

Indice

Indice	1
Elenco delle figure	6
Elenco delle tabelle	11
Introduzione	12
1 La propagazione del segnale nel mezzo fisico	17
1.1 Propagazione delle onde radio	18
1.1.1 Riflessione	18
Riflessione su un materiale dielettrico	19
Riflessione su un conduttore perfetto	20
1.1.2 Diffrazione	21
Le zone di Fresnel	21
1.1.3 Diffusione	22
1.2 Large-scale e small-scale fading	23
1.2.1 Modelli di propagazione in Large-scale	23
Modello di propagazione in Free space	24
Modello di riflessione a due raggi	25
Modello di diffrazione a lama di coltello	26
Log-distance Path Loss Model	26
Log-normal Shadowing	27
1.2.2 Small-scale fading	28
2 Lo Standard 802.11	31
2.1 L'architettura	31
2.2 I servizi	32
2.3 Il livello MAC	33
2.3.1 Coesistenza tra DCF e PCF	35
2.3.2 Frammentazione/Deframmentazione	35

2.3.3	DCF	36
2.3.3.1	Meccanismo di Carrier-sense	36
2.3.3.2	Meccanismo di Carrier-sense con RTS/CTS	36
2.3.3.3	Intervalli Temporal	37
2.3.3.4	Procedura di Random Backoff	38
2.3.3.5	Procedura di Riscontro di Ricezione	40
2.4	Sincronizzazione e Power Save Mode	40
2.5	Il Frame 802.11	41
2.5.1	Formato di un generico frame	41
2.5.2	Il frame RTS	42
2.5.3	Il frame CTS	43
2.5.4	Il frame ACK	43
2.5.5	Il frame Data	44
2.5.6	Il frame di tipo management	45
2.6	Il Livello Fisico	45
2.6.1	DSSS nello standard 802.11	47
2.6.2	Il Livello Fisico in 802.11b	49
2.6.3	Il Livello Fisico in 802.11g	50
3	Il Network Time Protocol	53
3.1	La configurazione della rete	55
3.2	Modello di implementazione	55
3.3	Modalità di interazione	57
3.4	NTP Data Format	58
3.5	Eventi elaborati	59
3.5.1	Transmit Procedure	59
3.5.2	Receive Procedure	60
3.5.3	Packet Procedure	61
3.5.4	Clock-Update Procedure	63
3.6	Il programma ntpd	63
3.6.1	ntpd in pratica	65
4	Hardware e software	67
4.1	Hardware	67
	I portatili	67
	Le schede wireless	68
4.2	Il software utilizzato	69
	Trasmettitore	69
	Ricevitore	71
4.3	Metodo di analisi	75

5	Misura dell'affidabilità delle schede wireless	77
5.1	Operazioni Wireless Extention	77
5.2	Operazioni wlan-ng	79
5.3	Valutazioni delle prestazioni	79
5.3.1	Confronto CNet – CNet	80
5.3.2	Confronto D-Link – D-Link	86
5.3.3	Conclusioni	89
6	Massimo Throughput Teorico	91
6.1	Calcolo del Massimo Throughput Teorico	93
6.2	802.11b	94
6.2.1	CSMA/CA	94
6.2.1.1	Long Preamble	97
6.2.1.2	Short Preamble	98
6.2.2	RTS/CTS	100
6.2.2.1	Long Preamble	101
6.2.2.2	Short Preamble	103
6.2.3	Analisi del TMT per 802.11b	104
6.2.3.1	CSMA/CA: Confronto tra Long e Short Pre- amble	104
6.2.3.2	RTS/CTS: Confronto tra Long e Short Preamble	105
6.2.4	Analisi dell'efficienza di banda	106
6.3	802.11g	109
6.3.1	CSMA/CA	110
6.3.1.1	Long Slot Time	111
6.3.1.2	Short Slot Time	113
6.3.2	RTS/CTS	114
6.3.2.1	Long Slot Time	116
6.3.2.2	Short Slot Time	117
6.3.3	Analisi del TMT per 802.11g	119
6.3.3.1	CSMA/CA: Confronto tra Long e Short Slot Time	119
6.3.3.2	RTS/CTS: Confronto tra Long e Short Slot Time	119
6.3.4	Analisi dell'efficienza di banda per 802.11g	120
6.4	Le prove sperimentali	123
6.4.1	Prove sperimentali per CSMA/CA	124
6.4.2	Prove sperimentali per RTS/CTS	126
6.5	Conclusioni	128

7	Ritardo dovuto alle ritrasmissioni	129
7.1	Ritardo teorico intodotto dalle ritrasmissioni	129
7.2	Il risultato sperimentale	131
8	Misure	133
8.1	Le misure eseguite in ambiente esterno	134
	Analisi utilizzata per caratterizzare la PDF asso-	
	ciata alle misure	135
8.1.1	La perdita di frame	135
	11 Mb/s	136
	5.5 Mb/s	137
	2 Mb/s	138
	1 Mb/s	139
	Conclusioni	140
8.1.2	Il deterioramento del livello del segnale ricevuto	140
	11 Mb/s	141
	5.5 Mb/s	141
	2 Mb/s	142
	1 Mb/s	143
8.1.3	Analisi del livello di segnale rilevato al ricevitore	144
	Conclusioni	148
8.1.4	La corrispondenza tra perdita di frame e livello di segnale	
	al ricevitore	149
	11 Mb/s	149
	5.5 Mb/s	150
	2 Mb/s	151
	1 Mb/s	152
	Conclusioni	153
8.2	Le misure eseguite in ambiente interno	155
8.2.1	La perdita di frame	156
	Trasmissione eseguita con le sole schede CNet	157
	Trasmissione eseguita con le sole schede D-Link	159
8.2.2	Analisi dei treni di frame	160
8.2.3	L'autocorrelazione della perdita di frame	162
	Modello di Gilbert–Elliot	162
	Conclusioni	164
	Conclusioni	165
	Sviluppi Futuri	168

A	La cattura di alcuni frame significativi	171
	Frame Data	172
	ACK	172
	RTS	173
	CTS	173
	Beacon	173
	ProbeRequest	174
B	La modulazione CCK a 5.5 Mb/s e 11 Mb/s	177
	5.5 Mb/s	177
	11 Mb/s	178
C	Istallare NTP	179
	Bibliografia	181

Elenco delle figure

1.1	Comportamento di un'onda incidente su una superficie piana. . . .	18
1.2	Riflessione di un'onda elettromagnetica su un materiale dielettrico.	20
1.3	I confini delle zone di Fresnel costituiti da cerchi concentrici nel caso in cui tra le due antenne non sono presenti ostacoli.	21
1.4	Le zone di Fresnel con un ostacolo tra ricevitore e trasmettitore sono delimitate da "famiglie" di elissoidi.	22
1.5	Geometria del modello di riflessione a due raggi.	25
1.6	Fluttuazioni dovute a small-scale fading e large-scale fading nel caso in cui il ricevitore effettua piccoli spostamenti.	29
1.7	Esempio di effetto Doppler.	29
2.1	Schema dell'architettura fornita dallo standard 802.11.	32
2.2	Architettura del Livello MAC di 802.11.	34
2.3	Metodo base di accesso al mezzo trasmissivo.	34
2.4	Metodo di accesso al mezzo trasmissivo con utilizzo di RTS/CTS. .	37
2.5	Andamento della crescita del parametro CW.	39
2.6	Procedura di Backoff.	39
2.7	Formato generale di un frame MAC.	42
2.8	Formato del frame RTS.	43
2.9	Formato del frame CTS.	43
2.10	Formato del frame ACK.	44
2.11	Formato del frame data.	44
2.12	Formato di un generico frame di tipo management.	45
2.13	Esempio di utilizzo della sequenza di Barker.	48
2.14	Formato del frame PLCP.	48
2.15	Formato del frame PLCP con preambolo lungo.	49
2.16	Formato del frame PLCP con preambolo corto.	50
2.17	Formato del frame PPDU.	51
3.1	NTP: Modello Implementativo.	56
3.2	NTP: Intestazione del messaggio NTP.	58

3.3	NTP: Calcolo di Roundtrip Dealy e Clock Offset.	62
3.4	NTP: Comportamento di ntpd per la sincronizzazione di un client con un server di riferimento.	65
4.1	Esempio di file generato dal programma trasmettitore.	70
4.2	Esempio di file generato dal programma ricevitore.	72
4.3	Esempio di traccia generata a video dal programma ricevitore. . . .	74
5.1	Test CNet-CNet: Misure eseguite a 60 metri a 11 Mb/s mante- nendo fissi i computer in trasmissione, <i>pettiroso</i> , e in ricezione, <i>passero</i> , e invertendo le schede.	81
5.2	Test CNet-CNet: Misure eseguite a 60 metri a 11 Mb/s introducen- do martin e per le sole schede CNET1 e CNET3; le frecce indicano la perdita percentuale media ottenuta per ciascuna misura.	82
5.3	Misure eseguite a 60 metri a 11 Mb/s per testare il comportamento delle due D-Link nelle stesse condizioni di test delle CNet.	83
5.4	Test Cnet-D-Link: Misure eseguite a 60 metri a 11 Mb/s relazio- nando una D-Link con le CNet prima in ricezione e poi in trasmissione. .	84
5.5	Test CNet-CNet: Misure eseguite a 80 metri a 11 Mb/s mantenendo fissi il portatile in trasmissione, <i>pettiroso</i> , e quello in ricezione, <i>passero</i> , e invertendo le tre schede CNet.	85
5.6	Test D-Link-D-Link: Misure eseguite a 10 metri a 54 Mb/s uti- lizzando sia IBM, <i>pettiroso</i> e <i>passero</i> , che ACER, <i>martin</i> , e in- vertendo sia le schede che i portatili; le frecce indicano la perdita percentuale media ottenuta per ciascuna misura.	87
5.7	Test D-Link-D-Link: Misure eseguite a 10 metri a 54 Mb/s con tre IBM, <i>pettiroso</i> , <i>passero</i> e <i>cardellino</i> incrociando schede e computer; le frecce indicano la perdita percentuale media ottenuta per ciascuna misura.	88
6.1	Modello OSI.	91
6.2	Intestazioni a differenti sublayer di IEEE 802.11.	92
6.3	Diagramma di tempo per CSMA/CA e RTS/CTS.	93
6.4	802.11b: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di CSMA/CA con Long Preamble.	98
6.5	802.11b: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di CSMA/CA con Short Preamble.	100
6.6	802.11b: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di RTS/CTS con Long Preamble.	102
6.7	802.11b: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di RTS/CTS con Short Preamble.	104

6.8	802.11b: CSMA/CA: Confronto tra Long e Short Preamble.	105
6.9	802.11b: CSMA/CA: Differenza tra Long e Short Preamble.	105
6.10	802.11b: RTS/CTS: Confronto tra Long e Short Preamble.	105
6.11	802.11b: RTS/CTS: Differenza tra Long e Short Preamble.	105
6.12	802.11b: CSMA/CA: Efficienza con utilizzo di Long Preamble. . . .	107
6.13	802.11b: CSMA/CA: Efficienza con utilizzo di Short Preamble. . .	107
6.14	802.11b: CSMA/CA: Differenza dell'efficienza di banda con utilizzo di Long e Short Preamble.	107
6.15	802.11b: RTS/CTS: Efficienza con utilizzo di Long Preamble. . . .	108
6.16	802.11b: RTS/CTS: Efficienza con utilizzo di Short Preamble. . . .	108
6.17	802.11b: RTS/CTS: Differenza dell'efficienza di banda con utilizzo di Long e Short Preamble.	108
6.18	Formato del frame PPDU.	109
6.19	802.11g: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di CSMA/CA con Long Slot Time.	113
6.20	802.11g: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di CSMA/CA con Short Slot Time.	115
6.21	802.11g: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di RTS/CTS con Long Slot Time.	117
6.22	802.11g: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di RTS/CTS con Short Slot Time.	119
6.23	802.11g: CSMA/CA: Differenza di prestazione tra Long e Short Slot Time.	121
6.24	802.11g: RTS/CTS: Differenza di prestazione tra Long e Short Slot Time.	121
6.25	802.11g: CSMA/CA: Efficienza con utilizzo di Long Slot Time. . .	121
6.26	802.11g: CSMA/CA: Efficienza con utilizzo di Short Slot Time. . .	121
6.27	802.11g: CSMA/CA: Efficienza di banda della differenza tra l'uti- lizzo di Long e Short Slot Time.	121
6.28	802.11g: RTS/CTS: Efficienza con utilizzo di Long Slot Time . . .	122
6.29	802.11g: RTS/CTS: Efficienza con utilizzo di Short Slot Time . . .	122
6.30	802.11g: RTS/CTS: Differenza dell'efficienza di banda con utilizzo di Long e Short Slot Time	122
6.31	802.11b: CSMA/CA: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 11 Mb/s.	124
6.32	802.11b: CSMA/CA: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 5.5 Mb/s.	124
6.33	802.11b: CSMA/CA: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 2 Mb/s.	125

6.34	802.11b: CSMA/CA: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 1 Mb/s.	125
6.35	802.11b: RTS/CTS: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 11 Mb/s.	126
6.36	802.11b: RTS/CTS: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 5.5 Mb/s.	126
6.37	802.11b: RTS/CTS: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 2 Mb/s.	127
6.38	802.11b: RTS/CTS: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 1 Mb/s.	127
7.1	Il ritardo ottenuto sperimentalmente introdotto dalle ritrasmissioni in cui sono indicati gli intervalli teorici di ritardo sino alla terza ritrasmissione.	131
8.1	Percentuale di perdita di frame ottenuta in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 11 Mb/s.	136
8.2	Percentuale di perdita di frame ottenuta in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 5.5 Mb/s.	137
8.3	Percentuale di perdita di frame ottenuta in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 2 Mb/s.	138
8.4	Percentuale di perdita di frame ottenuta in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 1 Mb/s.	139
8.5	Livello di segnale registrato in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 11 Mb/s.	141
8.6	Livello di segnale registrato in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 5.5 Mb/s.	142
8.7	Livello di segnale registrato in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 2 Mb/s.	143
8.8	Livello di segnale registrato in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 1 Mb/s.	144
8.9	Livello del segnale registrato per ogni velocità utilizzata.	145
8.10	Andamento generale del livello di segnale registrato al ricevitore in scala lineare.	146
8.11	Andamento generale del livello di segnale registrato al ricevitore in scala logaritmica.	147
8.12	Andamento del livello di segnale registrato al ricevitore.	148
8.13	Applicazione del modello a due raggi all'andamento del livello di segnale registrato al ricevitore.	149
8.14	Relazione tra percentuale di perdita di frame e livello del segnale rilevato al ricevitore in una trasmissione eseguita a 11 Mb/s.	150

8.15	Relazione tra percentuale di perdita di frame e livello del segnale rilevato al ricevitore in una trasmissione eseguita a 5.5 Mb/s.	151
8.16	Relazione tra percentuale di perdita di frame e livello del segnale rilevato al ricevitore in una trasmissione eseguita a 2 Mb/s.	152
8.17	Relazione tra percentuale di perdita di frame e livello del segnale rilevato al ricevitore in una trasmissione eseguita a 1 Mb/s.	153
8.18	Descrizione dell'ambiente utilizzato per le misure interne.	155
8.19	Andamento della perdita di frame in una prima trasmissione a 11 Mb/s utilizzando le schede CNet in ambiente interno.	157
8.20	Andamento della perdita di frame in una seconda trasmissione a 11 Mb/s utilizzando le schede CNet in ambiente interno.	158
8.21	Andamento della perdita di frame in una prima trasmissione a 11 Mb/s utilizzando le schede D-Link in ambiente interno.	159
8.22	Andamento della perdita di frame in una seconda trasmissione a 11 Mb/s utilizzando le schede D-Link in ambiente interno.	160
8.23	Densità di probabilità per la distribuzione dei treni di frame ricevuti correttamente.	161
8.24	Densità di probabilità per la distribuzione dei treni di frame persi. .	162
8.25	Il modello di Gilbert–Elliot.	163
8.26	Autocorrelazione del modello di Gilbert–Elliot.	163
8.27	Autocorrelazione della perdita di frame.	164
A.1	Contenuto del corpo di un frame di tipo Beacon.	174
A.2	Contenuto del corpo di un frame di tipo Probe Request.	175

Elenco delle tabelle

1.1	Valori tipici per l'esponente di path-loss n	27
2.1	Servizi offerti alle STA 802.11.	32
2.2	Contenuto dei campi indirizzo.	44
2.3	Frequency channel plan.	47
2.4	Parametri dipendenti dal valore della velocità di trasmissione	51
3.1	NTP: Modalità di interazione con un generico peer.	61
5.1	Riassunto operazioni WE.	78
5.2	Operazioni wlan-ng verificate.	79
5.3	Distinzione delle schede CNet in base all'indirizzo MAC.	80
5.4	Distinzione delle schede D-Link in base all'indirizzo MAC.	86
6.1	802.11b: $\delta_{long}^{CSMA/CA}$	98
6.2	802.11b: $\delta_{short}^{CSMA/CA}$	99
6.3	802.11b: $\delta_{long}^{RTS/CTS}$	102
6.4	802.11b: $\delta_{short}^{RTS/CTS}$	104
6.5	802.11g: $\Delta_{long}^{CSMA/CA}$	112
6.6	802.11g: $\Delta_{short}^{CSMA/CA}$	114
6.7	802.11g: $\Delta_{long}^{RTS/CTS}$	116
6.8	802.11g: $\Delta_{short}^{RTS/CTS}$	118
8.1	Relazione tra la distanza relativa al cambiamento di perdita di fra- me e livello di segnale rilevato al ricevitore in modo dipendente dalla velocità.	153
8.2	Guadagno teorico e sperimentale dovuto alla codifica utilizzata da ogni velocità	154
8.3	Etichette associate agli archi del modello di Gilbert–Elliot.	163
2.5	Codifica DQPSK.	177

ELENCO DELLE TABELLE

2.6	Codifica CCK per 5.5 Mb/s.	178
2.7	Codifica QPSK.	178

Introduzione

Il rapido sviluppo delle tecnologie rivolte alla comunicazione wireless a cui si è assistito in questi ultimi anni ha fornito una valida alternativa alla rete cablata.

Inoltre, il diffondersi di dispositivi mobili quali computer palmari, notebook così come i telefoni cellulari, hanno mostrato come l'utente abbia l'esigenza di accedere in qualsiasi momento alla rete e comunicare indipendentemente dal luogo in cui si trova.

In una rete wireless, in cui non vengono utilizzati fili per lo scambio di informazioni, i dati vengono trasmessi tramite onde, radio o infrarosse, direttamente attraverso l'etere aggiungendo quindi ai vantaggi delle normali reti cablate, come la condivisione di risorse, la possibilità, da parte dell'utente, di muoversi liberamente nello spazio.

Ma proprio la caratteristica delle reti wireless di non far viaggiare le onde radio, e quindi le informazioni, in un ambiente protetto come il filo, sottopone tali onde alle interferenze provenienti da altri dispositivi mobili, o più semplicemente dalle apparecchiature elettroniche circostanti, e ai cambiamenti del canale dovuto al movimento dell'utente o al movimento degli oggetti che circondano l'utente stesso.

L'obiettivo di questa tesi è proprio quello di valutare, tramite una campagna di misure realizzata con una rete wireless ad hoc formata da due portatili comunicanti unicamente tramite schede PCMCIA wireless, quanto il canale influisca sulla qualità di ricezione delle informazioni andando ad analizzare la perdita di frame riscontrata e il deterioramento del segnale ricevuto al variare della distanza posta tra trasmettitore e ricevitore e, inoltre, analizzando le fluttuazioni che si hanno sul canale per tempi sufficientemente lunghi in un tipico ambiente di lavoro.

La tesi qui presentata può essere considerata divisa in due fasi: è stato necessario infatti, prima di iniziare la campagna di misure vera e propria, analizzare aspetti che spaziano dalla propagazione delle onde radio nel mezzo fisico alla sincronizzazione dei dispositivi utilizzati.

Nel primo capitolo vengono presentati i fenomeni base che influenzano la propagazione del segnale in un sistema mobile di comunicazione quali riflessione, diffrazione e diffusione e le due tipologie di attenuazione, con la descrizione di alcuni modelli tra i più utilizzati in letteratura, da cui i sistemi mobili sono affetti: *large scale fading*, dovuta al movimento su grandi scale e condizionata dall'aspetto del terreno e, più in generale, dell'ambiente posto tra trasmettitore e ricevitore, e *small scale fading*, indirizzata ai cambiamenti del segnale dovuti a piccole variazioni, in spazio così come in tempo, tra antenna trasmittente e antenna ricevente.

Nel secondo capitolo viene presentato lo standard 802.11 con una panoramica sulla sua architettura e i servizi che vengono messi a disposizione dei dispositivi mobili sia in reti con infrastruttura, in cui i dispositivi mobili possono utilizzare anche la rete cablata e tutte le trasmissioni sono coordinate da un'unico dispositivo fisso preposto a questo compito, che in reti ad hoc, in cui la rete è unicamente costituita da dispositivi mobili che comunicano direttamente tra di loro.

Per la realizzazione della campagna di misure, è stata utilizzata una rete ad hoc formata da due soli dispositivi mobili. Per questo motivo viene analizzata più dettagliatamente la modalità di accesso al mezzo utilizzata da questa tipologia di rete, il *Distributed Coordination Function*, basato su politica di accesso al mezzo *carrier sense multiple access with collision avoidance* (CSMA/CA), mediante il quale un dispositivo che vuole iniziare una trasmissione deve ascoltare il canale per accertarsi che non vi siano già trasmissioni in corso, con una tecnica opzionale di tipo RTS/CTS in cui vengono scambiati alcuni frame di controllo per individuare eventuali nodi nascosti.

Dopo una descrizione di alcuni frame che vengono poi utilizzati nei capitoli successivi di questa tesi, e di cui è stato possibile eseguire la cattura mostrata in appendice, vengono mostrate le differenze più rilevanti tra 802.11, 802.11b e 802.11g, supportati dalle schede utilizzate nella campagna di misure.

Nel terzo capitolo viene descritto il *Network Time Protocol*, utilizzato sino dagli anni '80 per sincronizzare gli orologi di computer appartenenti ad una rete utilizzando un insieme di client e di server.

Tutti i portatili a nostra disposizione sono stati sincronizzati mediante l'utilizzo di questo protocollo, utilizzando una connessione dedicata con un portatile preposto a server; questo ha permesso di ridurre l'errore di cui sono affette le misure eseguite dovuto allo scostamento degli orologi dei portatili utilizzati.

Il quarto capitolo descrive le caratteristiche tecniche dei computer e delle schede wireless a nostra disposizione e viene presentato il software utilizzato per la realizzazione della campagna di misure.

Nel quinto capitolo vengono presentati i risultati ottenuti da misure preliminari eseguite per verificare l'affidabilità delle schede da noi utilizzate, ripetendo le misure con tutti i computer a nostra disposizione per escludere eventuali differenze rilevate dovute all'hardware dei portatili.

Il sesto capitolo è incentrato sullo studio del massimo throughput teorico raggiungibile a seconda della politica di accesso al mezzo utilizzata calcolato per lo standard 802.11b, per il quale si è differenziato il caso di preambolo del *Physical Layer Convergence Protocol* lungo o corto, e 802.11g, per il quale si è distinta la scelta di utilizzare *SlotTime* lungo o corto.

Per verificare se il throughput generato dalle nostre schede seguisse l'andamento teorico, sono state realizzate misure considerando tutte le velocità messe a disposizione dallo standard 802.11b differenziando la politica di accesso al mezzo utilizzata.

Nel settimo capitolo viene presentata la stima, accompagnata da alcuni risultati sperimentali, del ritardo di cui sono affette le trasmissioni, dovuto al tempo di elaborazione delle informazioni al trasmettitore e al ricevitore così come a eventuali ritrasmissioni eseguite quando non viene ricevuto il frame ACK di riscontro entro lo scadere del timer ad esso associato, nell'ipotesi semplificata in cui l'accesso al canale vada sempre a buon fine e non sia quindi presente il ritardo addizionale introdotto in questo caso.

Infine, nell'ottavo capitolo, viene descritta la campagna di misure eseguita in un ambiente esterno quanto più possibile lontano da fonti di interferenza per rilevare la perdita di frame e il deterioramento del segnale rilevato al ricevitore in modo dipendente unicamente dalla distanza frapposta tra antenna ricevente e antenna trasmittente per ogni velocità consentita dallo standard 802.11b.

Inoltre vengono presentati alcuni risultati ottenuti eseguendo le misure in un tipico ambiente di lavoro per determinare, mantenendo fissa la configurazione di misura, quanto influisca il cambiamento dell'ambiente esterno su trasmissioni radio. In tale ambiente sono state estratte statistiche riguardanti la lunghezza e la frequenza con cui appaiono treni di frame ricevuti correttamente e di frame andati persi rilevati in misure sufficientemente lunghe.

Capitolo 1

La propagazione del segnale nel mezzo fisico

Il canale in cui vengono propagate le onde radio, che permettono il trasporto di informazioni da un dispositivo sorgente a uno o più dispositivi destinatari, introduce delle limitazioni alle prestazioni dei sistemi wireless.

I sistemi radio fissi sono costruiti in modo tale da non avere ostacoli che causano l'attenuazione durante il cammino delle onde radio. Questa situazione, nota come *line_of_sight* (LOS), è impossibile da mantenere per sistemi mobili, come le reti wireless, in quanto vengono solitamente utilizzati in ambienti urbani nei quali sono presenti molti oggetti e superfici riflettenti che possono causare una variazione della potenza del segnale. Inoltre gli oggetti presenti nell'ambiente possono oscurare l'antenna ricevente, situazione nota come *no_line_of_sight*.

I modelli sviluppati per la propagazione delle onde radio si sono focalizzati su due aspetti principali dando quindi origine a due tipologie di modelli:

- modelli di propagazione che studiano la determinazione della potenza media del segnale ricevuto ad una generica distanza tra trasmettitore e ricevitore, utile per determinare l'area di copertura del trasmettitore stesso; tali modelli sono detti *large-scale propagation model* in quanto cercano di caratterizzare la potenza del segnale su grandi distanze;
- modelli di propagazione che studiano le fluttuazioni della potenza del segnale ricevuto per distanze molto piccole (qualche lunghezza d'onda) o tempi molto brevi (dell'ordine di secondi) noti come *small-scale propagation model*.

In questo capitolo vengono presentati i fenomeni che condizionano la propagazione delle onde radio e l'attenuazione che si ha considerando grandi distanze o meno.

1.1 Propagazione delle onde radio

I fenomeni base che condizionano la propagazione del segnale in un sistema mobile di comunicazione sono riflessione, diffrazione e diffusione. In un ambiente urbano, come già detto, non è garantita la situazione di LOS tra trasmettitore e ricevitore e la presenza di costruzioni causa l'attenuazione del segnale ricevuto dovuto alla diffrazione. A causa di questo fenomeno, le onde elettromagnetiche viaggiano su cammini di diverse lunghezze causando appunto l'attenuazione del segnale e la perdita di potenza man mano che la distanza tra trasmettitore e ricevitore aumenta.

1.1.1 Riflessione

Si ha riflessione quando un'onda radio si propaga attraverso un mezzo e colpisce un altro mezzo con proprietà elettriche differenti. In questo caso l'onda viene in parte riflessa e in parte trasmessa.

Consideriamo, in riferimento alla figura 1.1, un'onda piana che si propaga nel mezzo (1) nella direzione del vettore u_i .

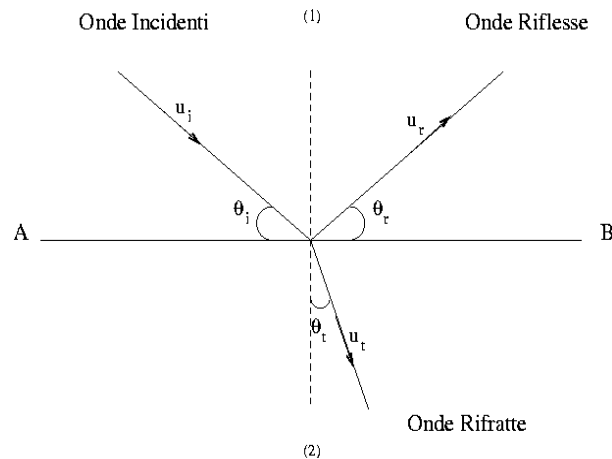


Figura 1.1: Comportamento di un'onda incidente su una superficie piana.

Dati sperimentali indicano che, quando l'onda raggiunge la superficie piana AB che separa il mezzo (1) dal mezzo (2), un'onda è trasmessa nel secondo

mezzo e un'altra onda piana è riflessa indietro nel mezzo (1); queste sono rispettivamente le onde *rifratte* e *riflesse*. Gli angoli θ_i , θ_r , θ_t , che i raggi formano con la normale alla superficie, sono legati dalle seguenti leggi verificate sperimentalmente:

1. le direzioni di incidenza, rifrazione e riflessione giacciono tutte in uno stesso piano normale alla superficie di separazione dei due mezzi;
2. l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione; cioè

$$\theta_i = \theta_r$$
3. il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e il seno dell'angolo di rifrazione è costante, *legge di Snell*.

Se il fronte d'onda incide su un materiale dielettrico perfetto, parte dell'energia dell'onda è trasmessa nel secondo mezzo e parte viene riflessa indietro nel primo mezzo.

Se il secondo mezzo è un conduttore perfetto allora l'intera energia incidente è riflessa indietro nel primo mezzo senza perdita di energia.

L'intensità del campo elettrico delle onde riflesse e trasmesse può essere relazionato all'onda incidente nel mezzo di origine tramite il *coefficiente di riflessione*¹ di *Fresnel* (Γ).

Riflessione su un materiale dielettrico In figura 1.2 viene mostrato un esempio di riflessione con angolo di incidenza θ_i tra due materiali dielettrici.

Come si può vedere parte dell'energia viene riflessa nel primo mezzo con un angolo θ_r e parte viene trasmessa (*rifratta*) nel secondo mezzo con un angolo θ_t . In figura gli indici i , r e t si riferiscono ai campi elettrico e magnetico rispettivamente incidente, riflesso e trasmesso; i parametri ε_1 , μ_1 , σ_1 e ε_2 , μ_2 , σ_2 rappresentano permittività, permeabilità e conduttanza² dei due mezzi coinvolti.

