di trasmissione TXOP viene determinata in due

differenti modi: attraverso le regole fornite da EDCF (canale libero + AIFS + backoff), oppure attraverso uno speciale *poll frame*, detto *QoS CF-Poll*, inviato dall'HC ad una particolare stazione. Questo frame speciale può essere inviato solo se il canale rimane libero per un periodo PIFS, senza bisogno di una procedura di backoff. In questo modo, anche durante un CP, l'HC può decidere temporaneamente di dare priorità ad un determinato traffico.

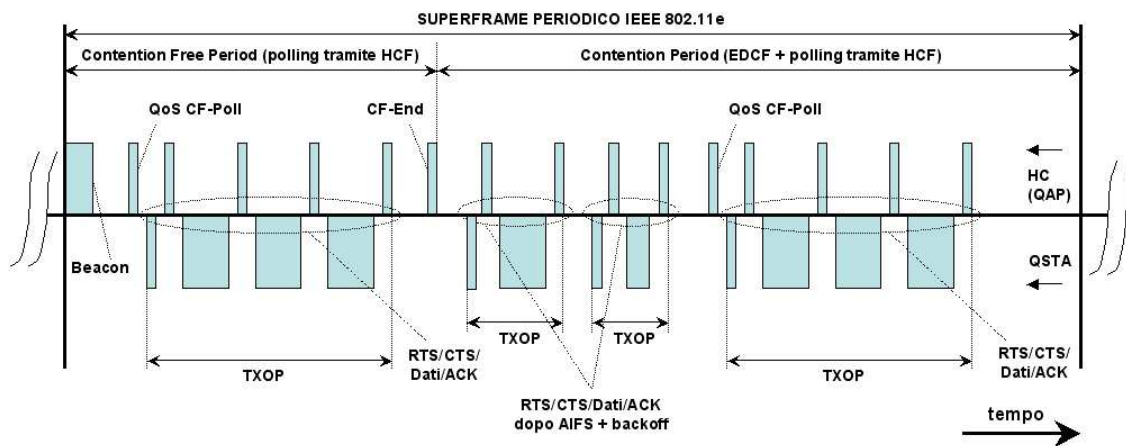


Figura 3.3. Esempio di superframe IEEE 802.11e.

Durante un CFP, il tempo d'inizio e la durata massima di ciascuna TXOP sono specificati dall'HC, ancora una volta mediante i frame speciali QoS CF-Poll. In questa fase quindi le stazioni non hanno diritto di accedere al canale se non sono "richiamate" dall'HC. Un CFP termina dopo che è trascorso il tempo specificato nel beacon frame o con l'arrivo di un frame *CF-End* inviato dall'HC.

Siccome il QoS CF-Poll frame è un'innovazione introdotta con IEEE 802.11e, per mantenere retro-compatibilità è stato progettato in modo tale che le stazioni "tradizionali", quando lo ricevono, settano il loro *Network Allocation Vector* (NAV) per tutta la durata della TXOP specificata nel frame stesso. In questo modo anche le stazioni tradizionali possono funzionare in regime HCF, ma con grosse limitazioni, in quanto possono operare solo durante i CP mentre rimangono inattive durante i CFP.

IEEE 802.11e definisce inoltre dei nuovi formati di trame per ottimizzare l'utilizzo delle risorse messe a disposizione dal canale. L'HC infatti è in grado di inviare ad ogni stazione una qualsiasi combinazione fra dati, polling e acknowledgement in un unico frame.

HCF Controlled Contention

Il meccanismo di accesso basato sulla contesa è influenzato dal grado di occupazione del canale. Se il canale è sovraccarico aumentano le collisioni, le CW e i backoff si dilatano e di conseguenza le prestazioni dell'intero canale degradano notevolmente. Se si vuole garantire QoS queste situazioni si devono evitare il più possibile, per questo viene introdotta una tecnica detta *Controlled Contention* che deve essere implementata obbligatoriamente dal QAP. Il QAP è un nodo critico in un QBSS, in quanto è responsabile dello *scheduling* del traffico ed è colui che può decidere in un qualsiasi momento a quale stazione assegnare il canale. Per fare questo ha bisogno di informazioni da aggiornare continuamente riguardo a quali stazioni hanno bisogno di trasmettere dati, in quale momento e per quanto tempo.

Controlled Contention è un meccanismo che permette alle stazioni di comunicare al QAP la necessità di allocazione di polled-TXOP, tramite una richiesta di risorse che non necessita di contesa del canale. Controlled Contention consiste in un periodo di tempo, stabilito da un frame speciale inviato dal QAP, suddiviso in brevi intervalli separati da SIFS detti *opportunity*. Ciascuna stazione che presenta del traffico in attesa di essere inviato sceglie un *opportunity* e trasmette un frame di richiesta di risorse, senza alcuna previa procedura di backoff, specificando AC e durata di TXOP desiderate. Per risolvere eventuali collisioni il QAP genera degli acknowledgement alle richieste ricevute, consentendo così alle stazioni di accorgersi di eventuali collisioni avvenute durante il periodo di Controlled Contention. Successivamente il QAP verifica se vi sono sufficienti risorse per soddisfare le richieste e in caso affermativo programma l'assegnazione del canale

(IEEE 802.11e non specifica però come deve essere svolto questo compito). In ultimo risponde a ciascuna stazione accettando o negando per intero le richieste o proponendo un'alternativa basata su parametri di QoS con meno priorità.

3.2 IEEE 802.11n

Nel gennaio 2004 IEEE ha annunciato la formazione di un nuovo *task group* (TGn) per apportare modifiche allo standard 802.11 volte ad un sensibile miglioramento del throughput.

Per ottenere un incremento di throughput è necessario apportare cambiamenti sia alla tecnologia radio, migliorando i meccanismi di trasmissione, ricezione e trasferimento dati, sia alla metodologia di accesso al canale riducendo l'overhead.

802.11n è studiato per rimpiazzare gradualmente gli attuali standard offrendo un data-rate teorico di 540/600 Mbps da paragonare con gli attuali 54Mbps di 802.11g e 11Mbps di 802.11b. Il futuro standard dovrà anche garantire retro-compatibilità con 802.11a/b/g permettendo l'interoperabilità tra le varie versioni.

Per incrementare la velocità molto probabilmente sarà utilizzata la tecnologia MIMO (Multiple Input Multiple Output) (v. sez 3.3) che permette su ogni nodo l'utilizzo di più antenne, consentendo trasmissioni e ricezioni simultanee (*Space Division Multiple Access – SDMA*). In questo modo la trasmissione/ricezione di una trama può essere ripartita sulle varie antenne. In pratica il canale viene suddiviso in sotto-canali utilizzati per trasmettere/ricevere flussi simultanei ed indipendenti di dati.

A causa del grande interesse commerciale dato dall'introduzione di 802.11n, furono presentate a IEEE numerose proposte. Fra queste solo due riuscirono a convincere i membri della commissione di TGn: TGn Sync e WWiSE.

Di TGn Sync fanno parte: Intel, Atheros Communications, Nortel, Samsung, Sony, Qualcomm, Philips e Panasonic, mentre di WWiSE: Broadcom, Motorola, Nokia, France Telecom, Texas Instruments e NTT.

La proposta di TGn Sync [8] prevede l'aggiunta di nuovi meccanismi al protocollo 802.11, introducendo notevoli cambiamenti sia a livello fisico che a livello MAC. TGn Sync propone soluzioni basate sul concetto di trasmissione di frame aggregati sia verso una singola destinazione sia a destinazioni multiple, utilizzo di antenne MIMO, meccanismi di protezione per permettere la retro-compatibilità e procedure per la trasmissione su canali di larghezza 20MHz e 40MHz.

La proposta di WWiSE [9] risulta simile a quella di TGn Sync, le differenze principali riguardano i meccanismi della codifica di trasmissione, la configurazione dei sistemi MIMO e il supporto ai canali da 40MHz.

WWiSE focalizza l'attenzione sui miglioramenti a livello fisico mentre a livello MAC le scelte sono vicine a quelle di TGn Sync ma non comportano particolari modifiche al protocollo.

A metà gennaio 2006 è stata presentata una proposta congiunta da parte di TGn Sync e WWiSE. nella quale si è cercato di inserire un valido insieme delle soluzioni proposte dai due gruppi, ma a maggio tale proposta è stata bocciata. La bocciatura causerà solamente un ritardo nell'approvazione dello standard, non un suo abbandono, ed ora si procederà all'analisi di nuove proposte.

Alcuni produttori di periferiche wireless hanno già immesso sul mercato alcuni dispositivi che utilizzano la tecnologia MIMO, commercializzati come pre-802.11n-compliant.

Netgear ad esempio ha commercializzato delle periferiche, chiamate *Range Max*, basate sul chipset "Video54's BeamFlex TM" [10]. In queste periferiche le antenne MIMO operano in due modi differenti: *Diversity* e *Spatial Multiplexing*.

Diversity si riferisce all'uso di più antenne in modo tale da aumentare la probabilità che il percorso del segnale tra sorgente e destinazione risulti di migliore qualità. La "diversità" può essere implementata da parte del trasmettitore, del ricevitore o in entrambi i nodi (Figura 3.4).

Spatial Multiplexing permette invece al trasmettitore di inviare differenti porzioni dei

pacchetti dati tramite più antenne che utilizzano canali separati in frequenza in modo tale da aumentare la capacità del canale. Il ricevitore dovrà però implementare un sistema di *de-multiplexing* che permetta di ricomporre il pacchetto originale.

Spatial Multiplexing necessita di percorsi di *multipath* non correlati, in una condizione ideale è possibile incrementare la capacità del canale in modo lineare aumentando il numero delle antenne. In un contesto reale non è possibile garantire questa condizione quindi tipicamente si pongono dei limiti nel numero di antenne utilizzate, ad esempio Netgear utilizza sette elementi. Un esempio di *Spatial Multiplexing* è riportato in Figura 3.5, dove è possibile osservare che la trasmissione del messaggio originale avviene utilizzando due antenne separate, ognuna delle quali trasmette parte del pacchetto.

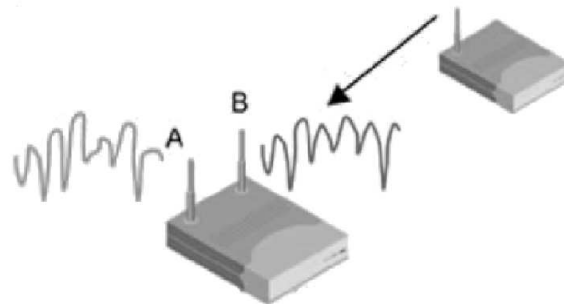


Figura 3.4. Implementazione di *Diversity*

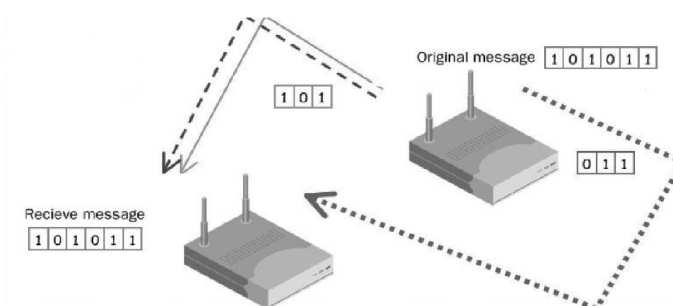


Figura 3.5. *Spatial Multiplexing*

3.3 Utilizzo di antenne intelligenti

Negli ultimi anni si è assistito ad un crescente interesse della comunità scientifica nelle applicazioni di antenne intelligenti in reti wireless. Molte pubblicazioni, in quest'area, sono focalizzate soprattutto sui problemi riscontrati nel livello MAC di 802.11 ([11], [14], [15]), mettendo in risalto i limiti della metodologia di accesso DCF nell'utilizzo di queste particolari antenne. Molti di questi lavori sono stati eseguiti con reti in configurazione ad-hoc, dove vengono maggiormente evidenziate le problematiche relative al livello MAC e solo parte delle pubblicazioni è invece rivolta verso un altro quesito: “qual'è l'impatto di queste antenne sulla topologia di una rete wireless?” [17].

Nelle reti wireless, tipicamente, i vari nodi utilizzano antenne di tipo omnidirezionale che presentano vari svantaggi, tra cui: i) un ridotto range di comunicazione, ii) uno basso riuso spaziale dei canali, iii) basse performance in ambienti rumorosi, iv) impossibilità di accessi simultanei al canale.

Al contrario l'utilizzo di antenne direzionali, montate nei vari nodi della rete, possono:

- aumentare il range di trasmissione, rispetto ad antenne omnidirezionali, in quanto concentrano l'energia elettromagnetica in un'unica direzione;
- ridurre i fenomeni di interferenza;
- annullare l'effetto di segnali provenienti da direzioni non volute;
- garantire un miglior riuso spaziale dei canali;
- consentire più trasmissioni simultanee.

La riduzione dei fenomeni di interferenza è garantita dalla riduzione dell'interferente di co-channel, dal minor livello di rumore presente nella banda di trasmissione e dalla riduzione della probabilità di collisione [15].

Nel contesto delle reti wireless, le antenne possono essere classificate come: *omnidirezionali*, *direzionali* e *ad array*.

Un'antenna **omnidirezionale** irradia o riceve energia elettromagnetica in modo uniforme su di un piano. Questo non significa che l'antenna abbia il medesimo guadagno in tutte le direzioni, in questo caso si parla di antenne *isotropiche* (un'antenna *isotropica* è definita come un elemento radiante che irradia o riceve energia in modo equo su di una superficie sferica). Un esempio di diagramma di radiazione di un'antenna *omnidirezionale* è mostrato in Figura 3.6.

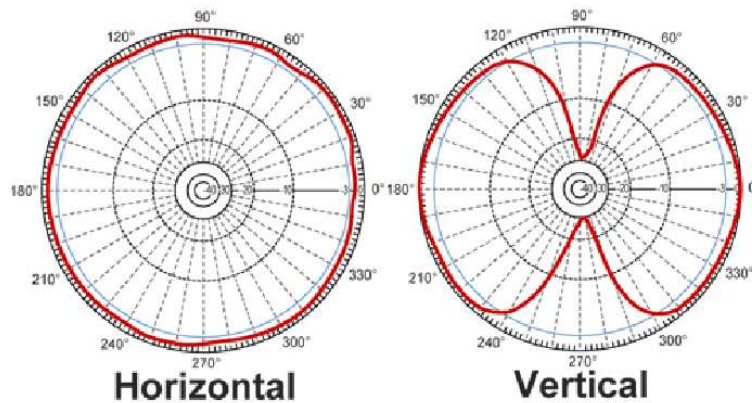


Figura 3.6. Esempio di pattern di radiazione per un'antenna omnidirezionale di tipo dipolare

Un'antenna di tipo **direzionale** presenta invece, un maggior guadagno in determinate direzione e minore o nessuno in altre [22]. La direzione di massimo guadagno è chiamata direzione di *boresight* e la direttività di un'antenna è funzione di come l'energia è focalizzata in una o più direzioni. Poiché la somma dell'energia rimane invariata, ma la sua distribuzione avviene su di un'area minore, la potenza del segnale trasmesso risulta più elevata. Viene definito *guadagno d'antenna* l'incremento di potenza del segnale che si ottiene dall'uso di antenne direzionali rispetto ad un'antenna isotropica che trasmette lo stesso segnale con la medesima potenza e tale guadagno viene misurato *dB* (decibels). Un semplice diagramma di radiazione di un'antenna direzionale è riportato in Figura 3.7.

Un'antenna ad **array**, solitamente, è formata da una schiera di antenne *omnidirezionali* o *isotropiche* e la direzione di *boresight* può essere variata mediante un cambiamento di fase e/o di potenza dei singoli elementi radianti. Un'antenna ad array può essere vista

come un particolare tipo di antenna direzionale in quanto presenta un maggior guadagno in determinate direzioni.

Un'antenna di questo tipo viene definita “intelligente” in quanto combina più di un elemento radiante che viene pilotato mediante tecniche di *signal-processing* in modo tale da ottimizzare il pattern di trasmissione e/o ricezione dell'intera schiera di antenne, a seconda del segnale che si vuole trasmettere o ricevere.

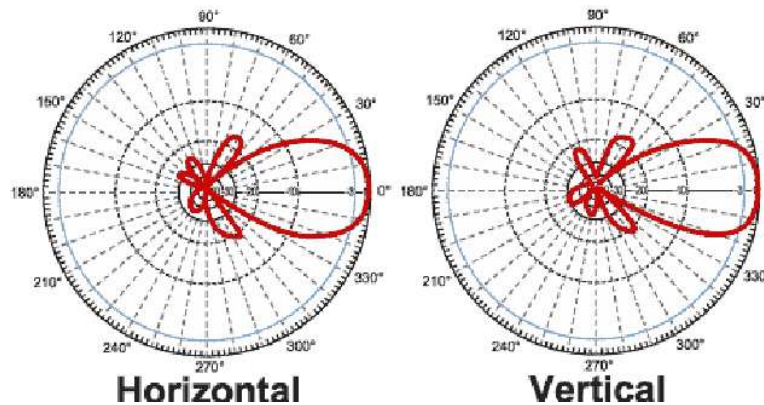


Figura 3.7. Esempio di pattern di radiazione di un'antenna direttiva

Le “antenne intelligenti” sono classificate in due gruppi principali: *switched beam* [13] e *adaptive beam forming* [15].

Un'antenna **switched beam** consiste in un'antenna che presenta più lobi di radiazione orientati lungo direzioni prestabilite e la scelta di quale o quali lobi utilizzare viene eseguita considerando il rapporto segnale su interferente (SIR). Il passaggio da un lobo all'altro avviene semplicemente operando una variazione di fase tra i vari elementi che compongono l'antenna. Queste antenne possono a loro volta essere suddivise in due sotto categorie: *Single beam* e *multi beam*. *Single beam* sta a significare che può essere utilizzato per trasmettere o ricevere un solo lobo per volta mentre in antenne *multi beam* sono possibile trasmissioni e ricezioni simultanee. Questo può essere visto come un esempio di *Spatial Division Multiple Access* (SDMA) dove più lobi sono utilizzati e sono permesse trasmissioni simultanee che possono avvenire anche su frequenze differenti l'una

dall'altra [7]. Un particolare tipo di antenne *multi beam* sono le *Multiple Input Multiple Output* antenne (MIMO) che, come detto, saranno molto probabilmente utilizzate nel futuro standard 802.11n.

Antenne **adaptive beam forming** possono invece spostare il lobo principale nella direzione voluta e anche posizionare dei nulli in corrispondenza della direzione d'arrivo dei segnali interferenti [13]. Per determinare la direzione del segnale da ricevere sono però necessari complessi algoritmi di analisi (v. sez. 3.3.2).