¹Il *coefficiente di riflessione* è una funzione delle proprietà del materiale e generalmente dipende dalla polarizzazione dell'onda, cioè dalla presenza istantanea delle componenti del campo elettrico in direzione ortogonale al fronte d'onda, dall'angolo di incidenza e dalla frequenza dell'onda stessa.

²*Permittività, permeabilità e conduttanza* sono quantità adimensionali che caratterizzano le proprietà elettriche e magnetiche del materiale a cui si riferiscono.

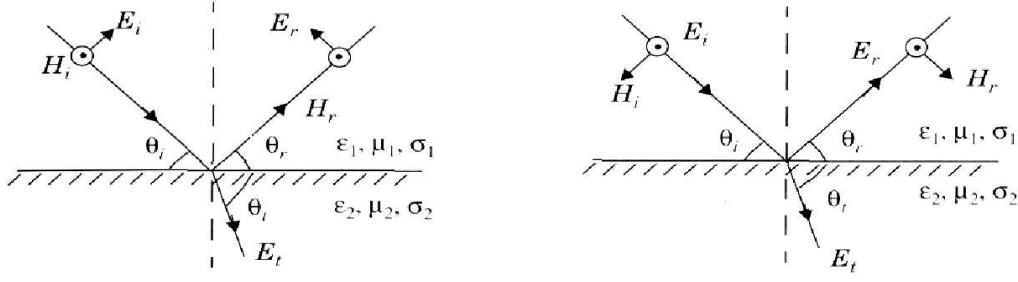


Figura 1.2: Riflessione di un'onda elettromagnetica su un materiale dielettrico.

La riflessione dipende dalla direzione di polarizzazione del campo elettrico e in figura 1.2 sono mostrati i due casi: a destra la polarizzazione del campo elettrico è perpendicolare al piano di incidenza³, a sinistra la polarizzazione del campo elettrico è parallela al piano di incidenza.

I coefficienti di riflessione nei due casi sono dati da

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_t - \eta_1 \sin \theta_i}{\eta_2 \sin \theta_t + \eta_1 \sin \theta_i} \quad (1.1)$$

$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_r}{E_i} = \frac{\eta_2 \sin \theta_i - \eta_1 \sin \theta_t}{\eta_2 \sin \theta_i + \eta_1 \sin \theta_t} \quad (1.2)$$

dove η_i è l'impedenza dell' i -esimo mezzo, nel nostro caso i è pari a 1 e 2, ed è dato da $\sqrt{\frac{\mu_i}{\epsilon_i}}$, ossia il rapporto tra campo elettrico e campo magnetico per un'onda piana uniforme nel particolare mezzo i . Da queste equazioni si ha che [1] $E_r = \Gamma E_i$ e $E_t = (1 + \Gamma) E_i$ in quanto, per la legge di Snell, $\theta_i = \theta_r$.

Riflessione su un conduttore perfetto L'energia elettromagnetica non può attraversare un conduttore perfetto, così, quando un'onda piana incide su un materiale di tal genere, tutta la sua energia viene riflessa.

Sia nel caso in cui la polarizzazione del campo elettrico giace nel piano di incidenza sia nel caso in cui sia ad esso perpendicolare, l'angolo del raggio incidente deve essere uguale all'angolo del raggio riflesso ma nel primo caso $E_i = E_r$ mentre nel secondo $E_i = -E_r$.

Da ciò si ha che, per un conduttore perfetto i coefficienti di riflessione sono dati da $\Gamma_{\perp} = 1$ e $\Gamma_{\parallel} = -1$, senza cioè tener conto dell'angolo di incidenza.

³Il *piano di incidenza* è definito come quel piano che contiene i raggi di incidenza, riflesso e trasmesso.

1.1.2 Diffrazione

Il fenomeno della diffrazione permette la propagazione dei segnali radio sulla superficie curva della Terra, oltre l'orizzonte e oltre i vari ostacoli che può incontrare. Anche nel caso in cui la potenza del segnale ricevuto decresce rapidamente quando il trasmettitore si muove all'interno di regioni così dette in ombra, il segnale generato dalla diffrazione è sufficientemente potente da produrre un segnale utile.

La diffrazione può essere spiegata mediante il principio di Huygen, che afferma che tutti i punti appartenenti ad un fronte d'onda possono essere considerati come sorgenti di nuove onde; tali onde si combinano per produrre un nuovo fronte che si propaga nella stessa direzione del primo; è questo secondo fronte d'onda che permette la propagazione del segnale nelle regioni in ombra.

Le zone di Fresnel Mediante le zone di Fresnel l'attenuazione dovuta a diffrazione viene messa in relazione alla differenza di cammino che le onde devono compiere per aggirare un ostacolo posto tra trasmettitore e ricevitore.

Le zone di Fresnel rappresentano regioni successive in cui le onde secondarie devono percorrere, per raggiungere il ricevitore dal trasmettitore, una distanza maggiore di $n\frac{\lambda}{2}$ rispetto al cammino lungo la LOS.

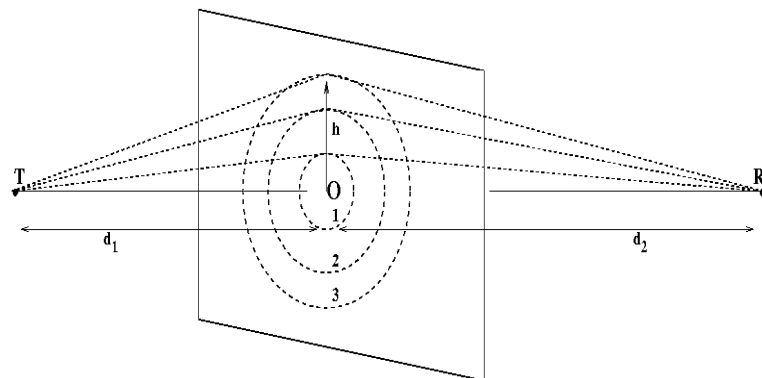


Figura 1.3: I confini delle zone di Fresnel costituiti da cerchi concentrici nel caso in cui tra le due antenne non sono presenti ostacoli.

In figura 1.3 è mostrato un piano posto tra trasmettitore e ricevitore: i cerchi concentrici rappresentano le zone di Fresnel generate dalla trasmissione tra i due dispositivi.

Il susseguirsi di queste zone ha l'effetto di fornire un'interferenza distruttiva e costruttiva al segnale finale. Il raggio della n -esima zona di Fresnel è denotato con r_n ed è dato da

$$r_n = \sqrt{\frac{n\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

dove λ è la lunghezza d'onda del segnale trasmesso e d_1 e d_2 sono la distanza delle due antenne dal piano.

La differenza tra il cammino diretto, lungo cioè la LOS, e il cammino rifratto che attraversa ogni cerchio è $n\frac{\lambda}{2}$, dove n è un valore intero; per esempio, per il cammino che attraversa il cerchio più piccolo, che corrisponde a $n = 1$, tale differenza è pari a $\frac{\lambda}{2}$. I raggi dei cerchi che delimitano le zone di Fresnel dipendono dal punto in cui è posto il piano, così le zone avranno raggio massimo nel punto centrale tra i due dispositivi e tali raggi si andranno a rimpicciolire se il piano è mosso tra trasmettitore e ricevitore.

Nei sistemi di comunicazione mobili l'attenuazione per diffrazione è dovuta agli ostacoli che incontrano le onde secondarie sul loro percorso; tali ostacoli fanno sì che solo una parte dell'energia trasmessa riesca a propagarsi intorno ad un oggetto.

Come si può vedere in figura 1.4 un ostacolo può bloccare il cammino di propagazione e tra trasmettitore e ricevitore si va costruire una “famiglia” di elissoidi, che rappresentano le zone di Fresnel, in cui il trasmettitore e il ricevitore sono posti sui fuochi dei vari elissoidi.

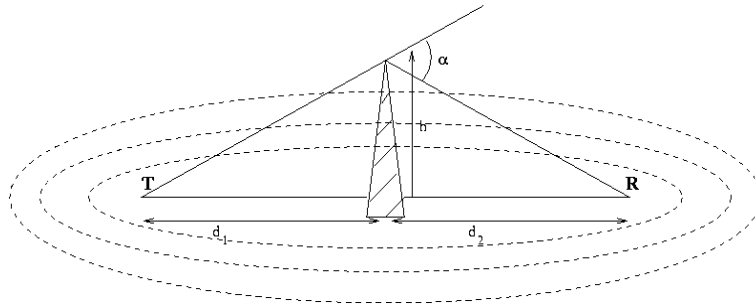


Figura 1.4: Le zone di Fresnel con un ostacolo tra ricevitore e trasmettitore sono delimitate da “famiglie” di elissoidi.

1.1.3 Diffusione

Il segnale ricevuto in un sistema radio mobile è spesso più forte di quanto ci si può aspettare considerando i fenomeni di riflessione e diffrazione, questo perché, quando il segnale colpisce una superficie rugosa, l'energia riflessa è propagata in tutte le direzioni grazie alla diffusione e questo fornisce ulteriore energia al segnale che giunge al ricevitore.

Superfici piane con dimensioni molto maggiori della lunghezza d'onda del segnale trasmesso possono essere considerate superfici riflettenti; tuttavia, la rugosità di tali superfici spesso introducono effetti di propagazione differenti dalla semplice riflessione speculare. La rugosità di una superficie è spesso testata mediante il criterio di Rayleigh che definisce un'altezza critica (h_c) delle protuberanze del terreno, per un dato angolo di incidenza θ_i , data da

$$h_c = \frac{\lambda}{8 \sin \theta_i}$$

Secondo tale criterio, una superficie è considerata liscia se l'altezza massima e minima delle sue protuberanze è minore di h_c . Per superfici rugose, il coefficiente di riflessione della superficie deve essere moltiplicato per un fattore di attenuazione ρ_S , dovuta alla diffusione, per giustificare la diminuzione del campo riflesso.

1.2 Large-scale e small-scale fading

I sistemi mobili di comunicazione sono affetti da due tipologie di attenuazione: *large-scale fading* e *small-scale fading*.

La prima rappresenta l'attenuazione media della potenza del segnale, o *path-loss*, dovuta al movimento su grandi aree; questo fenomeno è condizionato dall'aspetto del terreno e dell'ambiente in generale (presenza di colline, boschi, costruzioni, ...) tra trasmettitore e ricevitore. Le statistiche del large-scale fading forniscono una stima della path-loss in funzione della distanza posta tra le due antenne.

La seconda è indirizzata ai cambiamenti del segnale dovuti a piccole variazioni nello spazio che separa ricevitore e trasmettitore; tale fenomeno si manifesta in due modi: time-spreading (dispersione) del segnale e comportamento tempo variante del canale.

1.2.1 Modelli di propagazione in Large-scale

In questo paragrafo vengono presentati alcuni modelli base che descrivono l'attenuazione del segnale dovuta a fenomeni generati dalla conformazione dell'ambiente, in cui viene eseguita una trasmissione, su vaste aree.

Il primo modello che viene descritto è quello della propagazione in *free space*, ossia in un ambiente che non presenta ostacoli tra trasmettitore e ricevitore e in cui l'interazione con il terreno può essere considerato trascurabile, quindi verrà aggiunta la riflessione dovuta al terreno nel *ground reflection (2-ray) model* e infine la diffrazione dovuta ad un ostacolo posto tra le due antenne

nel *knife-edge diffraction model*; infine vengono presentati due modelli per la determinazione della path-loss molto utilizzati in letteratura.

Modello di propagazione in Free space Il modello di propagazione in free-space viene impiegato per caratterizzare la potenza del segnale ricevuto in ambienti in cui le onde possono propagarsi da trasmettitore a ricevitore senza incontrare ostacoli sul loro cammino; la potenza di tale segnale, in accordo alla maggior parte dei modelli di propagazione large-scale, decadrà come una funzione della distanza che separa le due antenne elevata ad un qualche esponente.

La potenza del segnale che arriva ad un'antenna ricevente posta a distanza d da un'antenna trasmittente è data dall'equazione di Friis

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1.3)$$

dove

- P_t è la potenza trasmessa;
- $P_r(d)$ è la potenza ricevuta in funzione della distanza posta tra trasmettitore e ricevitore;
- G_t e G_r sono i guadagni d'antenna, dipendenti dalle caratteristiche fisiche delle antenne utilizzate, rispettivamente del trasmettitore e del ricevitore;
- d è la distanza che separa le due antenne espressa in metri;
- L è il fattore di perdita dei dispositivi utilizzati non correlato alla propagazione ($L \geq 1$); un valore $L = 0$ indica nessuna perdita nel sistema hardware;
- λ è la lunghezza d'onda del segnale trasmesso espressa in metri.

La path-loss, che rappresenta l'attenuazione del segnale come quantità positiva espressa in dB, è definita come la differenza tra l'effettiva potenza in trasmissione e la potenza in ricezione, e può o meno includere l'effetto prodotto dal guadagno d'antenna. La path-loss per il modello free-space è data da

$$PL(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \left[\frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (1.4)$$

Questa equazione non è valida per distanza $d = 0$; per questo motivo viene utilizzata una distanza d_0 ⁴ come punto di riferimento per una potenza di

⁴Valori tipici per d_0 sono 1 metro per ambienti interni a 100 metri o 1 chilometro per ambienti esterni.

ricezione nota; così, per ogni distanza $d > d_0$, la potenza in ricezione $P_r(d)$ può essere relazionata alla potenza in ricezione a distanza d_0 . Quindi, utilizzando l'equazione 1.1, la potenza ricevuta in free-space ad una distanza maggiore di quella di riferimento è data da

$$P_r(d) = P_r(d_0) \left(\frac{d_0}{d} \right)^2 \quad (1.5)$$

Modello di riflessione a due raggi Il modello di riflessione a due raggi prende in considerazione, per la propagazione del segnale, sia il cammino diretto che la propagazione dovuta alla riflessione del terreno tra trasmettitore e ricevitore. Questo modello risulta accurato sia in sistemi di comunicazione mobile che utilizzano antenne molto alte poste a diversi chilometri di distanza, sia in ambienti urbani in cui i dispositivi possono comunicare direttamente.

In molti sistemi di comunicazione mobile, la distanza massima tra due antenne è di qualche chilometro così che la superficie terrestre può essere considerata piatta. Il segnale totale ricevuto, E_{TOT} , è il risultato della componente dovuta a trasmissione diretta, E_{LOS} , e della componente riflessa dal terreno, E_g .

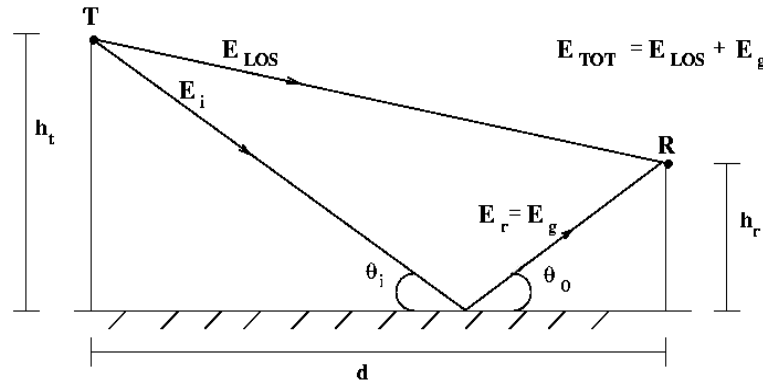


Figura 1.5: Geometria del modello di riflessione a due raggi.

La potenza del segnale ricevuto è quindi affetta dalla composizione del segnale giunto lungo cammini differenti ed è data da

$$P_r = P_t G_t G_r \frac{h_t^2 h_r^2}{d^4} \quad (1.6)$$

dove h_t e h_r sono le altezze rispettivamente del trasmettitore e del ricevitore [1].

Da questa equazione si vede come per grandi distanze ($d \gg \sqrt{h_t h_r}$) la potenza al ricevitore decade con la 4^a potenza della distanza, ossia ad una velocità di 40 dBm/decade, e questa è una perdita molto maggiore di quella sperimentata per il free-space.

Modello di diffrazione a lama di coltello La stima dell'attenuazione del segnale causato da diffrazione per onde radio in un ambiente non ottimale, in presenza per esempio di costruzioni o colline, è solitamente difficile da effettuare con precisione e in pratica si riduce ad approssimazioni teoriche modificate attraverso risultati empirici.

Quando la zona d'ombra in cui si viene a trovare il dispositivo ricevitore è generata da un unico oggetto, l'attenuazione causata dalla diffrazione può essere stimata considerando l'ostacolo come un piano il cui spessore è minimo (di qui il nome del modello) che si frappone tra ricevitore e trasmettitore. Questo è il più semplice modello di diffrazione in cui l'attenuazione del segnale causata da un tale fenomeno viene messa in relazione con quanto l'ostacolo invade la prima zona di Fresnel: più l'ostacolo entra nella prima zona di Fresnel e più il segnale arriva al ricevitore attenuato.

Log-distance Path Loss Model Sia i modelli teorici che quelli derivati da prove sperimentali indicano che la potenza media del segnale ricevuto decresce in modo logaritmico con la distanza sia in ambienti interni che esterni. La media di path-loss in large-scale per una distanza di separazione tra trasmettitore e ricevitore arbitraria è espressa da una funzione di tale distanza che utilizza un esponente, n , per la path-loss.

$$\overline{PL}(d) = \left(\frac{d}{d_0} \right)^n$$

che, espressa in dB, diventa

$$\overline{PL}(\text{dB}) = \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right)$$

dove

- n , l'esponente per la path-loss, indica la velocità con cui la path-loss aumenta con la distanza;
- d_0 è la distanza di riferimento determinata sperimentalmente;
- d è la distanza che separa l'antenna trasmettente da quella ricevente.

Da notare che le barre nelle equazioni sopra esposte indicano la media di tutti i possibili valori per la path-loss per un valore di d dato.

Quando si va a disegnare tale perdita in un grafico in doppia scala logaritmica si ottiene una linea retta con pendenza pari a $10n$ dB su decade. Il valore di n dipende dalle caratteristiche dell'ambiente circostante; alcuni valori tipici sono riportati in tabella 1.1 [1].

Environment	Path Loss Exponent, n
Free space	2
Urban area cellular radio	2.7 to 3.5
Shadowed urban cellular radio	3 to 5
In building line-of-sight	1.6 to 1.8
Obstructed in building	4 to 6
Obstructed in factories	2 to 3

Tabella 1.1: Valori tipici per l'esponente di path-loss n .

Log-normal Shadowing Il modello appena visto non considera che l'ingombro dell'ambiente circostante può essere molto diverso a seconda della posizione scelta mantenendo le antenne alla stessa distanza.

Prove sperimentali hanno posto in evidenza che ad ogni valore della distanza d la path-loss $PL(d)$ in una posizione particolare è casuale ed è data da

$$PL(d) = \overline{PL}(d) + X_\sigma = \overline{PL}(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma \quad (1.7)$$

dove X_σ è una distribuzione gaussiana a media nulla con deviazione standard pari a σ .

Questa distribuzione descrive gli effetti casuali di *shadowing* che si hanno con un largo numero di misure in locazioni in cui trasmettitore e ricevitore sono posti alla stessa distanza ma si ha un differente livello di occupazione del cammino di propagazione.

Semplicemente, il log-normal shadowing implica che i livelli di segnale misurati ad una data distanza tra trasmettitore e ricevitore hanno una distribuzione gaussiana sulla media della distanza.

La distanza di riferimento d_0 , l'esponente n e la deviazione standard σ descrivono il modello di path-loss per una locazione arbitraria e ad una specifica distanza tra le due antenne.

1.2.2 Small-scale fading

Il small-scale fading descrive le rapide fluttuazioni dell'ampiezza delle onde del segnale trasmesso che si verificano in brevi periodi di tempo, o per piccole distanze, così che gli effetti del large-scale fading sulla path loss possono essere ignorati.

L'attenuazione può essere causata dall'interferenza tra due o più onde, che trasportano la stessa informazione, che arrivano al ricevitore in tempi lievemente differenti. Queste onde, chiamate *onde multipath*, si combinano all'antenna ricevente in un segnale risultante che può variare completamente in ampiezza e fase rispetto al segnale generato dall'antenna trasmittente.

In aree urbane l'attenuazione è dovuta all'altezza delle antenne che non riesce a superare quella degli edifici che le circondano e quindi non è presente un cammino diretto tra i due dispositivi; anche nel caso in cui si abbia LOS si ha ancora multipath dovuto alla riflessione sul terreno e sulle varie strutture presenti. Questo fa sì che le onde arrivino da direzioni diverse con differenti ritardi di propagazione. Quindi il segnale che giunge al ricevitore in un qualsiasi punto può essere formato da un grande numero di onde piane che hanno una distribuzione di ampiezza, fase e angolo di arrivo casuale. Queste componenti multipath, combinate all'antenna ricevente, possono far sì che il segnale ricevuto da un dispositivo mobile sia distorto o attenuato. È importante notare come, nel caso in cui il ricevitore sia fisso, il segnale può comunque essere attenuato dal movimento degli oggetti all'interno del canale di propagazione.

Se gli oggetti presenti nel canale sono statici e il movimento è effettuato esclusivamente dal dispositivo ricevente, l'attenuazione è dovuta unicamente a tale movimento e le variazioni del segnale risultante sono viste come variazioni temporali, da qui il canale è detto variabile nel tempo, dal ricevitore che si muove attraverso un'area affetta da multipath. Il segnale risultante ad un ricevitore che si muove ad alta velocità può essere caratterizzato da attenuazioni differenti in un breve periodo di tempo a causa degli effetti costruttivi e distruttivi generati dal multipath.

In figura 1.6 sono mostrate le rapide variazioni nel livello del segnale ricevuto dovute allo small-scale fading nel caso in cui il ricevitore si muove su di una distanza di pochi metri.

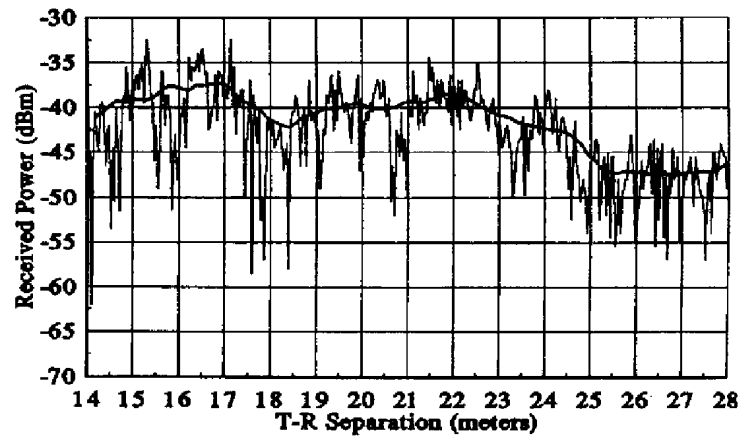


Figura 1.6: Fluttuazioni dovute a small-scale fading e large-scale fading nel caso in cui il ricevitore effettua piccoli spostamenti.

Il movimento dell'antenna ricevente relativo all'antenna trasmittente causa un'apparente spostamento della frequenza delle onde multipath. Lo spostamento della frequenza del segnale ricevuto dovuta al movimento è chiamato *effetto Doppler* ed è direttamente proporzionale alla velocità e alla direzione dello spostamento del dispositivo mobile rispetto alla direzione di arrivo delle onde multipath ricevute.

Prendiamo come riferimento la figura 1.7

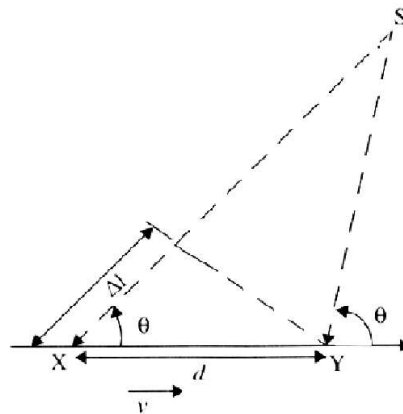


Figura 1.7: Esempio di effetto Doppler.

Sia S l'antenna trasmittente e l'antenna ricevente sia in movimento spostandosi dal punto X al punto Y, posti alla distanza d , con una certa velocità

v . La differenza di cammino percorso dalle onde radio nei punti X e Y è data da $\Delta = d \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$, dove θ , l'angolo di ricezione del segnale, è considerato lo stesso in X e in Y in quanto la sorgente di trasmissione è posta molto lontano.

La differenza di fase del segnale ricevuto dovuta alla differente lunghezza di cammino è quindi data da

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta l}{\lambda} = \frac{2\pi v \Delta t}{\lambda} \cos \theta$$

e quindi il cambiamento di frequenza, o effetto Doppler, è dato da f_d dove

$$f_d = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta}{\Delta t} = \frac{v}{\lambda} \cos \theta$$

Questa equazione mette in relazione l'effetto Doppler con la velocità di spostamento e l'angolo tra la direzione di spostamento e la direzione di arrivo delle onde radio: se l'antenna ricevente si sposta nella direzione di arrivo delle onde l'effetto Doppler è positivo e quindi la frequenza ricevuta risulta aumentata, se invece si sposta nella direzione opposta l'effetto Doppler è negativo e quindi la frequenza ricevuta risulta diminuita.

Capitolo 2

Lo Standard 802.11

Lo standard 802.11 fornisce la connettività wireless a dispositivi mobili, come portatili o palmari, all'interno di un'area locale e definisce funzioni e servizi richiesti da tali dispositivi per interagire all'interno di reti ad hoc o con infrastruttura.

2.1 L'architettura

L'architettura 802.11 è composta da diverse entità preposte a fornire ad una rete wireless gli strumenti per supportare la mobilità delle unità che la compongono.

La struttura base dell'architettura 802.11 è il *Basic Service Set* (BSS), cioè l'area in cui le “stazioni” (STA), i nodi della rete wireless, rimangono nella copertura radio l'una dell'altra; quindi se una STA esce dalla propria BSS non può comunicare con gli altri membri della stessa.

La rete più semplice realizzabile da dispositivi 802.11 è un *Independent BSS* (IBSS), che può essere formato anche da due sole STA in grado di comunicare direttamente.

Così come due STA possono formare un BSS, più BSS possono creare una struttura più ampia, un *Extended Service Set* (ESS), in cui una STA può comunicare con STA appartenenti agli altri BSS della ESS tramite il *Distribution System* (DS), tipicamente una rete cablata. I dati passano dalla BSS al DS, e viceversa, tramite un *Access Point* (AP), che altro non è se non una STA che integra le funzionalità per fornire i servizi per il DS.

Un'altra entità definita nell'architettura 802.11 è il portal, entità logica che permette il trasferimento dei dati tra reti 802.11 e reti 802.x.

Uno schema dell'intera architettura fornita dallo standard 802.11 è mostrata in figura 2.1

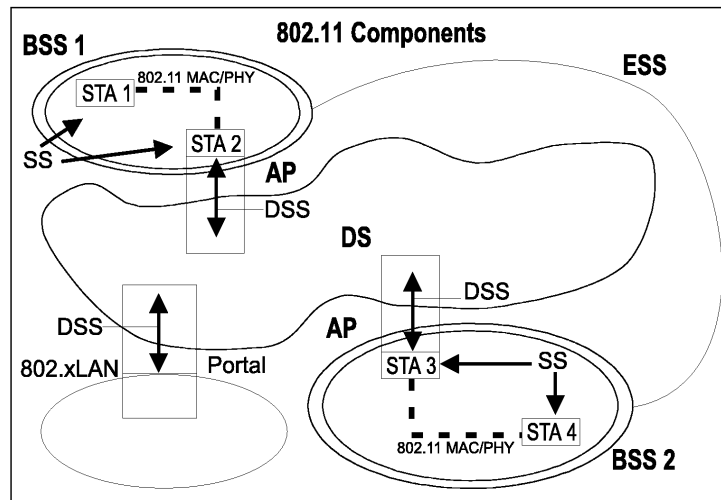


Figura 2.1: Schema dell'architettura fornita dallo standard 802.11.

2.2 I servizi

I servizi offerti alle STA dello standard 802.11 vengono divisi in due categorie: *Station Service* (SS), presente in ogni stazione 802.11, e *Distribution System Service* (DSS), presente negli AP e utilizzati per permettere la propagazione dei dati attraverso il DS.

In tabella 2.1 sono riportati i servizi divisi per categoria.

Gli ultimi sei dei servizi presentati in tabella sono utilizzati per il trasporto di MSDU da una STA all'altra, i primi tre sono utilizzati per controllare l'accesso e la riservatezza della rete.

Station Service	Distribution System Service
Authentication	Association
Deauthentication	Disassociation
Privacy	Distribution
MSDU delivery	Integration
	Reassociation

Tabella 2.1: Servizi offerti alle STA 802.11.

Vediamoli in dettaglio:

Distribution: è utilizzato da ogni STA appartenente ad un ESS che vuole trasmettere dati; il messaggio della STA trasmittente viene ricevuto

dall'AP del BSS a cui appartiene; l'AP inoltra il messaggio al destinatario, se questo appartiene alla medesima BSS, altrimenti lo affida al DS e il messaggio verrà ricevuto dall'AP del BSS a cui appartiene la STA ricevente; è compito di quest'ultimo AP recapitare il messaggio al destinatario;

Integration: è utilizzato dal distribution service quando il destinatario del messaggio appartiene ad una rete esterna; il messaggio viene quindi inviato al portal;

Association: è utilizzata da una STA per comunicare la propria presenza all'AP del proprio BSS così che il distribution service sappia a quale AP inoltrare un messaggio per quella STA. È sufficiente per una mobilità di tipo *no-transition*, cioè al più all'interno della propria BSS; è necessaria ma non sufficiente per mobilità di tipo *BSS-transition (roaming)*, ossia tra BSS di uno stesso ESS;

Reassociation: è utilizzata per spostare l'associazione da un AP all'altro ed è quindi utilizzata da STA in BSS-transition;

Disassociation: è utilizzata per terminare un'associazione esistente. Questo servizio è una notifica, non una richiesta, e come tale non può essere rifiutata da nessuna delle parti che formano l'associazione;

Authentication: è utilizzata da tutte le STA per confermare la propria identità a quelle STA con le quali vogliono comunicare. Se non viene raggiunto un livello accettabile di autenticazione tra due STA non viene stabilita l'associazione tra di esse;

Deauthentication: è utilizzata per terminare un'autenticazione esistente; quando un AP invia la notifica di deautenticazione ad una STA, termina anche l'associazione con tale STA;

Privacy: è utilizzata per cifrare il contenuto del messaggio. Da notare che se tale servizio non viene esplicitamente invocato, il traffico è interamente trasmesso in chiaro.

poiché una IBSS è formata solo da STA che sono direttamente connesse tra loro, per definizione, la sua architettura è formata unicamente da un BSS; inoltre, poiché non c'è un DS non sono presenti AP o portal e quindi i soli servizi utilizzati da STA appartenenti ad un IBSS sono gli station service.