Come nel caso delle *switched beam* esistono due tipi di antenne *adaptive beam forming*: *single user* e *multi user*. Nella configurazione *single user* è presente solo un lobo principale e non sono permesse trasmissioni simultanee. Al contrario in *multi user* sono supportate più comunicazioni contemporanee e in questo modo, ad esempio, in una rete wireless un utente potrebbe essere servito da più di un access point.

In Figura 3.8 è rappresentata la differenza tra antenne di tipo *switched beam* e *adaptive beam forming*.

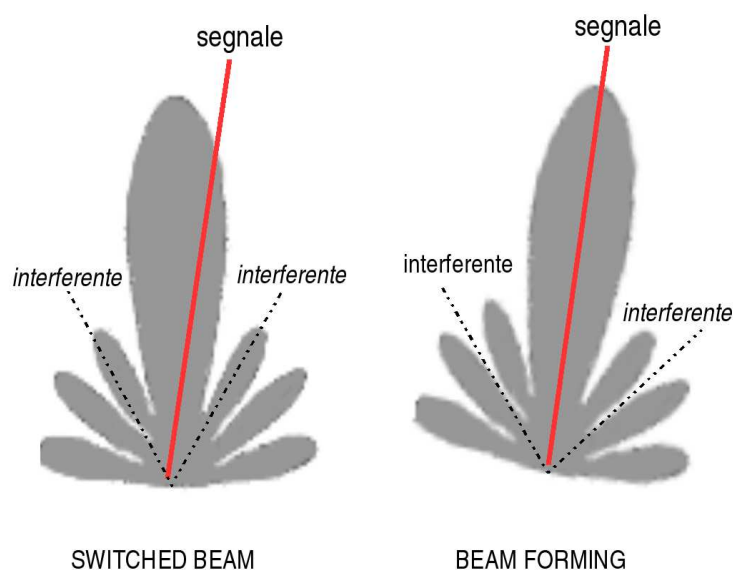


Figura 3.8. Differenze tra *switched beam* (sinistra) e *beam forming* (destra)

Si nota come l'utilizzo di antenne beam forming permette di orientare il lobo principale verso la direzione d'arrivo del segnale (linea continua) e posizionare i nulli nelle direzioni dei segnali interferenti (linee tratteggiate).

L'utilizzo di antenne *switched beam* o *beam forming* comporta però un compromesso tra i vantaggi, i maggiori costi hardware e l'utilizzo di tecniche addizionali di signal-processing.

3.3.1 Tipologie di antenne proposte in letteratura

L'utilizzo di pattern ideali, quindi senza lobi secondari, comporta una pesante semplificazione in quanto, ad esempio nel caso di *switched beam* in configurazione *multi user*, non si avrà mai sovrapposizioni di lobi ed inoltre con questa semplificazione i segnali interferenti vengono considerati solo in parte.

Ramanathan et al. [11] hanno proposto una soluzione che tiene in considerazione i lobi secondari. Il pattern dell'antenna consiste in un lobo principale di ampiezza Θ_m , e in lobi secondari di ampiezza $(2\pi - \Theta_m)$. In questo modo il lobo principale assume la forma di un cono con guadagno uniforme e i lobi secondari sono aggregati alla sua base e formano un "bulbo" sempre con guadagno uniforme ma minore di quello del lobo principale. Questo pattern è rappresentato graficamente in Figura 3.9.

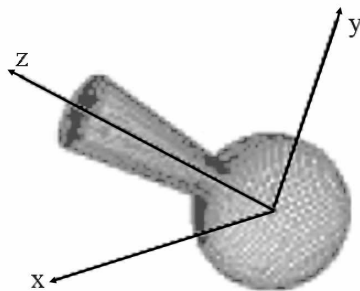


Figura 3.9. Pattern di radiazione dell'antenna proposta da Ramanathan et al. [11]

Un'altra caratterizzazione di “antenna intelligente” è stata proposta da Bettstetter et al. [17], in cui è considerata un'antenna *beam forming* a pura variazione di fase, cioè ogni elemento trasmette la medesima potenza e il lobo viene orientato mediante solo un cambiamento di fase tra i vari elementi. Questo tipo di “array” è stato realizzato in due differenti configurazioni (Figura 3.10):

- *Uniform Linear Array (ULA)*, dove ogni elemento i ($i = 1, \dots, n$) viene posizionato in linea retta con distanza Δ e con uno shift progressivo pari a γ rispetto all'elemento vicino. Dove Δ è pari a mezza lunghezza d'onda della frequenza principale e γ è determinato in base allo sfasamento dell'elemento precedente, secondo la seguente relazione: $\gamma_i = \gamma_{i-1} + \gamma$.
- *Uniform Circular Array (UCA)*, dove ogni elemento i è posizionato su di una circonferenza ed è distanziato dai suoi vicini di Δ

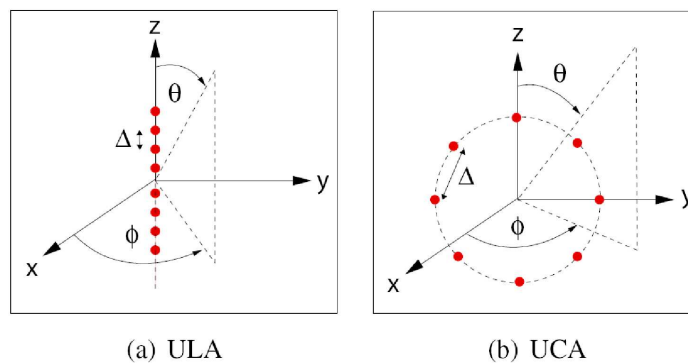


Figura 3.10. Disposizione degli elementi radianti

Il pattern di radiazione di questi due tipi di antenne è riportato in Figura 3.11, dove, a sinistra è rappresentato il pattern per antenna di tipo ULA e a destra quello per un'antenna UCA, entrambe formate da 6 elementi radianti in diverse configurazioni di shift di fase.

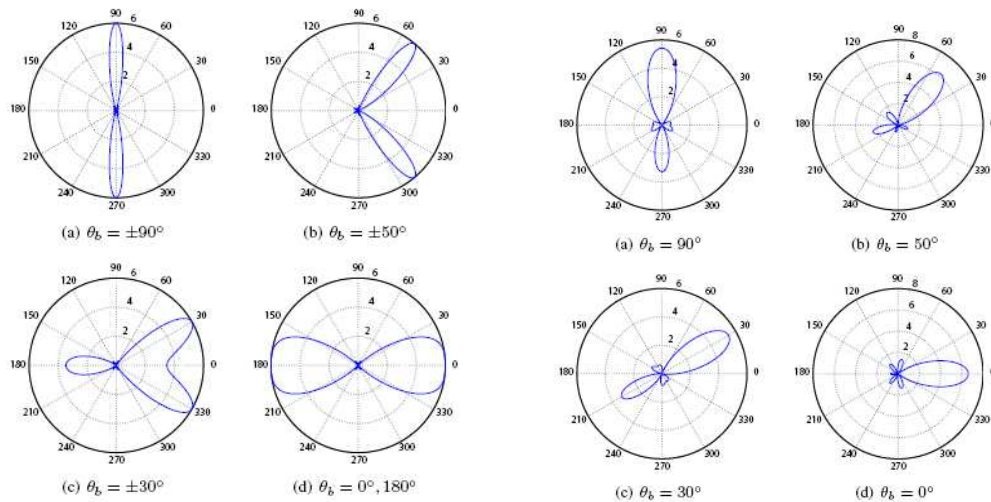


Figura 3.11. Pattern per antenne di tipo ULA (sinistra) e UCA (destra)

3.3.2 Posizionamento e selezione del lobo

Molte ricerche promettono significanti guadagni nell'utilizzo di "antenne intelligenti", ma questi guadagni per lo più sono influenzati dall'assunzione che i vari nodi, presenti in una rete wireless, hanno informazioni a priori a riguardo dei loro vicini e/o dell'accesso point. Queste informazioni di livello fisico permettono di posizionare nella direzione migliore il lobo principale. Per ottenere tali informazioni è però necessaria l'implementazione di complessi algoritmi di stima del canale. In seguito vengono riportate alcune soluzioni che sono state adottate per risolvere questo problema.

Vivek et al. [15] considerano un'antenna *switched beam* ideale ad ampio azimuth che utilizza la direzione di incidenza del segnale per determinare il miglior lobo per ricevere i dati ed è in grado di calcolare precisamente l'angolo di arrivo (Angle of Arrival, AoA) del segnale ricevuto. L'algoritmo AoA è stato sviluppato da Preston et al. [23].

Ramanathan et al. [11] utilizzano un altro sistema per valutare qual'è la migliore antenna che massimizza il rapporto segnale su interferente (SIR). Ogni elemento radiante,

che forma l'antenna, stima il valore della potenza ricevuta, in questo modo viene utilizzato per trasmettere e ricevere l'elemento che "sente" la maggiore potenza. Questo algoritmo si basa sull'assunzione che la direzione di *boresight* dell'antenna coincide con la direzione fisica del terminale con il quale si vuole comunicare.

Un'altra soluzione è proposta sia da Bettstetter et al. [17] che da Vilmann et al. [19]. Gli autori presentano un sistema, chiamato *Randomize beam forming* dove ogni nodo della rete sceglie in modo causale la direzione di *boresight* Θ nell'intervallo $[0, 2\pi[$, indipendentemente dalla posizione fisica dei nodi vicini. Questa soluzione non richiede coordinazione tra i nodi e non ha bisogno di algoritmi di sensing del canale o di stima della direzione d'arrivo del segnale. *Randomize beam forming* risulta pertanto una buona soluzione soprattutto nella fase di "wake-up" della rete per permettere ai nodi di iniziare a trasmettere. Una volta che i nodi hanno ottenuto informazioni sui loro vicini è possibile ottimizzare il sistema mediante l'uso di algoritmi di signal processing.

3.3.3 Modellazione del canale

Molte delle pubblicazioni citate non caratterizzano il mezzo trasmissivo, considerando il canale come un mezzo ideale senza fenomeni di *pathloss*, *fading*, *multipath* e di interferenza.

Bettstetter et al. [17], Vilmann et al. [19] e Gavish et al. [7], invece tengono in considerazione anche il fenomeno del *pathloss* dovuto alla distanza tra i nodi.

Il *pathloss* può essere rappresentato come:

$$\frac{p_r}{p_t} = g_t \cdot g_r \cdot \left(\frac{4\pi s}{\lambda} \right)^{-\alpha} \quad (3.1)$$

dove p_r e p_t rappresentano rispettivamente la potenza ricevuta e la potenza trasmessa, g_t e g_r sono il guadagno di trasmissione e ricezione dell'antenna, s è la distanza (in metri) tra due nodi, λ è la lunghezza d'onda (in metri) e α è il fattore di attenuazione e risulta:

$\alpha \approx 2$ per lo spazio libero mentre assume valore $\alpha \approx 3$ nel caso di ambienti urbani outdoor (Figura 3.12).

Nel caso di utilizzo di antenne ideali il guadagno g_t e g_r viene considerato costante per tutta l'apertura del lobo, mentre se si vuole fare un'analisi più dettagliata si deve considerare il guadagno di trasmissione e ricezione come funzione dell'angolo Θ .

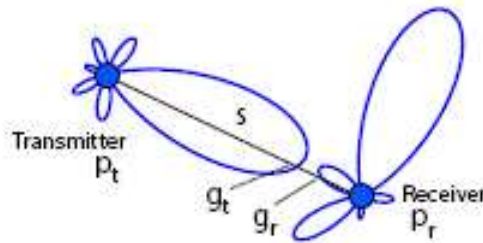


Figura 3.12. Esempio di grandezze in gioco per il calcolo del *pathloss*

3.3.4 Canale con fading

La caratterizzazione del canale può essere fatta in modo approssimato utilizzando l'equazione di propagazione nello spazio libero vista precedentemente oppure può essere fatta utilizzando alcuni modelli più dettagliati e che si avvicinano maggiormente alla rappresentazione di un canale reale.

Se si considera la trasmissione del segnale tenendo conto solamente dell'attenuazione causata dalla distanza che intercorre tra i due dispositivi, la funzione di trasferimento del canale, relativa alla trasmissione generata da un terminale generico i , può essere caratterizzata come

$$h(t)_i = e^{j\phi_i} \delta(t - \tau_i'') \quad (3.2)$$

dove ϕ_i e τ_i'' sono rispettivamente i ritardi di fase e temporale introdotti dal canale. In particolare, questi ritardi possono essere assunti come variabili casuali uniformemente distribuite rispettivamente negli intervalli $[0, 2\pi)$ e $[0, T_{max}]$.

Un rappresentazione più realistica della funzione di trasferimento del canale può essere fatta, considerando il canale affetto da *fading*. Il concetto di fading fa riferimento ad una variazione temporale della potenza del segnale ricevuto causata da cambiamenti dovuti al mezzo oppure al percorso di trasmissione. I fenomeni di fading possono essere suddivisi in due macroblocchi considerando le caratteristiche dell'ambiente di propagazione: *fading lento* (o fading su larga scala) quando le alterazioni del segnale ricevuto sono introdotte da lento movimenti dei dispositivi coinvolti nella comunicazione o da ostacoli presenti sul cammino di propagazione del segnale nell'etere e *fading veloce* (o fading su piccola scala) quando si hanno fenomeni di rapidi cambiamenti sul canale. In particolare per il primo fenomeno di fading si fa riferimento anche al concetto di *shadowing*, mentre per il secondo si fa riferimento anche al concetto di *multipath*.

Nel caso in cui si fa riferimento ad ambienti di propagazioni sufficientemente confinati in cui il fenomeno del multipath è influente si può caratterizzare il fading in due ulteriori sottogruppi: *fading piatto* quando il canale introduce un'attenuazione che di solito è rappresentata da un fattore moltiplicativo (sovente si assume che il coefficiente che caratterizza la perdita di segnale è una variabile causale con distribuzione Rayleigh) e *fading selettivo* quando il canale tiene conto della presenza di percorsi multipli, dovuti alla presenza delle repliche del segnale trasmesso dal terminale. In quest'ultimo caso, ogni percorso è caratterizzato da un proprio ritardo, da una propria rotazione di fase e da un fattore di ampiezza che anche in questo caso è una variabile casuale con distribuzione Rayleigh. Questa definizione generalizzata del fading non deve trarre in inganno: l'utilizzo di un modello del canale o dell'altro si basa su valutazioni che coinvolgono la banda del segnale, la bande di coerenza del canale, il ritardo di propagazione ed il tempo necessario alla trasmissione di un simbolo.

I modelli matematici che rappresentano il canale con fading relativi alla trasmissione di un generico dispositivo i possono essere riassunti come

$$h_k(t) = \begin{cases} \alpha_i e^{j\phi_i} \delta(t - \tau_i''), & \text{caso fading piatto} \\ \sum_{m_i=0}^{M_i} \alpha_{i,m_i} e^{j\phi_{i,m_i}} \delta(t - \tau_{i,m_i}''), & \text{caso fading selettivo} \end{cases} \quad (3.3)$$

dove ϕ_k, ϕ_{k,m_k} e τ_k'', τ_{k,m_k}'' sono rispettivamente i ritardi di fase e temporali introdotti dal canale: queste possono essere assunte come variabili casuali uniformemente distribuite tra $[0, 2\pi)$ e $[0, T_{max}]$, dove T_{max} è il massimo ritardo temporale che può esserci su di un raggio. M_k è il numero di percorsi multipli generati dal canale selettivo in frequenza per il segnale trasmesso dall'utente k -esimo. α_k, α_{k,m_k} sono le attenuazioni sui percorsi ed hanno una distribuzione di tipo Rayleigh:

$$f_\alpha(\alpha) = \frac{\alpha}{\sigma_\alpha} \exp \left\{ -\frac{\alpha^2}{2\sigma_\alpha^2} \right\}. \quad (3.4)$$

Per quanto concerne la valutazione dell'utilizzo di una o dell'altra approssimazione di canale con fading si può riassumere come

$$\begin{array}{ll} \textbf{Fading piatto} & B_s < B_c \\ & \tau > T_s \\ \textbf{Fading selettivo} & B_s > B_c \\ & \tau < T_s \end{array}$$

dove B_s è la banda del segnale trasmesso, B_c è la banda di coerenza del canale, τ è l'intervallo di tempo tra l'arrivo di repliche dello stesso segnale e T_s è il tempo necessario alla trasmissione di un simbolo.

Capitolo 4

Valutazione tools di simulazione

In questo capitolo saranno illustrati i principali strumenti di simulazione utilizzati dalla comunità scientifica e verranno esposte le motivazioni che hanno spinto ad utilizzare il simulatore “WLAN Simulator”. Verrà inoltre presentata una dettagliata analisi del lavoro svolto ponendo l’attenzione sulle modifiche apportate a WLAN Simulator e sull’estensione implementata che fornisce la possibilità di caratterizzare la rete.

4.1 Introduzione alla simulazione di reti

Il termine “simulazione” definisce il processo di modellizzazione di un sistema reale in modo tale da poter comprendere e valutare i comportamenti di tale sistema in diverse configurazioni utilizzo.

In generale i simulatori di rete si suddividono in quattro tipi in base alle scelte progettuali eseguite: a tempo continuo, a tempo discreto, con verifica dello stato essere eseguita in istanti regolari, verifica dello stato causata da un evento. Segue una breve descrizione delle filosofie base con cui si può sviluppare un simulatore:

fluid: il simulatore considera il traffico dei pacchetti, ad alto livello, come se fosse un flusso continuo e gli unici eventi considerati sono il cambio del valore del flusso. Questo modo di descrivere il comportamento della rete impone un dettagliato studio

matematico per verificare la validità di tale modello e richiede attenzione nel trattare l'interazione di più flussi;

packet-driven: il simulatore è “gestito” dai pacchetti: ogni qualvolta un nuovo pacchetto viene trasmesso, si genera un nuovo evento che deve essere gestito dal simulatore. Questa metodologia riproduce il comportamento reale di una rete a pacchetti, ma ha lo svantaggio di computazionalmente pesante;

time-driven: il simulatore entra in funzione solo in determinati istanti temporali prefissati e verifica quanto accaduto sulla rete dall'istante precedente a quello attuale.

event-driven: un simulatore event-driven elabora le informazioni esattamente in corrispondenza di ogni evento che accade sulla rete;

In questo lavoro di tesi si è posta l'attenzione su simulatori event-driven.

4.1.1 Analisi dei tool di simulazione

Nel campo della simulazione di reti sono presenti vari tool di simulazione, i più utilizzati sono : OPNET, GloMoSim, QualNet, OMNeT++, NS-2 e WLAN Simulator. In seguito verrà fornita una descrizione delle principali specifiche di questi tool.

OPNET

OPNET (*Optimized Network Engineering Tool*) è un tool commerciale sviluppato da MIL3Inc. [25] per la modellizzazione e simulazione di reti di comunicazioni, dispositivi e protocolli. È possibile simulare tutti i tipi di reti cablate e diverse tipologie di reti wireless (è implementato il livello MAC di 802.11). OPNET è organizzato in modo gerarchico ed i vari livelli sono strutturati come una macchina a stati finiti ed ogni livello è implementato in un linguaggio simile a C chiamato Proto-C.