2.3 Il livello MAC

Il livello MAC specifica le modalità di interazione tra STA diverse, coordinando l'accesso al mezzo condiviso, mediante il *Distributed Coordination Function* (DCF), utilizzato sia per reti ad hoc che con infrastruttura, e il *Point Coordination Function* (PCF), utilizzato unicamente per reti con infrastruttura.

In figura 2.2 è mostrata l'architettura del livello MAC

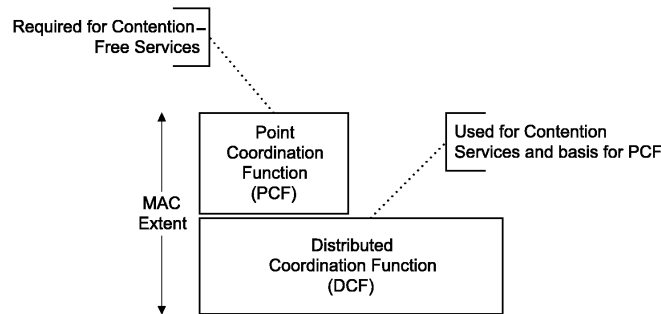


Figura 2.2: Architettura del Livello MAC di 802.11.

Il DCF è il metodo di accesso fondamentale per il livello MAC dello standard 802.11 ed è basato su carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA): una STA con necessità di trasmettere deve ascoltare il mezzo trasmissivo per determinare se un'altra STA è già in trasmissione; solo se il mezzo risulta libero la trasmissione può aver luogo.

Lo schema del meccanismo base di accesso al canale è mostrato in figura 2.3

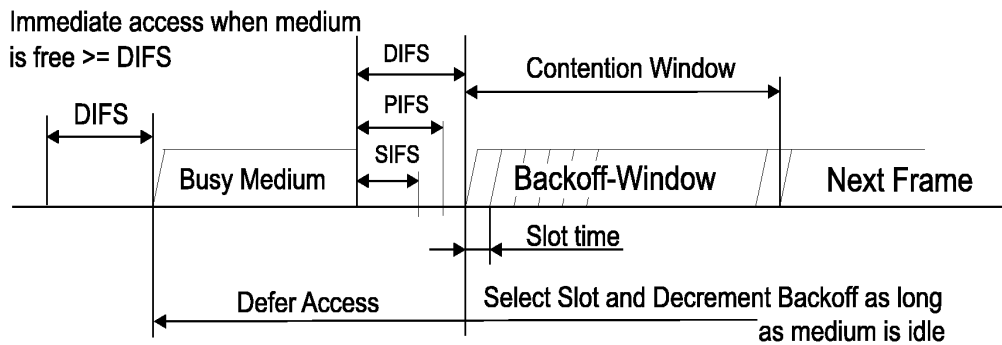


Figura 2.3: Metodo base di accesso al mezzo trasmissivo.

Il meccanismo CSMA/CA prevede un intervallo minimo tra la trasmissione di frame in sequenza, ed in questo intervallo di tempo la STA deve rilevare il mezzo inattivo prima di iniziare la trasmissione; se il mezzo risulta occupato la trasmissione viene rimandata.

Dopo il ritardo, e prima di tentare la trasmissione, la STA deve selezionare un intervallo di backoff e, finché il mezzo è libero, decrementa il contatore associato a tale intervallo.

Un'ulteriore tecnica può essere utilizzata opzionalmente per minimizzare le collisioni: la STA trasmittente e quella ricevente si scambiano frame di controllo, *Request To Send* (RTS) e *Clear To Send* (CTS), prima dell'inizio della trasmissione del frame dati.

Il PCF è opzionale ed è utilizzato solo per reti con infrastruttura.

La trasmissione tra STA di un BSS è regolamentata da un *Point Coordinator* (PC) che opera nell'access point.

Il PCF utilizza un meccanismo di ascolto del canale insieme ad uno basato su priorità. poiché il PC controlla integralmente le trasmissioni all'interno del BSS, viene eliminata la contesa per il mezzo trasmissivo realizzando quindi un metodo di accesso di tipo contention-free.

Le informazioni necessarie per guadagnare il controllo del mezzo vengono distribuite per mezzo di frame di tipo management, i *beacon*. In più, tutti i frame coinvolti nella trasmissione mediante PCF utilizzano un intervallo di tempo più piccolo di quello utilizzato dal DCF; questo implica che il traffico del PC ha priorità maggiore di quello utilizzato da STA che operano in DCF quando queste due funzioni coesistono.

2.3.1 Coesistenza tra DCF e PCF

DCF e PCF coesistono in modo da permettere ad entrambe di operare in modo concorrenziale all'interno di una stessa BSS. Quando un PC opera in una BSS, i due metodi di accesso al mezzo si alternano; si avranno quindi periodi in cui non si ha contesa del canale, *Contention-Free Period* (CFP) seguiti da periodi con contesa del canale, *Contention Period* (CP).

2.3.2 Frammentazione/Deframmentazione

La frammentazione è il processo che permette di spezzare data unit di tipo service (MSDU) o di tipo management (MMPDU) in più MAC Protocol Data Unit (MPDU), questo al fine di aumentare l'affidabilità, aumentando la probabilità di trasmettere con successo MSDU o MMPDU nei casi in cui le caratteristiche del canale limitano l'affidabilità per frame lunghi. Il processo inverso, ricostruire un MSDU o un MMPDU da più MPDU, è chiamato deframmentazione.

Da notare che solo frame spediti ad un indirizzo unicast possono essere frammentati; per trasmissioni in broadcast o in multicast i frame non vengono

frammentati anche se la loro lunghezza supera *aFragmentationThreshold*¹. Le MPDU risultanti dalla frammentazione vengono trasmesse in modo indipendente e prevedono ognuna un proprio riscontro. In mancanza di interruzioni dovute all'occupazione del canale, i frammenti vengono spediti in burst durante il contention period con una sola invocazione della procedura di accesso al mezzo in caso di DCF, come frame individuali durante il contention-free period in caso di PCF.

2.3.3 DCF

In questo paragrafo approfondiamo gli aspetti fondamentali del Distributed Coordination Function come metodo di accesso al canale, con la variante RTS/CTS, gli intervalli temporali previsti dal protocollo, la procedura di backoff e la procedura di riscontro di ricezione.

2.3.3.1 Meccanismo di Carrier-sense

Per rilevare lo stato, libero o occupato, del mezzo trasmissivo viene utilizzato un meccanismo di ascolto della portante fornito dal livello fisico e un meccanismo virtuale fornito dal livello MAC; solo se entrambi i metodi indicano il canale attivo il mezzo trasmissivo è considerato occupato.

Una STA che utilizza il metodo base di accesso al canale può trarre le informazioni relative al tempo di occupazione del canale per una trasmissione in corso tramite il campo *Duration/ID* contenuto nei frame. Queste informazioni vengono mantenute nel *Network Allocator Vector* (NAV), che contiene cioè le informazioni sull'uso futuro del mezzo trasmissivo. Il NAV può essere pensato come un contatore che decrementa il proprio valore con velocità uniforme; quando il valore del contatore è zero il mezzo trasmissivo è libero, altrimenti viene considerato occupato.

2.3.3.2 Meccanismo di Carrier-sense con RTS/CTS

Il meccanismo RTS/CTS è un metodo aggiuntivo per ridurre il problema delle collisioni.

In tal caso una STA che vuole trasmettere ad un'altra STA dovrà prima inviare un frame RTS indirizzato a tale STA; indichiamo con STA1 la stazione trasmittente e STA2 quella ricevente. Le STA che non sono direttamente coinvolte nella trasmissione possono ottenere, dal campo *Duration/ID* del frame RTS, le informazioni riguardanti la durata della trasmissione e di conseguenza

¹Lo standard definisce *aFragmentationThreshold* come soglia di frammentazione oltre la quale i frame MAC vengono spezzati in frame di lunghezza non maggiore di tale valore.

impostano il proprio NAV per ritardare l'accesso al mezzo. In risposta al frame RTS la STA2 invia alla STA1 un frame CTS, dopo aver atteso un intervallo di tempo specificato. Ancora le STA non coinvolte nella trasmissione impostano il NAV per rimandare il proprio accesso al canale di un tempo specificato nel campo Duration/ID del frame CTS.

La trasmissione vera e propria avverrà alla ricezione del frame CTS dopo aver atteso un tempo specificato senza rieseguire il controllo del canale.

Lo schema di tale meccanismo è mostrato in figura 2.4.

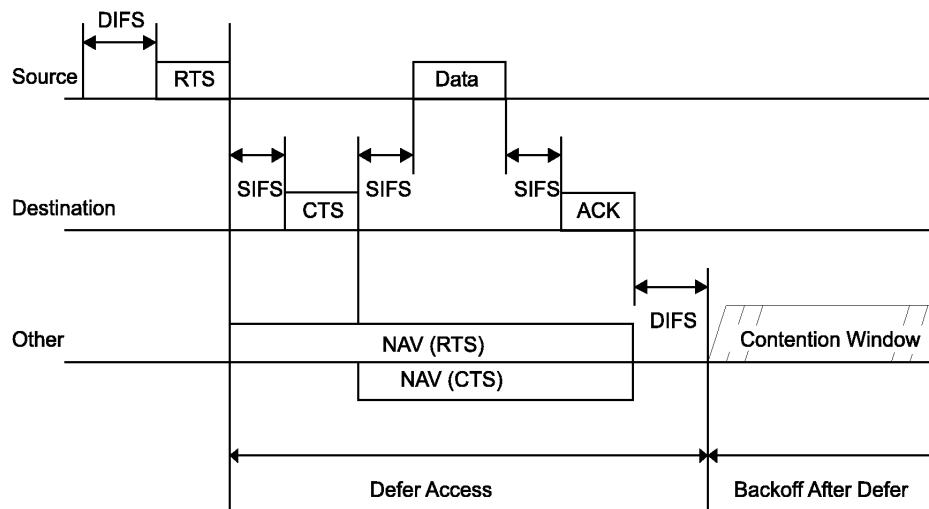


Figura 2.4: Metodo di accesso al mezzo trasmissivo con utilizzo di RTS/CTS.

Da notare come questo meccanismo sia utile per ovviare al problema dei nodi nascosti ossia quando, pur appartenendo alla stessa BSS, due nodi sono fuori della portata radio l'uno dell'altro e non sono quindi in grado di ascoltare le reciproche trasmissioni.

2.3.3.3 Intervalli Temporal

L'intervallo di tempo tra due frame è chiamato *Interframe Space* (IFS).

Una STA determina lo stato del canale monitorandolo per un intervallo di tempo specificato.

Lo standard definisce quattro IFS per fornire diversi livelli di priorità per l'accesso al mezzo.

Vediamoli in dettaglio dal più breve al più lungo:

Short Interframe Space (SIFS): viene utilizzato prima della trasmissione di frame di tipo ACK o CTS; per gli MPDU seguenti in un burst

di frammentazione; in risposta ad un polling del PCF così come viene utilizzato dal PC prima di ogni tipo di frame durante il CFP;

PCF Interframe Space (PIFS): viene utilizzato solo da STA operanti in PCF per avere la priorità ad accedere al canale all'inizio del CFP;

DCF Interframe Space (DIFS): viene utilizzato da STA operanti in DCF prima di trasmettere frame di tipo data e di tipo management;

Extebded Interframe Space (EIFS): viene utilizzato dal DCF quando il livello fisico indica che à stata iniziata la trasmissione di un frame il cui campo FCS non risulta essere corretto.

2.3.3.4 Procedura di Random Backoff

Abbiamo già detto che quando una STA intende spedire un frame di tipo data o management invoca il meccanismo di carrier sense per determinare lo stato del canale. Se questo risulta essere occupato dovrà ritardare la trasmissione di un DIFS se l'ultimo frame è stato ricevuto correttamente, o di un EIFS nel caso contrario. Dopo che il mezzo è risultato libero per un tale intervallo di tempo, la STA genera un *random backoff period* per un ulteriore ritardo nella trasmissione allo scopo di minimizzare le collisioni, durante la contesa del canale, tra STA che hanno subito ritardi per lo stesso evento.

Un random backoff time è dato da

$$\text{Backoff Time} = \text{Random}() * \text{aSlotTime}$$

dove

Random() è un intero pseudocasuale su una distribuzione uniforme in $[0, CW]$, con CW , *contention window*, intero nell'intervallo $[aCW_{\min}, aCW_{\max}]$ dove questi sono valori che dipendono dalle caratteristiche del livello fisico;

aSlotTime è un valore dipendente dalle caratteristiche del livello fisico.

Il valore iniziale del parametro CW è pari ad $aCW_{\min}$; ogni volta che la trasmissione di un frame non avviene con successo viene incrementato il valore di un contatore, *retry counter*, il che provoca per CW l'aquisizione del prossimo valore nella serie sino al raggiungimento di $aCW_{\max}$, nel qual caso il valore di CW rimane inalterato sinchè non viene riazzerato. Il ritorno di CW al valore iniziale $aCW_{\min}$ avviene ad ogni trasmissione eseguita correttamente.

L'insieme dei valori di CW è una sequenza crescente della potenza di due, meno uno, il cui andamento è mostrato in figura 2.5.

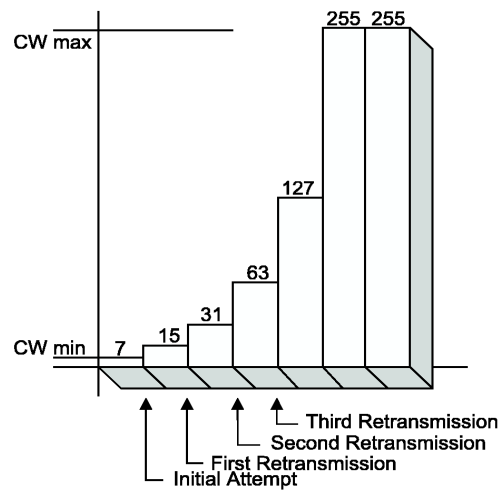


Figura 2.5: Andamento della crescita del parametro CW.

Dopo la generazione del BackoffTime viene utilizzato il meccanismo di carrier-sense per determinare lo stato del canale durante il backoff slot; se in questo intervallo di tempo il canale risulta occupato, il valore del backoff timer non viene decrementato, altrimenti viene decrementato di un valore pari a aSlotTime. La trasmissione ha inizio quando il backoff timer raggiunge il valore zero.

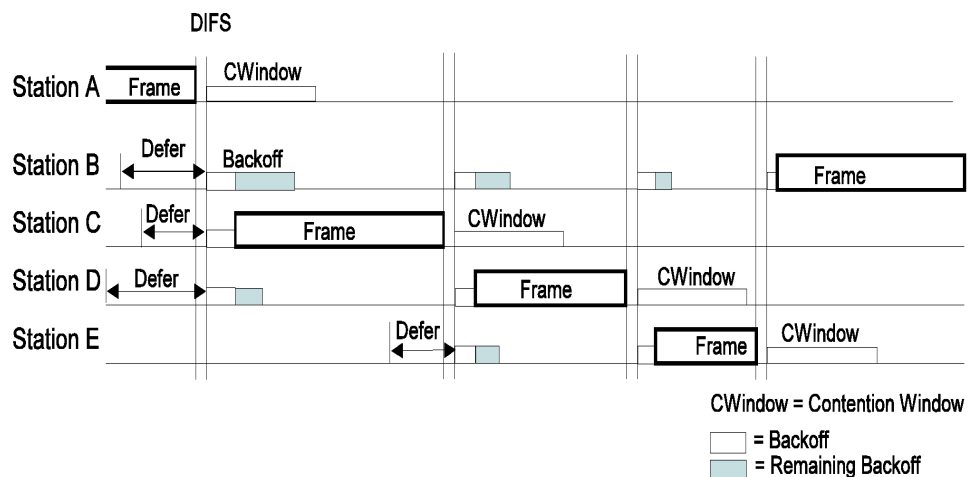


Figura 2.6: Procedura di Backoff.

2.3.3.5 Procedura di Riscontro di Ricezione

La ricezione di alcuni frame unicast richiede la risposta, da parte del destinatario, con un riscontro, il frame ACK, se il frame è stato ricevuto correttamente.

La trasmissione di tale frame di riscontro inizia dopo un intervallo SIFS senza controllare lo stato del canale. Se la STA sorgente non riceve l'ACK atteso prima dello scadere del timer relativo a tale ACK, considera la trasmissione fallita e invoca la procedura di backoff non appena spira il timer.

2.4 Sincronizzazione e Power Save Mode

Tutte le STA appartenenti alla stessa BSS devono essere sincronizzate con un clock comune ed è compito del *Timing Synchronization Function* (TSF) mantenere la sincronizzazione tra le STA.

Mentre in reti con infrastruttura è l'AP a realizzare il TSF e a controllare il clock comune inizializzando il TSF timer ed inviando alle STA il suo valore mediante frame speciali, i beacon, in una rete ad hoc la funzione TSF è implementata attraverso un algoritmo distribuito eseguito da tutte le STA della IBSS; ogni STA adotterà il tempo ricevuto con ogni frame di tipo beacon o probe response proveniente dalla IBSS a cui appartiene in cui il valore di TSF è in ritardo rispetto al proprio.

Così come la funzione TSF anche la generazione dei beacon è distribuita. Il periodo di trasmissione dei beacon è stabilito dalla STA che inizia la IBSS e viene trasmesso con frame beacon o probe request così che tutte le STA che vogliono entrare a far parte della IBSS adottino lo stesso parametro.

È lo stesso beacon a determinare il *Target Beacon Transmission Time* (TBTT), ossia il tempo tra la trasmissione di due beacon.

Ad ogni TBTT ogni STA deve:

- sospendere eventuali procedure di backoff in corso;
- calcolare un ritardo casuale distribuito in modo uniforme in $[0, 2 \cdot aCW_{min} \cdot aSlotTime]$;
- applicare la procedura di backoff al ritardo appena calcolato;
- se prima del termine della procedura viene ricevuto un beacon, la procedura viene abbandonata e vengono riprese le eventuali procedure di backoff sospese;
- altrimenti, allo scadere del ritardo calcolato, viene spedito il beacon.

Quando una STA vuole entrare a far parte di una BSS, o IBSS, deve determinare il canale opportuno e sincronizzarsi con le STA già appartenenti a quel determinato BSS; ciò può essere ottenuto rimanendo in ascolto in ciascun

canale in attesa di ricevere un frame beacon, *scanning passivo*, che contiene tutte le informazioni necessarie per eseguire la sincronizzazione, o inviando un frame broadcast, probe request, contenente l'identificatore della rete cercata, *scanning attivo*, e attendendo un probe response per un tempo sufficiente; se tale frame non viene ricevuto viene eseguita la stessa operazione sul canale successivo.

Da notare che nel caso di reti con infrastruttura è l'AP incaricato di rispondere ai frame probe request, mentre nelle reti ad hoc tale compito è lasciato alla STA che ha generato l'ultimo beacon.

poiché nelle reti wireless molte stazioni possono essere dispositivi portatili, è previsto un meccanismo per ridurre i consumi energetici spegnendo il più a lungo possibile i transceiver, bufferizzando i frame e, prima di trasmetterli, avvertendo la stazione destinataria della presenza del traffico in attesa mediante TIM, *Traffic Indication Map*, trasmessi ad intervalli fissi in modo da minimizzare i consumi.

Nelle reti con infrastruttura l'AP mantiene le informazioni riguardanti il *power management mode* adottato dalle varie STA ed invia ad esse il TIM incluso all'interno del beacon.

In caso di reti ad hoc ogni stazione tiene sotto controllo lo stato delle altre e, se ha necessità di trasmettere a una STA in power save mode, la avvisa mediante un ad hoc TIM spedito in tempi prestabiliti in cui tutte le STA sono in ascolto, stesso intervallo di tempo in cui vengono spediti anche i beacon.

2.5 Il Frame 802.11

Per interagire all'interno di una rete tutte le stazioni devono essere in grado di costruire i frame per la trasmissione e decodificare i frame in ricezione.

Ogni frame è costituito da

- un'intestazione MAC, che tra i vari campi comprende il Duration/ID;
- un campo di lunghezza variabile per il contenuto vero e proprio del frame;
- un campo per il controllo della correttezza del frame.

In questo paragrafo verranno analizzati solo i frame utilizzati nei successivi capitoli, come i frame di controllo.

2.5.1 Formato di un generico frame

Il formato del frame MAC comprende un insieme di campi che sono posizionati con un ordine prefissato in tutti i frame.

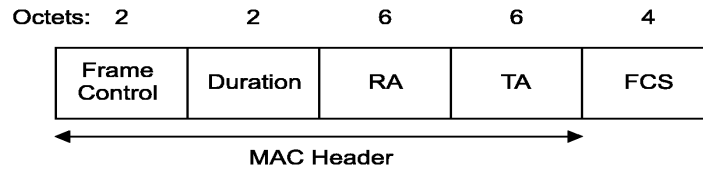


Figura 2.8: Formato del frame RTS.

Il campo “RA” contiene l’indirizzo della STA destinataria del frame in attesa di trasmissione, mentre il campo “TA” indica l’indirizzo della STA che trasmette tale frame.

2.5.3 Il frame CTS

Il frame CTS (Clear To Send) è un frame di controllo. Il suo formato è mostrato in figura 2.9

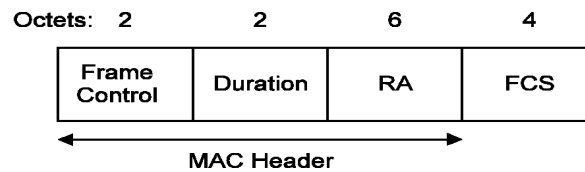


Figura 2.9: Formato del frame CTS.

Come si può notare è presente in unico campo indirizzo, “RA”, che viene riempito con il contenuto del campo “TA” del frame RTS ricevuto immediatamente prima; così anche il campo “Duration/ID” è ottenuto da quello contenuto nel frame RTS da cui è stato sottratto il tempo impiegato per la trasmissione di CTS e il suo intervalli SIFS.

2.5.4 Il frame ACK

Come i due precedenti, anche il frame ACK è un frame di controllo. Il suo formato è mostrato in figura 2.10.

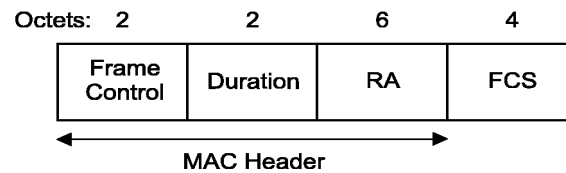


Figura 2.10: Formato del frame ACK.

Il campo “RA” è ottenuto copiandolo dal frame per il quale è richiesto il riscontro presente.

Se il frame ricevuto non era frammentato, il campo “Duration” è posto a zero, altrimenti il suo valore è ottenuto dallo stesso campo del frame ricevuto al quale viene sottratto il tempo impiegato per trasmettere l’ACK e il suo intervallo SIFS.

2.5.5 Il frame Data

Il formato del frame data è mostrato in figura 2.11

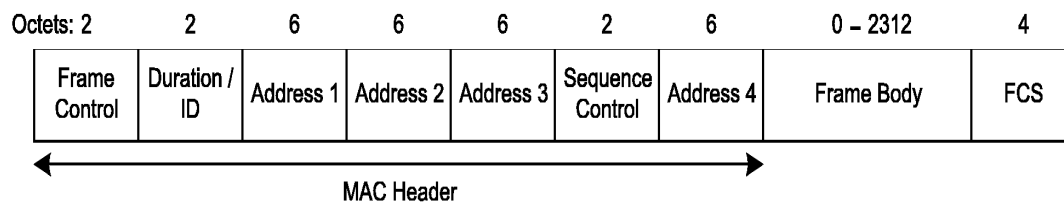


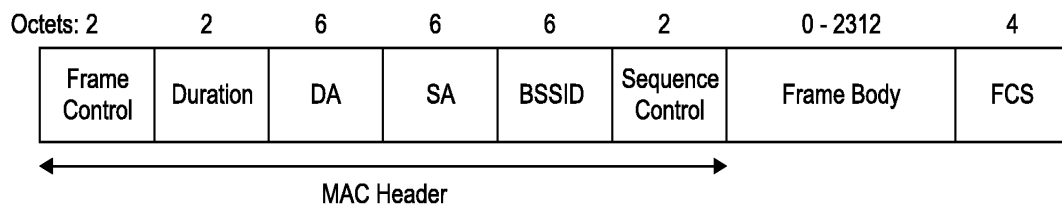
Figura 2.11: Formato del frame data.

Il contenuto dei campi riservati ai vari indirizzi dipende dal valore di ToDS e FromDS, del campo Frame Control, come descritto nella seguente tabella:

To DS	From DS	Address 1	Address 2	Address 3	Address 4
0	0	DA	SA	BSSID	N/A
0	1	DA	BSSID	SA	N/A
1	0	BSSID	SA	DA	N/A
1	1	RA	TA	DA	SA

Tabella 2.2: Contenuto dei campi indirizzo.

Il contenuto di “Address 1” è utilizzato per determinare il destinatario del frame; il campo “Address 2” è utilizzato per indirizzare il riscontro se questo è



()

- una funzione di conversione per il livello fisico che, utilizzando la procedura PLCP (*Physical Layer Convergence Procedure*), mappa la MPDU in un formato adatto alla trasmissione e ricezione delle varie informazioni tra due o più STA utilizzando il sistema PMD;
- un sistema PMD (*Physical Medium Dependent*) che definisce le caratteristiche del mezzo wireless (WM), tra due o più STA, e il metodo di trasmissione e ricezione attraverso tale WM.

Lo standard prevede due tipi di trasmissione nella banda ISM² (2.4 - 2.4835 GHz):

infrarosso In una rete wireless a raggi infrarossi ogni STA è dotata di un transceiver che utilizza per la trasmissione un diodo a emissione luminosa (LED), che emette luce a raggi infrarossi, e per la ricezione utilizza un fotodiodo; entrambi questi dispositivi operano con la medesima lunghezza d'onda utilizzata dalle altre STA che compongono la rete.

L'utilizzo di queste componenti fa sì che le STA della rete possono comunicare direttamente solo se i transceiver sono perfettamente allineati, in caso contrario la trasmissione di dati è possibile grazie alle proprietà riflettenti dei raggi infrarossi. Con questa modalità di trasmissione quindi la rete può essere installata solo all'interno di un unico ambiente, con il vantaggio di non subire interferenze da parte di reti operanti in ambienti adiacenti;

radiofrequenza Al contrario della trasmissione con raggi infrarossi, la radiofrequenza permette di coprire aree estese, non più un unico ambiente, e, inoltre, possono essere presenti più reti isolate all'interno di uno stesso ambiente.

I dispositivi a radiofrequenza operano sulle frequenze della banda ISM; poiché queste non sono soggette a licenza e poiché sono bande strette, è stato imposto l'utilizzo della tecnica di modulazione *Spread Spectrum* per trasmissioni in tale banda al fine di ridurre il livello di interferenza. L'idea alla base di tale tecnica è di espandere il contenuto informativo di un segnale su una banda maggiore di quella richiesta.

Esistono due metodi per realizzare la tecnica Spread Spectrum: *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) e *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS):

- FHSS: il segnale viene trasmesso utilizzando una sequenza pseudocasuale, la sequenza di hopping, di frequenze radio che permette di saltare da frequenza in frequenza ad intervalli di tempo stabiliti; solo i ricevitori che conoscono la particolare sequenza di hopping del trasmettitore possono ricevere correttamente l'informazione;
- DSSS: i bit che compongono il segnale vengono codificati mediante un codice, il *chipping code*, rappresentato da una sequenza di bit. A lato trasmettitore il segnale viene combinato con il chipping code, solitamente mediante uno XOR, e trasmesso; a lato ricevitore si eseguirà l'operazione inversa per ottenere l'informazione originale.

²Industrial, Medical, Scientific: in origine era riservata, con accordi internazionali, per scopi non commerciali.

Nei paragrafi seguenti verrà analizzato con maggior dettaglio il DSSS per 802.11, 802.11b e 802.11g.

2.6.1 DSSS nello standard 802.11

Il PHY DSSS può operare nell'intervallo di frequenza da 2.4 GHz a 2.4835 GHz in USA ed Europa, e nell'intervallo di frequenza da 2.471 GHz a 2.497 GHz in Giappone.

Le frequenze centrali e gli identificativi dei canali sono riportati in tabella 2.3. Le organizzazioni *Federal Communications Commission* (FCC) per gli USA, *Industry Canada* (IC) per il Canada e *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) per l'Europa specificano la banda utilizzabile da 2.4 GHz a 2.4835 GHz; MKK per il Giappone specifica la banda utilizzabile nell'intervallo da 2.471 MHz a 2.497 GHz.

CHNL_ID	Frequency	Regulatory domains					
		X'10' FCC	X'20' IC	X'30' ETSI	X'31' Spain	X'32' France	X'40' MKK
1	2412 MHz	X	X	X	—	—	—
2	2417 MHz	X	X	X	—	—	—
3	2422 MHz	X	X	X	—	—	—
4	2427 MHz	X	X	X	—	—	—
5	2432 MHz	X	X	X	—	—	—
6	2437 MHz	X	X	X	—	—	—
7	2442 MHz	X	X	X	—	—	—
8	2447 MHz	X	X	X	—	—	—
9	2452 MHz	X	X	X	—	—	—
10	2457 MHz	X	X	X	X	X	—
11	2462 MHz	X	X	X	X	X	—
12	2467 MHz	—	—	X	—	X	—
13	2472 MHz	—	—	X	—	X	—
14	2484 MHz	—	—	—	—	—	X

Tabella 2.3: Frequency channel plan.

In presenza di più reti che utilizzano canali diversi all'interno di una stessa area non si ha interferenza dovuta alla sovrapposizione o alla vicinanza di tali reti se la distanza tra le frequenze centrali utilizzate è almeno di 30 MHz. Per codificare il flusso informativo viene utilizzata una sequenza di Barker a 11 simboli, chiamati chip, pari a

+1, -1, +1, +1, -1, +1, +1, +1, -1, -1, -1

un esempio del suo utilizzo è mostrato in figura 2.13.

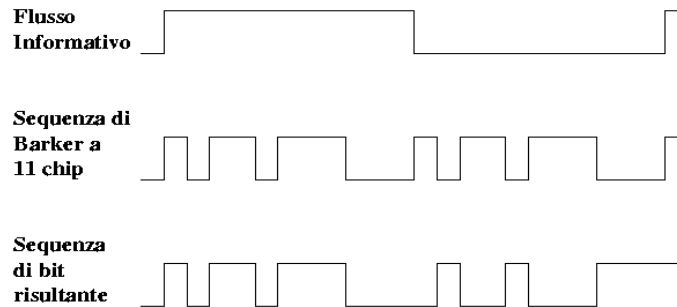


Figura 2.13: Esempio di utilizzo della sequenza di Barker.

Sono definite due modulazioni, con relative velocità, per il PHY DSSS: un basic data rate, basato su modulazione DBPSK (*Differential Binary Phase Shift Keying*) che permette una velocità di trasmissione pari a 1 Mb/s, e un enhanced access rate, basato su modulazione QBPSK (*Quadrature Binary Phase Shift Keying*) che permette una velocità di trasmissione pari a 2 Mb/s.

Il frame PLCP, mostrato in figura 2.14, è formato dal MPDU al quale vengono preposti il PLCP-Preamble e il PLCP-Header, entrambi trasmessi a 1 Mb/s.

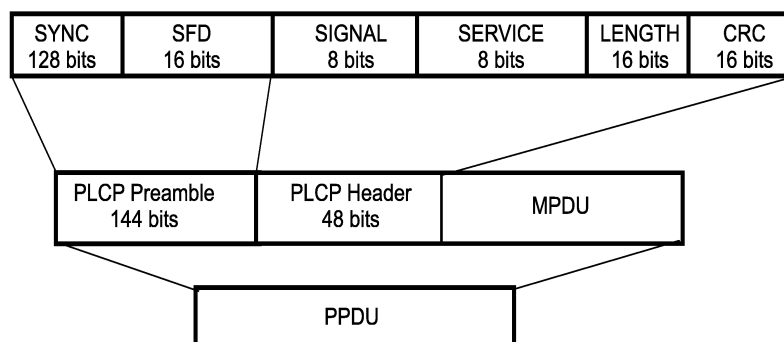


Figura 2.14: Formato del frame PLCP.

2.6.2 Il Livello Fisico in 802.11b

Lo standard 802.11b è un'estensione di 802.11 che fornisce velocità, per la trasmissione dei dati, pari a 5.5 Mb/s e 11 Mb/s in aggiunta alle già esistenti 1 Mb/s e 2 Mb/s.

Le frequenze centrali e gli identificativi dei canali sono riportati in tabella 2.3.

In presenza di più reti che utilizzano canali diversi all'interno di una stessa area non si ha interferenza dovuta alla sovrapposizione o alla vicinanza di tali reti se la distanza tra le frequenze centrali utilizzate è almeno di 25 MHz.

Per fornire velocità maggiori, come schema di modulazione viene utilizzata una sequenza a 8 chip, appartenente ai *complementary code keying* (CCK). Inoltre, per aumentare il throughput per le velocità più alte, è previsto un PLCP-Preamble più corto.

Il formato del PLCP con preambolo lungo è mostrato in figura 2.15.

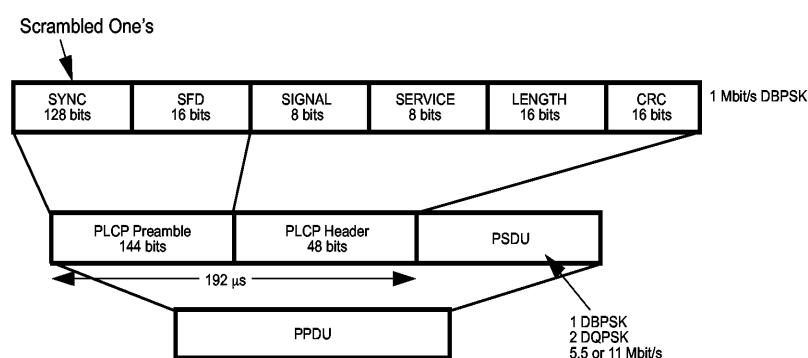


Figura 2.15: Formato del frame PLCP con preambolo lungo.

Come si può vedere, sia il PLCP-Preamble, di 144 bit, che il PLCP-Header, di 48 bit, vengono trasmessi alla velocità di 1 Mb/s, mentre le velocità consentite per la trasmissione del PSDU sono 1 Mb/s, 2 Mb/s, 5.5 Mb/s e 11 Mb/s.

Il formato del PLCP con preambolo corto è mostrato in figura 2.16.

In questo caso il PLCP-Preamble, di 72 bit, viene trasmesso ad una velocità di 1 Mb/s, mentre il PLCP-Header, di 48 bit, viene trasmesso ad una velocità pari a 2 Mb/s, introducendo un ritardo di trasmissione di $96 \mu s$ contro i $192 \mu s$ del caso precedente; altra differenza sono le velocità consentite per la trasmissione del PSDU: 2 Mb/s, 5.5 Mb/s e 11 Mb/s.

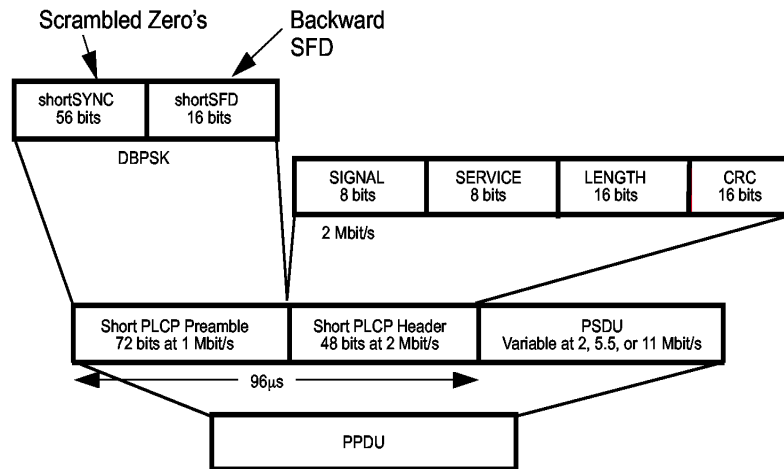


Figura 2.16: Formato del frame PLCP con preambolo corto.

2.6.3 Il Livello Fisico in 802.11g

Lo standard 802.11g permette velocità di trasmissione per i dati pari a 6 Mb/s, 9 Mb/s, 12 Mb/s, 18 Mb/s, 24 Mb/s, 36 Mb/s, 48 Mb/s e 54 Mb/s ed opera nella banda ISM a 2.4 GHz.

Le frequenze centrali e gli identificativi dei canali sono riportati in tabella 2.3.

In presenza di più reti che utilizzano canali diversi all'interno di una stessa area non si ha interferenza dovuta alla sovrapposizione o alla vicinanza di tali reti se la distanza tra le frequenze centrali utilizzate è almeno di 25 MHz.

La modulazione impiegata dallo standard, così come i parametri utilizzati, per esempio per il calcolo della durata della trasmissione di un frame, dipendono dalla velocità con cui si sceglie di trasmettere i dati come mostrato in tabella 2.4.

Data rate (Mbits/s)	Modulation	Coding rate (R)	Coded bits per subcarrier (N _{BPSC})	Coded bits per OFDM symbol (N _{CBPS})	Data bits per OFDM symbol (N _{DBPS})
6	BPSK	1/2	1	48	24
9	BPSK	3/4	1	48	36
12	QPSK	1/2	2	96	48
18	QPSK	3/4	2	96	72
24	16-QAM	1/2	4	192	96
36	16-QAM	3/4	4	192	144
48	64-QAM	2/3	6	288	192
54	64-QAM	3/4	6	288	216

Tabella 2.4: Parametri dipendenti dal valore della velocità di trasmissione

In figura 2.17 è mostrato il formato dell'intero frame PPDU

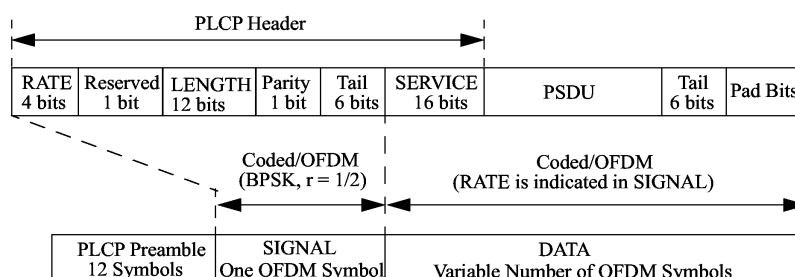


Figura 2.17: Formato del frame PPDU.

Come si può notare, una parte dell'intestazione del PSDU va a costituire il *SIGNAL* del PPDU e viene trasmessa con modulazione DPSK, mentre il campo *service* e il PSDU, che insieme ai campi *tail* e *pad* costituiscono il campo *DATA* del PPDU, vengono trasmessi alla velocità specificata nel campo *RATE* del PLCP-Header.

Lo standard 802.11g specifica, inoltre, due distinti slot time: uno slot time standard con valore pari a $20 \mu s$ e uno slot time opzionale con valore $9 \mu s$ che può essere utilizzato in un BSS formato da sole STA conformi allo standard 802.11g che supportano tale opzione.

Capitolo 3

Il Network Time Protocol

L'importanza di avere a disposizione uno strumento che permetta la sincronizzazione dei clock di computer diversi nasce dal numero sempre crescente di reti create a scopo di studio e lavoro. Se programmi comunicanti lavorano su computer differenti, il tempo tenderà sempre a scivolare in avanti o indietro passando da un computer all'altro; così, se un computer è in anticipo rispetto agli altri, questi sono in ritardo rispetto al primo e il passaggio da un computer all'altro avrà l'effetto di salti avanti e indietro nel tempo.

Oggi esistono diversi metodi utilizzati per la sincronizzazione delle innumerevoli reti presenti su tutto il globo.

Tra questi metodi ricordiamo [6]:

Plesiochronous: tipicamente utilizzato per reti che attraversano confini amministrativi. Ogni nodo riceve il tempo di riferimento da una sorgente indipendente;

Hierarchical Source-Receiver: un primary reference source in un nodo principale genera un clock di riferimento che è condiviso e distribuito. Le due componenti principali di questa configurazione sono i receiver clock usati per generare il tempo di riferimento e i cammini all'interno della rete utilizzati per trasmettere il clock di sincronizzazione;

Mutual Synchronization: l'informazione relativa al clock è condivisa tra tutti i nodi della rete. Ogni clock spedisce e riceve un tempo di riferimento a e da tutti gli altri clock nella rete. Il tempo della rete è determinato da ogni nodo come media dei segnali di sincronizzazione che riceve dagli altri clock.

Sino dalla metà degli anni '80 Internet ha utilizzato uno standard noto come Network Time Protocol per sincronizzare gli orologi di una rete utilizzando un insieme di client e server.

NTP [5] fornisce i meccanismi necessari per sincronizzare l'orologio con una precisione nell'ordine del millisecondo. Il protocollo include informazioni per specificare la precisione e l'errore commesso dall'orologio locale rispetto a quello di riferimento.

Il suo scopo è di trasportare l'informazione sul rilevamento dei tempi attraverso i server disposti all'interno della rete per poter eseguire un riscontro degli orologi e ridurre errori dovuti all'hardware e a fallimenti nella propagazione delle informazioni.

La gerarchia di NTP attualmente comprende almeno 16 server primari accessibili liberamente in U.S., Canada e U.K. Questi server devono generare e distribuire, agli altri server della sottorete di sincronizzazione, l'ora locale riferita a UTC (*Coordinated Universal Time*).

I server sono dislocati tra Nord America, Europa e Asia. Generalmente reti con un piccolo numero di client non hanno necessità di sincronizzarsi con un server primario. Per questo ci sono circa 100 server secondari accessibili liberamente e sincronizzati direttamente con un server primario capaci di fornire la sincronizzazione per circa 100000 client e server distribuiti in Internet.

All'interno di questo capitolo adotteremo la seguente nomenclatura:

- stabilità: quanto un clock riesce a mantenere una frequenza costante;
- accuratezza: quanto la frequenza e il tempo di un clock riescono a rimanere allineati con l'orologio di riferimento;
- precisione: quanto stabilità e accuratezza possono essere mantenute all'interno di uno stesso sistema;
- offset: scarto tra due orologi;
- skew: differenza di frequenza tra due clock;
- drift: differenza di skew tra due clock;

NTP è disegnato per produrre tre risultati:

- clock offset: rappresenta la quantità da aggiungere all'orologio locale per portarlo in corrispondenza con l'orologio di riferimento;
- roundtrip delay: fornisce la capacità di far arrivare un messaggio all'orologio di riferimento in un tempo specificato;
- dispersion: rappresenta il massimo errore dell'orologio locale relativo all'orologio di riferimento.

3.1 La configurazione della rete

La sottorete approntata per la sincronizzazione è formata da una rete di time server primari e secondari, da client e da cammini di interconnessione.

Un *primary time server* è sincronizzato direttamente a una sorgente di riferimento, solitamente un radio clock.

Un *secondary time server* trae la sincronizzazione, possibilmente attraverso altri secondary server, da un primary server sulla rete.

Solitamente, la rete di client e server assume una struttura hierarchical-master-slave con i server primari alla radice e i server secondari in successivi livelli verso le foglie in ordine decrescente di accuratezza.

Mantenendo le convenzioni assunte dall'industria telefonica, l'accuratezza di ogni server è definito con un intero chiamato *stratum*; così, ai server primari è assegnato un valore per stratum pari a 1, ai livelli sottostanti nella gerarchia è assegnato il valore incrementato di stratum al livello precedente. A causa di questo incremento, singoli campioni di accuratezza si degraderanno in modo dipendente dai cammini sulla rete e dalla stabilità dell'orologio locale.

La struttura della sottorete preposta per la sincronizzazione è organizzata per produrre la più alta accuratezza, ma non deve diventare un ciclo; infatti ogni incremento di stratum coinvolge un time server potenzialmente non raggiungibile, il che potrebbe introdurre un ulteriore errore nella misura.

Per risolvere questo problema l'algoritmo di selezione di NTP è una variante del Bellman-Ford distributed routing algorithm: la distanza usata dall'algoritmo consiste in stratum al quale viene aggiunta la *distanza di sincronizzazione*, che consiste in dispersion + $\frac{|\text{delay}|}{2}$.

Come risultato di questa struttura, la sottorete si riconfigura automaticamente in una hierarchical-master-slave per produrre un time preciso e affidabile, anche quando uno o più server primari o secondari, o lo stesso cammino all'interno della rete, falliscono.

3.2 Modello di implementazione

Nel più comune modello client/server, un client invia un messaggio NTP a uno o più server ed elabora la risposta. Il server scambia indirizzi e porte, sovrascrive alcuni campi nel messaggio, ricalcola il checksum e ritorna immediatamente il messaggio. Le informazioni incluse nel messaggio NTP permettono al client di determinare il time del server rispetto al proprio e di correggere quindi il clock locale.

3. IL NETWORK TIME PROTOCOL

Nel resto del capitolo indichiamo con *host* l'istanza del protocollo sul processore locale, mentre con *peer* l'istanza del protocollo su un processore remoto connesso da un cammino sulla rete.

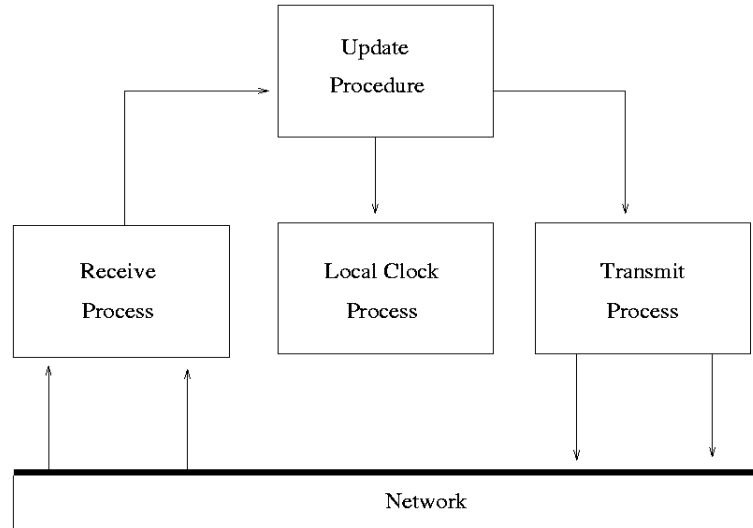


Figura 3.1: NTP: Modello Implementativo.

In figura 3.1 è mostrato il modello implementativo per un host; questo è composto da tre processi:

Transmit process: scandito da timer indipendenti per ogni peer, raccoglie le informazioni nel data base e spedisce messaggi NTP ai vari peer. Ogni messaggio contiene il timestamp locale generato al momento della spedizione del messaggio, i timestamp ricevuti precedentemente e altre informazioni necessarie per determinare la gerarchia;

Receive process: riceve messaggi NTP così come informazioni del radio clock al quale è direttamente collegato. Quando viene ricevuto un messaggio NTP, viene calcolato l'offset tra il clock locale e quello del peer; questa informazione viene incorporata nel data base insieme ad altre informazioni utili per determinare gli errori;

Update procedure: viene invocata alla ricezione di un messaggio o a intervalli predefiniti. Elabora l'offset dai dati ricevuti per ogni peer e sceglie quello migliore. Per fare ciò ha bisogno di molte osservazioni per un numero ristretto di peer o di poche osservazioni per un grande numero di peer a seconda dell'accuratezza richiesta.

Local-clock process: opera sui dati calcolati da update procedure e corregge la fase e la frequenza del clock locale; ciò può produrre un cambio repentino o una correzione graduale del clock locale per azzerare l'offset.

I dati utilizzati dai processi appena descritti sono organizzati in un database partizionato, composto da una partizione per ogni peer coinvolto nella sincronizzazione del clock locale dell'host.

3.3 Modalità di interazione

Fatta eccezione per la modalità broadcast, quando due peer si scambiano messaggi e uno o entrambi crea e mantiene un'istanza del protocollo viene instaurata tra i due una associazione NTP. L'associazione può operare in una delle cinque modalità come indicato nella variabile `mode` all'host:

- Symmetric Active (1): un host operante in questa modalità invia messaggi periodici senza badare allo stato di raggiungibilità o allo stratum del peer; è l'host che annuncia la sua volontà a sincronizzare ed essere sincronizzato con il peer;
- Symmetric Passive (2): questo tipo di associazione è solitamente creata all'arrivo di un messaggio da parte di un peer operante nella modalità symmetric active e persiste sinché il peer è raggiungibile e operante ad uno stratum minore o uguale a quello dell'host;
- Client (3): un host operante in questa modalità invia messaggi periodici senza badare allo stato di raggiungibilità o allo stratum del peer; è l'host che annuncia la sua volontà ad essere sincronizzato dal peer ma non a sincronizzarlo a sua volta;
- Server (4): questo tipo di associazione è di solito creata all'arrivo di un messaggio di richiesta da parte di un client e esiste solo il tempo necessario per la risposta alla richiesta; in questo caso l'host fa conoscere la sua intenzione a sincronizzare ma non a essere sincronizzato;
- Broadcast (5): un host operante in questa modalità invia messaggi periodici senza badare allo stato di raggiungibilità o allo stratum dei vari peer; è l'host che annuncia la sua volontà di sincronizzare tutti i peer ma senza essere sincronizzato da alcuno di essi.

Un host operante in modalità client spedisce messaggi NTP a host operanti in modalità server, per esempio dopo il reboot del sistema o a intervalli definiti. Il server risponde semplicemente scambiando indirizzi e porte, inserendo le informazioni richieste e rimandando il messaggio al client. In questo modo il protocollo si riduce a una chiamata di procedura senza perdita significativa di precisione e robustezza.

In modalità Symmetric Active e Symmetric Passive sparisce la distinzione tra client e server. Mentre la seconda è indirizzata a time server che operano

vicino ai nodi terminali nella gerarchia della rete, la prima è indirizzata per time server vicini ai nodi root della rete di sincronizzazione e con un grande numero di peer; in questa modalità non si ha necessità di mantenere precedentemente informazioni sull'identità dei singoli peer, in quanto l'associazione viene creata solo nel momento in cui arriva un messaggio NTP, ma tali informazioni potranno essere poi utilizzate qualora il peer risultasse irraggiungibile o operasse con uno stratum più alto così da non essere più utilizzabile per la sincronizzazione.

La modalità broadcast è pensata per reti con numerose workstation e qualora non sia richiesta un'elevata precisione. Tipicamente, uno o più time server spediscono periodicamente messaggi broadcast alle workstation, le quali poi calcoleranno il tempo sulla base di una latenza stabilita nell'ordine di pochi millisecondi.

3.4 NTP Data Format

Il formato del messaggio NTP che segue immediatamente l'header UDP è mostrato in figura 3.2

0	8	16	24	31
LI	VN	Mode	Stratum	Poll
Precision				
Root Delay (32)				
Root Dispersion (32)				
Reference Identifier (32)				
Reference Timestamp (64)				
Originate Timestamp (64)				
Receive Timestamp (64)				
Transmit Timestamp (64)				
Authenticator (optional) (96)				

Figura 3.2: NTP: Intestazione del messaggio NTP.

Vediamo brevemente i vari campi:

Leap Indicator (LI): è un codice a due bit di warning per l'aggiunta o la sottrazione di un secondo nell'ultimo minuto del giorno corrente;

- Version Number (VN): è un intero a tre bit indicante la versione di NTP utilizzata;
- Mode: è un intero a tre bit che indica la modalità di interazione utilizzata, come visto nei paragrafi precedenti, più tre codifiche per uso privato di NTP;
- Stratum: è l'intero a otto bit che indica il livello del clock locale, nella gerarchia della rete per la sincronizzazione; da notare che il valore 0 indica unspecified, per peer per i quali non esiste ancora alcuna associazione (per effettuare una comparazione il valore 0 è considerato maggiore di ogni altro valore);
- Poll Interval: indica il massimo intervallo in secondi tra messaggi successivi;
- Precision: indica la precisione del clock locale in secondi;
- Root Delay: indica il roundtrip delay totale dalla primary reference source;
- Root Dispersion: indica il massimo errore relativo dalla primary reference source; sono possibili solo valori positivi maggiori di zero;
- Reference Clock Identifier: identifica il clock di riferimento;
- Reference Timestamp: è il tempo locale al quale il clock locale è stato posto o corretto;
- Originate Timestamp: è il tempo locale al quale la richiesta lascia l'host client per il service host;
- Receive Timestamp: è il tempo locale al quale la richiesta arriva al service host;
- Transmit Timestamp: è il tempo locale nel quale la risposta lascia il service host per il client host;
- Authenticator (optional): quando il meccanismo di autenticazione è implementato, questo campo contiene le informazioni per l'autenticazione.

3.5 Eventi elaborati

Eventi significativi interessanti dal punto di vista di NTP occorrono quando spira il timer di un peer¹, o quando arriva un messaggio NTP da diversi peer, o ancora quando fallisce il collegamento con un server di riferimento.

3.5.1 Transmit Procedure

La procedura di trasmissione viene eseguita quando scade il timer per un peer per tutte le modalità eccetto per quella client con un server broadcast, nel qual caso non vengono mai spediti messaggi, e per la modalità server in tutti i casi, in quanto i messaggi vengono spediti solo in risposta a messaggi ricevuti;

¹Ogni peer con il quale esiste un'associazione ha un proprio timer.

inoltre viene invocata dalla procedura di ricezione quando arriva un messaggio NTP da un peer per il quale non esiste alcuna associazione.

Una volta impostati i campi di intestazione del pacchetto NTP visti nel paragrafo precedente, viene controllata la raggiungibilità del peer, a cui si vuole trasmettere il messaggio, controllando il reachability register²; se tutti i bit sono a zero il peer non è più raggiungibile e quindi, dopo aver ripulito le variabili relative al clock locale, viene scelta un'altra sorgente di sincronizzazione. Se l'associazione non era ancora stata creata, questa viene cancellata. Se vengono inseriti dati validi nel filter register³ almeno una volta durante i precedenti due poll interval viene incrementato un data valid counter; dopo otto di tali intervalli validi viene incrementato il poll interval. In caso contrario vengono decrementati il valid data counter e il poll interval e il valore per offset e delay viene posto a zero mentre per dispersion viene scelto il massimo consentito; inoltre viene selezionata un'altra sorgente per la sincronizzazione.

3.5.2 Receive Procedure

La procedura di ricezione viene eseguita all'arrivo di un messaggio NTP.

Convalida il messaggio, interpreta la modalità di interazione e chiama altre procedure per filtrare i dati e selezionare la sorgente di sincronizzazione. Se il numero di versione non corrisponde alla versione corrente, il messaggio viene scartato. La sorgente e la destinazione per gli indirizzi Internet e le porte nelle intestazioni IP o UDP vengono confrontate con i peer per i quali esiste un'associazione; se non combaciano viene iniziata una nuova istanza del protocollo e creata una nuova associazione. Viene determinata la modalità di interazione e la procedura continua per casi, mostrati in tabella 3.1, dipendenti dalla modalità del peer e dalla modalità dell'host.

Se la combinazione delle due modalità restituisce

- *error* il pacchetto viene ignorato e l'associazione eliminata;
- *recv* il pacchetto viene elaborato⁴ e l'associazione segnata come raggiungibile se l'header risulta valido; inoltre, se anche i dati sono validi il clock locale viene aggiornato. In caso contrario, se l'associazione non era già stata configurata, questa viene scartata;
- *xmit* il pacchetto viene elaborato e viene spedita subito la risposta;

²Peer Variable: è uno shift register di 8 bit usato per determinare lo stato di raggiungibilità del peer.

³Clock Filter Variable: è uno shift register di 8 posizioni, dove ogni posizione contiene una terna formata dal delay e dall'offset misurati e dalla dispersion associata calcolata con una sola osservazione.

⁴L'elaborazione dei dati contenuti nel pacchetto viene eseguita dalla Packet Procedure.

- *pck* il pacchetto viene elaborato e l'associazione segnata come raggiungibile se l'header risulta valido; inoltre, se anche i dati sono validi il clock locale viene aggiornato. In caso contrario, se l'associazione non era già stata configurata, viene spedita immediatamente una risposta e l'associazione viene scartata.

peer mode	sym act	sym pas	client	server	bcst
mode					
sym active	recv	pkt	recv	xmit	xmit
sym passive	recv	error	recv	error	error
client	xmit	xmit	error	xmit	xmit
server	recv	error	recv	error	error
broadcast	recv	error	recv	error	error

Tabella 3.1: NTP: Modalità di interazione con un generico peer.

3.5.3 Packet Procedure

La packet procedure verifica la validità del pacchetto, calcola i campioni per delay e offset e, con l'aiuto di altre procedure, filtra i dati e seleziona la sorgente di sincronizzazione.

Per verificare la validità del pacchetto viene controllato che

1. il valore di transmit timestamp non sia già stato ricevuto dallo stesso peer in quanto tale valore potrebbe essere una vecchia copia;
2. il valore di originate timestamp sia l'ultima spedita a quel peer, in caso contrario il pacchetto potrebbe essere fuori ordine o corrotto.

A questo punto viene aggiornato il poll interval e controllato che il receive e originate timestamp non siano poste a zero, se ciò accade l'associazione non è sincronizzata o è venuta a mancare la raggiungibilità in una o entrambe le direzioni.

Il pacchetto è considerato valido e si possono quindi ricavare, dai dati che contiene, clock offset, roundtrip delay e dispersion.

Per il calcolo del roundtrip delay e del clock offset relativo al peer facciamo riferimento alla figura 3.3

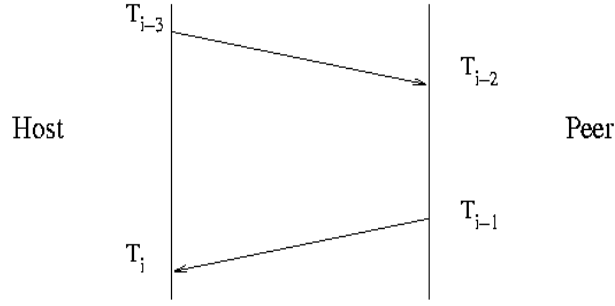


Figura 3.3: NTP: Calcolo di Roundtrip Delay e Clock Offset.

Numeriamo i tempi di spedizione e ricezione dei messaggi NTP come mostrato in figura e sia i un intero pari. I valori T_{i-3} , T_{i-2} , T_{i-1} e T_i sono, rispettivamente, il contenuto di

- pkt.org: Originate Timestamp contenuto nell'intestazione del pacchetto;
- pkt.rec: Receive Timestamp contenuto nell'intestazione del pacchetto;
- pkt.xmt: Transmit Timestamp contenuto nell'intestazione del pacchetto;
- peer.rec: Receive Timestamp propria dello stato del protocollo del peer.

Il clock offset ϑ , roundtrip delay δ e dispersion ε dell'host relativo al peer sono dati da [5]:

$$\begin{aligned}\vartheta &= \frac{(T_{i-2} - T_{i-3}) + (T_{i-1} - T_i)}{2} \\ \delta &= (T_i - T_{i-3}) - (T_{i-1} - T_{i-2}) \\ \varepsilon &= (1 \ll \text{sys.precision}) + \varphi(T_i - T_{i-3})\end{aligned}$$

dove

sys.precision è un intero che indica la precisione del clock locale in secondi;
 φ il massimo skew rate possibile

La quantità ε rappresenta il massimo errore, o dispersion, dovuto a errori di misurazione all'host e all'accumulo di skew nel clock locale sull'intervallo durante il quale è stato trasmesso l'ultimo messaggio al peer.