È possibile inoltre implementare nuovi modelli, ma per fare questo è necessario definire una macchina a stati finiti.

GloMoSim e QaulNet

GloMoSim [27] è stato sviluppato da UCLA Computing Laboratory per lo studio di modelli di reti su larga scala (con più di 1 milione di nodi). È stato implementato per la simulazione sia di reti cablate che wireless, ed è stato sviluppato utilizzando come linguaggio di programmazione PARSEC.

QualNet [28] è invece la versione commerciale di GloMoSim e questa suite contiene molte più funzionalità rispetto a GloMoSim pur mantenendo la stessa filosofia implementativa.

OMNeT++

OMNeT++ [26] è un progetto *open-source* sviluppato in C++ e con interfaccia GUI . Può essere utilizzato per simulare: modelli di traffico in reti di telecomunicazioni, protocolli, reti di code, modelli a multiprocessore e altro hardware. OMNet++ non è solamente utilizzato per la simulazione di reti di telecomunicazioni.

OMNeT++ è un progetto relativamente recente rispetto agli altri tool di simulazione e la sua natura *open source* è possibile estendere le sue caratteristiche implementando nuovi protocolli.

Network Simulator 2 (NS-2)

Network Simulator (NS-2)[24] è uno strumento di simulazione largamente utilizzato dalla comunità scientifica e molti dei risultati di simulazione sono ottenuti con l’ausilio di questo tool. NS-2 permette di modellare dettagliatamente l’intero stack protocollare (Figura 2.4) inclusi i livelli rete, trasporto e applicazione. La prima versione “NS-1” è stata sviluppata a partire dal 1989 dal *Network Research Group* del *Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)*.

L’obiettivo di NS-2 consiste nel riprodurre, in maniera più fedele possibile, il comportamento di un grande numero di applicazioni, protocolli, tipi di rete, elementi di rete e modelli di traffico, che possono essere tutti considerati come “oggetti simulati”.

Ciò che caratterizza NS-2 è la sua struttura di simulatore *event-driven*. Esso si basa su due linguaggi di programmazione: un simulatore orientato agli oggetti scritto in C++ e un interprete scritto in OTcl (un'estensione orientata agli oggetti di Tcl). OTcl è utilizzato per eseguire gli script di comando dell'utente. NS-2 presenta anche una ricca libreria di oggetti di reti e di protocolli. La parte scritta in C++ vuole in primo luogo consentire efficienza nella simulazione e tempi di esecuzione ragionevoli, quella scritta in OTcl consente all'utente di definire particolari topologie di rete, di specificare i protocolli, di scegliere le applicazioni che si intendono simulare e stabilire il formato dell'output che si vuole ottenere dal simulatore.

Si possono seguire due strade nell'utilizzo di NS-2 in funzione del problema che si vuole affrontare. Se il problema principale è quello di avere uno strumento che permetta la simulazione di protocolli di rete già esistenti, l'utilizzo è relativamente semplice: si crea un modello della rete, la si simula e si analizzano i risultati. NS-2 permette di definire molte topologie di rete, di impostare le caratteristiche dei vari nodi, di modellare il canale ed il tipo di collegamenti. Al termine di ogni simulazione viene generato un file di output in cui sono tracciati tutti gli eventi che si sono verificati nella rete, in particolare vengono memorizzate tutte le informazioni di ogni pacchetto che transita sul canale, fra le quali il tipo (dati o acknowledgement), il momento in cui viene inviato, chi lo ha inviato e se è stato ricevuto correttamente. Dall'analisi di questo file è quindi possibile ottenere informazioni sulle prestazioni della rete.

Se al contrario si vuole modificare il funzionamento di un determinato protocollo oppure inserirne di nuovi, oltre alla modellizzazione della rete è necessario scrivere i nuovi componenti del simulatore per ottenere il comportamento voluto. Questo comporta, oltre alla conoscenza di C++ e OTcl, una completa comprensione della struttura del simulatore e della sua organizzazione. Ad esempio volendo caratterizzare un nodo di una rete, ognuna delle funzioni svolte dai livelli ISO/OSI dovrà essere scritta in C++ mentre il collegamento e la configurazione dei livelli in OTcl.

Una simulazione svolta con NS-2 può essere così sintetizzata:

1. creazione di uno *scheduler*;
2. creazione e impostazione dei file di traccia;
3. definizione della topologia;
4. scelta del protocollo di routing;
5. impostazione dei modelli di errore per i vari collegamenti;
6. creazione delle connessioni a livello trasporto;
7. caratterizzazione delle sorgenti di traffico;
8. inizio della simulazione.

La simulazione di reti wireless mediante NS-2 presenta un approccio diverso da quello utilizzato per la descrizione delle reti cablate. Per le reti wireless oltre al numero dei nodi è necessario definire uno scenario di simulazione, cioè i limiti della zona entro cui si muoveranno i nodi. Inoltre la topologia non è sufficiente a definire il tipo e la quantità di traffico che viene trasmesso sulla rete, occorre definire delle connessioni tra nodo e livello applicazione tramite oggetti, detti *Agenti*, che definiscono anche il protocollo di trasporto adottato. L'elemento chiave è l'oggetto "MobileNode", costituito da componenti di rete come il *Link layer*, *Interface Queue* e *Mac layer*. Infine bisogna specificare la tipologia dell'antenna utilizzata, il modello di propagazione voluto e il tipo di protocollo di routing nel caso di reti ad-hoc.

WLAN Simulator

WLAN Simulator è un simulatore *event-driven* sviluppato da G.Bianchi e I.Tinnirello [6] che considera dettagliatamente le caratteristiche del modello di accesso DCF di IEEE

802.11, sia nella sua versione base sia con l'utilizzo dell'*handshake* RTS/CTS (v. sez. 2.2.2). È possibile inoltre abilitare alcune caratteristiche di EDCF (v. sez. 3.1) con la semplificazione di considerare una sola classe di trasmissione per ogni stazione. Il cuore del sistema è il livello MAC che implementa tutte le funzionalità descritte nello standard 802.11. Sono inoltre descritti un generico livello superiore, chiamato HI, che ha il compito della generazione dei pacchetti da trasmettere, ed uno inferiore, MED, che si occupa della fase di trasmissione e ricezione. La generazione dei pacchetti è eseguita considerando un tempo di arrivo con distribuzione esponenziale. Non viene considerata la frammentazione, quindi i pacchetti definiti come *Mac Service Data Unit* (MSDU) a livello MAC e *Mac Protocol Data Unit* (MPDU) a livello MED, presentano la stessa lunghezza che viene impostata dall'utente. Infine il canale viene considerato ideale e i tempi di trasmissione sono nulli.

Il simulatore emula il funzionamento di una rete con architettura ad-hoc (v. sez. 2.1), non è quindi previsto l'uso di access point o di stazioni privilegiate ed inoltre si suppone che tutti i pacchetti arrivino a destinazione con un singolo "*hop*" in questo modo non vengono considerati e non sono implementati, protocolli di *routing*.

Le caratteristiche principali di tale simulatore possono essere così riassunte:

- implementazione di DCF e EDCF con singola coda;
- lunghezza delle MSDU fissa definita dall'utente;
- no frammentazione 1 MSDU = 1 MPDU;
- distribuzione poissoniana degli arrivi;
- distribuzione casuale uniforme delle MSDU da inviare a ogni stazione;
- arrivo dei pacchetti a destinazione in un singolo hop;

4.1.2 Confronto tra i tool di simulazione

OPNET è completo di una veste grafica e di animazioni, viene utilizzato per simulazioni da varie compagnie di telecomunicazioni ed il suo uso è gratuito solo per le università nord americane. Rispetto a GloMoSim e a NS-2, in OPNET risulta più facile descrivere una nuova applicazione e escludere dalla simulazione parte dello stack protocollare, aumentando così la velocità di simulazione e riducendo i livelli di dettaglio non necessari durante la simulazione.

In GloMoSim e QualNet l'utente deve avere una buona familiarità con PARSEC per essere in grado di sviluppare nuovi protocolli o per modificare quelli esistenti. Inoltre GloMoSim non è freeware, ma per enti di ricerca, associazioni no-profit e per scopi educativi il suo uso è gratuito. Purtroppo la documentazione è molto ridotta, non esiste un manuale dell'utente ed è presente un esiguo numero di tool disponibili per la generazione di nuove topologie di rete, per il monitoraggio del comportamento del sistema e per l'analisi dei risultati di post-simulazione. QualNet contiene invece molti modelli e protocolli sia per reti cablate che wireless, una completa documentazione ed il supporto tecnico ma per il suo utilizzo è necessario acquistare una licenza d'uso.

OMNeT++ non è specificatamente creato per la simulazione di reti di telecomunicazioni e non dispone di una valida documentazione del codice che permetta di valutarne la corretta implementazione. Infine rispetto a NS-2 risulta più semplice lo sviluppo di nuovi protocolli.

OPNET e QualNet, in questo lavoro di tesi, non sono stati utilizzati in quanto comportano l'acquisto di una licenza d'uso mentre gli altri tool sono stati scartati in base alle precedenti motivazioni. Inoltre dato che l'obiettivo principale è lo studio delle interazioni tra livello MAC e livello fisico, inteso come caratterizzazione del canale, è necessario utilizzare un tool che sia in grado di simulare solo questi due livelli, senza che siano influenzati dal comportamento dei livelli superiori.

NS-2 rappresenta un valido simulatore, ma infine si è deciso di utilizzare WLAN

Simulator per i seguenti motivi:

- **compattezza del codice:** WLAN Simulator è relativamente semplice, permette un facile debug e un controllo completo di ogni parametro di simulazione, mentre NS-2 è un progetto complesso con molti sviluppatori diversi. Questo comporta un difficile controllo delle varie parti del codice e una difficile valutazione sulla sua corretta implementazione. Inoltre dato che l'obiettivo principale è lo studio delle interazioni tra livello MAC e PHY con WLAN Simulator è possibile simulare solamente quello di cui si necessita, mentre con NS-2 si è costretti a simulare l'intera architettura protocollare. Ciò richiede una particolare attenzione nel valutare l'influenza dei livelli superiori sulle performance del livello MAC;
- **modularità:** WLAN Simulator riproduce fedelmente la macchina a stati del livello MAC descritta nello standard. Estensioni e aggiornamenti risultano perciò facilmente realizzabili;
- **efficienza:** WLAN Simulator richiede poche risorse e un tempo di simulazione ridotto rispetto a NS-2, questo permette un significativo incremento delle prestazioni del processo di simulazione.

4.2 Physical Simulator

L'obiettivo di questo studio è la realizzazione di un'estensione per WLAN Simulator in grado di rappresentare sia la topologia fisica della rete sia il canale trasmissivo. La caratterizzazione topologica della rete viene fatta considerando un'ambiente a due dimensioni, dove i vari nodi vengono posizionati all'interno di un'area, definita come un piano rettangolare, che rappresenta una EBSS. Il canale invece in prima approssimazione è stato caratterizzato con la presenza di attenuazione dovuta al pathloss. È comunque prevista la possibilità di rappresentare il canale con modelli più dettagliati.

La filosofia seguita, per l'implementazione di questa estensione, è orientata alla creazione di un'interfaccia che caratterizzi un generico livello fisico, senza considerare la fase di modulazione del segnale. Il linguaggio di programmazione è C++; tutto Physical Simulator è strutturato in modo modulare in classi in modo da renderlo facilmente estendibile e adattabile. Il software sviluppato può essere utilizzato sia con WLAN Simulator, sia con qualsiasi altro simulatore implementato in questo linguaggio.

L'estensione sviluppata permette di rappresentare i singoli nodi presenti (stazioni e accesspoint) tramite parametri come il posizionamento all'interno della cella, la potenza di trasmissione, la frequenza di lavoro, i livelli di potenza e sensibilità e il tipo di antenna utilizzata.

Di seguito si presenterà una breve introduzione del funzionamento di WLAN Simulator nella sua configurazione originale, al fine di consentire una migliore comprensione delle modifiche che saranno in seguito apportate. Si descriveranno poi le caratteristiche strutturali, le scelte implementative e il funzionamento dell'estensione sviluppata. In conclusione si elencheranno le modifiche da apportare a WLAN Simulator necessarie per l'integrazione della nuova estensione e per poter eseguire simulazioni anche con reti in configurazione infrastrutturata.

4.2.1 Funzionamento di WLAN Simulator

La filosofia seguita per l'implementazione di WLAN Simulator è stata basata sullo sviluppo di un simulatore in grado di emulare il comportamento del livello MAC di IEEE 802.11. In questo modo è stato possibile condurre simulazioni solo utilizzando questo livello ed eliminando di fatto tutte le interazioni con i livelli superiori e quelli inferiori che avrebbero potuto influenzare i risultati.

Questo approccio ha però condotto ad una definizione astratta e non realistica dei livelli superiori e di quelli inferiori. Al fine di seguire il comportamento standard di un dispositivo 802.11 in cui il compito del livello MAC 'è quello (in fase di trasmissione) di

ricevere pacchetti di dati dal livello superiore, gestire l'accesso al canale tramite protocolli di carrier sense e tecniche di backoff e non quello di generazione di dati e sensing del canale, in WLAN Simulator si possono identificare tre livelli:

1. la rappresentazione dei livelli superiori, chiamata "HI";
2. il livello "MAC";
3. la rappresentazione dei livelli inferiori, chiamata "MED".

La rappresentazione dei livelli superiori ha il solo compito di generare i pacchetti di traffico da inoltrare al livello MAC. Le interazioni che il livello HI ha con il livello MAC, avvengono solo nella direzione "alto – basso", cioè da HI a MAC e non influenzano pertanto i risultati delle analisi condotte su quest'ultimo. Una corretta ricezione è valutata a livello MAC, in quanto le prestazioni che si desidera valutare sono relative solamente al livello MAC. Si suppone infine che la generazione dei pacchetti avvenga con frequenza tale da porre sempre la rete simulata in condizioni di saturazione: il livello MAC ha sempre a disposizione un nuovo pacchetto da trasmettere.

Il livello MED fornisce una rappresentazione semplificata dei livelli inferiori al MAC e prevede scambi di informazioni con il livello MAC. Questa interazione diversamente da quella definita precedentemente, è bidirezionale: le informazioni possono essere generate dal livello MAC per il MED e viceversa.

In MED non è presente una definizione del canale trasmissivo che viene considerato ideale, in quanto privo di rumore, di effetti di distorsione, di attenuazione del segnale e con tempi di propagazione nulli. Inoltre non esiste il concetto di topologia, si presume infatti che tutte le stazioni siano all'interno di una cella e tutti i nodi abbiano la capacità di trasmettere (o ricevere), verso (o da) tutte le altre stazioni presenti in un singolo hop. La fase di comunicazione tra due stazioni può essere così schematizzata:

1. generazione del pacchetto in HI e inoltro a MAC;

2. elaborazione da parte di MAC e inoltro a MED in caso di canale non occupato da una trasmissione;
3. MED si occupa di:
 - accesso al canale tramite l'utilizzo delle tempistiche impostate da MAC;
 - se il canale è libero, comunicazione a tutte le stazioni che sta per avvenire una nuova trasmissione;
 - inizio della trasmissione;
 - verifica di eventuali collisioni;
 - nel caso di collisioni interazione con MAC per consentire l'inizializzazione della Contention Window;
4. ricezione del pacchetto da parte della stazione di destinazione;
5. invio di un pacchetto di ACK per confermare la corretta ricezione;
6. nuova fase di contesa del canale.

Una trasmissione può non andare a buon fine se avviene una collisione o se il pacchetto di ACK non viene ricevuto entro un determinato tempo limite ed in questi casi la stazione provvede alla ritrasmissione dello stesso pacchetto. Il numero massimo di ritrasmissioni che una stazione può effettuare è un parametro impostabile dall'utente.

4.2.2 Architettura software dell'estensione sviluppata

Le scelte implementative seguite hanno condotto alla creazione di un nuovo software in grado di simulare la topologia di una rete wireless sia in configurazione ad-hoc che infrastrutturata. Il nuovo software è strutturato in modo tale da presentare una classe con funzione di interfaccia verso WLAN Simulator. È stato scelto di interfacciare l'estensione

sviluppata con il livello MED, di WLAN Simulator, in modo tale incrementarne le funzionalità rendendo possibile una caratterizzazione topologica della rete e la definizione del canale trasmissivo.

L'oggetto che coordina e mantiene memoria della topologia della rete e delle caratteristiche dei nodi in essa presenti è la classe *Grid*. Questa si occupa della fase di inizializzazione, di fornire tutti i parametri necessari per la caratterizzazione di ogni nodo e della creazione della cella entro la quale vengono posizionati i vari nodi. La cella è definita come un'area rettangolare, di dimensioni impostate dall'utente. Tale area è poi suddivisa in sotto sezioni, anch'esse di dimensioni impostate dall'utente, che restituiscono una rappresentazione globale di tipo griglia. Questa rappresentazione è stata introdotta al fine di poter rappresentare un'area tipo "open space" reale, in cui le stazioni possono muoversi e in cui le singole celle possono rappresentare ostacoli, come pareti o mobili, attraverso le quali le stazioni non possono transitare.

In *Grid* vengono inoltre gestite le strutture dati dalla quali è possibile ricavare le informazioni di: distanza, attenuazione e angolo presente tra due nodi. Le strutture dati implementate sono matrici in cui sono riportate varie informazioni per ogni nodo. In particolare, sono state implementate tre strutture di questo tipo: la prima contiene informazioni relative alle relazioni tra le stazioni, la seconda informazioni relative alle stazioni rispetto agli accesspoint e la terza quelle relative a relazioni tra accesspoint.

Per ottenere questi dati *Grid* si interfaccia con altre classi che definiscono le peculiarità dei vari oggetti che compongono la rete:

classe *MS*: definisce le caratteristiche delle stazione, in termini di caratteristiche fisiche, di potenza e antenne utilizzate;

classe *AP*: definisce le caratteristiche degli accesspoint ed eredita gli attributi della classe *MS*;

classe *Distance*: si occupa della valutazione delle distanze e degli angoli tra i vari nodi della rete;

classe *Channel*: implementa la caratterizzazione del canale;

classe *Antenna*: descrive i tipi di antenna che possono essere utilizzate dai nodi ed in particolare, i diagrammi di radiazione ed i guadagni di potenza.

All'interno della classe *MS* una stazione è caratterizzata dai seguenti parametri:

- identificativo della stazione;
- posizione x e y , espressa in metri, all'interno della cella considerata;
- tipo di antenna usata;
- offset dell'antenna;
- numero di facce dell'antenna utilizzata;
- identificativo della faccia utilizzata dell'antenna;
- angolo di massima radiazione di ogni faccia dell'antenna;
- valore di potenza di trasmissione in mW e in dBm ;
- valore di soglia per il SIR (*Signal to Noise Ratio*) e per la potenza;
- identificativo dell'accesspoint al quale la stazione è collegata.