Quindi vengono eseguiti i seguenti test:

1. δ e ε non siano superiori a determinati parametri di NTP;
2. il peer clock deve essere sincronizzato e l'intervallo in cui il peer clock è stato corretto deve essere positivo e minore del massimo intervallo in cui un clock di riferimento è considerato valido dopo l'ultimo aggiornamento;
3. l'host non deve essere sincronizzato con un peer con più alto stratum;

4. l'header deve contenere valori ragionevoli per i campi riguardanti delay e dispersion sino alla radice della sottorete di sincronizzazione passando per il peer.

Se il pacchetto supera questi test il suo header è considerato valido e quindi il peer può essere selezionato per la sincronizzazione.

Quindi vengono copiati le variabili contenute nel pacchetto nei campi che descriveranno il peer e vengono prodotti delay, offset e dispersion relativi al peer.

3.5.4 Clock-Update Procedure

La procedura di clock-update è chiamata dalla procedura di ricezione quando vengono determinati validi valori per clock offset, delay e dispersion per il corrente peer. Viene prodotta la correzione finale per il clock locale e, nel caso in cui non vengano generati valori validi per nessun peer, la procedura di clock-update termina senza apportare alcuna modifica.

Può succedere che il clock venga azzerato; in questo caso vengono pulite tutte le variabili che riferiscono i clock di ogni peer per il quale esiste un'associazione, così come il poll interval, e viene selezionata una nuova sorgente per la sincronizzazione. Da notare che i bit di leap vengono posti a 11, non sincronizzato, così che nessun peer cerchi di sincronizzarsi con l'host prima che l'host abbia scelto un nuovo peer per la sincronizzazione.

Vengono calcolate, e impostate, il root delay, root dispersion e root synchronization distance per mezzo del peer sino alla radice della sottorete di sincronizzazione. Da notare che all'host non è permesso sincronizzarsi con un peer posto a una distanza maggiore di un valore predefinito.

3.6 Il programma ntpd

NTP viene completamente implementato mediante il programma ntpd [8] che imposta e mantiene il clock di sistema sincronizzato con i server standard sparsi per la rete.

Il programma ntpd opera scambiando messaggi con uno o più server a intervalli predefiniti.

Alla partenza, sia la prima volta che per le successive, il programma richiede diversi scambi per la maggior parte dei server così da accumulare dati che permettano l'impostazione del clock.

Molti sistemi operativi utilizzano un chip per mantenere il tempo durante periodi in cui viene a mancare la corrente. Quando la macchina viene accesa, il chip è utilizzato per inizializzare il time del sistema.

3. IL NETWORK TIME PROTOCOL

Dopo la sincronizzazione con un server NTP, il sistema operativo corregge il chip di volta in volta. Nel caso in cui non sia presente il chip, o per una qualunque ragione il suo tempo differisce da quello del server per una quantità maggiore di 1000s, ntpd assume che sia successo qualcosa di irreparabile e l'unica azione sicura è l'intervento dell'operatore che dovrà impostare il clock manualmente. Anche se esiste la possibilità di controllare il valore rilevato dal chip, una volta che il clock è stato impostato, un errore maggiore di 1000s causerà ugualmente l'uscita di ntpd.

Solitamente ntpd corregge il clock con piccoli passi così da ottenere una scala temporale il più continua possibile. In condizioni di grande congestione della rete, il roundtrip delay può eccedere 3s a la distanza di sincronizzazione può diventare molto grande. Per questo ntpd scarta campioni il cui offset eccede 128ms, a meno che l'intervallo di tempo durante il quale non ci sono campioni con offset minore di 128ms non superi i 900s. Il primo campione dopo questo, qualunque sia l'offset, porta il clock al tempo indicato.

Come risultato di questo comportamento, una volta che il clock è stato impostato, è molto raro perdere più di 128ms, anche sotto condizioni di forte congestione della rete. In alcuni casi, come all'inizio della sincronizzazione, l'errore può eccedere i 128ms con la conseguenza di vedere il clock impostato indietro se risulta in avanti più di 128ms rispetto a quello del server. In alcune applicazioni un tale comportamento non è accettabile. Un'opzione data a ntpd impedisce che le correzioni avvengano con salti bruschi consentendo correzioni massime di 500 parti per milione (PPM), con la conseguenza di impiegare molto tempo perché si converga ad un offset accettabile, circa 2000s per ogni secondo in cui il clock è fuori da un range accettabile. Durante questo intervallo il clock locale non è significativo e il sistema non può essere usato per applicazioni che richiedono il tempo corretto della rete.

Il comportamento iniziale di ntpd dipende dall'esistenza del file di frequenza, generalmente ntp.drift. Questo file contiene l'ultimo errore stimato di frequenza.

Quando ntpd inizia e il file non esiste, ntpd entra in una modalità speciale appositamente creata perché il clock di sistema si adatti velocemente a dei valori nominali utilizzati per iniziare poi la sincronizzazione con un server di rete.

Dopo circa un'ora il file di frequenza viene creato e vi viene memorizzato il corrente offset.

Se invece, alla partenza di ntpd, il file esiste la frequenza è inizializzata a quella del file e viene iniziata immediatamente la sincronizzazione mediante un server. Dopo di che la frequenza corrente viene memorizzata nel file a intervalli

di un'ora.

3.6.1 ntpd in pratica

In figura 3.4 è mostrato il comportamento del programma ntpd si vuole sincronizzare un client con un server.

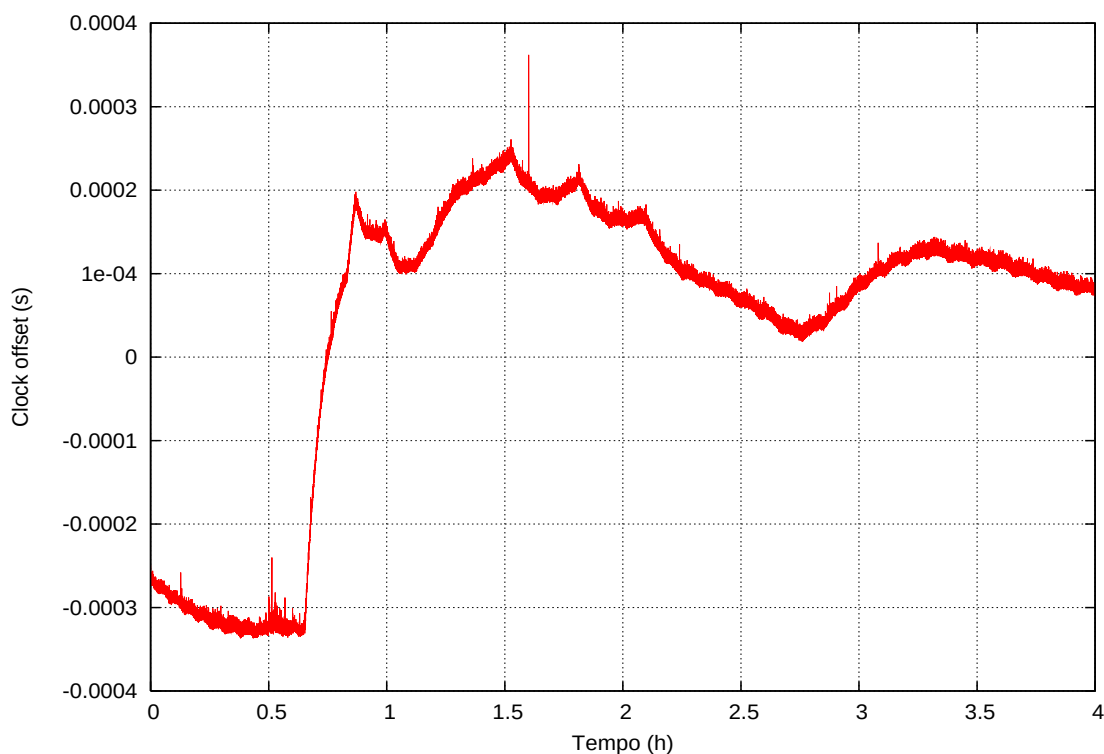


Figura 3.4: NTP: Comportamento di ntpd per la sincronizzazione di un client con un server di riferimento.

La misura è stata realizzata impostando un portatile come server NTP e un altro come client NTP, come spiegato in Appendice A, e mantenendo una connessione dedicata tra le due macchine utilizzando un cavo cross.

La rilevazione dei clock locali è stata realizzata mediante un programma che rileva il clock locale del computer ad esso collegato mediante la porta ethernet. La misurazione è iniziata senza il funzionamento di NTP su entrambe le macchine. ntpd è stato lanciato dopo 30 minuti dall'inizio della misura su entrambi i portatili. In figura è ben visibile il momento in cui, creata l'associazione per il server, ntpd sulla macchina client esegue una prima correzione al clock locale, inferiore a 1 PPM, e le più piccole correzioni successive.

Capitolo 4

Hardware e software

In questo capitolo viene presentato l'hardware fornito per eseguire le misure e il software utilizzato per realizzarle.

Alla fine del capitolo viene presentato il metodo di analisi utilizzato per disegnare i grafici che mostrano i risultati ottenuti.

4.1 Hardware

La rete ad hoc utilizzata per la campagna di misure è costituita da due portatili che comunicano tramite schede PCMCIA per connessioni wireless.

I portatili I portatili a nostra disposizione sono di due case costruttrici differenti, tre portatili di *IBM* e un portatile di *Acer*.

Grazie alla sua stabilità e alla quantità di software disponibile e utilizzabile liberamente, è stato deciso di utilizzare come sistema operativo *Linux GNU/Debian* con versione del kernel 2.6.8.

Vediamo in dettaglio le caratteristiche tecniche dei portatili che distingueremo per mezzo dell'hostname indicato:

- **IBM:**
 - **Modello:** ThinkPad R40e
 - **Sistema Operativo:** Debian Linux
 - **Versione del Kernel:** 2.6.8
 - **Processore:** Mobile Intel Celeron Processor 1.8GHz 400MHz FSB
 - **Memoria:** 256MB RAM espandibile sino a 1024MB
 - **HDD:** 30GB Ultra ATA/100 HDD
 - **Networking:** Modem/Fax 56Kbps, scheda 10/100 Base-T Ethernet

- **Interfacce:** 1 x RJ-11 per modem, 1 x RJ-45 per Ethernet, 1 Slot PCMCIA CardBus a 32 bit di tipo II o 1 di tipo III;
- **Hostname:** *pettirosso, passero, cardellino*.
- Acer:
 - **Modello:** TravelMate 220
 - **Sistema Operativo:** Debian Linux
 - **Versione del Kernel:** 2.6.8
 - **Processore:** Mobile Intel Celeron Processor 1.33GHz 133MHz FSB
 - **Memoria:** 256MB RAM espandibile sino a 1024MB
 - **HDD:** 20GB Ultra ATA/100 HDD
 - **Networking:** Modem/Fax 56Kbps, scheda 10/100 Base-T Ethernet
 - **Interfacce:** 1 x RJ-11 per modem, 1 x RJ-45 per Ethernet, 1 Slot PCMCIA CardBus a 32 bit di tipo II o 1 di tipo III;
 - **Hostname:** *martin*

Le schede wireless Per eseguire le misure sono state fornite schede di case costruttrici differenti: *LinkSys*, *CNet* e *D-Link*. Questo ha portato ad un lavoro preliminare alla campagna di misure vera e propria finalizzato a determinare il comportamento delle schede in termini di predata di pacchetto. Le modalità e i risultati ottenuti dalla valutazione delle schede sono riportati nel capitolo 5.

Vediamo in dettaglio le caratteristiche tecniche delle schede:

- LinkSys:
 - **Modello:** WPC11 versione ver3.0
 - **Driver utilizzato:**
 - * prism2 versione 0.2.1-pre17
 - * orinoco versione 0.13e
 - **Protocollo supportato:** 802.11b
 - **Tipi di adattatore:** PCMCIA type II o III Slot
 - **Canali:** 13 canali in Europa
 - **Velocità di trasmissione:** 1Mbps, 2Mbps, 5.5Mbps, 11Mbps
- CNet:
 - **Modello:** CNWLC-811 versione 18-1B-811L-EU
 - **Driver utilizzato:** atmel versione 2.1.1
 - **Protocollo supportato:** 802.11b

- **Tipi di adattatore:** PCMCIA type II o III Slot
- **Canali:** 13 canali in Europa
- **Velocità di trasmissione:** 1Mbps, 2Mbps, 5.5Mbps, 11Mbps
- D-Link:
 - **Modello:** DWL-G650+ versione 1.0.11
 - **Driver utilizzato:** acx100 versione 0.2.
 - **Protocollo supportato:** 802.11b/g
 - **Tipi di adattatore:** PCMCIA type II o III Slot
 - **Canali:** 13 canali in Europa
 - **Velocità di trasmissione:** 1Mbps, 2Mbps, 5.5Mbps, 6Mbps, 8Mbps, 11Mbps, 12Mbps, 18Mbps, 22Mbps, 36Mbps, 48Mbps, 54Mbps

4.2 Il software utilizzato

Il software utilizzato per eseguire tutte le misure presentate nei capitoli successivi è formato da due programmi: un programma trasmettitore, realizzato prima dell'inizio di questa tesi, e un programma ricevitore sviluppato durante il lavoro di tesi.

Entrambi i programmi generano un file di log nel quale vengono mantenute, oltre alle informazioni proprie dei singoli pacchetti trasmessi o ricevuti, indicazioni relative all'intera misura e inoltre danno la possibilità di visualizzare alcune informazioni che permettono di controllare la misura in corso.

Trasmettitore Il programma trasmettitore, *send*, costituisce un'interfaccia ad alto livello per la trasmissione a livello 2 del modello OSI mostrato in figura 6.1.

Un tipico utilizzo del programma *send* è il seguente:

```
send -i interface -c packet -l length -m time MACAddress
```

dove con le varie opzioni vengono specificati:

1. **-i:** l'interfaccia su cui verranno inviati i pacchetti;
2. **-c:** il numero di pacchetti da trasmettere;
3. **-l:** la lunghezza del singolo pacchetto;
4. **-m:** il tempo di intervallo tra la trasmissione di un pacchetto e il successivo.
5. **MACAddress:** l'indirizzo MAC dell'host di destinazione, nel caso di trasmissione unicast, o l'indirizzo ff:ff:ff:ff:ff:ff nel caso di trasmissione broadcast.

Altre opzioni utilizzate per le misure sono

- **-s**: specifica il nome del file di log;
- **-D | F | I | R**: specifica il contenuto del pacchetto;
- **-v**: per la modalità verbose, ossia per mostrare a video il lavoro svolto dal programma;
- **-help**: stampa a video l'help del programma elencando le varie opzioni con gli eventuali valori di default.

Il file di log generato da tale programma è mostrato in figura 5.1.

```
#
#-- Starting a new log at Fri Mar 25 09:12:45 2005
# eth1 is the interface
# 00:08:A1:3B:C8:6D is the source MAC address
# 00:08:a1:42:fb:c6 is the destination MAC address
# fixed is the bit rate policy
# 0 is the short retry limit
# 0 is the long retry limit
# 100 is the signal quality range
# 100 is the signal level range
# 0 is the signal noise range
# 1111741965.4922 is the reference time
#packet,rate,qua,sig,no ,len.,requested,actual ,jitter
#number,Mb/s,lty,nal,ise,[B],time [s],time [s], [us]
  1, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0000, 0.0000, 0
  2, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0042, 0.0050, -24
  3, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0092, 0.0100, 1
  4, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0142, 0.0150, -6
  5, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0192, 0.0200, 5
  6, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0242, 0.0250, -7
  7, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0292, 0.0300, 0
  8, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0342, 0.0350, 27
  9, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0392, 0.0400, -26
 10, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0442, 0.0450, -4
 11, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0492, 0.0500, 1
 12, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0542, 0.0550, -3
 13, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0592, 0.0600, 2
 14, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0642, 0.0650, -3
 15, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0692, 0.0700, 0
 16, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0742, 0.0750, -2
 17, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0792, 0.0800, 0
 18, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0842, 0.0850, -1
 19, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0892, 0.0900, -1
 20, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0942, 0.0950, -2
 21, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.0992, 0.1000, 2
 22, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.1042, 0.1050, -2
 23, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.1092, 0.1100, 1
 24, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.1142, 0.1150, -4
 25, 11, 0, 0, 0, 0,1000, 0.1192, 0.1200, 1
```

Figura 4.1: Esempio di file generato dal programma trasmettitore.

Nel file vengono inserite inizialmente alcune righe di informazioni contenenti la data e l'ora d'inizio della misura, il nome dell'interfaccia di trasmissione, gli indirizzi MAC sorgente e destinazione, se la velocità utilizzata è fissa, i valori massimo e minimo per le ritrasmissioni, il tempo di riferimento espresso in secondi.

Il file di log vero e proprio è formato da nove colonne contenenti, per ogni pacchetto

- il numero di sequenza del pacchetto;
- la velocità di trasmissione in Mb/s;
- la qualità del segnale ricevuto;
- il livello del segnale ricevuto;
- il rumore del segnale ricevuto;
- la lunghezza del pacchetto in byte;
- il tempo, in secondi, di trasmissione in relazione al tempo di riferimento;
- il tempo attuale di trasmissione, in secondi;
- il jitter, in μs , cioè l'errore di trasmissione del pacchetto rispetto alla trasmissione del pacchetto precedente.

Alla fine dell'esecuzione vengono stampate a video alcune statistiche come il tempo impiegato dal programma per inviare i pacchetti, il numero di pacchetti spediti, il numero di quelli spediti in ritardo e una media del ritardo eseguita su tutti i pacchetti inviati.

Ricevitore Il programma ricevitore, *receive*, utilizza, nella sua implementazione, la libreria *Packet Capture* (PCAP) che fornisce un'interfaccia ad alto livello per la cattura dei pacchetti; utilizzando questa libreria sono accessibili tutti i pacchetti che viaggiano sulla rete, inclusi i pacchetti destinati ad altri host.

Nel main del programma vengono utilizzate la funzione *pcap_open_live(...)*, che permette di ottenere un descrittore dei pacchetti catturati sulla rete, e la funzione *pcap_loop(...)*, che permette di collezionare ed elaborare i pacchetti catturati. Quest'ultima funzione, alla ricezione di un nuovo pacchetto, invoca la *got_packet(...)* che aggiorna il file di log e la stampa a video con le informazioni ottenute dall'ultimo pacchetto ricevuto.

```
# Cell 01 - Address: 02:00:7C:D0:73:26
# ESSID:"piolo"
# Mode:Ad-Hoc
# Channel:1
# Encryption key:off

# Starting a new log at Fri Mar 25 09:33:07 2005
# Sysname : Linux
# Nodename : passero
# Release : 2.6.8-tkpad-acx
# Version : #1 Thu Sep 30 10:51:01 UTC 2004
# Machine : i686
# eth1 is the interface
# fixed is the bit rate policy : 11Mb
# 0 is the short retry limit
# 0 is the long retry limit
# 100 is the signal quality range
# 100 is the signal level range
# 0 is the signal noise range

# MAC Addr RX : 0:8:a1:42:fb:c6
# MAC Addr TX : 0:8:a1:3b:c8:6d
# Tempo di interrarrivo : 0.005000s

# Time           Length Seq    Qual   Level  Noise  Status  Jitter
1111743187.202359 1014  0      0      49     0      1      INF
1111743187.204024 1014  1      0      49     0      1     -0.003335
1111743187.205388 1014  2      0      49     0      1     -0.003636
1111743187.206991 1014  3      0      49     0      1     -0.003397
1111743187.208577 1014  4      0      49     0      1     -0.003414
1111743187.209949 1014  5      0      49     0      1     -0.003628
```

Figura 4.2: Esempio di file generato dal programma ricevitore.

Il file di log generato dal programma *receive*, mostrato in figura 5.2, contiene informazioni riguardanti il computer in ricezione mediante il suo hostname, il sistema operativo che utilizza e la sua versione, alcune delle informazioni che si ritrovano anche nel programma *send* e il tempo utilizzato per intervallare la trasmissione. Inoltre viene mantenuta traccia delle eventuali reti presenti nei vari canali previsti dallo standard; tali informazioni sono ottenute reindirizzando, nel file generato da *receive*, il risultato del comando

`iwlist interface scanning`

dove con *interface* viene specificata l'interfaccia su cui eseguire il comando.

Da notare che si è dovuto aumentare il tempo di scanning rispetto a quello stabilito dalla funzione `iwlist` in quanto ci siamo accorti che questo era troppo

breve e non sempre si riuscivano ad individuare tutte le reti eventualmente presenti nell'ambiente di misura.

Il file di log vero e proprio è costituito da otto colonne contenenti:

1. il tempo assoluto di ricezione del pacchetto;
2. la lunghezza del pacchetto;
3. il numero di sequenza del pacchetto ricevuto;
4. informazioni relative, per ogni pacchetto, alla qualità del segnale ricevuto così come il suo livello e rumore;
5. lo stato di ricezione del pacchetto; un valore pari a 1 indica che il pacchetto è stato ricevuto, 0 che il pacchetto è andato perduto;
6. il jitter, inteso come errore del tempo di ricezione del pacchetto rispetto al tempo di ricezione atteso in accordo con il valore di intertrasmissione impostato e al tempo rilevato per l'ultimo pacchetto ricevuto.

Nel caso in cui il pacchetto venga perso, nel file di log la riga ad esso corrispondente è costituita da soli 0 tranne il valore di jitter per il quale è stato scelto il valore INF, infinito, ad indicare che non si ha la possibilità di calcolare il valore reale. Inoltre, il driver della scheda che si è scelto di utilizzare per la campagna di misure rendeva note le informazioni riguardanti il segnale ricevuto solo per reti con infrastruttura; si è quindi dovuto intervenire sul driver stesso per ottenere tali informazioni anche per reti ad hoc.

Inoltre, come specificato dallo stesso driver, il valore mostrato è dato da

$$\text{Signal-Level} = \frac{\text{RSSI}}{42} * 100$$

dove RSSI (*Receive Signal Strength Indicator*), è un parametro del livello fisico indicante una stima della potenza del segnale all'antenna ricevente; il valore 42, specifica ancora il driver, è stato ottenuto per via sperimentale e indica il valore di potenza massimo rilevato con tali prove.

In figura 5.3 è mostrato un esempio delle informazioni stampate a video.

Le informazioni stampate a video per il monitoraggio della misura quando questa è ancora in corso, sono relative ad ogni singolo pacchetto ricevuto; in particolare viene visualizzata una crocetta per ogni pacchetto andato perduto e un puntino per ogni pacchetto ricevuto.

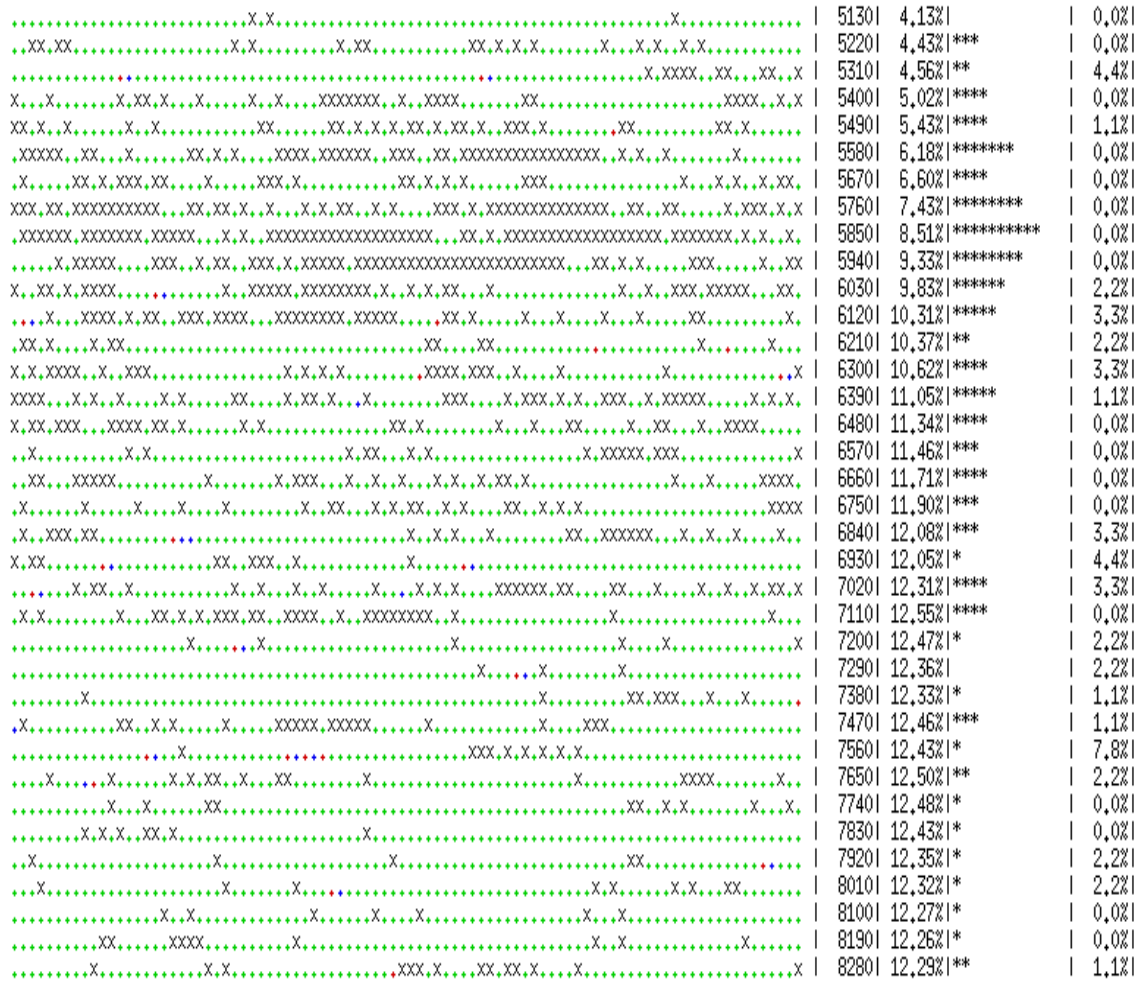


Figura 4.3: Esempio di traccia generata a video dal programma ricevitore.

Se il pacchetto non è stato perso si ha una differenziazione dei vari pacchetti ricevuti mediante la colorazione del punto corrispondente: in relazione ad un intervallo di tempo scelto per stimare la puntualità della ricezione del singolo pacchetto, il puntino viene colorato di verde se il pacchetto è arrivato in orario, di rosso se è in ritardo e di blu se è stato ricevuto in anticipo.

Inoltre, alla fine di ogni riga vengono visualizzate alcune statistiche quali:

1. il numero di sequenza dell'ultimo pacchetto ricevuto;
2. la percentuale di perdita dall'inizio della misura;
3. la statistica relativa alla percentuale di perdita dei pacchetti che compaiono sulla stessa riga;
4. la percentuale dei pacchetti che sono stimati essere arrivati in orario.

4.3 Metodo di analisi

L'elaborazione dei dati generati dal software utilizzato per eseguire le misure hanno lo scopo di rilevare la perdita di pacchetto riscontrata e la potenza del segnale ricevuto.

In un primo momento si è pensato che la media di tali valori fosse sufficiente per confrontare i risultati ottenuti dalle varie misure, ma ci si è subito resi conto come questa stima non fosse adatta a mantenere le caratteristiche di misure della durata di circa 15 minuti.

Si è quindi deciso di dividere i dati in intervalli disgiunti di grandezza dipendente dalla durata della misura stessa e che permettesse di ottenere una statistica sufficientemente fedele all'andamento generale di tale misura.

Sugli intervalli così ottenuti si è eseguita quindi la media della perdita di pacchetti registrata e di questa è stata calcolata la densità di probabilità.

I grafici che rappresentano sinteticamente la distribuzione per la perdita di frame e il livello di segnale rilevati per le varie misure sono costituiti da barre indicanti massimo, minimo e media; in tali grafici, per massimo, minimo e media si intendono i valori calcolati utilizzando un intervallo entro cui è contenuto il 90% dei campioni, eliminando il 5% superiore e quello inferiore della distribuzione.

Capitolo 5

Misura dell'affidabilità delle schede wireless

Le schede a nostra disposizione per effettuare la campagna di misure sono prodotte da case costruttrici differenti; per questo motivo si è deciso di eseguire, come lavoro preliminare alla campagna stessa, una valutazione dell'affidabilità delle varie schede in termini di perdita di frame; nel resto del capitolo ci riferiremo a tale affidabilità con *prestazione* della data scheda.

Per fare ciò si è inoltre stabilito di effettuare le misure di test disabilitando le ritrasmissioni e alla massima velocità consentita dalla scheda.

La prima operazione è stata quindi quella di determinare le operazioni di *wireless extension* e di *wlan-ng* supportate dai vari driver nonché le operazioni private messe a disposizione dagli stessi.

5.1 Operazioni Wireless Extention

Wireless Extension (WE) è una generica API (*Application Program Interface*) che permette al driver di mostrare all'utente la configurazione e le statistiche specifiche di una normale wireless LAN.

Una serie di programmi a riga di comando utilizzano la WE per accedere ai parametri che caratterizzano una particolare rete wireless, nonché di intervenire sul loro valore, indipendentemente dal tipo (infrastrutturata o ad hoc) purchè il driver supporti la Wireless Extension.

Inoltre i parametri della rete come il numero di ritrasmissioni da eseguire o la bit rate possono essere modificati senza il bisogno di far ripartire nuovamente il driver o il sistema operativo.

Nella seguente tabella sono riassunte le operazioni messe a disposizione dalla WE. Per ognuna delle schede vengono specificati il nome della casa costruttrice, la versione, il driver e la versione del driver utilizzato dalle rispettive schede.

Scheda versione	CNet 18-1B-811L-EU	LinkSys ver.3	LinkSys ver.3	D-Link 1.0.11
Driver versione	atmel 2.1.1	prism2 0.2.1-pre17	orinoco 0.13e	acx100 0.2.0pre8
essid	ok	fun not impl	ok	ok
nwid/domain	op not sup	fun not impl	op not sup	op not sup
freq/channel	ok	non esegue	ok	ok
sens	op not sup	fun not impl	invalid arg	invalid arg
mode	ok	fun not impl	invalid arg	ok
ap	no	no	no	ok
nickname	ok	fun not impl	ok	ok
rate/bit	ok	fun not impl	ok	ok
rts	ok	fun not impl	ok	ok
frag	ok	fun not impl	ok	op not sup
key	ok	fun not impl	ok	ok
power	ok	fun not impl	ok	ok
txpower	op not sup	fun not impl	ok	ok
retry	ok	fun not impl	op not sup	ok

Tabella 5.1: Riassunto operazioni WE.

Come si può vedere in tabella, le schede più adatte allo studio che si vuole intraprendere risultano essere quelle prodotte dalla CNet e dalla D-Link in quanto le operazioni fondamentali di cui si ha bisogno sono la possibilità di modificare il valore delle ritrasmissioni così come la velocità e il canale su cui trasmettere; tali valori sono specificati rispettivamente alle righe **retry**, **rate/bit** e **freq/channel** di tale tabella.

La scheda LinkSys con il driver orinoco versione 0.13e non permette di imporre un valore per le ritrasmissioni diverso da quello impostato di default mentre il driver prism2 versione 0.2.1-pre17 per la stessa scheda non supporta molte delle operazioni messe a disposizione dal tool per la WE. Per questo motivo sono state installate versioni più aggiornate di tale driver che sembravano aver implementato le operazioni richieste dal presente studio ma le stesse operazioni risultano essere ancora non implementate.

5.2 Operazioni wlan-ng

Wlan-ng è un progetto *free software* con lo scopo di sviluppare un sistema completo Wireless LAN basato sullo standard che utilizza le operazioni di sistema di Gnu/Linux. La differenza essenziale tra la Wireless Extension e la wlan-ng è che quest'ultima è stata sviluppata appositamente per lo standard 802.11. Il pacchetto Wlan contiene driver e utility per Gnu/Linux che supportano schede wireless con Intersil PRISM chipset per le funzioni radio e AMD PCNet-Mobile chip per le funzioni MAC.

In tabella sono riportate solo alcune delle operazioni wlan-ng per la sola scheda LinkSys ver.3 con driver prism2 versione 0.2.1-pre17.

Operazione	
dot11RTSThreshold	ok
dot11FragmentationThreshold	ok
p2CnfOwnChannel	no
p2RTSThreshold	ok
p2FragmentationThreshold	ok
p2TxRateControl	no

Tabella 5.2: Operazioni wlan-ng verificate.

5.3 Valutazioni delle prestazioni

Per valutare le prestazioni delle schede si sono effettuate due tipologie di misure:

1. si sono mantenuti fissi il computer trasmittente e il computer ricevente e si sono invertite le schede per evidenziare eventuali diversità nel comportamento delle stesse;
2. si sono invertiti i computer e sono state ripetute le prove per determinare prestazioni differenti introdotte da un eventuale diversità hardware nei portatili.

I risultati dei vari test effettuati sono riportati in grafici tridimensionali che descrivono la distribuzione della percentuale di perdita di pacchetti, in cui vengono indicati sull'asse X la perdita di frame riscontrata in percentuale mentre sull'asse Y la misura realizzata.

I test sono stati completamente eseguiti in una zona poco frequentata del parcheggio dell'area di ricerca CNR di Pisa per cercare di evitare il passaggio

di un numero elevato di persone al fine di limitare le eventuali interferenze che queste potevano creare.

Per diminuire inoltre la corruzione delle misure dovute al cambiamento di ambiente, dovuto per esempio al sopraggiungere di nuovi veicoli, si sono eseguiti i test in orari in cui abbiamo osservato esserci la minore affluenza nella zona scelta.

5.3.1 Confronto CNet – CNet

Per agevolare la descrizione del lavoro realizzato si è deciso di distinguere le schede CNet in base al MAC address. Nella tabella 5.3 è descritta la nomenclatura utilizzata.

Nome scheda	MAC
CNET1	00:08:A1:42:FB:C6
CNET2	00:08:A1:42:FB:A5
CNET3	00:08:A1:3B:C8:6D

Tabella 5.3: Distinzione delle schede CNet in base all’indirizzo MAC.

La valutazione delle CNet, realizzata impostando la velocità di trasmissione a 11 Mb/s, è iniziata effettuando misure a 60 metri mantenendo in trasmissione e in ricezione lo stesso portatile, rispettivamente *pettirosso* e *passero*, combinando tra di loro tutte le schede CNet a nostra disposizione.

In figura 5.1 sono riportati i risultati ottenuti da questo test.

Eseguita la prima misura con CNET3 in trasmissione e CNET1 in ricezione e invertendo poi le schede si è subito rilevato un comportamento anomalo nel sistema: l’inversione delle schede ha portato la perdita da un valore inferiore al 5% ad uno compreso tra il 20% e il 60%.

Si è passati subito al confronto di queste due schede con la terza della stessa casa cercando di individuare quale delle due prese in esame nel test precedente fosse causa di tale comportamento.

Si è quindi eseguito il test con CNET2 in trasmissione e CNET1 in ricezione e si sono quindi invertite le schede: ancora una volta si è passati da una perdita irrilevante ad una tra il 20% e il 60% invertendo le schede.

Il test eseguito escludendo dalla trasmissione CNET1, ponendo quindi CNET3 in trasmissione e CNET2 in ricezione e vice versa, ha fatto registrare, in entrambi i casi, una perdita di pacchetto inferiore a 1 %. Questo risultato ha fatto pensare ad un problema della scheda CNET1 in trasmissione in quanto, nei casi in cui questa scheda è stata utilizzata per la ricezione, i risultati

ottenuti si sono mostrati in linea con quelli relativi alle trasmissioni che non la coinvolgono.

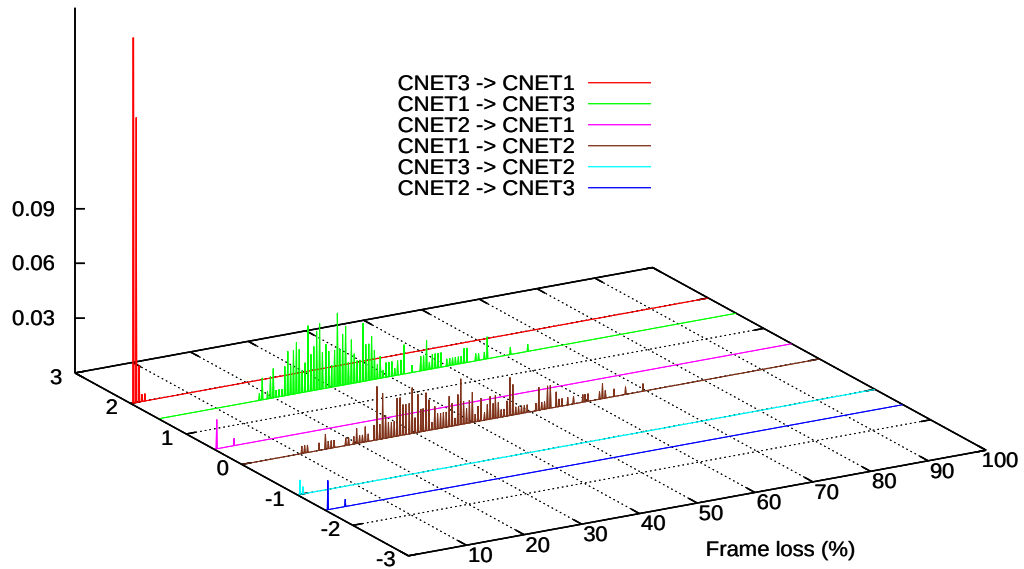


Figura 5.1: Test CNet–CNet: Misure eseguite a 60 metri a 11 Mb/s mantenendo fissi i computer in trasmissione, *pettiroso*, e in ricezione, *passero*, e invertendo le schede.

Al fine di escludere un eventuale collegamento tra il problema rilevato con la CNET1 e i portatili utilizzati per eseguire le misure, si è proseguito con il test di tale scheda introducendo un nuovo portatile di casa produttrice differente, un ACER (*martin*), eseguendo le seguenti prove:

1. sono state ripetute le prove eseguite precedentemente
 - a) con CNET1 in trasmissione e CNET3 in ricezione
 - b) con CNET3 in trasmissione e CNET1 in ricezione
2. sono stati invertiti i portatili e sono state realizzate le stesse prove di cui al punto precedente
3. si è confrontato il comportamento dei portatili sin qui utilizzati con il nuovo computer.

I risultati sono riportati in figura 5.2, in cui viene inoltre indicato, dalle frecce poste nella parte posteriore del grafico, il valor medio ottenuto per ogni misura.

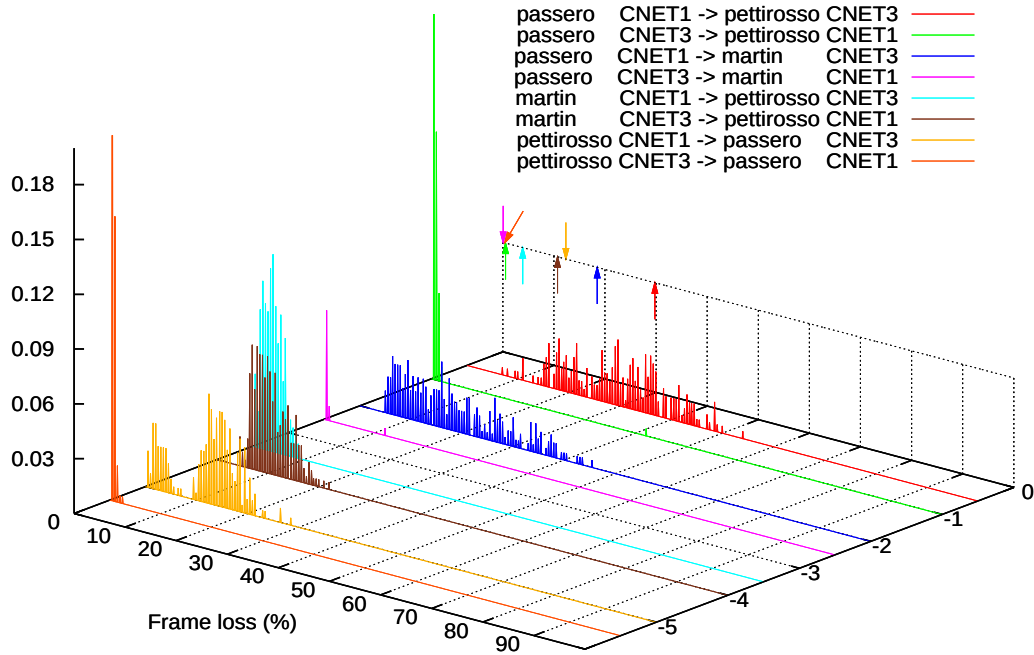


Figura 5.2: Test CNet–CNet: Misure eseguite a 60 metri a 11 Mb/s introducendo martin e per le sole schede CNET1 e CNET3; le frecce indicano la perdita percentuale media ottenuta per ciascuna misura.

I grafici in ordinata -0.5 e -1 riportano i risultati ottenuti eseguendo i test con gli stessi portatili, sia in trasmissione che in ricezione, utilizzati per il test precedente: ancora la percentuale di perdita passa da un valore compreso tra il 20% e il 60% ad uno inferiore al 5%.

Invertendo i computer, come si può vedere in ordinata -5 e -5.5, si è ottenuto uno slittamento della curva i cui valori, quando a trasmettere è la CNET1, sono compresi tra lo 0% e il 30% mentre invertendo le schede la percentuale è rimasta pressocchè invariata rispetto al test precedente.

I risultati ottenuti introducendo come computer ricevente *martin* sono mostrati in ordinata -2 e -2.5: il comportamento conseguito è analogo a quelli ottenuti precedentemente. Utilizzando però questo nuovo portatile in trasmissione si è ottenuta una perdita con percentuale compresa tra 0% e 10% con

CNET1 come trasmettitore mentre ponendo tale scheda in ricezione, e quindi CNET1 in trasmissione, il valore varia tra 5% e 25%.

Si è ancora ottenuto, quindi, un comportamento differente invertendo le schede, ma non in modo così sostanziale come nelle prove eseguite in precedenza.

Un ulteriore test è stato ottenuto relazionando le CNet con una delle due D-Link a nostra disposizione.

Prima di eseguire il test ci si è assicurati che, nelle stesse condizioni di test delle schede CNet, ossia distanza di 60 metri tra computer trasmittente e computer ricevente e velocità di trasmissione pari a 11 Mb/s, le D-Link avessero un comportamento stabile. Per verificare ciò si sono :

1. fissati il computer ricevente e trasmittente eseguite due misure:
 - a) con DLINK2 in trasmissione e DLINK1 in ricezione;
 - b) con DLINK1 in trasmissione e DLINK2 in ricezione;
2. invertiti i portatili sono state ripetute le prove di cui al punto precedente

dove DLINK1 e DLINK2 sono i nomi assegnati alle schede D-Link distinguendole per il loro indirizzo MAC come specificato in tabella 5.4 a pagina 86.

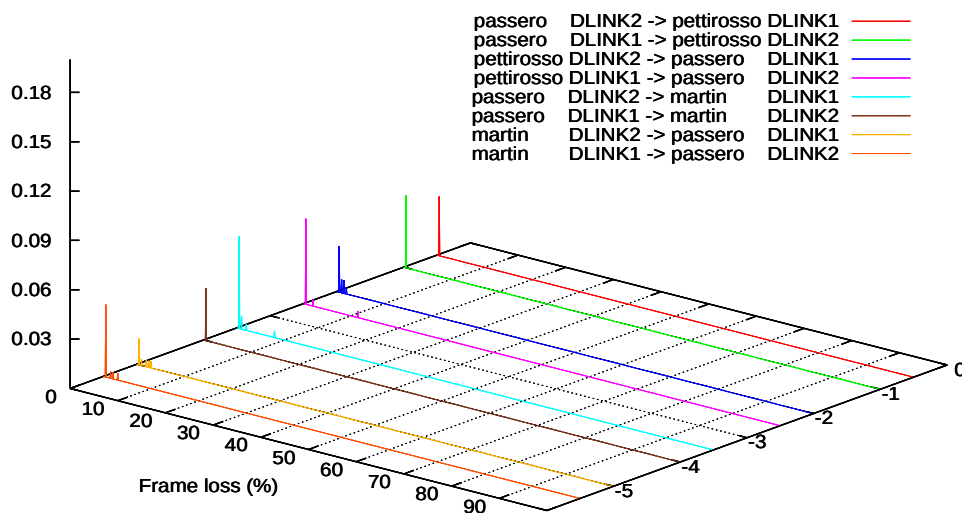


Figura 5.3: Misure eseguite a 60 metri a 11 Mb/s per testare il comportamento delle due D-Link nelle stesse condizioni di test delle CNet.

Come si può notare in figura 5.3, con le varie configurazioni ottenute seguendo il criterio appena descritto, si sono registrate percentuali di perdita di frame tutte inferiori al 5%. Questa rilevazione permette di affermare che i computer in trasmissione e in ricezione non influenzano il valore registrato dal test effettuato e quindi permette di scegliere in modo arbitrario quale delle due schede relazionare con le CNet.

In figura 5.4 sono mostrati i risultati ottenuti relazionando i due tipi di schede e utilizzando come computer in trasmissione *pettirosso* e in ricezione *passero*, sono state quindi eseguite con gli stessi portatili e nelle stesse condizioni di trasmissione, ancora la velocità è impostata a 11 Mb/s, con cui si sono realizzate le misure riportate in figura 5.1.

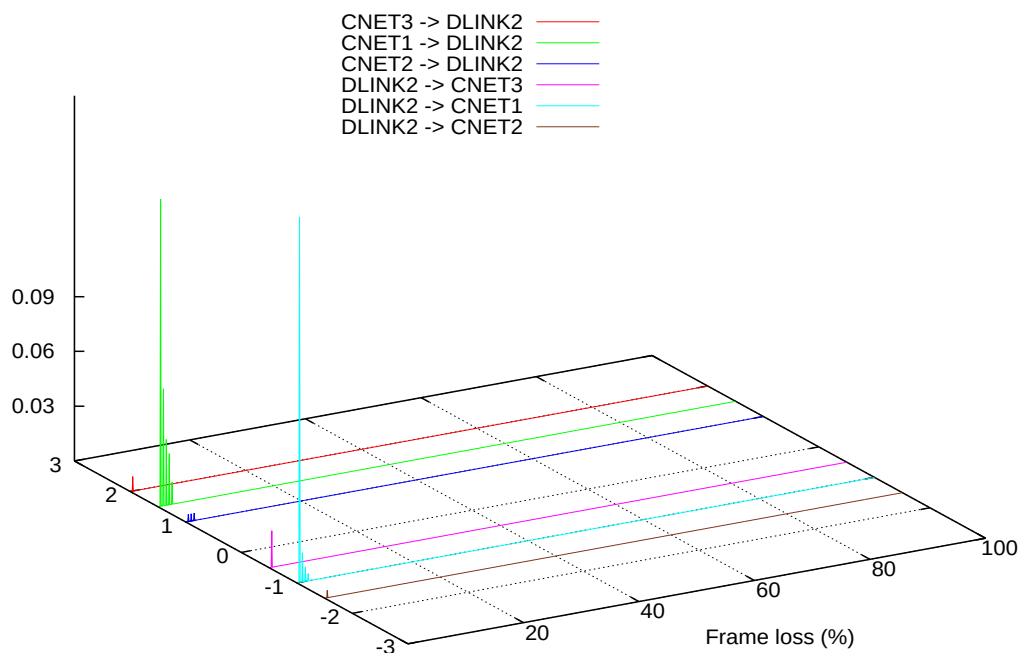


Figura 5.4: Test Cnet–D-Link: Misure eseguite a 60 metri a 11 Mb/s relazionando una D-Link con le CNet prima in ricezione e poi in trasmissione.

In ordinata 2, 1.5 e 1 sono rappresentati i risultati ottenuti ponendo in ricezione la scheda DLINK2 mentre in ordianta -0.5, -1, -2 si trovano quelli relativi ai test ottenuti ponendo tale scheda in trasmissione.

Ancora una volta le misure ottenute con la CNET1, in trasmissione o in ricezione, hanno registrato le peggiori prestazioni. Tuttavia la differenza con le rimanenti due schede non è così rilevante da poter essere sicuri del difetto della prima, in quanto tutti i test hanno riportato valori di perdita di frame inferiore al 5%.

È stata quindi effettuata un' ultima prova a 80 metri mantenendo fissi il portatile in trasmissione, *pettirosso*, e il portatile in ricezione, *passero*, e facendo ruotare le tre schede.

Come si può vedere dal grafico in figura 5.5, in questa situazione le tre schede hanno registrato lo stesso comportamento sia in trasmissione che in ricezione.

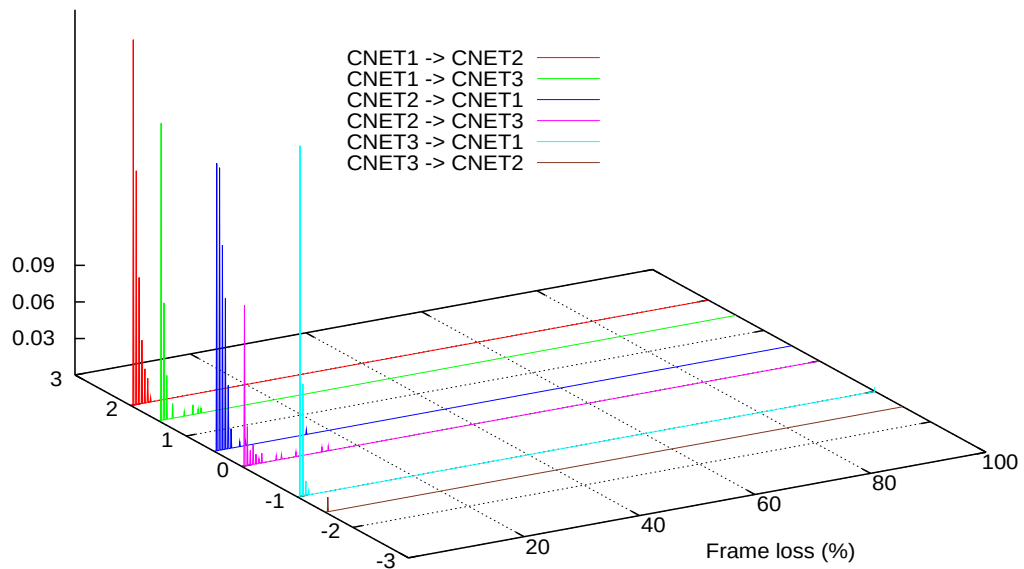


Figura 5.5: Test CNet-CNet: Misure eseguite a 80 metri a 11 Mb/s mantenendo fissi il portatile in trasmissione, *pettirosso*, e quello in ricezione, *passero*, e invertendo le tre schede CNet.

Quanto rilevato dai test riportati in figura 5.1 quindi non è probabilmente da imputare ad una singola scheda o alla particolare combinazione di portatili utilizzati. Una probabile causa di un tale comportamento è il cambiamento dell'ambiente circostante; infatti, anche se le prove sono state eseguite cercando

di mantenere inalterate le condizioni di misura, la durata stessa di queste, quindici minuti ciascuna, non esclude un tale cambiamento dovuto all’arrivo di nuove vetture nel parcheggio o alla partenza di quelle già presenti al suo interno.

5.3.2 Confronto D-Link – D-Link

Per agevolare sia la descrizione che la lettura di questo paragrafo distingueremo le schede D-Link in base all’indirizzo MAC così come è stato fatto in precedenza per le schede CNet.

Nella tabella 5.4 è descritta la nomenclatura utilizzata nell’intero documento.

Nome scheda	MAC
DLINK1	00:80:C8:2E:1C:96
DLINK2	00:80:C8:2E:1C:B7

Tabella 5.4: Distinzione delle schede D-Link in base all’indirizzo MAC.

Nei grafici presentati in questa sezione si è aggiunto il valor medio di ogni misura realizzata, indicato con una freccia nella parte posteriore della figura, per meglio evidenziare i vari comportamenti riscontrati.

La valutazione delle schede D-Link si è ottenuta portando i portatili ad una distanza di 10 metri tra loro e imponendo la velocità di trasmissione a 54 Mb/s.

Come possiamo vedere dalla figura 5.6 si devono distinguere due casi: il caso in cui a trasmettere e ricevere siano i due IBM e il caso in cui nel test sia coinvolto l’ACER.

- nel primo caso si nota non solo uno slittamento del 5% della curva della percentuale di perdita invertendo la scheda trasmittente con quella ricevente ma, invertendo in un secondo momento il computer in ricezione con quello in trasmissione, si registra uno spostamento della stessa di circa il 30%.
- nel secondo caso, invece, non si hanno slittamenti sostanziali invertendo le schede utilizzate e, quando poi si vanno ad invertire i portatili implicati nella misura, si riscontra uno spostamento della curva ma tale spostamento è indipendentemente dall’ IBM coinvolto nel test.

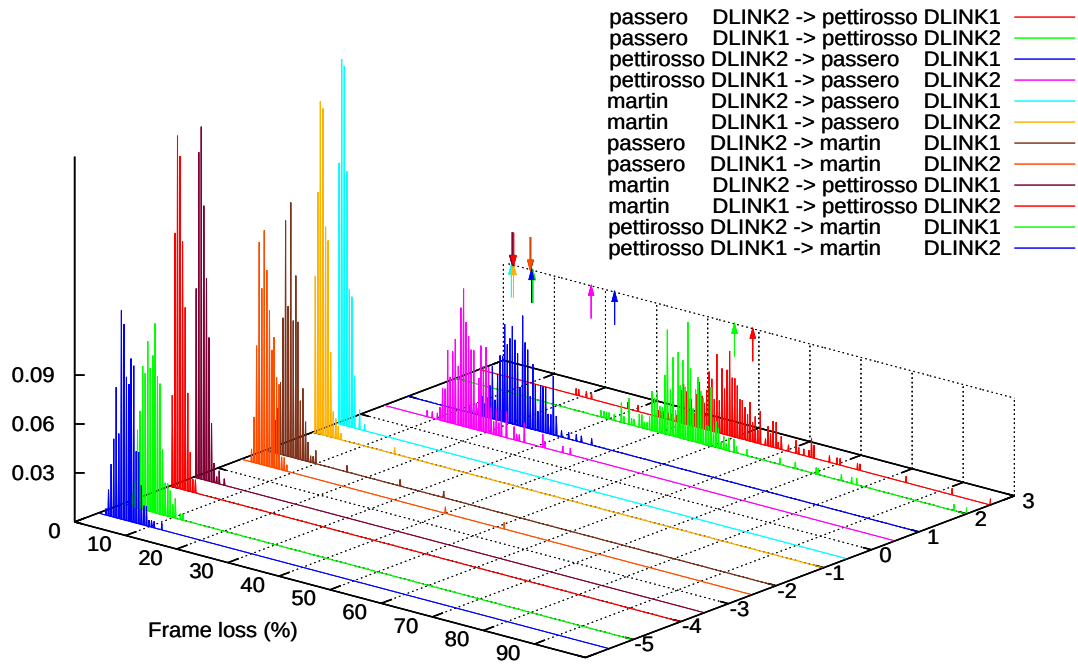


Figura 5.6: Test D-Link–D-Link: Misure eseguite a 10 metri a 54 Mb/s utilizzando sia IBM, *pettirosso* e *passero*, che ACER, *martin*, e invertendo sia le schede che i portatili; le frecce indicano la perdita percentuale media ottenuta per ciascuna misura.

Per verificare se, ancora una volta, il problema fosse da ricercare nei portatili utilizzati, è stato introdotto, al posto dell'ACER, un terzo portatile IBM, *cardellino*, con le stesse caratteristiche hardware e software quindi dei primi due e si sono ripetute le prove e quindi

1. mantenendo fissi il computer in trasmissione e quello in ricezione eseguite due misure:
 - a) con DLINK2 in trasmissione e DLINK1 in ricezione;
 - b) con DLINK1 in trasmissione e DLINK2 in ricezione;
2. una volta invertiti i portatili sono state eseguite nuovamente le misure di cui al punto precedente.

In figura 5.7 sono mostrati i risultati ottenuti.

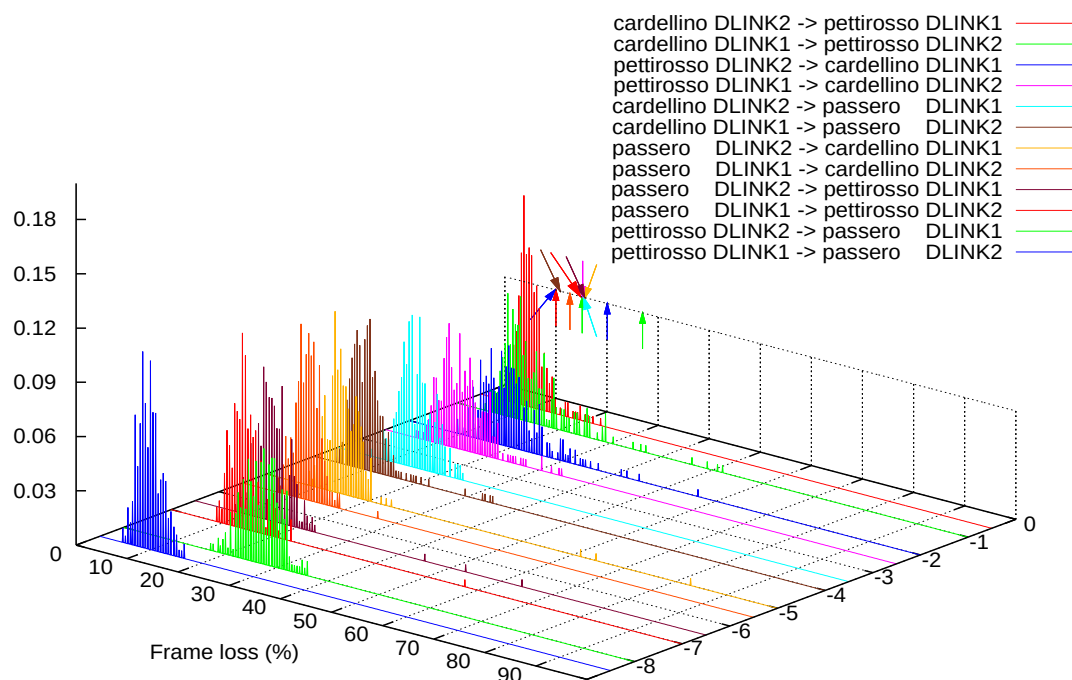


Figura 5.7: Test D-Link–D-Link: Misure eseguite a 10 metri a 54 Mb/s con tre IBM, *pettirosso*, *passero* e *cardellino* incrociando schede e computer; le frecce indicano la perdita percentuale media ottenuta per ciascuna misura.

In ordinata -6.5, -7, -8 e -8.5 sono riportate le misure eseguite con i due vecchi IBM, *pettirosso* e *passero*, realizzate nuovamente, questo perché le prove riportate in figura fossero eseguite in un ambiente pressocchè invariato. In questi quattro grafici si nota come ponendo in trasmissione *passero* e in ricezione *pettirosso* si ottenga un comportamento simile sia trasmettendo con DLINK1 che con DLINK2; ponendo invece *pettirosso* in trasmissione e *passero* in ricezione si ha una percentuale di perdita compresa tra il 15% e il 35% utilizzando come scheda trasmittente DLINK2 e una percentuale compresa tra il 5% e il 15% trasmettendo con DLINK1.

Analizzando invece le misure ottenute introducendo il nuovo computer, si nota come, mantenendo fisso il computer in ricezione e quello in trasmissione, l’inversione delle schede utilizzate comporta uno spostamento della curva inferiore al 5%; mantenendo invece fisse la scheda in trasmissione e quella in ricezione e invertendo questa volta i portatili, introducendo quindi eventuali differenze di rilevazioni dovute all’hardware dei computer, il comportamento

rilevato varia ancora di un valore inferiore al 5% tranne nel caso in cui la trasmissione coinvolga *cardellino* e *pettirosso* e si utilizzi in trasmissione la DLIN2 e in ricezione la DLINK1: lo spostamento della curva risulta del 10%.