L'identificativo della stazione è un numero progressivo che è compreso tra 0 e N . Ogni stazione può utilizzare antenne del tipo: *beam forming*, *switched beam*, omnidirezionali e direzionali (v. sez. 3.3), mentre l'offset rappresenta l'angolo verso il quale l'antenna sarà orientata. Il numero di facce dell'antenna e l'identificativo della faccia utilizzata presentano valori diversi da 1 solo nel caso di utilizzo di antenne *switched beam*. L'angolo

di massima radiazione di ogni faccia è l'angolo verso cui il diagramma di radiazione dell'antenna presenta un valore di massimo. I valori di soglia sono utilizzati per valutare se una stazione può trasmettere o meno. Infine, l'identificativo del accesspoint al quale la stazione è collegata non è definito come una variabile ma come un vettore di variabili. Questo è stato fatto in previsione dell'utilizzo di antenne MIMO (v. sez. 3.2), caso in cui una stazione può collegarsi a più di un accesspoint. Inoltre, in questo modo, nel caso di implementazione della mobilità, è anche possibile mantenere memoria di tutti gli accesspoint a cui una stazione si è collegata.

La classe *AP* ereditando gli attributi di *MS* utilizza gli stessi parametri per la caratterizzazione di un accesspoint. Le uniche differenze riguardano: il vettore precedentemente descritto che al posto degli identificativi degli accesspoint contiene gli identificativi delle stazioni collegate all'accesspoint stesso e la possibilità di settare la frequenza di lavoro.

In *Distance* vengono calcolate le distanze e gli angoli presenti tra i vari nodi. Mentre in *Channel* viene valutato il valore dell'attenuazione dovuta al pathloss. Le funzioni per il calcolo delle distanze, degli angoli e del pathloss vengono invocate all'interno della classe *Grid* in fase di inizializzazione della rete. Infine, i risultati ottenuti vengono inseriti nella struttura dati implementata in *Grid* ed è possibile successivamente utilizzarli senza dover nuovamente ricalcolarli.

Nella classe *Antenna* vengono definiti gli oggetti antenna che rappresentano i diagrammi di radiazione delle antenne utilizzate dalle stazioni. Ogni antenna è caratterizzata da: un identificativo univoco, un guadagno e dall'ampiezza, espressa in gradi, del lobo.

Infine, la classe utilizzata come interfaccia verso WLAN Simulator è la classe *Phy*. *Phy* consente a MED, durante ogni fase di trasmissione, di poter ottenere informazioni necessarie per valutare se la stazione è in grado o meno di effettuare l'invio di un pacchetto.

La valutazione sulla capacità o meno di una stazione di inviare un pacchetto ad un'altra, viene fatta basandosi sull'analisi del livello di potenza presente tra i due nodi. In

particolare se tale livello scende sotto una determinata soglia, impostabile dall'utente, si suppone che non può avvenire nessun tipo di comunicazione. Il livello di potenza viene calcolato tenendo in considerazione gli effetti dovuti al pathloss del canale.

Oltre a fornire tali informazioni, *Phy* interagisce con le altre classi implementate, in particolar modo con *Grid* ed è utilizzata per settare i parametri necessarie alla caratterizzazione della rete.

4.2.3 Parametri descrittivi e funzionamento

Parametri necessari per la definizione della rete

I parametri necessari per definire la topologia della rete sono forniti in ingresso al simulatore usando tre differenti file di testo. Nei file sono contenute le informazioni necessarie per definire rispettivamente le caratteristiche delle antenne, delle stazioni e degli accesspoint.

Il simulatore consente l'utilizzo di antenne intelligenti, come *switched beam* e *beam forming*, e tradizionali, come omnidirezionali e direttive, e ad ogni antenna viene associato un diagramma di radiazione, scelto dall'utente. I diagrammi di radiazione sono definiti come una lista di 360 elementi, dove ogni elemento rappresenta il valore del guadagno di trasmissione espresso in *dB* corrispondente ad un relativo angolo. Dato l'utilizzo dei *dB* come unità di misura, per caratterizzare il guadagno nullo si utilizza il valore pari a -1000 *dB*. Inoltre, tutti i diagrammi sono strutturati in modo tale da avere come asse di simmetria l'asse *y* e sono orientati lungo la sua direzione positiva. In questo modo, per rappresentare un diagramma di radiazione di un'antenna con un lobo ideale di ampiezza 120° vengono settati valori positivi per gli elementi del vettore compresi tra $0-60$ e tra $300-359$. Ogni diagramma di radiazione è rappresentato in un file di testo e pertanto per semplificare le operazioni il file che descrive le antenne passato al simulatore, contiene la lista dei file che rappresentano i diagrammi delle antenne che possono essere utilizzate.

La descrizione delle singole stazioni è inserita in un file di testo, in cui sono riportate

le informazioni di tutte le stazioni. Il file è strutturato in modo tale da fornire una breve descrizione dei vari parametri, in seguito viene specificato il tipo di posizionamento delle stazioni ed infine vengono definite le caratteristiche di ogni singola stazione. La scelta del tipo di posizionamento è necessaria in quanto all'interno della cella le stazioni possono essere disposte dall'utente oppure possono essere ubicate in modo random.

Le caratteristiche di ogni singola stazione vengono definite dai seguenti parametri:

- scelta del diagramma di radiazione da associare al tipo di antenna utilizzata;
- offset dell'antenna espresso in gradi che rappresenta la direzione verso la quale è orientata l'antenna;
- tipo di antenna: *switched beam*, *beam forming* o direttiva. È possibile utilizzare antenne omnidirezionali usando indistintamente uno dei precedenti tipi, ma associando ad esso un diagramma di radiazione con guadagno costante a 360°;
- posizione all'interno della griglia con coordinate cartesiane (l'unità di misura usata è il metro);
- potenza di trasmissione [*mW*];
- valore di soglia per il SIR (*Signal to Interference Ratio*) [*dB*];
- valore di soglia per la potenza di ricezione [*dB*].

L'identificativo di ogni stazione viene semplicemente ricavato dall'numero della riga, in questo modo verrà assegnato l'identificativo 0 alla stazione le cui caratteristiche sono descritte sulla prima riga che riporta i parametri precedentemente illustrati.

Il file di definizione degli accesspoint ha una struttura analoga a quella precedentemente descritta ed aggiunge un ulteriore parametro che permette di settare la frequenza di lavoro dell'accesspoint (e di conseguenza di tutti terminali che si associano ad esso).

Il software implementato, pur considerando il protocollo IEEE 802.11, può utilizzare qualsiasi frequenza di lavoro e qualsiasi potenza di trasmissione, rendendo pertanto ancora più flessibile un suo possibile utilizzo in altri simulatori di rete.

Funzionamento

Il funzionamento dell'estensione sviluppata si basa sulle seguenti ipotesi utilizzate per la definizione di reti infrastrutturate e ad-hoc:

configurazione infrastrutturata: le stazioni possono utilizzare qualsiasi tipo di antenna e la direzione di massima radiazione, per antenne *beam forming*, o la migliore faccia da utilizzare, per *switched beam*, vengono definite una volta che si è selezionato l'accesspoint a cui collegarsi. Per l'utilizzo di antenne omnidirezionali o direzionali si mantiene, invece, l'angolo di offset definito dall'utente. È chiaro che nel caso di omnidirezionali questo parametro non comporta nessuna variazione delle caratteristiche di radiazione dell'antenna. Inoltre, per gli accesspoint momentaneamente si prevede il solo utilizzo di antenne omnidirezionali o direzionali con offset fissato;

configurazione ad-hoc: le stazioni possono utilizzare solo antenne omnidirezionali in quanto il livello MAC di IEEE 802.11 non implementa le funzionalità necessarie per un corretto utilizzo di antenne intelligenti.

Successivamente alla lettura dei parametri di ingresso e prima dell'inizio della simulazione, nel caso di rete con architettura infrastrutturata, la prima operazione è la selezione dell'accesspoint a cui ogni stazione deve collegarsi. Per prima cosa si valuta il tipo di antenna che la stazione usa. Nel caso in cui l'antenna scelta sia di tipo *beam forming* o *switched beam*, la determinazione dell'accesspoint migliore viene fatta ipotizzando che ogni stazione "ascolti" il canale in ogni direzione angolare, come se utilizzasse un'antenna omnidirezionale, e selezioni l'accesspoint che presenta il miglior livello di potenza, considerando che il canale non introduca rumore, ma presenti solo fenomeni di attenuazione dovuti al pathloss (v. Formula 3.1). Per il calcolo del pathloss si considera che la

frequenza di lavoro della stazione sia la stessa dell'accesspoint esaminato in quel determinato istante. Infine, selezionato l'accesspoint con il quale connettersi, la stazione calcola l'angolo di vista che ha verso questo e lo utilizza per il settaggio dell'antenna.

Per antenne *beam forming* come offset si assume l'angolo calcolato (che rappresenta anche la direzione di massimo guadagno. In pratica viene ruotato il lobo dell'antenna fino a porre la direzione di massima irradiazione verso l'accesspoint.

Invece, per antenne *switched beam*, l'angolo viene utilizzato per determinare quale lobo dell'antenna deve essere attivato: in questo caso la direzione di massima irradiazione del lobo non corrisponde con la direttrice che idealmente connette le stazioni con li accesspoint e si considera attivo il lobo che ha una linea di vista con l'accesspoint. Ad esempio nel caso del diagramma di radiazione di 120° , precedentemente descritto, l'antenna presenta tre facce (tre lobi), ma solo una di queste sarà utilizzata per trasmettere e ricevere. È da notare che in questo caso gli angoli che coincidono con il valore di massimo guadagno, per questa configurazione, sono solo tre e sono posizionati a 0° , 120° e 240° e non è detto che coincidano con la direzione verso la quale si trova l'accesspoint. Quindi il guadagno di un'antenna *switched beam* potrebbe risultare minore rispetto a quello di una *beam forming*.

Nel caso di utilizzo di antenne omnidirezionali ovviamente non è considerato un offset e la stima della potenza ricevuta è valutata per tutti i 360° . Nel caso di antenne direttive, si ha un offset prefissato e si stima la potenza ricevuta solo nella porzione angolare definita dall'ampiezza del lobo dell'antenna.

Se una stazione non è in grado di connettersi a nessun accesspoint essa viene semplicemente esclusa dalla rete. L'esclusione dalla rete si ottiene facendo in modo che questa stazione non sia in grado di generare traffico o di riceverne.

Terminata la fase di associazione delle stazioni agli accesspoint e la configurazione degli stessi nodi, si eseguono ulteriori processamenti dei dispositivi: ogni stazione imposta la propria frequenza di lavoro in base a quella utilizzata dall'accesspoint selezionato,

ogni accesspoint compila una lista contenente gli identificativi di tutte le stazioni ad esso associate ed infine vengono inserite nelle opportune strutture dati tutte le distanze, gli angoli e le attenuazioni tra i nodi della rete (tra stazione e stazione, tra accesspoint e accesspoint e tra stazioni e accesspoint). È da precisare che le distanze relative tra i vari nodi della rete vengono sempre calcolate per tutti gli elementi presenti, mentre le attenuazioni si valutano solo nel caso in cui la frequenza di utilizzo di entrambi i nodi considerati è la medesima.

In reti con architettura ad-hoc, oltre alle distanze e agli angoli, vengono calcolate tutte le attenuazioni tra le varie stazioni, ipotizzando che tutti i nodi utilizzino la stessa frequenza. Si valuta, infine, se una stazione è in grado di comunicare con le altre basandosi sul calcolo del livello di potenza, come nel caso di reti con infrastruttura, e se ciò non è possibile alla stazione viene inibita la possibilità di generare o ricevere pacchetti.

Terminata l'inizializzazione della rete può iniziare la simulazione vera e propria.

4.2.4 Modifiche apportate a WLAN Simulator

Sono state apportate varie modifiche a WLAN Simulator. In primo luogo è stato necessario interfacciarlo con l'estensione sviluppata, poi è stata introdotta la possibilità di utilizzare accesspoint e quindi reti in configurazione infrastrutturata, in seguito è stata modificata la parte statistica, sia per tener conto della presenza degli accesspoint, sia per ottenere nuovi dati utili per la valutazione delle simulazioni ed infine sono state aggiunte nuove voci alla lista dei parametri d'ingresso del simulatore.

Interfacciamento

Data la scelta di interfacciare l'estensione per la caratterizzazione della topologia con il livello MED è stato necessario apportare alcune modifiche al simulatore originale.

In particolare è stata modificata la fase di inizializzazione di una trasmissione. MED

ad ogni trasmissione si occupa di “informare”, ogni stazione presente nella rete, dell’inizio della trasmissione stessa (v. sez. 4.2.1). In tal modo ogni stazione è in grado di capire quando il canale è occupato o meno e di conseguenza decidere se iniziare una trasmissione o decrementare la finestra di *backoff*. Questa soluzione, nella versione originale, dava per scontato che ogni stazione era in grado di trasmettere a tutte le altre e che quindi le stazioni in ogni istante erano in grado di accorgersi se il canale era occupato o meno.

Con le modifiche apportate, ad ogni trasmissione si valuta che il livello di potenza del segnale, tra la stazione sorgente e la destinazione, sia sufficientemente elevato per consentire una trasmissione. Queste valutazioni possono portare al caso in cui due stazioni siano tra loro hidden.

Ad esempio se si considerano reti in configurazione infrastrutturata e l’utilizzo di antenne intelligenti (o direttive) si può verificare il caso in cui una stazione si accorga solo della presenza dell’accesspoint, mentre le altre stazioni risultano per lei hidden. Per chiarezza una stazione che utilizza ad esempio una *beam forming*, può sentire solo l’accesspoint in quanto quest’antenna è orientata verso l’accesspoint stesso e nel caso in cui le altre stazioni siano dislocate dietro il nodo in esame, non c’è modo che questo si accorga dell’inizio di una trasmissione da parte di una stazione posta alle sue spalle.

Inserimento del concetto di accesspoint

Per simulare reti con architettura infrastrutturate è stato inserito, in WLAN Simulator, il concetto di accesspoint.

Le varie stazioni, nel simulatore originale, vengono ordinate in un vettore, dove la posizione all’interno di questo determina l’identificativo della stazione stessa. È stato pertanto scelto di caratterizzare gli accesspoint come normali stazioni e di inserirli nelle posizioni iniziali di questo vettore. In questo modo, nel caso di utilizzo di N accesspoint e M stazioni, gli identificativi da 1 a N rappresentano gli accesspoint e quelli da $N + 1$ a $M + N$ le stazioni. Bisogna porre particolare attenzione a questo tipo di ordinamento, in

quanto, quello utilizzato nel livello fisico è differente. È necessario quindi effettuare una conversione degli identificativi tra livello MAC e fisico.

Inseriti gli accesspoint, si è resa necessaria una modifica di parte del codice del simulatore originale per poter caratterizzare questo nuovo oggetto. In pratica è stata cambiata sia la fase di generazione dei pacchetti da trasmettere, sia le tempistiche di accesso al canale utilizzate dall'accesspoint, quest'ultime definite nello standard IEEE 802.11 (v. sez. 2.2). La fase di generazione dei pacchetti prevedeva che ogni pacchetto fosse indirizzato ad una stazione, scelta a caso, presente nella rete. Con l'inserimento dell'accesspoint questo comportamento ha indotto a forzare ogni comunicazione a passare attraverso l'accesspoint. È stata pertanto modificata la metodologia di generazione facendo in modo che ogni pacchetto, trasmesso dalle stazioni, sia indirizzato all'accesspoint mantenendo comunque l'informazione sull'identificativo della stazione di destinazione. L'accesspoint ricevuto il pacchetto comunica al mittente l'avvenuta ricezione, tramite l'invio di un ACK, e poi ridirige il pacchetto dati verso la stazione di destinazione. La stazione di destinazione invia poi all'accesspoint conferma di avvenuta ricezione tramite un ACK. È stata anche mantenuta la configurazione originale in modo tale da poter sempre simulare reti con architettura ad-hoc.

Le modifiche apportate alla metodologia di generazione dei pacchetti, hanno introdotto ulteriori funzionalità, volte a caratterizzare il traffico presente sulla rete. In dettaglio si può simulare:

- traffico di *uplink*: in questo caso le stazioni trasmettono all'accesspoint un pacchetto destinato ad una stazione non presente nella cella simulata (allo stato attuale il pacchetto viene scartato dall'accesspoint);
- traffico di *downlink*: l'accesspoint è l'unico nodo a generare traffico;
- traffico *locale*: le stazioni comunicano tra loro attraverso l'accesspoint e questo non può generare traffico.

Statistiche di simulazione

Il simulatore genera un file di output contenente informazioni sul comportamento della rete simulata e al fine di poter meglio valutare l'andamento della simulazione sono stati aggiunti alcuni parametri:

- numero totale di tentavi di accesso al canale e di pacchetti collisi per ogni stazione;
- totale degli eventi di collisione;
- nel caso di utilizzo di RTS/CTS, il numero di tutti i pacchetti RTS inviati e di tutte le collisioni generate da questi pacchetti per ogni stazione;
- throughput considerando solo pacchetti di dati;
- throughput considerando tutti pacchetti con i rispettivi header.

Un'ulteriore modifica ha riguardato l'inserimento come variabile d'ingresso del valore da assegnare come seme al generatore di numeri casuali. In questo modo è possibile eseguire una simulazione con gli stessi parametri, ma introducendo casualità data appunto dalla diversa generazione dei numeri casuali.

Parametri d'ingresso

Per utilizzare le nuove caratteristiche implementate oppure per poterle escludere e quindi utilizzare il simulatore nella sua configurazione originale, è stata modificata la lista dei parametri di input del simulatore. Tale lista è riportata come allegato (v. Appendice A).

Capitolo 5

Risultati ottenuti

In questo capitolo saranno illustrati i risultati ottenuti dall'utilizzo di WLAN Simulator sia in configurazione originale che con l'aggiunta dell'estensione sviluppata. Le prove effettuate hanno avuto come primo scopo la validazione dell'estensione del simulatore riguardante la caratterizzazione topologica del sistema. Pertanto, si sono svolte valutazioni con le stesse configurazioni per reti ad-hoc sul simulatore originale e su quello con l'aggiunta dell'estensione (v. sez. 5.1). Successivamente, sono stati eseguiti test di valutazione più approfonditi su reti infrastrutturate con diverse tipologie di antenne utilizzando il simulatore modificato (v. sez. 5.2). Alcuni parametri, definiti per caratterizzare il comportamento del simulatore, sono considerati uguali per tutti i test eseguiti, anche per la stima delle prestazioni nel caso di antenne non tradizionali. I test effettuati sono stati condotti considerando: velocità di trasmissioni dei dati diverse, accesso al canale DCF sia con handshake RTS/CTS che senza e utilizzando un numero variabile di stazioni. In particolare si possono riassumere questi parametri come:

Velocità di trasmissione $\left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ Mbps} \\ 2 \text{ Mbps} \\ 5,5 \text{ Mbps} \\ 11 \text{ Mbps} \end{array} \right.$

Numero di stazioni	{ 2 6 10 15 20
Modalità di accesso al canale con DCF	{ senza RTS con RTS

Ogni simulazione, infine, è stata eseguita mantenendo costanti i vari parametri necessari alla caratterizzazione del comportamento della rete ed in Tabella 5.1 sono riportati in dettaglio i valori assegnati a tali parametri.

Parametro	Valore
MSDU length	8184 bit
MAC header length	272 bit
ACK lenght	112 bit
PHY header length	128 bit
PHY bit rate	1 Mbps
DIFS time	50 μs
SIFS time	10 μs
slot time	20 μs
CW min	32 slot
CW max	1024 slot
TX power	100 [mW]

Tabella 5.1. Parametri costanti in ogni simulazione

Si noti che le grandezze della suddetta tabella rappresentano i valori dei parametri riportati nello standard IEEE 802.11. È stato scelto di impostare la dimensione di 8184 bit al pacchetto MSDU, in quanto, tale dimensione corrisponde alla massima dimensione che un pacchetto UDP può raggiungere senza essere frammentato.

I risultati presentati rappresentano le prestazioni della rete in termini di throughput e di percentuale di collisioni avvenute, in configurazioni DCF sia senza che con handshake di pacchetti RTS/CTS.

5.1 Reti Ad-Hoc

5.1.1 Risultati di validazione

In primo luogo sono stati condotti dei test con lo scopo di validare l'estensione sviluppata. È stato pertanto simulato il comportamento di una rete wireless in configurazione ad-hoc, prima con il simulatore originale ed in seguito con la versione modificata, tenendo in considerazione la topologia della rete ed imponendo che tutti i nodi potessero comunicare fra di loro senza la presenza di fenomeni di terminali nascosti. Per quanto riguarda la caratterizzazione topologica della rete è stata impostata una disposizione circolare delle stazioni e considerato il solo utilizzo di antenne omnidirezionale.

In Figura 5.1, sono riportati i grafici relativi all'andamento del throughput ottenuti con WLAN Simulator in configurazione originale, senza e con l'uso del handshake RTS/CTS. In Figura 5.2 sono, invece, riportati i corrispettivi grafici ottenuti tenendo in considerazione la caratterizzazione topologica della rete. I suddetti grafici rappresentano la variazione del throughput all'aumento del numero di stazioni presenti nella rete e al variare del rate di trasmissione.

Confrontando i grafici riportati in Figura 5.1 e Figura 5.2 non si notano variazioni di rilievo nel caso di utilizzo della versione modificata di WLAN Simulator rispetto a quella originale, questo dimostra che le modifiche apportate, nel caso in cui tutte le stazioni possono comunicare fra di loro, non influenzano i risultati.

In Figura 5.3 e Figura 5.4 sono rappresentate la variazioni della percentuale di collisione senza e con RTS/CTS al variare della velocità di trasmissione e del numero di stazioni. Come presumibile, si può notare che con l'aumentare del numero di stazioni, la percentuale di collisioni aumenta, mentre la variazione della velocità di trasmissione influisce marginalmente su questo parametro. Si sottolinea il fatto che la percentuale di collisione nel caso di utilizzo di RTS/CTS si riferisce alle collisioni avvenute tra pacchetti RTS e CTS e risulta di poco maggiore rispetto al caso di collisioni tra pacchetti di dati.

Anche questi risultati hanno dimostrato che l'aggiunta dell'estensione che tiene in considerazione la topologia della rete, non ha introdotto alcuna alterazione nei risultati ottenuti rispetto all'utilizzo di WLAN Simulator in configurazione originale. Il throughput nel caso di RTS/CTS è minore rispetto al caso precedente, in quanto per ogni valutazione si è fatto sempre riferimento al throughput effettivo dei dati.

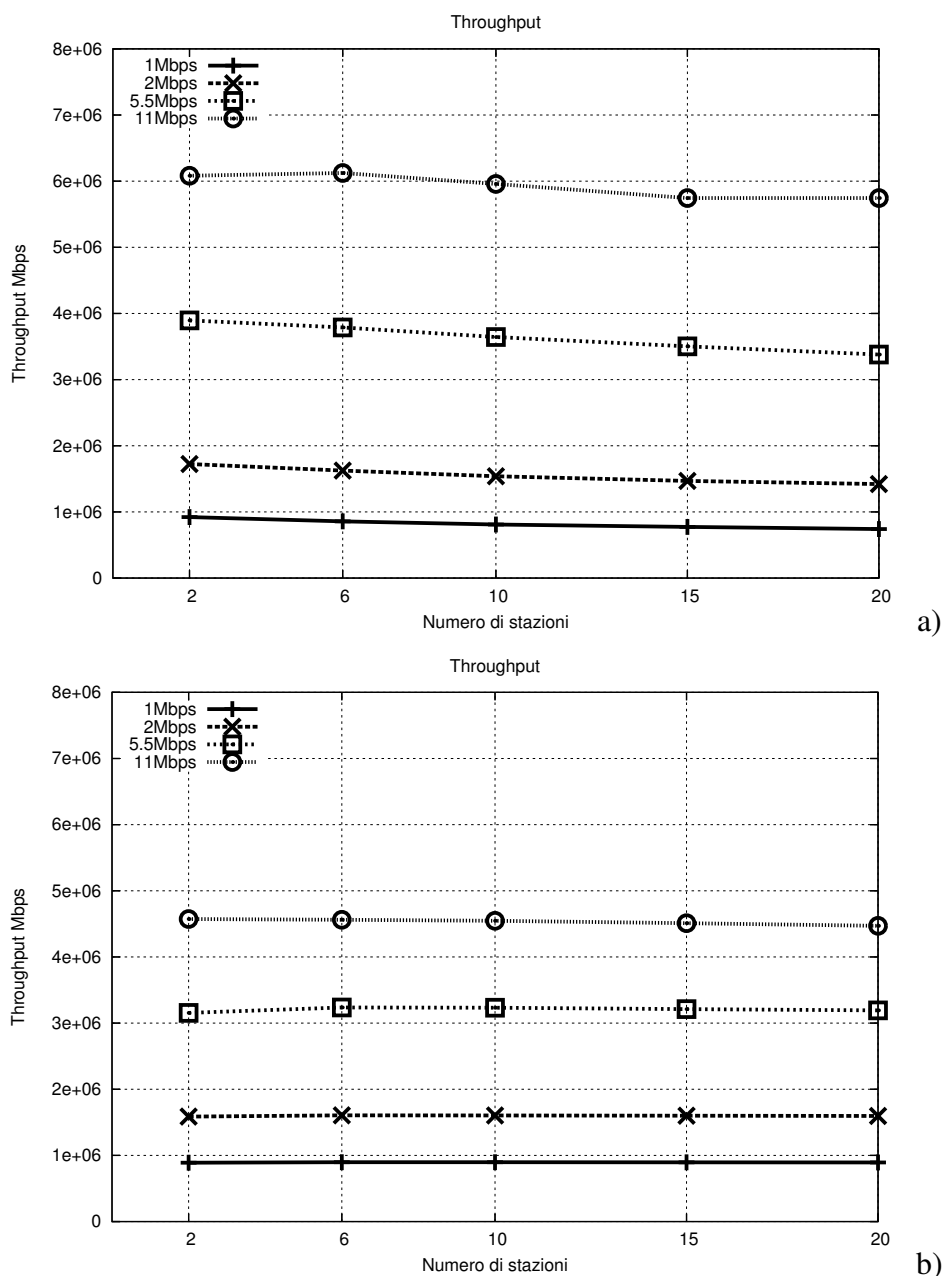


Figura 5.1. Throughput ottenuto con la versione originale di WLAN Simulator, senza (a) e con RTS/CTS (b)

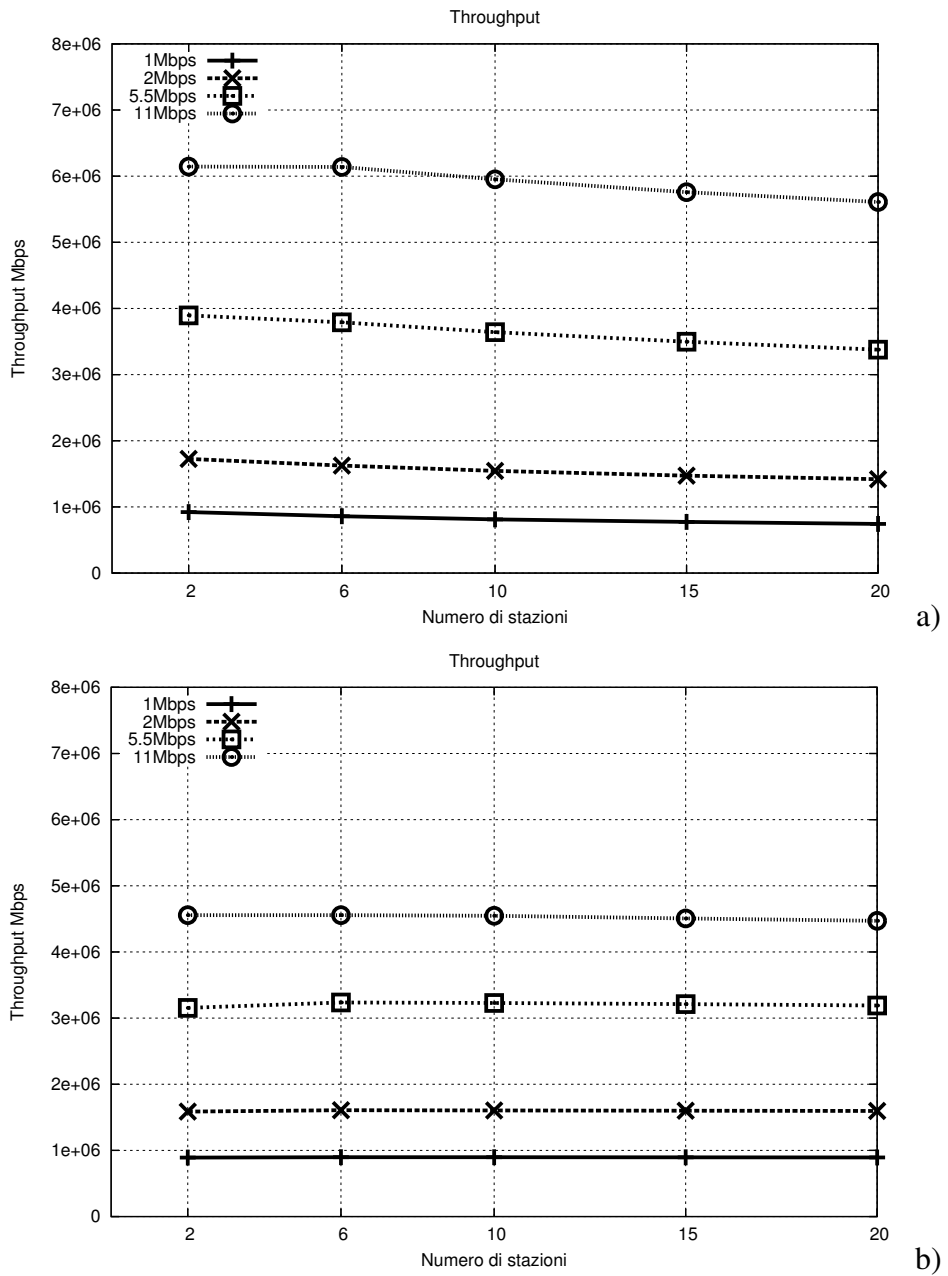


Figura 5.2. Throughput ottenuto con la versione modificata di WLAN Simulator, senza (a) e con RTS/CTS (b)

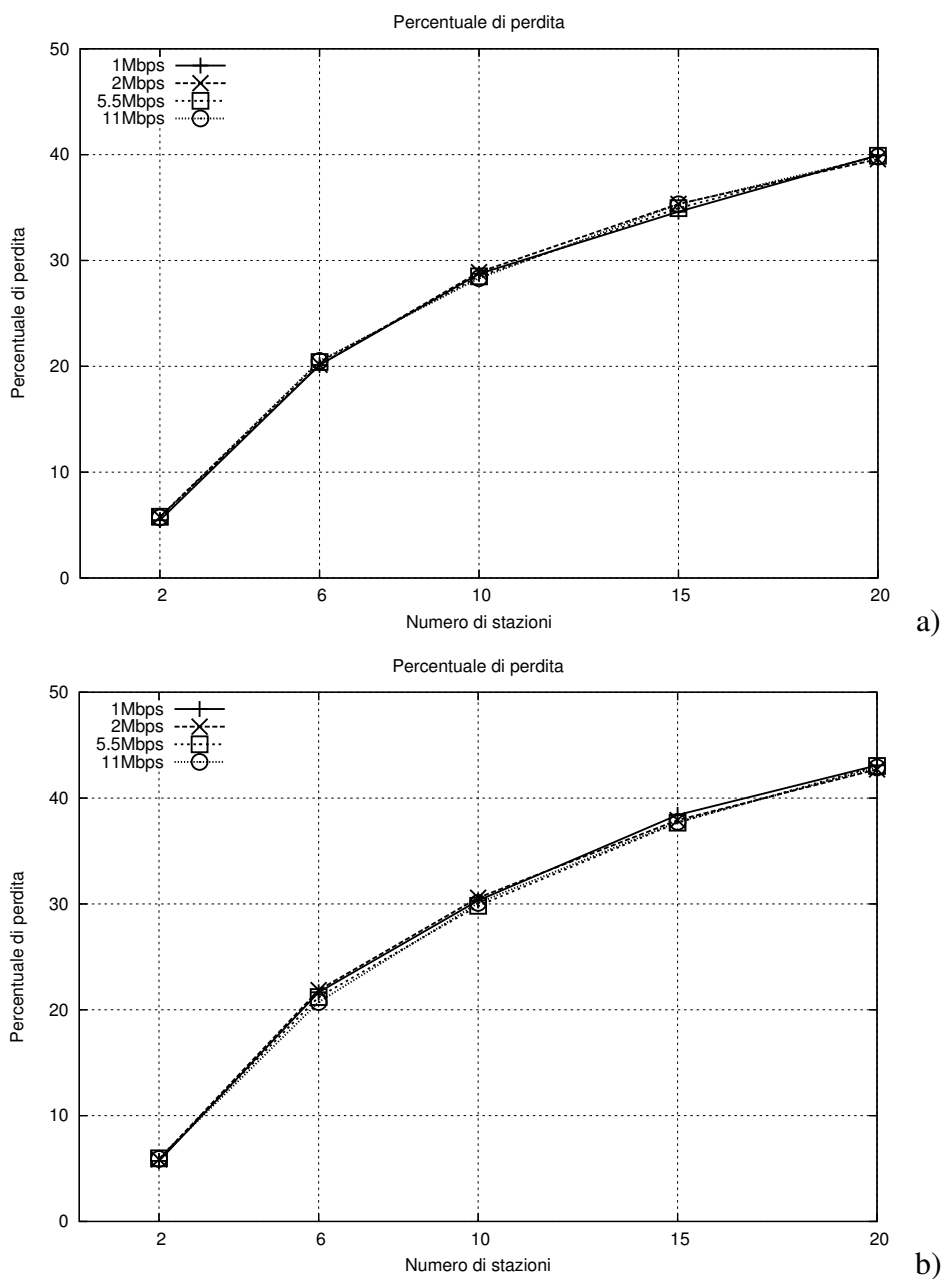


Figura 5.3. Percentuale di pacchetti collisi ottenuta con la versione originale di WLAN Simulator, senza (a) e con RTS/CTS (b)

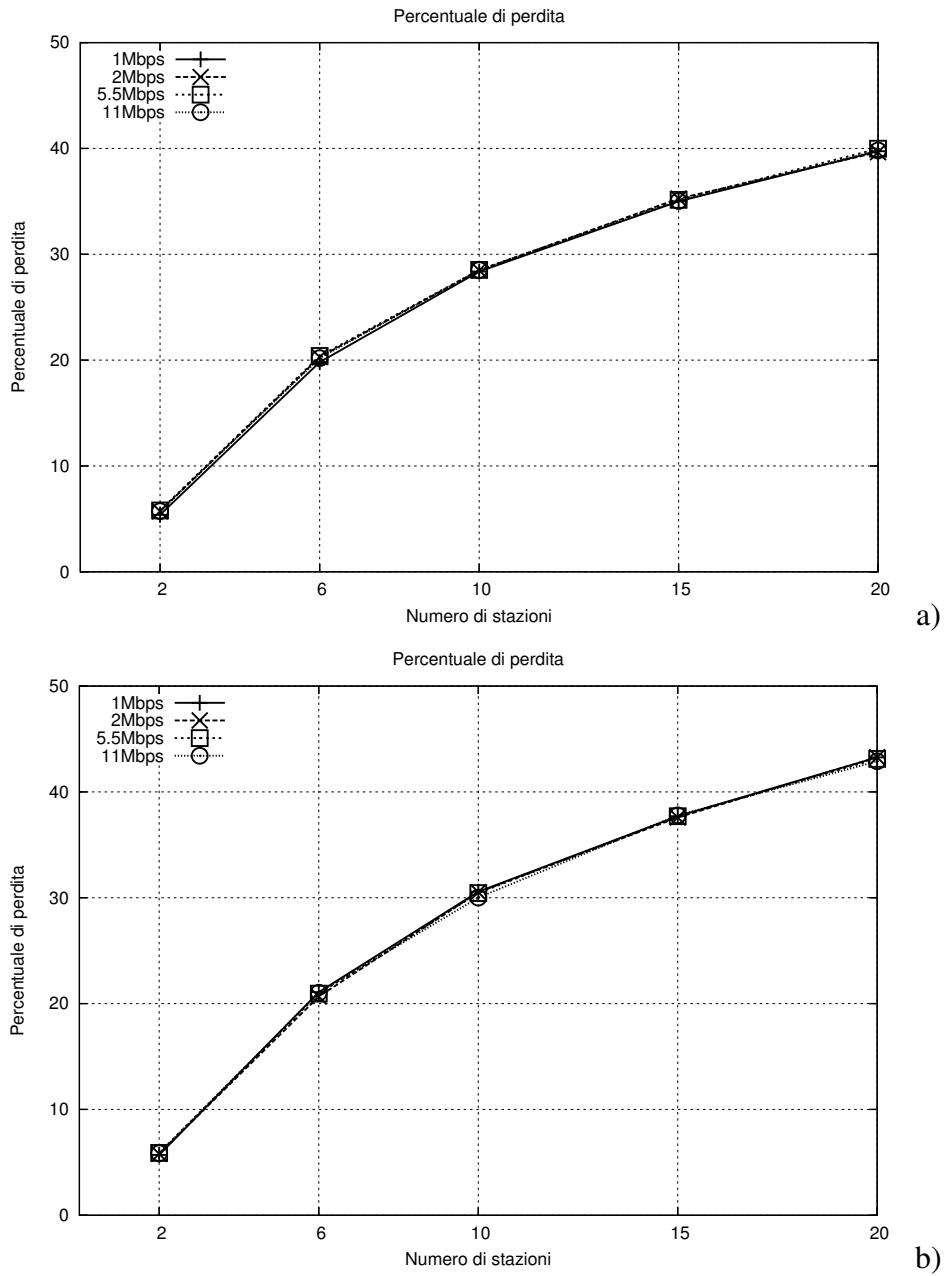


Figura 5.4. Percentuale di pacchetti collisi ottenuta con la versione modificata di WLAN Simulator, senza (a) e con RTS/CTS (b)

5.2 Reti infrastrutturate

5.2.1 Antenne omnidirezionali

In seguito alla validazione dell'estensione implementata, sono stati condotti esperimenti utili alla valutazione del comportamento di sistemi con rete in configurazione infrastrutturata. Tali simulazioni sono state eseguite considerando un'architettura di rete infrastrutturata in cui tutte le stazioni utilizzano antenne omnidirezionali e al fine di ottenere equità nel comportamento delle varie stazioni, queste sono state disposte su di una circonferenza il cui centro corrisponde alla posizione dell'accesspoint. In tal modo tutte le stazioni presentano il medesimo valore di attenuazione rispetto all'accesspoint stesso; in particolare le stazioni sono state posizionate lungo una circonferenza con raggio pari a 10 metri.