5.3.3 Conclusioni

In questo capitolo sono stati presentati i risultati ottenuti andando a valutare le prestazioni delle schede wireless a nostra disposizione in termini di perdita di pacchetti.

Le misure di test sono state eseguite alla massima velocità di trasmissione consentita dalla scheda e disabilitando le ritrasmissioni.

Le schede prese in esame sono le CNet e le D-Link; non si sono eseguiti test per le schede LinkSys in quanto queste non permettono di impostare il numero di ritrasmissioni.

Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle misure di test si è evidenziato un comportamento piuttosto instabile in entrambe le schede. Tale comportamento presumibilmente dipende dall'ambiente circostante piuttosto che dalle caratteristiche hardware delle schede esaminate.

Si è quindi deciso di eseguire la campagna di misure mantenendo fissi il computer ricevente e quello trasmittente, così come le schede impiegate per la trasmissione e la ricezione di pacchetti, così che l'eventuale errore introdotto dall'hardware impiegato sia costante per l'intera durata della campagna di misure.

Inoltre, per limitare l'errore introdotto da un eventuale cambiamento del canale, è stato stabilito di eseguire le misure in un ambiente stabile dal punto di vista della sua configurazione e lontano da fonti di interferenze quali, per esempio, altre reti presenti nell'area di misura scelta.

Capitolo 6

Massimo Throughput Teorico

In questa sezione viene presentato il calcolo esatto del Theoretical Maximum Throughput (TMT) per reti 802.11, per i protocolli 802.11b e 802.11g e per vari data rate.

Tutte le informazioni per il calcolo effettuato sono disponibili sugli standard IEEE [9, 10, 11, 12]

Il calcolo esatto del TMT permette di determinare le reali prestazioni della rete tenendo in considerazione le varie componenti inserite nei diversi strati che costituiscono il modello OSI mostrato in figura 6.1.

OSI	
Application Layer	Layer 7 Application
	Layer 6 Presentation
	Layer 5 Session
Transport Layer (TCP)	Layer 4 Transport
Network Layer (IP)	Layer 3 Network
IEEE 802.2 Logical Link Control (LLC) + SubNetwork Access Protocol (SNAP)	Layer 2 Data Link
IEEE 802.11 Medium Access Control (MAC)	
Physical Layer Convergence Procedure (PLCP)	Layer 1 Physical
Physical Medium Dependent (PMD)	

Figura 6.1: Modello OSI.

Il throughput dichiarato, infatti, per i prodotti IEEE 802.11 si riferisce solo al data rate radio dei pacchetti mentre parte della capacità della rete è persa proprio per la trasmissione delle varie intestazioni.

Dato che, in riferimento al modello OSI, IEEE 802.11 copre il MAC layer e il PHY layer, vediamo quali intestazioni vengono aggiunte quando un datagram viene passato al link layer.

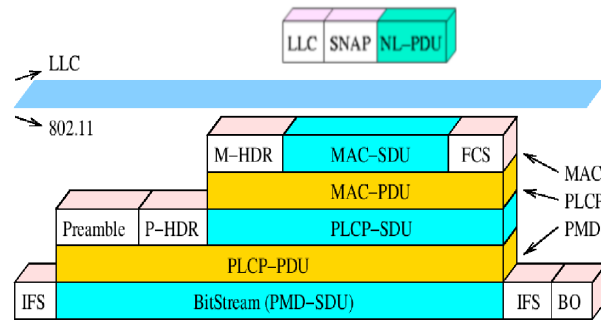


Figura 6.2: Intestazioni a differenti sublayer di IEEE 802.11.

Come si vede in figura 6.2 prima di essere passato al livello MAC, il Network Layer Protocol Data Unit, che indichiamo con NL-PDU, viene integrato con due campi: 3 byte di LLC e 5 byte di SNAP.

A livello MAC vengono aggiunti, rispettivamente prima e dopo NL-PDU, il MAC-Header e il campo FCS a formare il MAC-PDU. Similmente, a livello PLCP vengono aggiunti il PLCP-Preamble e il PLCP-Header.

Quindi il PLCP-PDU viene ad essere formato da :

$$\text{PLCP-PDU} = \text{PLCP-Preamble} + \text{PLCP-Header} + \text{PLCP-SDU} \quad (6.1)$$

dove, per frame di tipo data,

$$\begin{aligned} \text{PLCP-SDU} &= \text{MAC-PDU} = & (6.2) \\ &= \text{MAC-Header} + \text{MAC-SDU} + \text{FCS} = \\ &= \underbrace{\text{MAC-Header}}_{192 \text{ bit}} + \text{LLC} + \text{SNAP} + \text{NL-PDU} + \underbrace{\text{FCS}}_{32 \text{ bit}} \end{aligned}$$

dove la dimensione del campo MAC-Header è indicata senza tener conto del campo Address4 del frame di tipo data (per dettagli vedere par. 2.5.5) in quanto tale campo non viene utilizzato in una rete ad hoc.

6.1 Calcolo del Massimo Throughput Teorico

Il Massimo Throughput Teorico, che nel resto del capitolo indichiamo con TMT, è definito sotto le seguenti assunzioni:

- bit error rate (BER) nulla;
- non ci sono perdite dovute a collisioni;
- non è utilizzata la point coordination function (PCF);
- non si ha perdita di pacchetto dovuta a buffer overflow al nodo ricevente;
- il nodo trasmittente ha sempre un numero sufficiente di pacchetti da spedire;
- lo strato MAC non utilizza la frammentazione;
- non vengono considerati management frame.

Per eseguire il calcolo del TMT, tutte le componenti di ogni strato vengono convertite in una unità comune, il *tempo*.

Per ottenere il massimo throughput, si dividerà NL-PDU per il tempo impiegato per la sua trasmissione

$$\text{TMT} = \frac{\text{NL-PDU size}}{\text{Delay per NL-PDU}}$$

Va notato che il data rate utilizzato non sempre è lo stesso all'interno di uno stesso PLCP-PDU; per esempio, il PLCP-Preamble e il PLCP-Header vengono trasmessi ad un data rate indipendente da quello utilizzato per il resto del frame.

Inoltre, per frame di controllo come RTS, CTS e ACK, lo standard [11] specifica che il nodo trasmittente utilizza un data rate pari alla più alta velocità, nel basic data rate, minore o uguale alla velocità di trasmissione del frame immediatamente precedente nella sequenza di trasmissione.

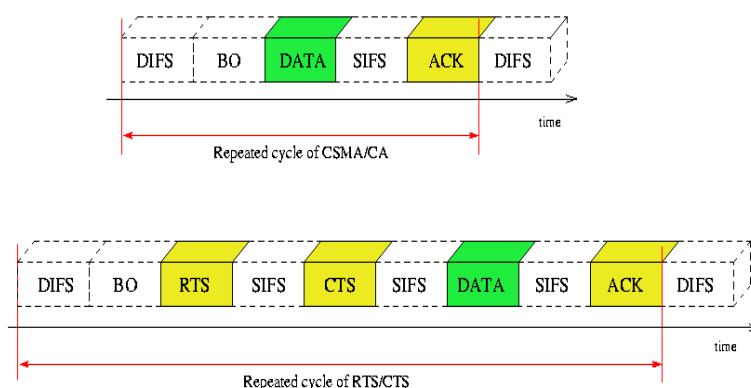


Figura 6.3: Diagramma di tempo per CSMA/CA e RTS/CTS.

In figura 6.3 è mostrato come i pacchetti vengano trasmessi per i protocolli 802.11; si può notare come il diagramma temporale sia differente per le due politiche di accesso al mezzo, CSMA/CA e RTS/CTS.

Per i calcoli esposti nei paragrafi seguenti si ha che:

- la durata di ogni delay è presa da [11];
- il tempo di trasmissione di una MPDU dipende dalla sua dimensione e dal data rate utilizzato;
- la dimensione della *contention window* (CW) non cresce in modo esponenziale, in quanto non ci sono collisioni, così che CW è sempre pari alla minima dimensione della contention window (CW_{min});
- il tempo di backoff è scelto in maniera casuale seguendo una distribuzione uniforme in $[0, CW]$.

Il ritardo totale per un NL-PDU è calcolato come la somma di tutte le componenti di ritardo viste in figura 6.3 così che il ritardo per un NL-PDU è semplificato da una funzione della dimensione in byte di NL-PDU:

$$\text{Delay per NL-PDU}(x) = f(\text{NL-PDU}(x))$$

quindi si è in grado di ottenere il TMT semplicemente dividendo il numero di bit che compongono NL-PDU per il delay totale

$$\text{TMT}(x) = \frac{8 * x}{f(\text{NL-PDU}(x))} * 10^{-6} \text{ bps} \quad (6.3)$$

Nel resto del capitolo verrà indicata la funzione $f(\text{NL-PDU}(x))$ con T_{cycle} .

6.2 802.11b

In questo paragrafo viene esposto il calcolo del TMT per il protocollo 802.11b.

Si prendono in considerazione le politiche di accesso al mezzo CSMA/CA e RTS/CTS e, per ognuna di queste, si distingue l'utilizzo di preambolo lungo e preambolo corto per il PLCP.

Alla fine del paragrafo vengono confrontate le varianti prese in considerazione andando a misurare l'efficienza di banda.

6.2.1 CSMA/CA

Per poter calcolare il TMT in caso di utilizzo della politica CSMA/CA, andiamo ad analizzare il T_{cycle} , cioè il ritardo per un NL-PDU in funzione della sua dimensione.

In riferimento alla figura 6.3 a pagina 93 abbiamo che

$$T_{ciclo} = T_{DIFS} + T_{BO} + T_{data} + T_{SIFS} + T_{ACK} \quad (6.4)$$

dove, dalla definizione dello standard [11]

$$\begin{aligned} T_{DIFS} &= \text{ritardo imposto dal protocollo} = \\ &= \text{aSIFSTime} + 2 * \text{aSlotTime} = 50 \mu s \\ T_{BO} &= \text{tempo di backoff} = \\ &= \text{Random()} * \text{aSlotTime} = 310 \mu s \\ T_{data} &= \text{tempo impiegato a trasferire il PLCP-PDU} \\ T_{SIFS} &= \text{ritardo imposto dal protocollo} = \\ &= \text{aSIFSTime} \\ T_{ACK} &= \text{tempo di attesa di un ACK di risposta al trasmettitore} \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} \text{aSIFSTime} &= 10 \mu s \\ \text{aSlotTime} &= 20 \mu s \\ \text{Random()} &= \text{variabile aleatoria nell'intervallo } [0, \text{CW}] \\ \text{CW} &= \text{compresa in } [\text{aCWmin}, \text{aCWmax}] \\ \text{aCWmin} &= 31 \\ \text{aCWmax} &= 1023 \end{aligned}$$

Va precisato il valore di $\text{Random}()$: abbiamo detto che è una variabile aleatoria scelta nell'intervallo $[\text{aCWmin}, \text{aCWmax}]$. poiché si assume che non siano presenti ritrasmissioni, il valore di $\text{Random}()$ rimane quello iniziale $\text{CW} = \text{aCWmin}$ e, supponendo che in media la trasmissione venga effettuata con successo, il valore di $\text{Random}()$ sarà $\text{Random()} = \text{aCWmin}/2$.

Si ricorda che il PLCP-PDU è formato da :

$$\text{PLCP-PDU} = \underbrace{\text{PLCP-Preamble}}_{\substack{\swarrow \quad \searrow \\ 144 \text{ bit} \quad 72 \text{ bit}}} + \underbrace{\text{PLCP-Header}}_{48 \text{ bit}} + \text{PLCP-SDU} \quad (6.5)$$

dove si sono indicati i due valori per il preambolo previsti dallo standard [11] Tale standard definisce infatti le seguenti due PPDU a seconda del preambolo utilizzato:

Long Preamble: il campo PLCP-Preamble della PPDU è di 144 bit e il campo PLCP-header è di 48 bit; lo stesso standard stabilisce che la trasmissione di questi due campi vengano spediti ad una velocità di 1 Mb/s introducendo un ritardo pari a $192 \mu s$. Inoltre le bit rate permesse per la trasmissione della PSDU sono di 1 Mb/s, 2 Mb/s, 5.5 Mb/s e 11 Mb/s;

Short Preamble: il campo PLCP-Preamble della PPDU è di 72 bit e il campo PLCP-header è, come nel caso precedente, di 48 bit; ancora lo standard stabilisce che la trasmissione di questi due campi introduce un ritardo pari a $96 \mu s$ da cui si ha che il PLCP-Preamble viene trasmesso a 1 Mb/s mentre il PLCP-Header a 2 Mb/s, questo per permettere al trasmettitore di interagire con ricevitori che non sono in grado di ricevere short preamble e header. Inoltre le bit rate permesse per la trasmissione della PSDU sono di 2 Mb/s, 5.5 Mb/s e 11 Mb/s.

Abbiamo inoltre visto in 6.2 che

$$\begin{aligned} \text{PLCP-SDU} &= \text{MAC-PDU} = \\ &= \text{MAC-Header} + \text{LLC} + \text{SNAP} + \text{NL-PDU} + \text{FCS} \end{aligned}$$

Indicando con *FIELD* la dimensione in byte del generico FIELD della PPDU, si ha che

$$\begin{aligned} T_{data} &= \frac{\text{PLCP-Preamble}}{\text{rate(PLCP-Preamble)}} + \frac{\text{PLCP-Header}}{\text{rate(PLCP-Header)}} + \\ &+ \frac{\text{MAC-Header} + \text{LLC} + \text{SNAP} + \text{NL-PDU} + \text{FCS}}{\text{rate(NL-PDU)}} = \\ &= \frac{\text{PLCP-Preamble}}{\text{rate(PLCP-Preamble)}} + \frac{\text{PLCP-Header}}{\text{rate(PLCP-Header)}} + \\ &+ \frac{\text{NL-PDU} * 8 + 288 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} \end{aligned} \quad (6.6)$$

$$\begin{aligned} T_{ACK} &= \frac{\text{PLCP-Preamble}}{\text{rate(PLCP-Preamble)}} + \frac{\text{PLCP-Header}}{\text{rate(PLCP-Header)}} + \\ &+ \frac{\text{ACK}}{\text{rate(ACK)}} = \\ &= \frac{\text{PLCP-Preamble}}{\text{rate(PLCP-Preamble)}} + \frac{\text{PLCP-Header}}{\text{rate(PLCP-Header)}} + \\ &+ \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} \end{aligned} \quad (6.7)$$

poiché il PLCP prevede due preamboli di lunghezza differente e con data rate per preamble e header indipendenti dalla bit rate utilizzata per la trasmissione del frame, si prosegue nel calcolo distinguendo i due casi.

6.2.1.1 Long Preamble

Nel caso di Long Preamble lo standard [11] stabilisce la velocità di trasmissione per PLCP-Preamble e PLCP-Header pari a 1 MB/s; quindi le equazioni 6.6 e 6.7 diventano rispettivamente

$$\begin{aligned}
 T_{data} &= \frac{144 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{48 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{NL-PDU * 8 + 288 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} = \\
 &= \frac{NL-PDU * 8 + 336 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} + 192 \mu s \\
 T_{ACK} &= \frac{144 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{48 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} = \\
 &= \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} + 192 \mu s
 \end{aligned}$$

e quindi si ha che l'equazione 6.4 può essere scritta come:

$$\begin{aligned}
 T_{cycle} &= 50 \mu s + 310 \mu s + \frac{NL-PDU * 8 + 288 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} + 192 \mu s + 10 \mu s + \\
 &\quad + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} + 192 \mu s = \\
 &= \frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \frac{288 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} + 754 \mu s
 \end{aligned}$$

quindi

$$T_{cycle} = \frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \delta_{long}^{CSMA/CA}$$

dove $\delta_{long}^{CSMA/CA}$ dipende dalla velocità utilizzata per spedire il frame e i cui valori sono riportati in tabella 6.1.

A questo punto si ha che

$$TMT(NL-PDU) = \frac{NL-PDU * 8}{\frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \delta_{long}^{CSMA/CA}}$$

In figura 6.4 è mostrato l'andamento del TMT in funzione della dimensione del frame.

rate	$\delta_{long}^{CSMA/CA}$
1 Mb/s	1154 μs
2 Mb/s	954 μs
5.5 Mb/s	827 μs
11 Mb/s	791 μs

Tabella 6.1: 802.11b: $\delta_{long}^{CSMA/CA}$.

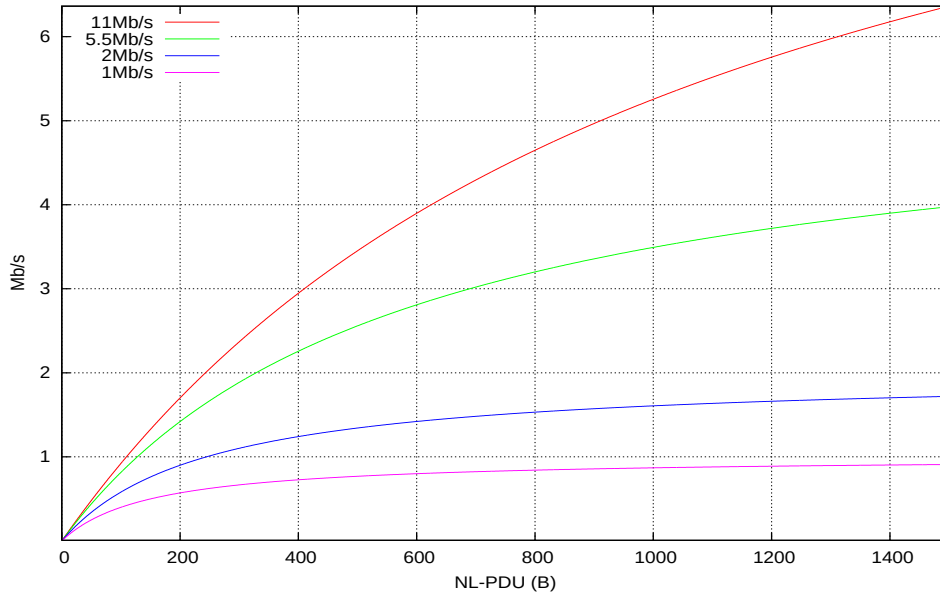


Figura 6.4: 802.11b: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di CSMA/CA con Long Preamble.

6.2.1.2 Short Preamble

Nel caso di Short Preamble lo standard [11] stabilisce la velocità di trasmissione per PLCP-Preamble pari a 1 MB/s e per PLCP-Header a 2 MB/s; quindi le equazioni 6.6 e 6.7 diventano rispettivamente

$$\begin{aligned}
 T_{data} &= \frac{72 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{48 \text{ bit}}{2 \text{ Mb/s}} + \frac{NL\text{-}PDU * 8 + 288 \text{ bit}}{\text{rate}(NL\text{-}PDU)} = \\
 &= \frac{NL\text{-}PDU * 8 + 288 \text{ bit}}{\text{rate}(NL\text{-}PDU)} + 96 \mu s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{ACK} &= \frac{72 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{48 \text{ bit}}{2 \text{ Mb/s}} + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} = \\
&= \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} + 96 \mu s
\end{aligned}$$

e quindi, in questo caso, l'equazione 6.4 può essere scritta come:

$$\begin{aligned}
T_{cycle} &= 50 \mu s + 310 \mu s + \frac{NL-PDU * 8 + 288 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} + 96 \mu s + 10 \mu s + \\
&\quad + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} + 96 \mu s = \\
&= \frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \frac{288 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} + 562 \mu s
\end{aligned}$$

quindi

$$T_{cycle} = \frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \delta_{short}^{CSMA/CA}$$

dove, come nel caso precedente, $\delta_{short}^{CSMA/CA}$ dipende dalla velocità utilizzata per spedire il frame. I valori di tale costante sono riportati in tabella 6.2

rate	$\delta_{short}^{CSMA/CA}$
2 Mb/s	762 μs
5.5 Mb/s	635 μs
11 Mb/s	599 μs

Tabella 6.2: 802.11b: $\delta_{short}^{CSMA/CA}$.

Si ricorda che, con preambolo corto, le velocità di trasmissione consentite dallo standard sono 2 Mb/s, 5.5 Mb/s e 11 Mb/s.

Il TMT in funzione della dimensione del frame trasmesso è dato a questo punto da

$$TMT(NL-PDU) = \frac{NL-PDU * 8}{\frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \delta_{short}^{CSMA/CA}}$$

e il suo andamento, per ogni velocità consentita dallo standard, è mostrato in figura 6.5.

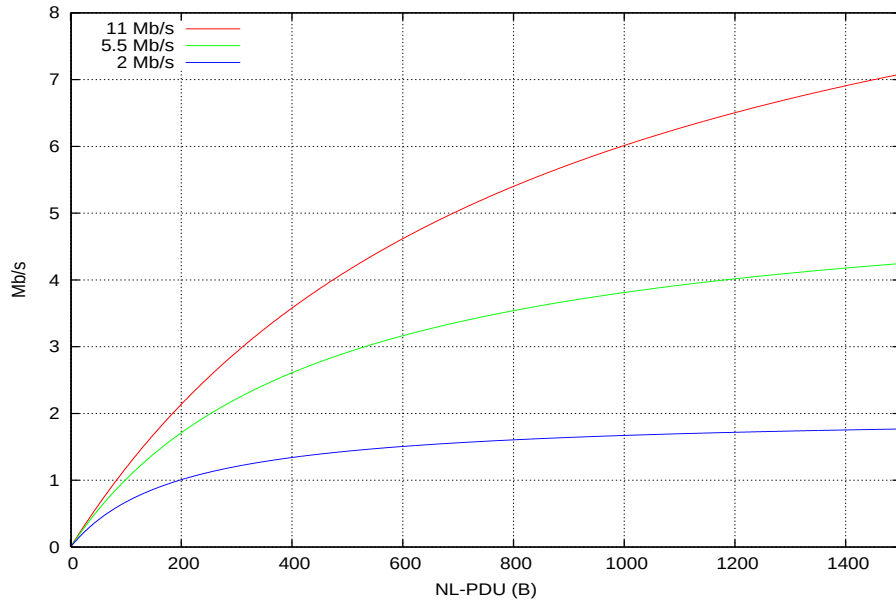


Figura 6.5: 802.11b: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di CSMA/CA con Short Preamble.

6.2.2 RTS/CTS

Proseguiamo nel calcolo del TMT nel caso in cui la politica di accesso al mezzo utilizzata sia RTS/CTS.

Con riferimento alla figura 6.3 a pagina 93 analizziamo il T_{cycle}

$$T_{cycle} = T_{DIFS} + T_{BO} + T_{RTS} + T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{SIFS} + T_{data} + T_{SIFS} + T_{ACK} \quad (6.8)$$

dove i valori per le varie componenti temporali sono gli stessi di quelli visti per la 6.4.

Vediamo i valori per i nuovi T_{CTS} e T_{RTS}

$$\begin{aligned} T_{CTS} &= \frac{PLCP-Preamble}{rate(PLCP-Preamble)} + \frac{PLCP-Header}{rate(PLCP-Header)} + \frac{CTS}{rate(CTS)} \\ &= \frac{PLCP-Preamble}{rate(PLCP-Preamble)} + \frac{PLCP-Header}{rate(PLCP-Header)} + \frac{112 \text{ bit}}{rate(CTS)} \end{aligned} \quad (6.9)$$

$$\begin{aligned}
T_{RTS} &= \frac{PLCP-Preamble}{rate(PLCP-Preamble)} + \frac{PLCP-Header}{rate(PLCP-Header)} + \quad (6.10) \\
&\quad + \frac{RTS}{rate(RTS)} = \\
&= \frac{PLCP-Preamble}{rate(PLCP-Preamble)} + \frac{PLCP-Header}{rate(PLCP-Header)} + \\
&\quad + \frac{160 \text{ bit}}{rate(RTS)}
\end{aligned}$$

Vediamo quindi in dettaglio il T_{cycle} nel caso di Long e Short Preamble.

6.2.2.1 Long Preamble

Nel caso di Long Preamble lo standard [11] stabilisce che il PLCP-Preamble debba essere spedito a 1 Mb/s e il PLCP-Header a 1 Mb/s.

I valori per T_{data} e T_{ACK} sono gli stessi calcolati nel paragrafo 1.2.1.1 mentre T_{RTS} e T_{CTS} sono dati da

$$\begin{aligned}
T_{RTS} &= \frac{144 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{48 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{160 \text{ bit}}{rate(RTS)} = \\
&= \frac{160 \text{ bit}}{rate(RTS)} + 192 \mu s \\
T_{CTS} &= \frac{144 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{48 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{112 \text{ bit}}{rate(CTS)} = \\
&= \frac{112 \text{ bit}}{rate(CTS)} + 192 \mu s
\end{aligned}$$

e quindi si ha che la 6.8 diventa

$$\begin{aligned}
T_{cycle} &= 50 \mu s + 310 \mu s + \frac{160 \text{ bit}}{rate(RTS)} + 192 \mu s + 10 \mu s + \\
&\quad + \frac{112 \text{ bit}}{rate(CTS)} + 192 \mu s + 10 \mu s + \frac{NL-PDU * 8 + 288 \text{ bit}}{rate(NL-PDU)} + 192 \mu s + \\
&\quad + 10 \mu s + \frac{112 \text{ bit}}{rate(ACK)} + 192 \mu s = \\
&= \frac{NL-PDU * 8}{rate(NL-PDU)} + \frac{288 \text{ bit}}{rate(NL-PDU)} + \frac{160 \text{ bit}}{rate(RTS)} + \frac{112 \text{ bit}}{rate(CTS)} + \\
&\quad + \frac{112 \text{ bit}}{rate(ACK)} + 1158 \mu s = \\
&= \frac{NL-PDU * 8}{rate(NL-PDU)} + \delta_{long}^{RTS/CTS}
\end{aligned}$$

6. MASSIMO THROUGHPUT TEORICO

dove $\delta_{long}^{RTS/CTS}$ dipende dalla velocità utilizzata per spedire il frame e i cui valori sono riportati in tabella 6.3

rate	$\delta_{long}^{RTS/CTS}$
1 Mb/s	1830 μs
2 Mb/s	1494 μs
5.5 Mb/s	1281 μs
11 Mb/s	1220 μs

Tabella 6.3: 802.11b: $\delta_{long}^{RTS/CTS}$.

Il TMT in funzione della dimensione del frame è dato quindi da

$$\text{TMT}(NL\text{-}PDU) = \frac{NL\text{-}PDU * 8}{\frac{NL\text{-}PDU * 8}{\text{rate}(NL\text{-}PDU)} + \delta_{long}^{RTS/CTS}}$$

il cui andamento è mostrato in figura 6.6

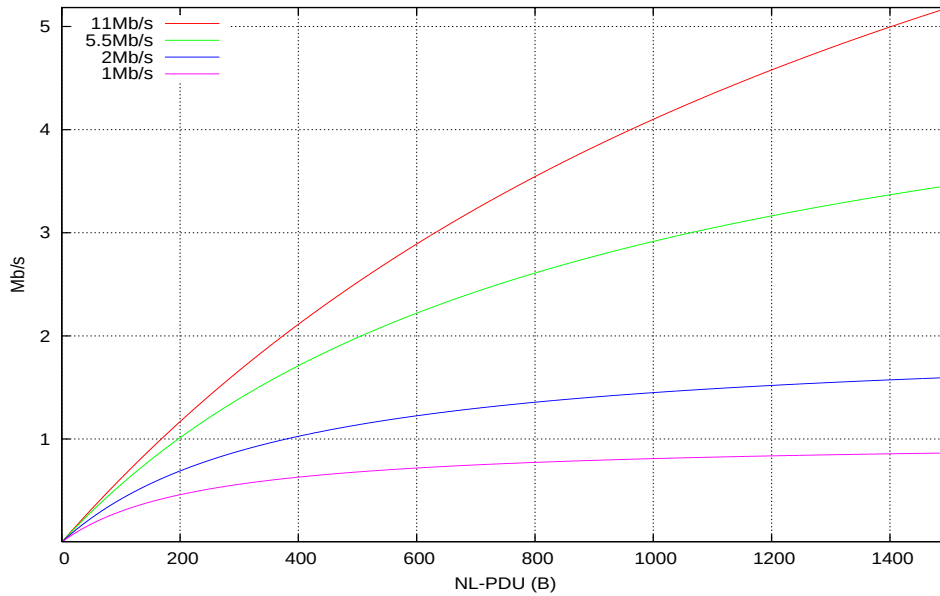


Figura 6.6: 802.11b: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di RTS/CTS con Long Preamble.

6.2.2.2 Short Preamble

Come già ricordato, nel caso di Short Preamble lo standard [11] stabilisce la velocità di trasmissione, per PLCP-Preamble a 1 Mb/s e PLCP-Header a 2 Mb/s.

I valori di T_{data} e T_{ACK} sono gli stessi calcolati nel paragrafo 5.2.1.2 mentre la 6.9 e la 6.10 diventano

$$\begin{aligned} T_{CTS} &= \frac{72 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{48 \text{ bit}}{2 \text{ Mb/s}} + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(CTS)}} = \\ &= \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(CTS)}} + 96 \mu s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T_{RTS} &= \frac{72 \text{ bit}}{1 \text{ Mb/s}} + \frac{48 \text{ bit}}{2 \text{ Mb/s}} + \frac{160 \text{ bit}}{\text{rate(RTS)}} = \\ &= \frac{160 \text{ bit}}{\text{rate(RTS)}} + 96 \mu s \end{aligned}$$

e quindi si ha che l'equazione 6.8 risulta essere

$$\begin{aligned} T_{cycle} &= 50 \mu s + 310 \mu s + \frac{160 \text{ bit}}{\text{rate(RTS)}} + 96 \mu s + 10 \mu s + \\ &+ \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(CTS)}} + 96 \mu s + 10 \mu s + \frac{NL-PDU * 8 + 288 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} + 96 \mu s + \\ &+ 10 \mu s + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} + 96 \mu s = \\ &= \frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \frac{288 \text{ bit}}{\text{rate(NL-PDU)}} + \frac{160 \text{ bit}}{\text{rate(RTS)}} + \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(CTS)}} + \\ &+ \frac{112 \text{ bit}}{\text{rate(ACK)}} + 774 \mu s = \\ &= \frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \delta_{short}^{RTS/CTS} \end{aligned}$$

dove $\delta_{short}^{RTS/CTS}$ dipende dalla velocità utilizzata per spedire il frame e i cui valori sono riportati in tabella 6.4

Il TMT in funzione della dimensione del frame è dato quindi da

$$TMT(NL-PDU) = \frac{NL-PDU * 8}{\frac{NL-PDU * 8}{\text{rate(NL-PDU)}} + \delta_{short}^{RTS/CTS}}$$

Il suo andamento è mostrato in figura 6.7

rate	$\delta_{short}^{RTS/CTS}$
2 Mb/s	1110 μs
5.5 Mb/s	897 μs
11 Mb/s	836 μs

Tabella 6.4: 802.11b: $\delta_{short}^{RTS/CTS}$.