I test sono stati effettuati impostando valori di soglia tali che ogni stazione sia in grado di trasmettere e ricevere, in quanto lo scopo di queste simulazioni è valutare il comportamento della rete in configurazione infrastrutturata e non la stima dettagliata delle prestazioni in condizioni limite.

In Figura 5.5 sono rappresentati in dettaglio i comportamenti delle singole stazioni in due test effettuati. In particolare essi rappresentano l'andamento del numero di tentativi di accesso al canale e la percentuale di collisioni nel caso di 6 e 20 stazioni (rispettivamente Figura 5.5a e 5.5b) considerando una velocità di trasmissione pari a 1 Mbps. Gli istogrammi relativi al numero di tentativi di accesso sono riportati in scala logaritmica, mentre quelli relativi alla percentuale di pacchetti collisi in scala lineare. L'istogramma relativo alla stazione con identificativo 0 è rappresentativo del comportamento dell'accesspoint. In particolare si può notare che l'accesspoint non incorre mai in collisioni e questo comportamento conferma il corretto funzionamento della rete in configurazione infrastrutturata, in quanto dopo la ricezione del pacchetto l'accesspoint esegue una procedura di contesa del canale, necessaria per la trasmissione dello stesso alla stazione

destinazione, utilizzando un tempo d'attesa di canale libero pari a SIFS. L'attesa di un intervallo temporale pari a SIFS fa in modo che l'accesspoint vinca sempre le fasi di contesa del canale, garantendo l'assenza di collisioni con stazioni mobili.

In Figura 5.6 sono raffigurati gli andamenti del throughput nel caso senza e con RTS/CTS, mentre in Figura 5.7 vengono riportati i grafici relativi alla variazione delle percentuali di collisioni all'aumentare del numero di stazioni.

Si può notare, come ci si attendeva, che il throughput nel caso di utilizzo di RTS/CTS diminuisce e tale diminuzione è da attribuire al maggior overhead presente sulla rete e al fatto che si sta sempre valutando il throughput effettivo considerando solo i pacchetti dati trasmessi e non i pacchetti RTS/CTS per la prenotazione del canale. L'utilizzo di RTS/CTS non risulta pertanto necessario, anzi tale sistema riduce le prestazioni ottenibili in termini di throughput.

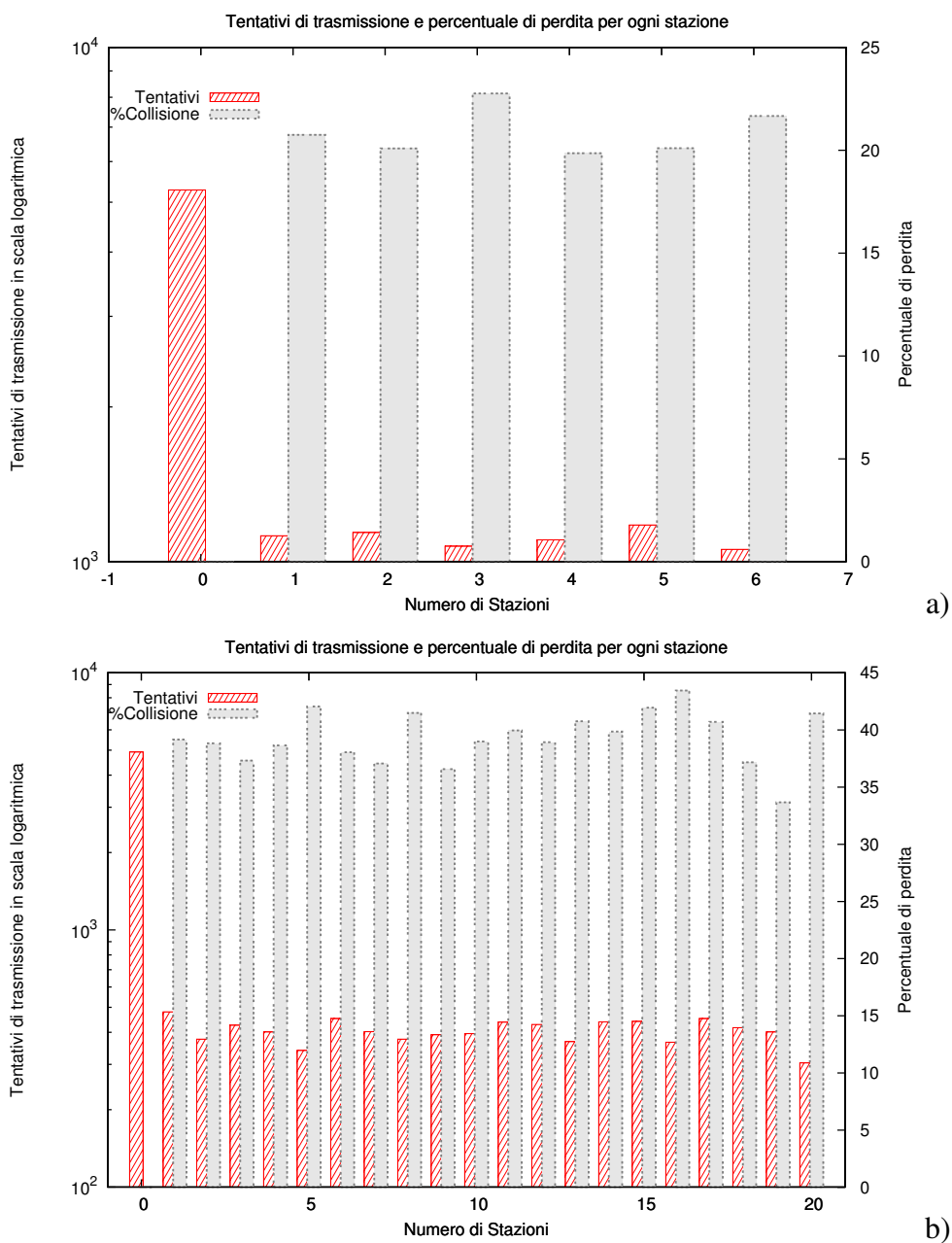
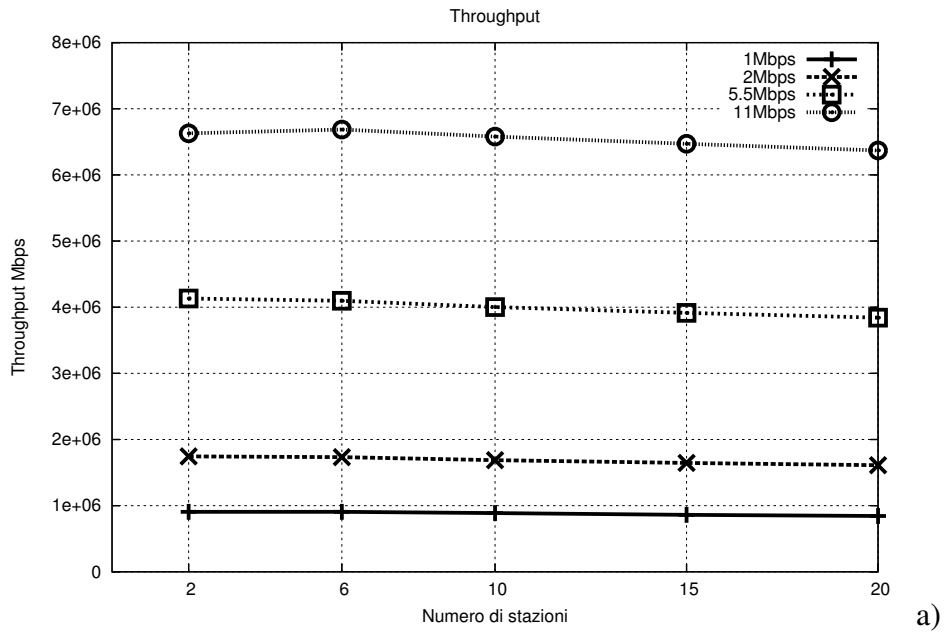
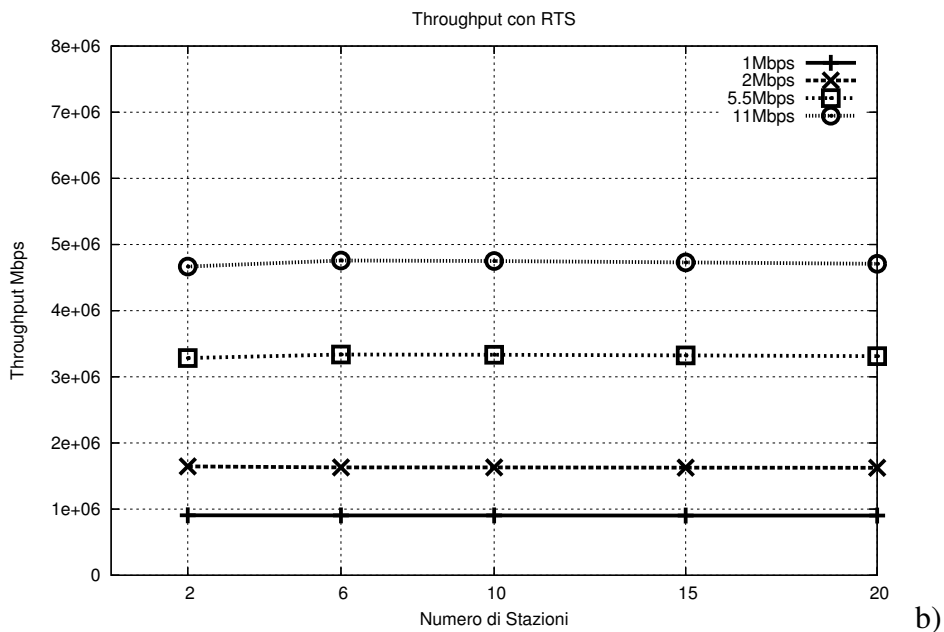


Figura 5.5. Numero di tentativi di accesso al canale e percentuale di pacchetti collisi, 6 stazioni (a) e 20 stazioni (b)



a)



b)

Figura 5.6. Throughput rete infrastrutturata con antenne omnidirezionali, senza (a) e con RTS/CTS (b)

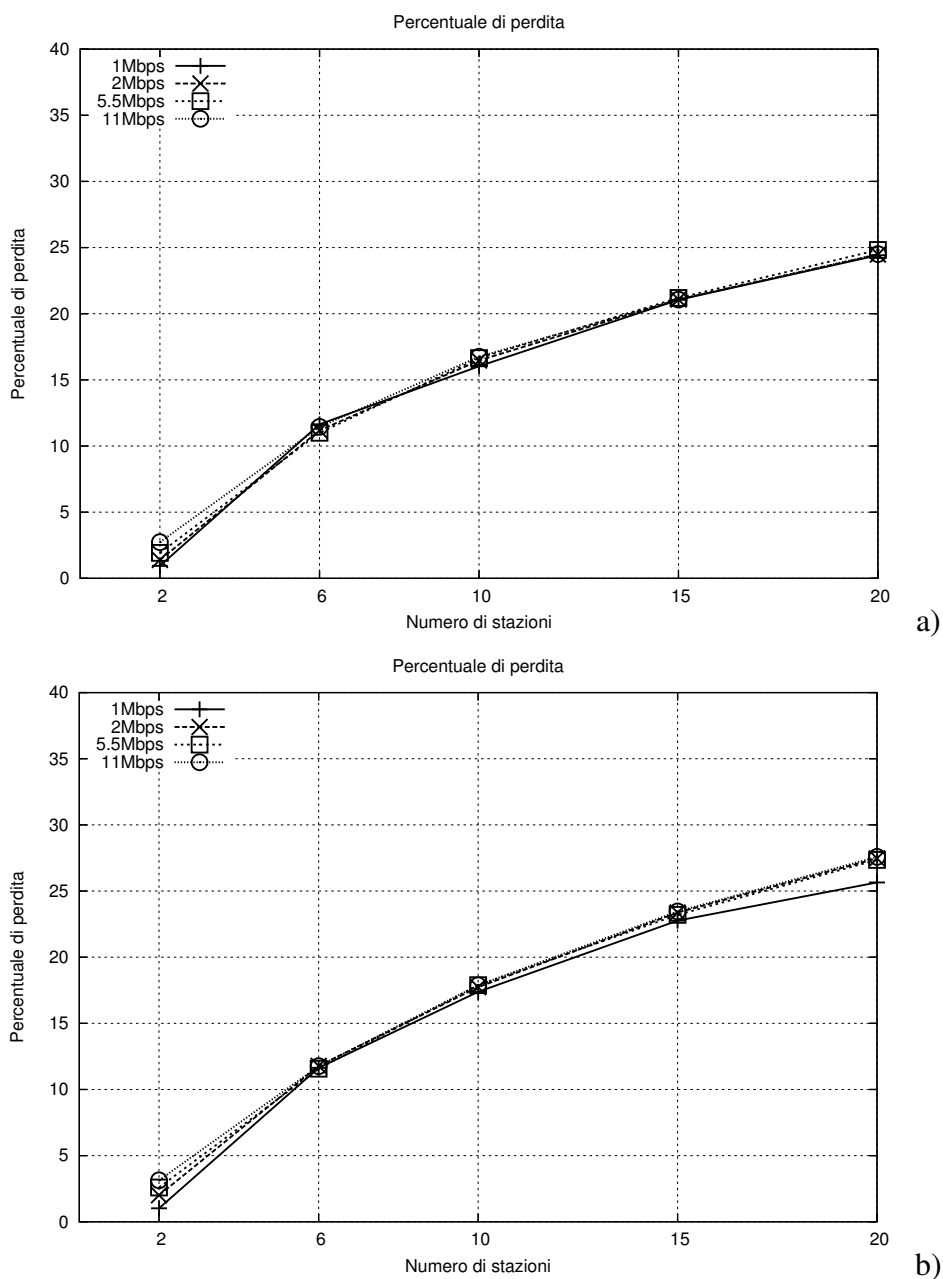


Figura 5.7. Percentuale di pacchetti collisi, senza (a) e con RTS/CTS (b)

5.2.2 Antenne *beamforming*

Nelle simulazione eseguite con antenne *beamforming* sono state utilizzate antenne con lobo di radiazione ideale di ampiezza pari a 120° e la disposizione topologica della rete è stata mantenuta costante rispetto al caso precedente.

Pur mantenendo una configurazione topologica che garantisce che tutte le stazioni presentino il medesimo livello di attenuazione rispetto all'accesspoint, l'utilizzo di antenne *beamforming*, seppur con un lobo di radiazione di 120° , genera ovviamente condizioni di hidden terminal. Questo comportamento è valutabile, in primo luogo, dall'analisi dei grafici relativi al comportamento delle singole stazioni riportati in Figura 5.8 (caso con 6 e 20 stazioni e velocità di 1 Mbps). Da tali grafici è osservabile che la percentuale di pacchetti collisi, in entrambe le configurazioni, è molto elevata e raggiunge picchi prossimi al 100%. Il notevole incremento di collisioni rispetto al caso di utilizzo di antenne omnidirezionali (Figura 5.5) è attribuibile al solo fenomeno di hidden terminal.

In Figura 5.9 sono rappresentati i grafici relativi all'andamento del throughput nel caso senza RTS/CTS (Figura 5.9a) e con RTS/CTS (Figura 5.9b). In Figura 5.9a, si può notare che per simulazioni eseguite con solo 2 stazioni i valori di throughput sono approssimativamente uguali a quelli ottenuti nel caso di utilizzo di antenne omnidirezionali (Figura 5.6a), in quanto, le due stazioni sono disposte sulla circonferenza in posizioni diametralmente opposte e pertanto non sono presenti fenomeni di hidden terminal. La variazioni di prestazioni è da considerarsi accettabile e giustificabile dal fatto che per ogni simulazione eseguita si introduce variabilità nei tempi di generazione dei pacchetti dati. Invece, la drastica riduzione del throughput, osservabile nel caso di simulazione eseguite con più di 2 stazione, è la naturale conseguenza dell'elevata percentuale di pacchetti collisi. In Figura 5.10a è riportata la rappresentazione dell'andamento della percentuale di pacchetti collisi che conferma la condizione per cui, in simulazioni con più di due terminali, la presenza di hidden terminal provoca un notevole incremento di collisioni. Le prestazioni ottenute dalla rete, in questa configurazione, non risultano tali da poter

garantire una comunicazione tra i vari nodi

In Figura 5.9b è, invece, rappresentato il throughput valutato solo sui pacchetti dati, ottenuto nel caso di utilizzo di handshake RTS/CTS. In questo caso, si può notare che il throughput ha un andamento costante all'aumentare del numero di stazioni, anche se presenta valori meno elevati rispetto al corrispettivo caso ottenuto con antenne omnidirezionali (Figura 5.6b). La variazione di throughput è giustificabile dal fatto che le collisioni dei pacchetti RTS/CTS sono incrementate rispetto al caso precedente, questo comportamento è osservabile dalla comparazione del grafico riportato in Figura 5.7b e quello riportato in Figura 5.10b che rappresentano rispettivamente l'andamento delle simulazioni nel caso di utilizzo di antenne omnidirezionali e *beamforming*. Pertanto utilizzando antenne *beamforming*, per ottenere prestazioni ragionevoli risulta indispensabile l'utilizzo di handshake RTS/CTS.

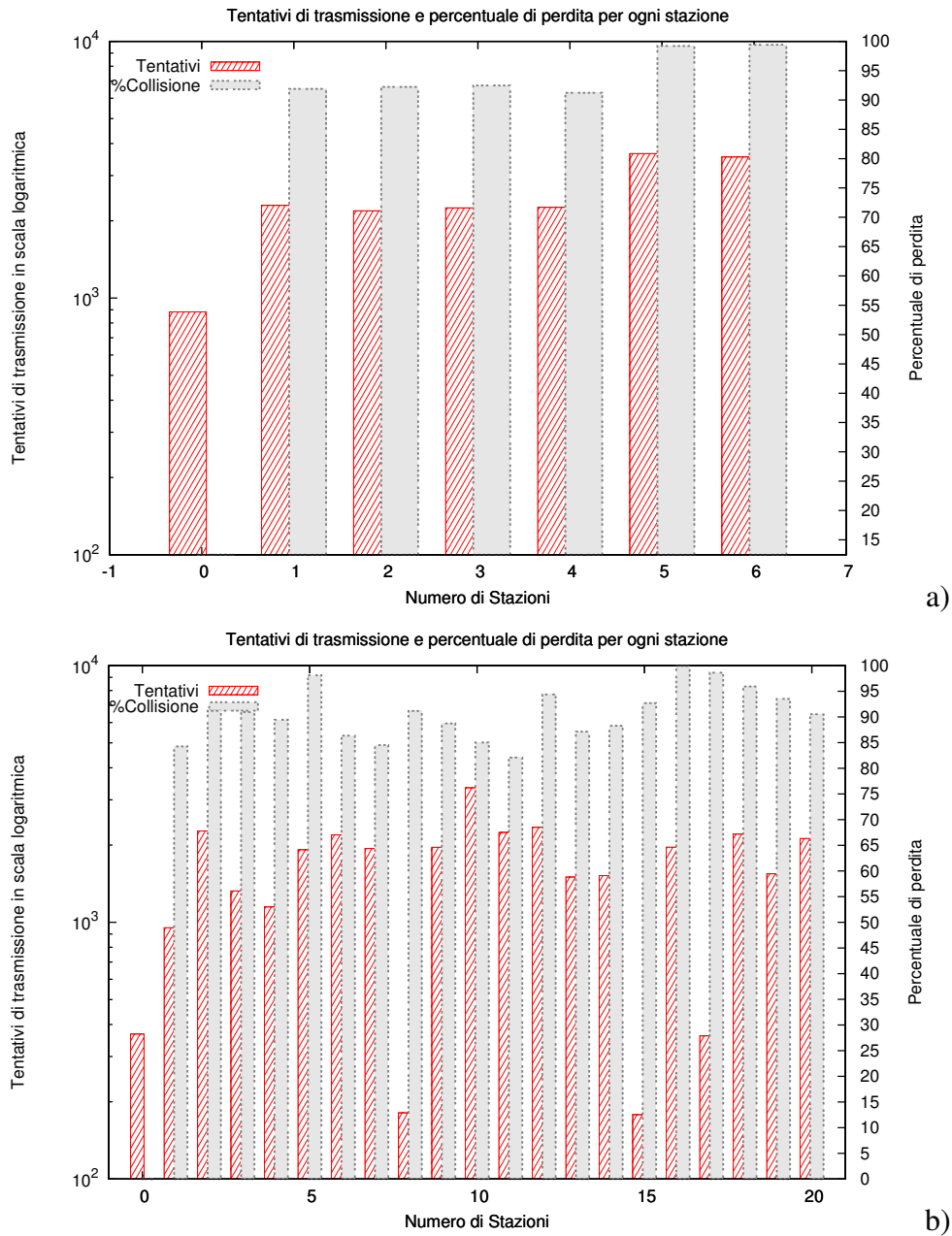


Figura 5.8. Numero di tentativi di accesso al canale e percentuale di pacchetti collisi, 6 stazioni (a) e 20 stazioni (b)

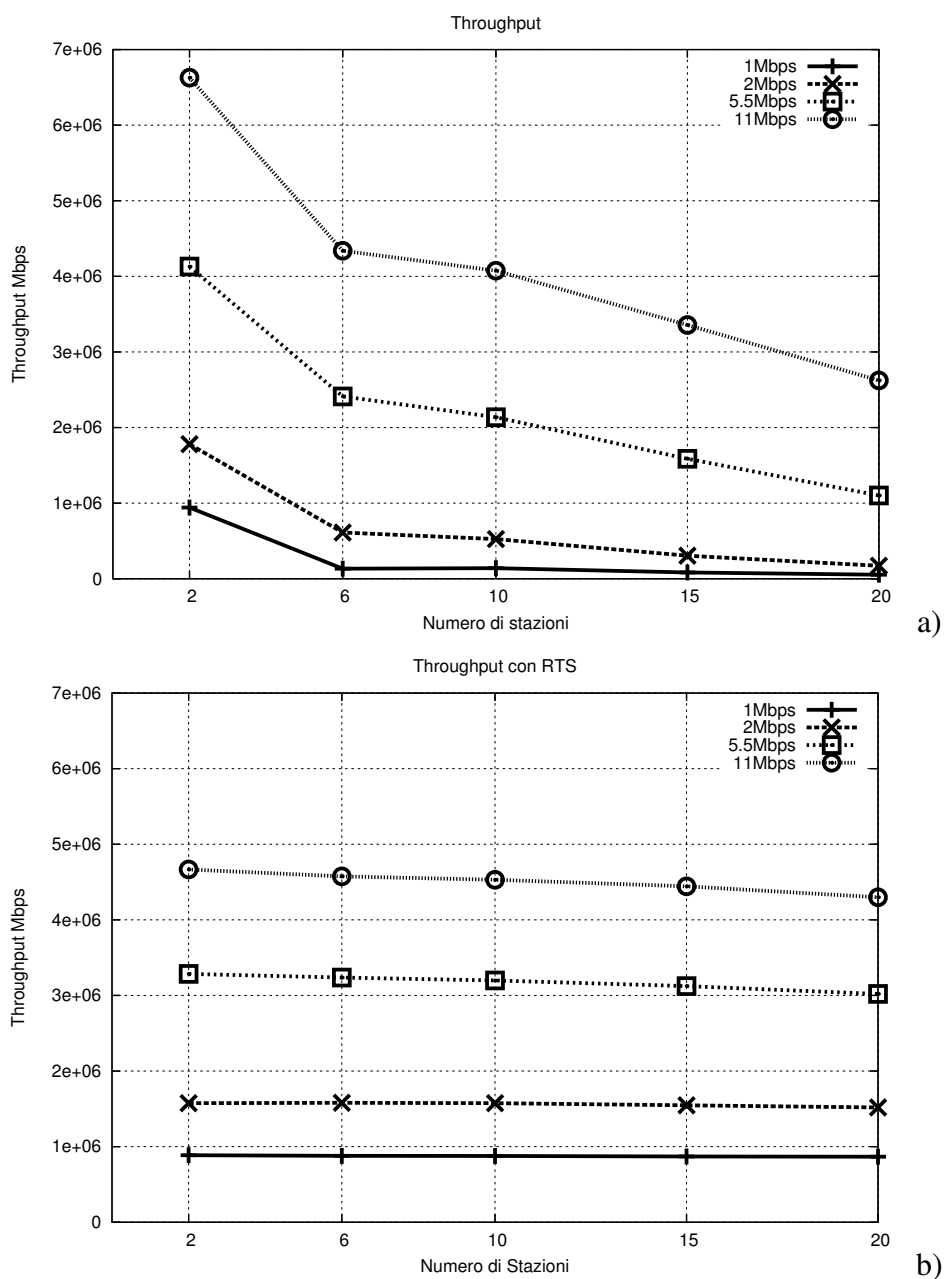


Figura 5.9. Throughput rete infrastrutturata con antenne *beamforming*, senza (a) e con RTS/CTS (b)

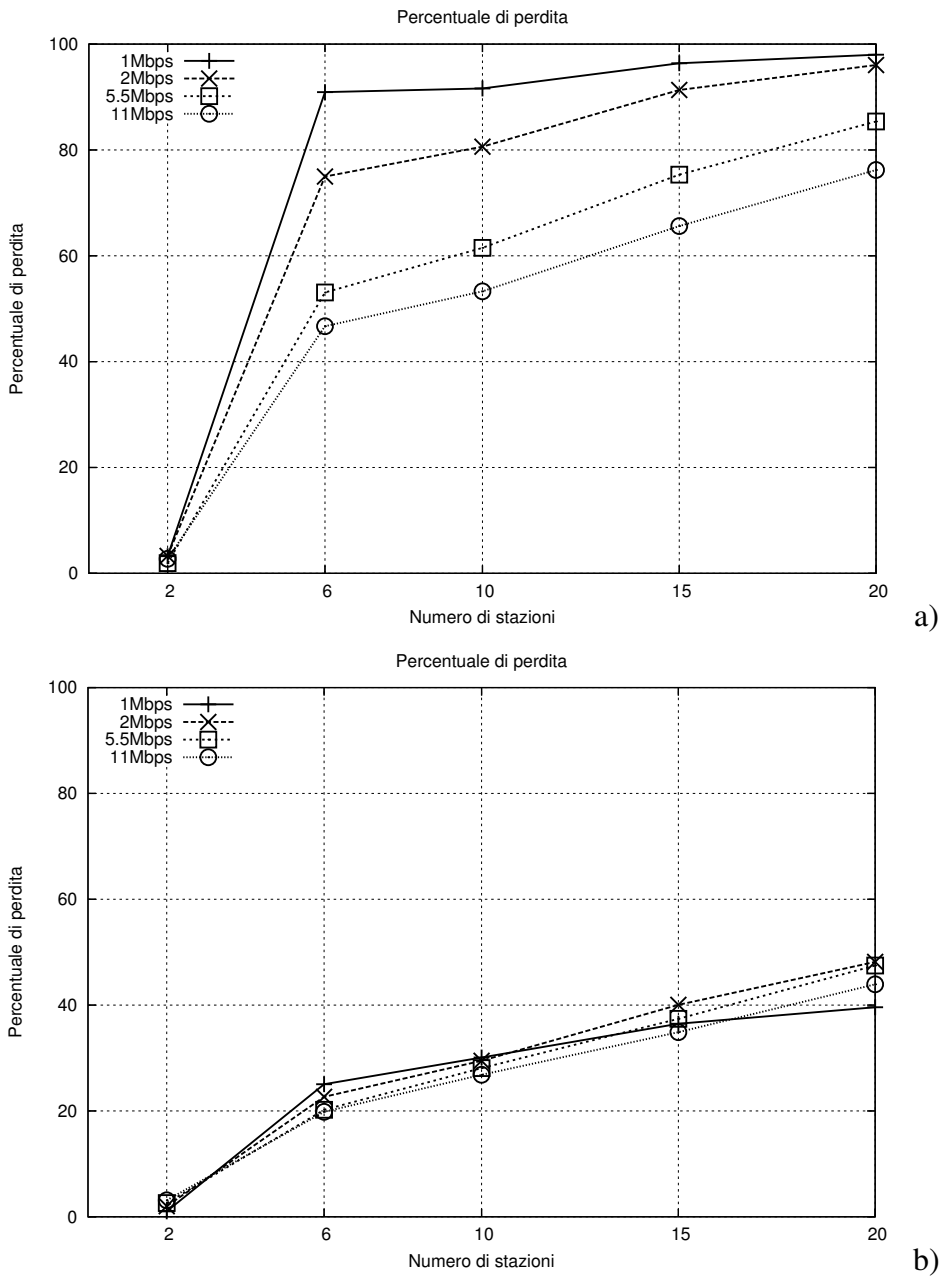


Figura 5.10. Percentuale di pacchetti collisi, senza (a) e con RTS/CTS (b)

5.2.3 Antenne *switchedbeam*

Sono state infine condotte ulteriori simulazioni utilizzando antenne intelligenti di tipo *switchedbeam*, con diagramma di radiazione ideale in cui ogni lobo ha un'ampiezza di 120° , in questo modo ogni antenna è formata da tre differenti facce. Inoltre, è stata mantenuta la medesima topologia di rete considerata nel caso di antenne omnidirezionali (v. sez. 5.2.1).

Anche in questo caso si propongono i risultati relativi a:

- comportamento delle singole stazioni (Figura 5.11);
- andamento del throughput (Figura 5.12);
- percentuale di pacchetti collisi (Figura 5.13).

Dall'analisi dei presenti grafici è possibile ricavare le medesime considerazioni fatte per il caso di antenne *beamforming* (v. sez. 5.2.2), in quanto non si introducono variabilità date dai diagrammi di radiazione poiché considerare questi come ideali provoca che il guadagno risulta costante su tutta l'apertura del lobo. La variabilità dei risultati ottenuti, rispetto a quelli analizzati per antenne *beamforming*, è invece riconducibile, oltre che alla casualità introdotta nelle simulazioni, alla problematica dei terminali hidden. Nel caso di antenne *beamforming* la massima radiazione corrispondeva infatti alla direttiva che congiunge la stazione con l'accesspoint, mentre nel caso di *switchedbeam* si ha solo la sicurezza che la linea virtuale che congiunge i due dispositivi interseca il lobo di radiazione dell'antenna. Questo comporta che una stazione, nelle due configurazioni, possa risultare hidden o meno rispetto ad una seconda stazione.

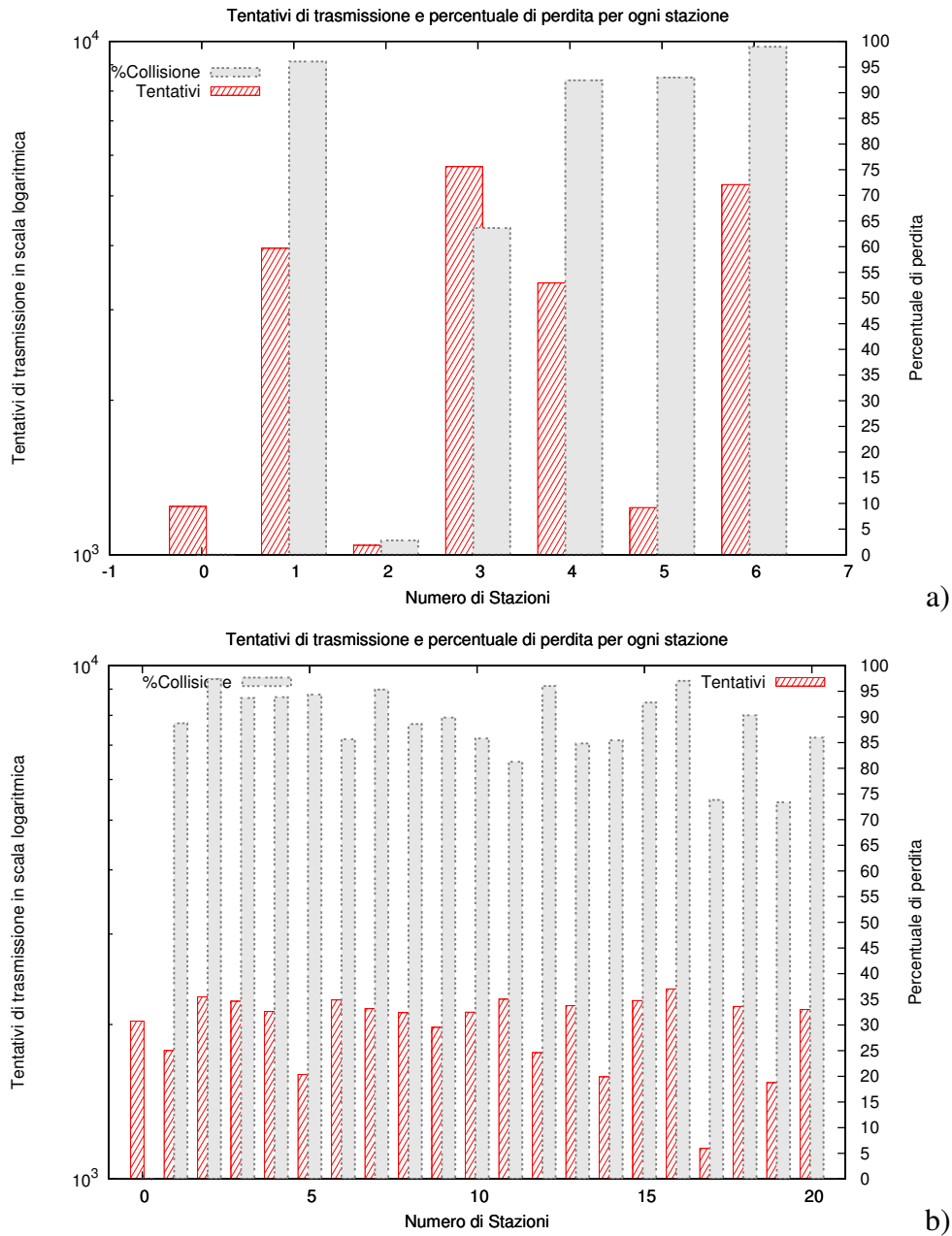


Figura 5.11. Numero di tentativi di accesso al canale e percentuale di pacchetti collisi, 6 stazioni (a) e 20 stazioni (b)

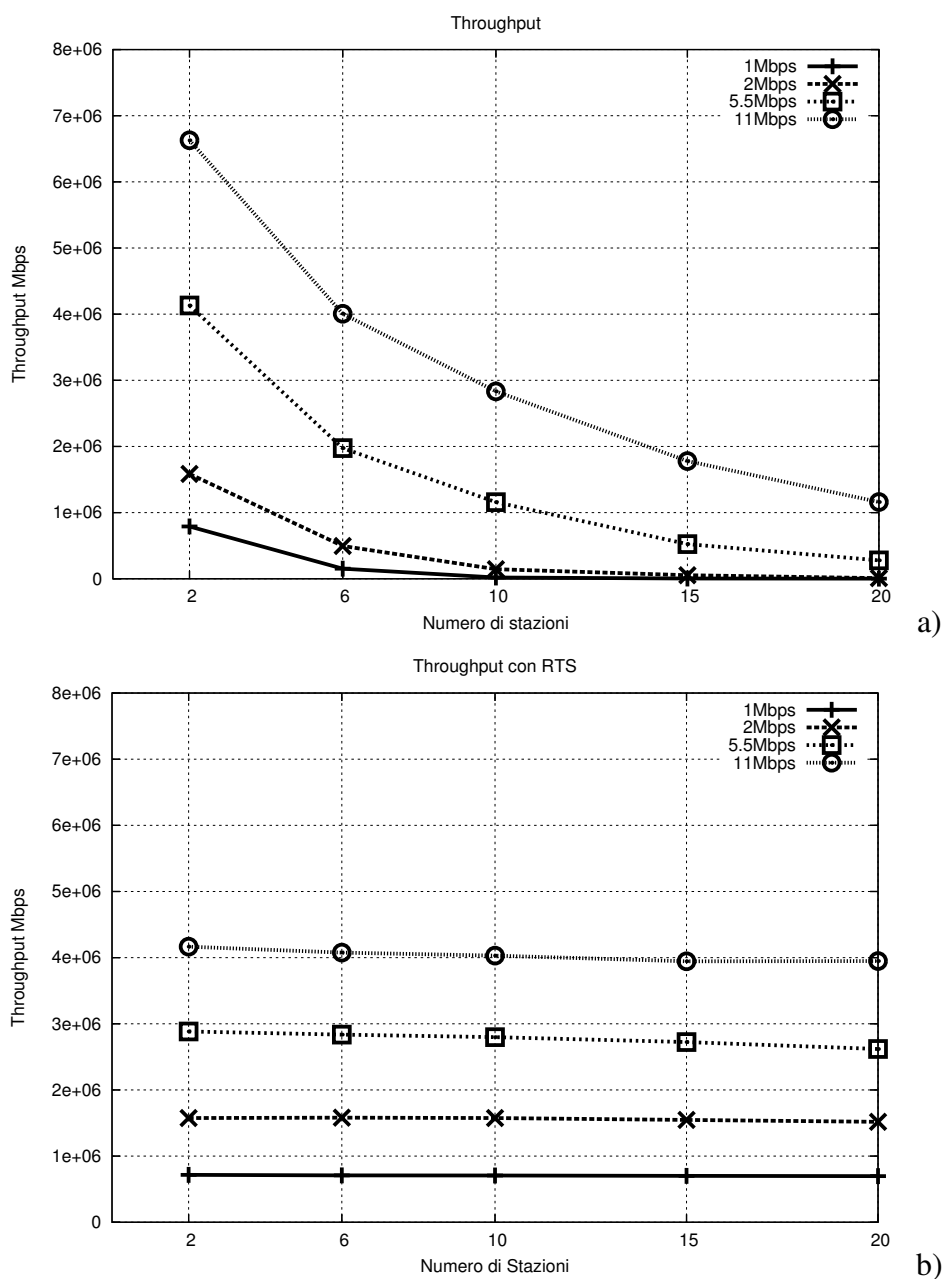


Figura 5.12. Throughput rete infrastrutturata con antenne *switchedbeami*, senza (a) e con RTS/CTS (b)

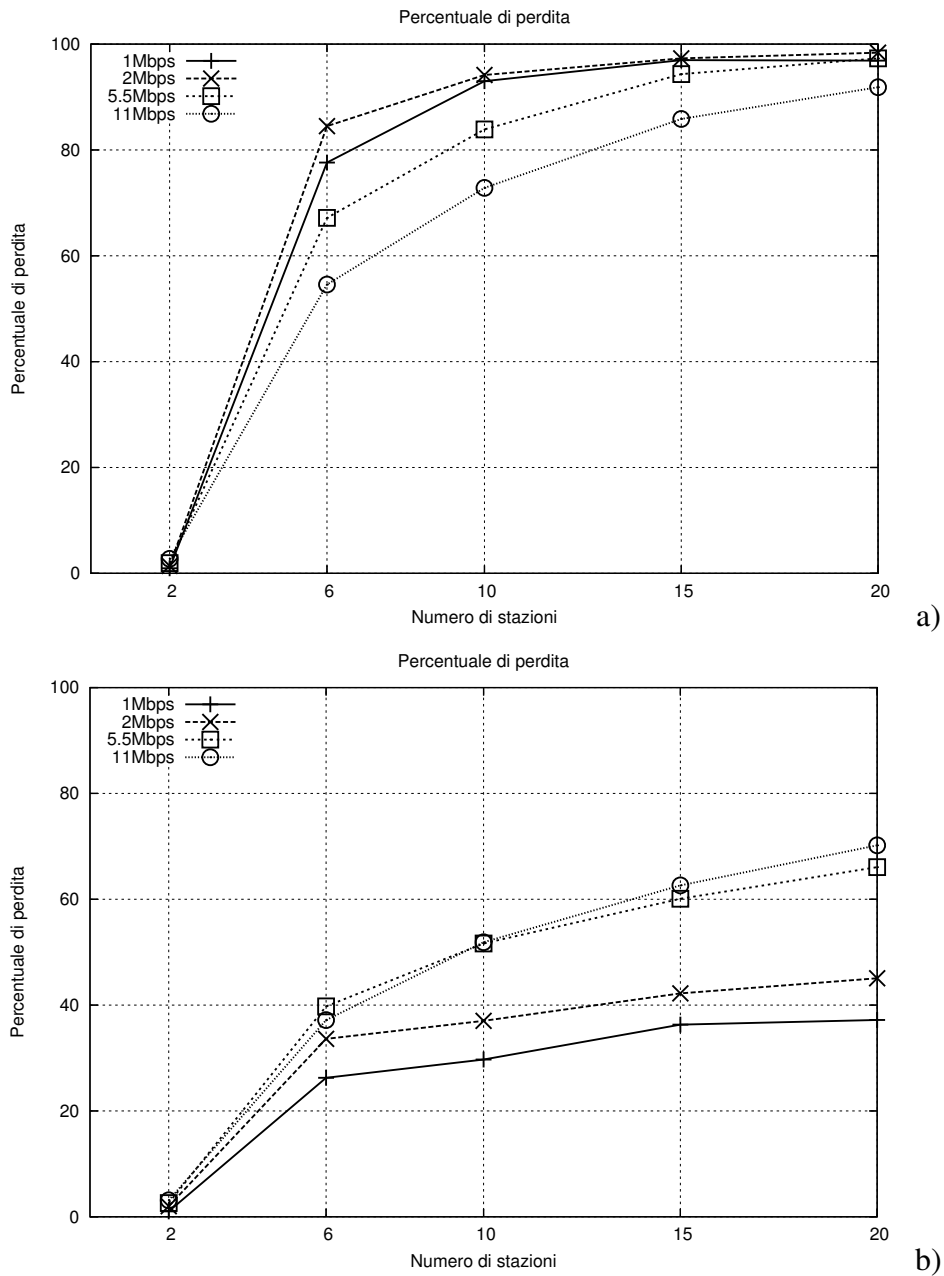


Figura 5.13. Percentuale di pacchetti collisi, senza (a) e con RTS/CTS (b)

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

La finalità di questo lavoro è di costruire uno strumento utile all'analisi delle prestazioni del protocollo IEEE 802.11 e di conseguenza delle WLAN che si basano su di esso.

Il primo passo è stata la definizione di un tool che permettesse di caratterizzare una rete wireless sia dal punto di vista topologico, sia per quanto riguarda le peculiarità delle singole stazioni e del canale trasmissivo. Si è puntato maggiormente sulla caratterizzazione delle stazioni ed in particolare sulla tipologia delle antenne utilizzate. Per fare questo sono state tenute in considerazione tutte le più recenti proposte, presentate in letteratura, per quanto riguarda l'incremento di prestazioni dal punto di vista di velocità di trasmissione e throughput, ottenibili dall'utilizzo di antenne intelligenti.

I risultati ottenuti, descritti nel Capitolo 5, sono da considerarsi come risultati di validazione di considerazioni fatte solo a livello teorico, ma fanno ben sperare nelle potenzialità di sviluppo del tool realizzato. Oltre ai risultati descritti sono state condotte ulteriori sessioni di simulazione per reti in configurazione infrastrutturata, utilizzando: disposizioni topologiche differenti, digrammi di radiazione con lobi di ampiezza maggiore e minore di 120° e un numero diverso di stazioni. I risultati ottenuti sono stati tutti comparabili con quelli esposti e hanno evidenziato il fatto che l'utilizzo di antenne direttive (intelligenti o meno) provoca l'incremento della presenza di hidden terminal e quindi risulta necessario utilizzare la metodologia di accesso al canale con handshake RTS/CTS per ottenere

prestazioni ragionevoli. Non è stato possibile valutare reti infrastrutturate con la presenza di più di un accesspoint in quanto, anche se l'estensione sviluppata permette questa configurazione, l'implementazione del livello MAC non dà la possibilità di effettuare più trasmissioni simultanee su canali differenti.

Lo sviluppo del sistema implementato non è infatti da considerarsi concluso, anzi, lo stato attuale rappresenta solo un ottimo punto di partenza. Si possono pertanto individuare diversi sviluppi futuri del simulatore in questione che possono essere schematizzati come:

1. sviluppo della caratterizzazione del canale con l'introduzione di valutazioni relative al SIR e di fenomeni di fading e multipath;
2. introduzione della mobilità delle stazioni che compongono la rete, fino alla valutazione dell'handover tra accesspoint e di roaming;
3. valutazione della velocità di trasmissione in funzione della distanza che intercorre tra terminali coinvolti nella comunicazione e del rumore presente sul canale;
4. modifica di parte del codice di WLAN Simulator per il supporto di reti con diverse BSS che utilizzano differenti frequenze di comunicazione, in modo tale da poter considerare il caso di trasmissioni simultanee su canali diversi;
5. valutazione dell'interferenza di co-canale per una più precisa valutazione dell'interferente.

Dato il futuro avvento dello standard 802.11n (si presume che diventerà tale negli ultimi mesi del 2006 o inizio 2007), infine si potranno prevedere le opportune modifiche del livello MAC per consentire simulazioni in grado di valutare le reali prestazioni di questo nuovo protocollo che preannuncia un sostanziale incremento della velocità di trasmissione.

Appendice A

Parametri d'ingresso del simulatore

Di seguito sono riportati i principali parametri necessari alla configurazione della simulazione. I parametri riportati in *italico* rappresentano i parametri, non presenti nel simulatore originale, ma che sono stati aggiunti per inizializzare le funzionalità dell'estensione sviluppata.

- *Do you want to use infrastructure mode?*: parametro utilizzato per abilitare o meno la configurazione di rete infrastrutturata (yes);
- *Do you want to use physical layer?*: parametro per abilitare o meno la caratterizzazione topologica della rete (yes);
- *Traffic Type: local (0), uplink (1), downlink (2)* ; definisce la direzione del traffico all'interno di una BSS (0);
- Number of stations: numero di stazioni da inserire nella rete (2);
- *Number of APs*: numero di accesspoint da inserire (1);
- MAC Header Length: lunghezza in bit del header dei pacchetti di dati (272);
- ACK Length: lunghezza in bit del pacchetto ACK (112);
- Phy Header Length: lunghezza in bit del header relativo ai pacchetti di comunicazione (128 bit) ;

- Phy Bit Rate: velocità di trasmissione dei pacchetti di segnalazione in Mbps (1);
- Data Bit Rate: velocità di trasmissione dei pacchetti di dati in Mbps (1);
- Hidden probability: parametro per assegnare probabilità di avere terminali hidden (0);
- RTS Threshold (on MSDU Length): parametro per utilizzare o meno RTS/CTS (off);
- DIFS: durata del tempo di DIFS (0);
- SIFS: durata del tempo di SIFS (10);
- Slot time: durata di uno slot (20);
- MSDU length: lunghezza in bit del pacchetto dati (8184);
- Rate for Single Station: rate di generazione per ogni singola stazione (in kbps);
- Contention Window min: dimensione minima della contention window (32);
- Contention Window max: dimensione massima della contention window (1024);
- Transient Phase: durata del transiente in secondi (5);
- Duration of One Batch: durata di un singolo batch in secondi (10);
- Number of Simulation Batches: numero di batch (10);
- *Value of SEED for random number generator*: valore del seme per il generatore di numeri casuali;
- *Name of configuration file for MS*: nome del file di configurazione delle singole stazioni;
- *Name of configuration file for accesspoint*: nome del file di configurazione degli accesspoint;

-
- *Name of configuration file for antennas*: nome del file di configurazione per le antenne;
 - *Attenuation Coefficient alpha*: valore di attenuazione del canale (2);
 - *Value of x*: dimensione orizzontale della cella in metri (100);
 - *Value of y*: dimensione verticale della cella in metri (100);
 - *Gap between two elements in the same row*: dimensione per la suddivisione verticale della cella, in metri (0,5);
 - *Gap between two elements in the same column*: dimensione per la suddivisione orizzontale della cella (0,5);

Non è necessario inserire a mano i precedenti parametri per ogni simulazione, è infatti possibile creare dei file di testo contenenti i valori da assegnare ad ogni parametro e passare tali file in input al simulatore. In particolare l'avvio della simulazione avviene utilizzando il seguente comando:

```
./wls < NomeFileInput
```

Dove `./wls` è il programma eseguibile del simulatore, `<` il comando per passare in ingresso il file contenente i parametri e `NomeFileInput` il nome del file di input.

Il simulatore genera più file di output, in formato ASCII, contenenti i risultati di ogni singola simulazione, sono stati pertanto scritti alcuni script in grado di utilizzare i file generati dal simulatore al fine di originare nuovi file in formato testo contenenti i dati necessari per produrre grafici attraverso l'utilizzo del tool gnuplot.

Sono stati inoltre utilizzati script in fase di invocazione del simulatore in modo da poter invocare lo stesso sequenzialmente, su diverse configurazioni di ingresso definite nei file di input passati come parametri.

Bibliografia

- [1] IEEE, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications,” IEEE Std. 802.11, 1999.
- [2] IEEE, “Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz Band,” IEEE Std. 802.11b, 1999.
- [3] IEEE, “Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band,” IEEE Std. 802.11a, 1999.
- [4] IEEE, “Amendment to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band,” IEEE Std. 802.11g, 2003.
- [5] IEEE, “Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 8: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements,” IEEE Std. 802.11e, 2005.
- [6] Giuseppe Bianchi, “Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 18, No. 3, pagine 535 – 547, Marzo 2000.
- [7] Bezalel Gavish, Yoram Ofek, and Roger M. Whitaker, “Uplink analysis with mobile devices using directional-smart antennas”, *International Journal of Mobile Network Design and Innovation 2005*, Vol. 1, pagine , 2005.

- [8] TGn Sync “TGn Sync Complete Proposal Presentation”, 11-04-0888-11-000n-tgnsync-proposal-presentation.ppt, www.tgnsync.org, Marzo 2005.
- [9] WWiSE “WWiSE IEEE 802.11n Proposal Presentation”, 11-05-0150-02-000n-WWiSE-Proposal-Complete Presentation.ppt, www.wwise.org, Marzo 2005.
- [10] Netgear white paper, “MIMO and Smart Antenna Techniques for 802.11a/b/g”, *Netgear white paper*, <http://www.netgear.com>, 2005.
- [11] Ram Ramanathan, “On the performance of ad hoc networks with beamforming antennas,” *MobiHoc '01: Proceedings of the 2nd ACM international symposium on Mobile ad hoc networking & computing*, ACM Press, pagine 95–105, 2001.
- [12] Martin Burkhart, Pascal von Rickenbach, Roger Wattenhofer, Aaron Zollinger, “Does Topology Control Reduce Interference?” *MobiHoc 2004 Conf*, ACM Press, 2004.
- [13] Dhananjay Lal, Vivek Jain, Qing-An Zeng, Dharma P. Agrawal, “Performance Evaluation of Medium Access Control for Multiple-Beam Antenna Nodes in a Wireless Lan” *IEEE journal Transaction on parallel and distributed system*, Vol. 15, 2004.
- [14] Young-Bae Ko, Shankarkumar, V. Vaidya, N.H., “Medium access control protocols using directional antennas in ad hoc networks” *IEEE, NFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Vol. 1, pagine 13–21, Marzo 2000.
- [15] Jain V., Gupta A., Lal D. Agrawal, D.P, “IEEE 802.11 DCF based MAC protocols for multiple beam antennas and their limitations”, *Mobile Adhoc and Sensor Systems Conference, 2005. IEEE International Conference on*, pagine 467–474, Novembre 2005.
- [16] M. Wennström, J. Strandell, T. Öberg, E. Lindskog, and A. Rydberg, “Auto-Calibrating Adaptive Array for Mobile Telecommunications”, *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions*, pagine 729–736, Agosto 2000.
- [17] Christian Bettstetter, Christian Hartmann, and Clemens Moser, “How Does

- Randomized Beamforming Improve the Connectivity of Ad Hoc Networks?” *Communications IEEE International Conference*, Vol. 5, pagine 3380–3385, Maggio 2005.
- [18] Daniel Aguayo, John Bicket, Sanjit Biswas, Glenn Judd, and Robert Morris, “Link-level measurements from an 802.11b mesh network”, *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, ACM Press, Vol. 34, pagine 121–132, 2004.
- [19] Robert Vilzmann, Christian Bettstetter, Daniel Medina, Christian Hartmann, “Hop distances and flooding in wireless multihop networks with randomized beamforming”, *MSWiM '05: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems*, ACM Press, pagine 20–27, 2005.
- [20] Jemai J., Piesiewicz R., Kurner, T., “Calibration of an indoor radio propagation prediction model at 2.4 GHz by measurements of the IEEE 802.11b preamble”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 1, pagine 111–115, giugno 2005.
- [21] Zhu Han, K.J. Ray Liu, “Adaptive SINR Threshold Allocation for Joint Power Control and Beamforming Over Wireless Networks”, *IEEE Vehicular Technology Conference*, Vol. 3, pagine 1548–1552, ottobre 2001.
- [22] Daniel Aguayo, John Bicket, Sanjit Biswas, Glenn Judd, and Robert Morris, “Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part I: Performance Improvement, Feasibility, and System Considerations” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 85, pagine 1031–1060, 1997.
- [23] S.L. Preston, D.V. Thiel, T.A. Steven, G. O’Keefe, and Jun Wei Lu, “Base-station tracking in mobile communication using a parasitic antenna array”, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 46, pagine 841–844, 1998.
- [24] ns-2, network simulator (ver. 2) from Lawrence Berkeley National Laboratory, URL <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [25] OPNET Technologies, Inc., URL <http://www.opnet.com/services/university/>.

BIBLIOGRAFIA

- [26] OMNeT++ Discrete Event Simulation System, URL
<http://www.omnetpp.org/>.
- [27] GloMoSim, Global Mobile Information System Simulation Library, URL
<http://pcl.cs.ucla.edu/projects/glomosim/>.
- [28] QualNet, Scalable Networks: The fast alternative for network simulation, URL
<http://www.scalable-networks.com/>.

Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento a Paola che mi ha aiutato, sostenuto e incoraggiato in questi anni di università. Grazie di cuore ai miei genitori che hanno creduto in me, che mi hanno sempre dimostrato fiducia e mi hanno permesso di arrivare fin qui. Un pensiero particolare ai miei nonni che mi hanno sempre dimostrato affetto. Come non ringraziare inoltre tutti i miei amici che sono stati sempre presenti!!

Un sentito grazie al prof. Renato lo Cigno per la disponibilità dimostratami e a Danilo che mi ha aiutato durante tutto il periodo di tesi dando sempre il consiglio giusto e facendosi sempre trovare disponibile.