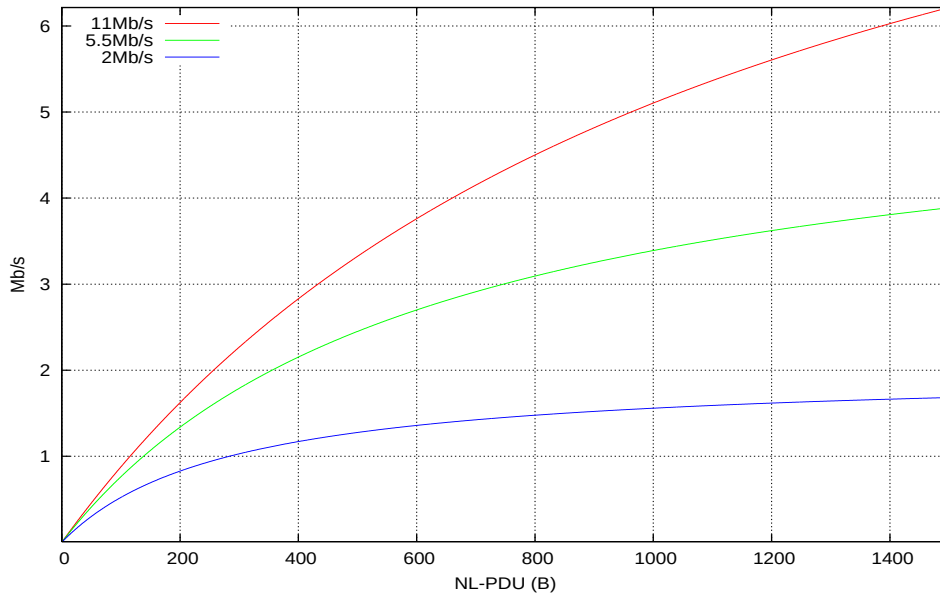


Figura 6.7: 802.11b: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di RTS/CTS con Short Preamble.

6.2.3 Analisi del TMT per 802.11b

In questo paragrafo andiamo ad analizzare i risultati ottenuti nel precedente studio confrontando il comportamento indotto dalla scelta tra Long e Short Preamble nelle due politiche di accesso al mezzo CSMA/CA e RT/CTS prese in esame.

6.2.3.1 CSMA/CA: Confronto tra Long e Short Preamble

In figura 6.8 sono riportati i grafici per CSMA/CA con preambolo lungo e preambolo corto per le velocità consentite dallo standard [11].

In figura 6.9 è mostrata la differenza esistente tra le prestazioni con preambolo lungo e preambolo corto.

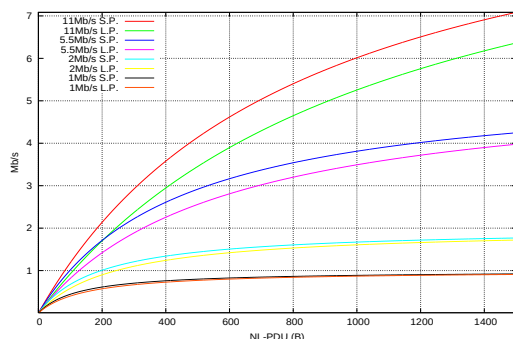


Figura 6.8

802.11b: CSMA/CA: Confronto tra Long e Short Preamble.

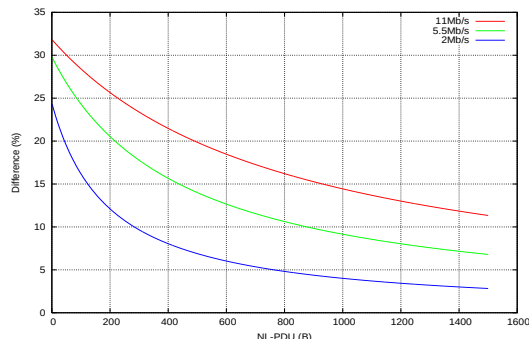


Figura 6.9

802.11b: CSMA/CA: Differenza tra Long e Short Preamble.

Da questo grafico è evidente come la scelta di preambolo da utilizzare influisca in modo minore andando a considerare frame di dimensioni sempre maggiori e come, comunque, tale differenza risulti maggiore per velocità più alte.

6.2.3.2 RTS/CTS: Confronto tra Long e Short Preamble

In figura 6.10 sono riportati i grafici per RTS/CTS con preambolo lungo e preambolo corto per le velocità consentite dallo standard [11].

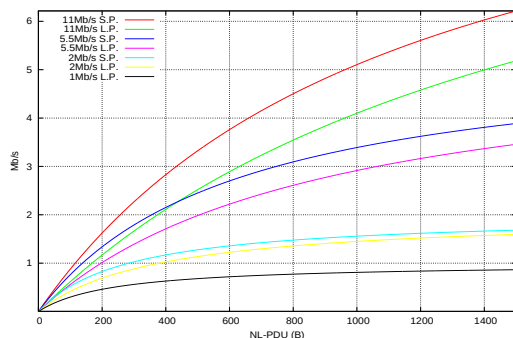


Figura 6.10

802.11b: RTS/CTS: Confronto tra Long e Short Preamble.

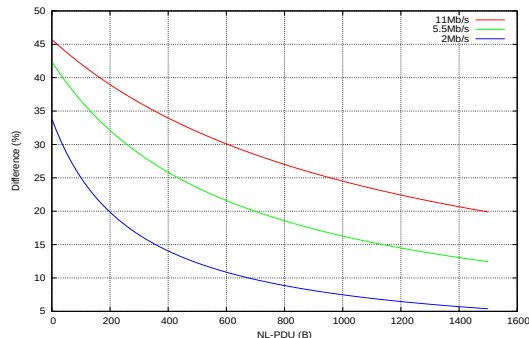


Figura 6.11

802.11b: RTS/CTS: Differenza tra Long e Short Preamble.

In figura 6.11 è mostrata la differenza tra l'utilizzo di preambolo lungo e l'utilizzo di preambolo corto.

Anche nel caso di politica di accesso al mezzo RTS/CTS, la scelta del preambolo incide sempre meno man mano che la dimensione del frame cresce e, ancora, per velocità minori.

6.2.4 Analisi dell'efficienza di banda

Come misura di utilizzo dello spettro, si definisce efficienza di banda ε

$$\varepsilon = \frac{\text{TMT}}{R} \quad (6.11)$$

dove R è il basic data rate.

Dalla formula si vede come l'efficienza di banda sia inversamente proporzionale al basic data rate e dai suoi grafici risulta più evidente la tendenza alla saturazione rispetto ai grafici del TMT.

Vediamo l'efficienza di banda applicata al nostro studio.

In figura 6.12 è mostrata l'efficienza di banda per la politica di accesso al mezzo CSMA/CA con utilizzo di preambolo lungo.

Come si può vedere l'efficienza di banda raggiunge un valore massimo di solo il 58% con un velocità di 11 Mb/s mentre andando a diminuire la velocità di trasmissione l'efficienza raggiunge il 90% con velocità pari a 1 Mb/s.

Nel caso di preambolo corto invece, come si vede in figura 6.13, l'efficienza di banda, con rate trasmissivo pari a 11 Mb/s, raggiunge il 65% mentre, trasmettendo a 2 Mb/s, si arriva al 89%.

Andando a valutare la differenza di efficienza ottenuta per i due preamboli si ha che, come si può vedere in figura 6.14, questa varia tra il 5.4%, che equivale al massimo ottenuto per una velocità pari a 2 Mb/s, e il 6.9% ottenuto come massima differenza per una velocità di 11 Mb/s.

Vediamo ora come varia l'efficienza di banda nel caso di politica di accesso al mezzo RTS/CTS.

In figura 6.15 è mostrata l'efficienza di banda per l'utilizzo di preambolo lungo.

Come si può vedere l'efficienza di banda raggiunge un valore massimo di solo il 48% con un velocità di 11 Mb/s mentre, andando a diminuire la velocità di trasmissione, l'efficienza raggiunge il 87% con velocità pari a 1 Mb/s.

Nel caso di preambolo corto, come si vede in figura 6.16, l'efficienza di banda raggiunge il 58%, con rate trasmissivo pari a 11 Mb/s, mentre si arriva al 85% trasmettendo a 2 Mb/s.

Andando a valutare la differenza di efficienza ottenuta per i due preamboli si ha che, come si può vedere in figura 6.17, questa varia tra il 7.3%, che equivale

al massimo ottenuto per una velocità pari a 2 Mb/s, e il 9.4% ottenuto come massima differenza per una velocità di 11 Mb/s.

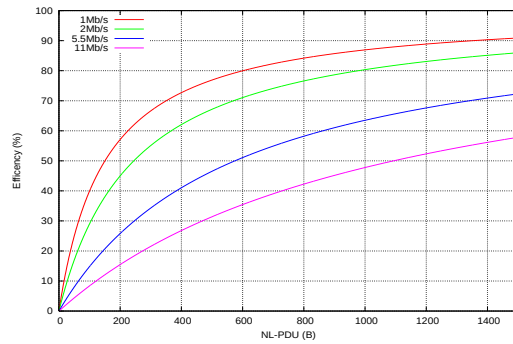


Figura 6.12

802.11b: CSMA/CA: Efficienza con utilizzo di Long Preamble.

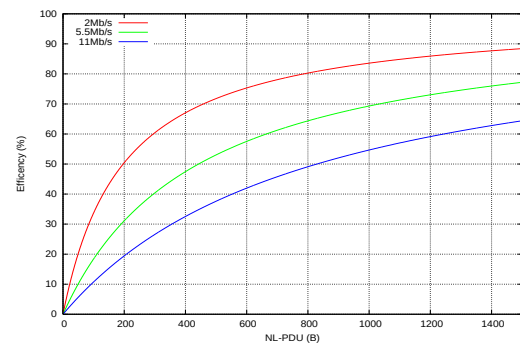


Figura 6.13

802.11b: CSMA/CA: Efficienza con utilizzo di Short Preamble.

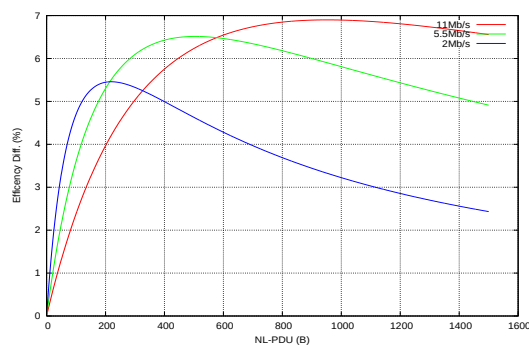


Figura 6.14

802.11b: CSMA/CA: Differenza dell'efficienza di banda con utilizzo di Long e Short Preamble.

6. MASSIMO THROUGHPUT TEORICO

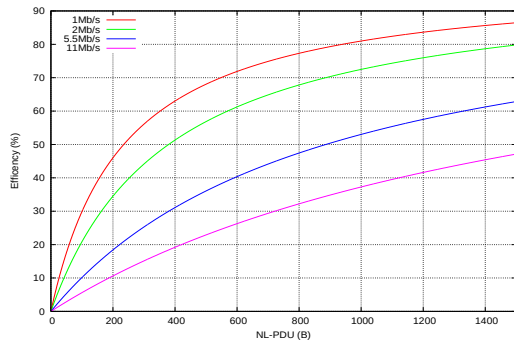


Figura 6.15

802.11b: RTS/CTS: Efficienza con utilizzo di Long Preamble.

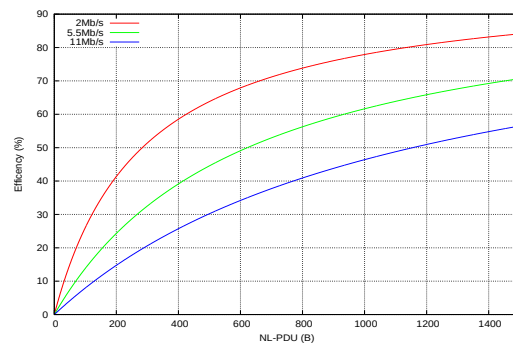


Figura 6.16

802.11b: RTS/CTS: Efficienza con utilizzo di Short Preamble.

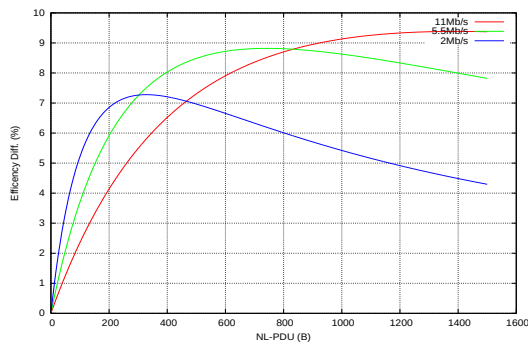


Figura 6.17

802.11b: RTS/CTS: Differenza dell'efficienza di banda con utilizzo di Long e Short Preamble.

6.3 802.11g

In questo paragrafo andiamo a calcolare il TMT per il protocollo 802.11g.

Si prendono in considerazione le due politiche di accesso al mezzo CSMA/CA e RTS/CTS e, come vedremo, l'utilizzo di Long o Short Slot Time.

Alla fine del paragrafo vengono confrontate le varianti prese in esame andando a misurare l'efficienza di banda.

Prima di iniziare il calcolo particolareggiato del TMT, andiamo ad analizzare il ritardo introdotto dai vari frame spediti durante la comunicazione, siano essi data frame o control frame.

Come già ricordato, a livello PLCP vengono aggiunti un campo PLCP-Preamble e un campo PLCP-Header.

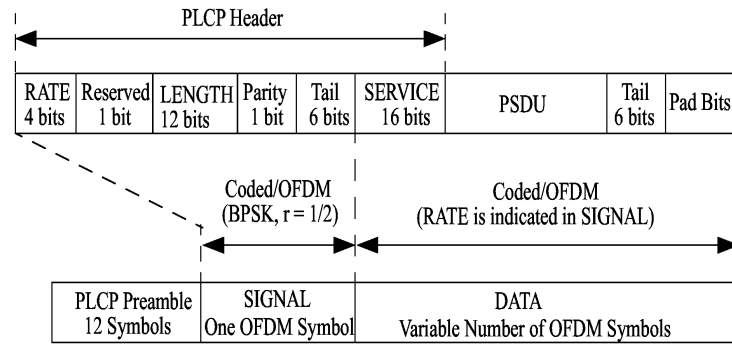


Figura 6.18: Formato del frame PPDU.

Come si vede in figura 6.18, oltre ai due campi già citati, vengono aggiunti, in coda alla PSDU, alcuni bit di tail e di pad definiti in [10].

In riferimento a tale figura si vede come il campo PLCP-Header, escluso il campo Service, è denotato con SIGNAL ed è trasmesso con una più robusta combinazione di modulazione BPSK ed un coding rate di $R=1/2$; il campo Service va a costituire il DATA insieme alla PSDU con i suoi campi TAIL e PAD, e viene trasmesso al data rate specificato nel campo RATE del PLCP-Header.

Da questa descrizione si ha che, come definito in [12], il tempo di trasmissione di un generico frame è dato da

$$TX_{TIME} = T_{Preamble} + T_{SIGNAL} + T_{SYM} * \left\lceil \frac{16 \text{ bit} + MPDU * 8 + 6 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + T_{EXT} \quad (6.12)$$

dove $T_{Preamble}$, T_{SIGNAL} , T_{SYM} e N_{DBPS} sono definiti in [10] come

$$\begin{aligned} T_{Preamble} &= 16 \mu s \\ T_{SIGNAL} &= 4 \mu s \\ T_{SYM} &= 4 \mu s \\ N_{DBPS} &= \text{il numero di data bit per simbolo} \\ T_{EXT} &= \text{Signal Extension} = 6 \mu s \end{aligned}$$

Andiamo a studiare ora come cambia il ritardo dovuto alla trasmissione di un pacchetto in funzione della politica di accesso al mezzo scelta.

6.3.1 CSMA/CA

Per poter calcolare il TMT in caso di politica CSMA/CA, andiamo ad analizzare il T_{cycle} , cioè il ritardo per la trasmissione di un NL-PDU in funzione della sua dimensione.

In riferimento alla figura 6.3 a pagina 93 abbiamo che

$$T_{cycle} = T_{DIFS} + T_{BO} + T_{data} + T_{SIFS} + T_{ACK} \quad (6.13)$$

dove, dalla definizione dello standard [12], si ha

$$\begin{aligned} T_{DIFS} &= aSIFSTime + 2 * aSlotTime \\ T_{BO} &= Random() * aSlotTime \\ T_{data} &= TX_{TIME}(data) = \text{tempo impiegato per trasferire il PLCP-PDU} \\ T_{SIFS} &= aSIFSTime \\ T_{ACK} &= TX_{TIME}(ACK) = \text{tempo di attesa di un ACK al trasmettitore} \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} aSIFSTime &= 10 \mu s \\ aSlotTime &= 20 \mu s, \text{ Long SlotTime, o } 9 \mu s, \text{ Short SlotTime} \\ Random() &= \text{variabile aleatoria nell'intervallo } [0, CW], \\ &\quad \text{come già spiegato nel paragrafo 5.2.1} \\ CW &= \text{compresa in } [aCWmin, aCWmax] \\ aCWmin &= 15 \\ aCWmax &= 1023 \end{aligned}$$

Slot Time. Come già detto, lo standard 802.11g prevede due valori distinti per lo Slot Time: il valore tipico è quello del Long Slot Time posto a 20 μs ma, quando le stazioni che costituiscono la BSS lo supportano, può essere utilizzato un valore opzionale, lo Short Slot Time, pari a 9 μs .

A differenza del protocollo 802.11b, qui quello che cambia non è il ritardo introdotto dal singolo frame, ma si vanno a modificare unicamente le componenti di delay coinvolte nella trasmissione.

Prima di evidenziare la diversa scelta per lo Slot Time, andiamo a vedere il ritardo introdotto per i frame utilizzati nella trasmissione. Ricordando che

$$\text{MAC-PDU} = \text{MAC-Header} + \text{LLC} + \text{SNAP} + \text{NL-PDU} + \text{FCS}$$

abbiamo, mantenendo la stessa nomenclatura dei precedenti paragrafi, che

$$\begin{aligned} T_{data} &= T_{preamble} + T_{SIGNAL} + \\ &\quad + T_{SYM} * \left\lceil \frac{16 \text{ bit} + (\text{NL-PDU} + 36 \text{ byte}) * 8 + 6 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + T_{EXT} = \\ &= 16 \mu s + 4 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{\text{NL-PDU} * 8 + 358 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 6 \mu s = \\ &= 4 \mu s * \left\lceil \frac{\text{NL-PDU} * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\begin{aligned} T_{ACK} &= T_{preamble} + T_{SIGNAL} + \\ &\quad + T_{SYM} * \left\lceil \frac{16 \text{ bit} + \text{ACK} * 8 + 6 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + T_{EXT} = \\ &= 16 \mu s + 4 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 6 \mu s = \\ &= 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s \end{aligned} \quad (6.15)$$

Possiamo quindi proseguire nel calcolo del TMT distinguendo tra Long e Short Slot Time.

6.3.1.1 Long Slot Time

Con Slot Time pari a $20 \mu s$ si ha che

$$\begin{aligned} T_{DISF} &= \text{aSIFSTime} + 2 * \text{aSlotTime} = 50 \mu s \\ T_{BO} &= \text{Random}() * \text{aSlotTime} = 150 \mu s \end{aligned}$$

6. MASSIMO THROUGHPUT TEORICO

quindi dalla 6.13 si ha che

$$\begin{aligned}
 T_{cycle} &= 50 \mu s + 150 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s + 10 \mu s + \\
 &\quad + 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s = \\
 &= 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 262 \mu s
 \end{aligned}$$

Quindi T_{cycle} è data da

$$T_{cycle} = 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \Delta_{long}^{CSMA/CA}$$

dove $\Delta_{long}^{CSMA/CA}$ dipende dalla velocità utilizzata per spedire il frame e i cui valori sono riportati in tabella 6.5

rate	N_{DBPS}	$\Delta_{long}^{CSMA/CA}$
6 Mb/s	24	286 μs
9 Mb/s	36	278 μs
12 Mb/s	48	274 μs
18 Mb/s	72	270 μs
24 Mb/s	96	270 μs
36 Mb/s	144	266 μs
48 Mb/s	192	266 μs
54 Mb/s	216	266 μs

Tabella 6.5: 802.11g: $\Delta_{long}^{CSMA/CA}$.

A questo punto si ha che

$$TMT(NL-PDU) = \frac{NL-PDU * 8}{4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \Delta_{long}^{CSMA/CA}}$$

In figura 6.19 è mostrato l'andamento del TMT in funzione della dimensione del frame trasmesso.

Come si può notare, in tale grafico, così come nei prossimi riguardanti il protocollo 802.11g, l'andamento della curva presenta un aspetto a dente di sega; tale andamento è determinato dall'operazione di arrotondamento superiore presente nel calcolo per la determinazione della durata della trasmissione per un generico frame, stabilito dal protocollo stesso ed evidenziato nell'equazione 6.12.

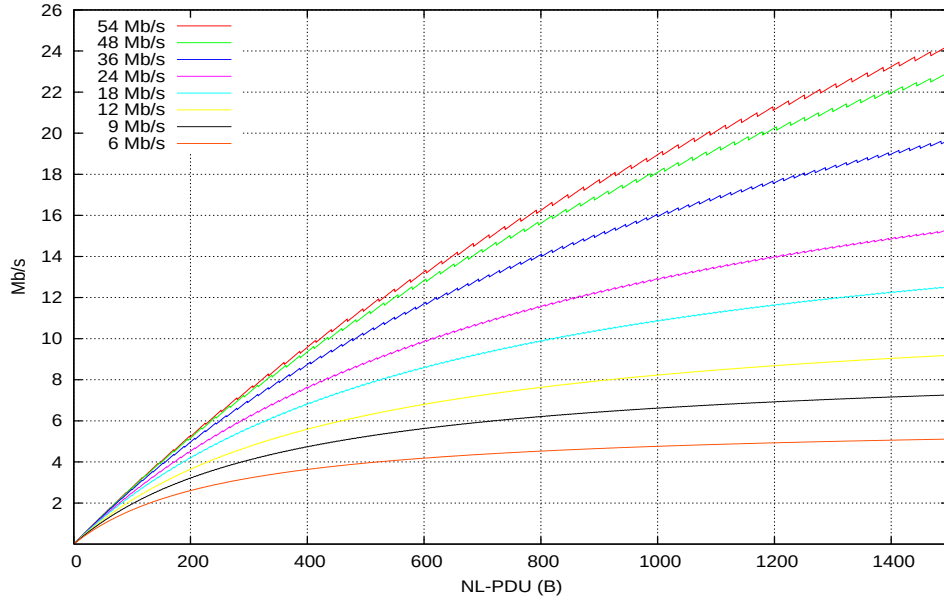


Figura 6.19: 802.11g: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di CSMA/CA con Long Slot Time.

6.3.1.2 Short Slot Time

Con Slot Time pari a $9 \mu s$ si ha che

$$\begin{aligned} T_{DISF} &= aSIFSTime + 2 * aSlotTime = 28 \mu s \\ T_{BO} &= Random() * aSlotTime = 67.5 \mu s \end{aligned}$$

quindi dalla 6.13 si ha che

$$\begin{aligned} T_{cycle} &= 28 \mu s + 67.5 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s + 10 \mu s + \\ &+ 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s = \end{aligned}$$

$$= 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 157.5 \mu s$$

Quindi T_{cycle} è data da

$$T_{cycle} = 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \Delta_{short}^{CSMA/CA}$$

dove $\Delta_{short}^{CSMA/CA}$ dipende dalla velocità utilizzata per spedire il frame e i cui valori sono riportati in tabella 6.6

rate	N_{DBPS}	$\Delta_{short}^{CSMA/CA}$
6 Mb/s	24	181.5 μs
9 Mb/s	36	173.5 μs
12 Mb/s	48	169.5 μs
18 Mb/s	72	165.5 μs
24 Mb/s	96	165.5 μs
36 Mb/s	144	161.5 μs
48 Mb/s	192	161.5 μs
54 Mb/s	216	161.5 μs

Tabella 6.6: 802.11g: $\Delta_{short}^{CSMA/CA}$.

A questo punto si ha che

$$TMT(NL-PDU) = \frac{NL-PDU * 8}{4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \Delta_{short}^{CSMA/CA}}$$

L'andamento del TMT così ottenuto è mostrato in figura 6.20

6.3.2 RTS/CTS

Proseguiamo nel calcolo del TMT considerando che, come politica di accesso al mezzo, sia utilizzata RTS/CTS.

Con riferimento alla figura 6.3 a pagina 93 abbiamo che

$$T_{cycle} = T_{DIFS} + T_{BO} + T_{RTS} + T_{SIFS} + T_{CTS} + T_{SIFS} + T_{data} + T_{SIFS} + T_{ACK} \quad (6.16)$$

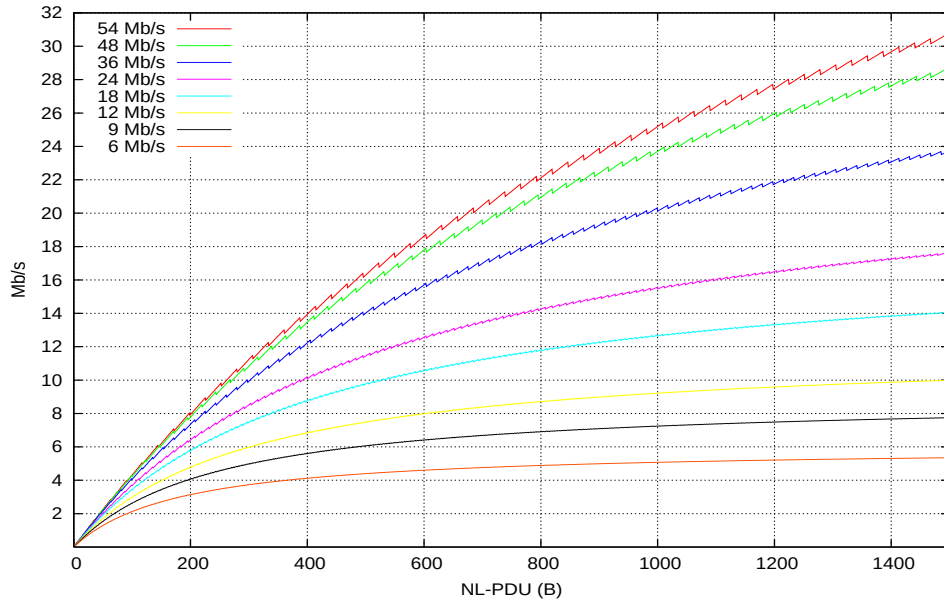


Figura 6.20: 802.11g: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di CSMA/CA con Short Slot Time.

dove i valori per le variabili temporali sono gli stessi visti per l'equazione 6.13.

Vediamo i valori per i frame RTS e CTS

$$\begin{aligned}
 T_{RTS} &= T_{preamble} + T_{SIGNAL} + T_{SYM} * \left\lceil \frac{16 \text{ bit} + RTS * 8 + 6 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \\
 &\quad + T_{EXT} = \\
 &= 16 \mu s + 4 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{182 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 6 \mu s = \\
 &= 4 \mu s * \left\lceil \frac{182 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{CTS} &= T_{preamble} + T_{SIGNAL} + T_{SYM} * \left\lceil \frac{16 \text{ bit} + CTS * 8 + 6 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \\
 &\quad + T_{EXT} = \\
 &= 16 \mu s + 4 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 6 \mu s = \\
 &= 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s
 \end{aligned}$$

mentre T_{data} e T_{ACK} sono gli stessi calcolati in 6.14 e 6.15

Distinguiamo quindi il calcolo per Long e Short Slot Time.

6.3.2.1 Long Slot Time

In questo caso lo Slot Time è pari a $20 \mu s$ e quindi, come nel paragrafo 5.3.1.1, si ha che

$$\begin{aligned} T_{DISF} &= aSIFSTime + 2 * aSlotTime = 50 \mu s \\ T_{BO} &= Random() * aSlotTime = 150 \mu s \end{aligned}$$

quindi dalla 6.16 si ha che

$$\begin{aligned} T_{cycle} &= 50 \mu s + 150 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{182 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s + 10 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \\ &+ 26 \mu s + 10 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s + 10 \mu s + \\ &+ 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s = \\ &= 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 4 \mu s * \left\lceil \frac{182 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 8 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \\ &+ 334 \mu s \end{aligned}$$

Quindi T_{cycle} è data da

$$T_{cycle} = 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \Delta_{long}^{RTS/CTS}$$

dove $\Delta_{long}^{RTS/CTS}$ dipende dalla velocità utilizzata per spedire il frame e i cui valori sono riportati in tabella 6.7

rate	N_{DBPS}	$\Delta_{long}^{RTS/CTS}$
6 Mb/s	24	414 μs
9 Mb/s	36	390 μs
12 Mb/s	48	374 μs
18 Mb/s	72	362 μs
24 Mb/s	96	358 μs
36 Mb/s	144	350 μs
48 Mb/s	192	346 μs
54 Mb/s	216	346 μs

Tabella 6.7: 802.11g: $\Delta_{long}^{RTS/CTS}$.

A questo punto si ha che

$$TMT(NL-PDU) = \frac{NL-PDU * 8}{4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil} + \Delta_{long}^{RTS/CTS}$$

In figura 6.21 è mostrato l'andamento del TMT ottenuto.

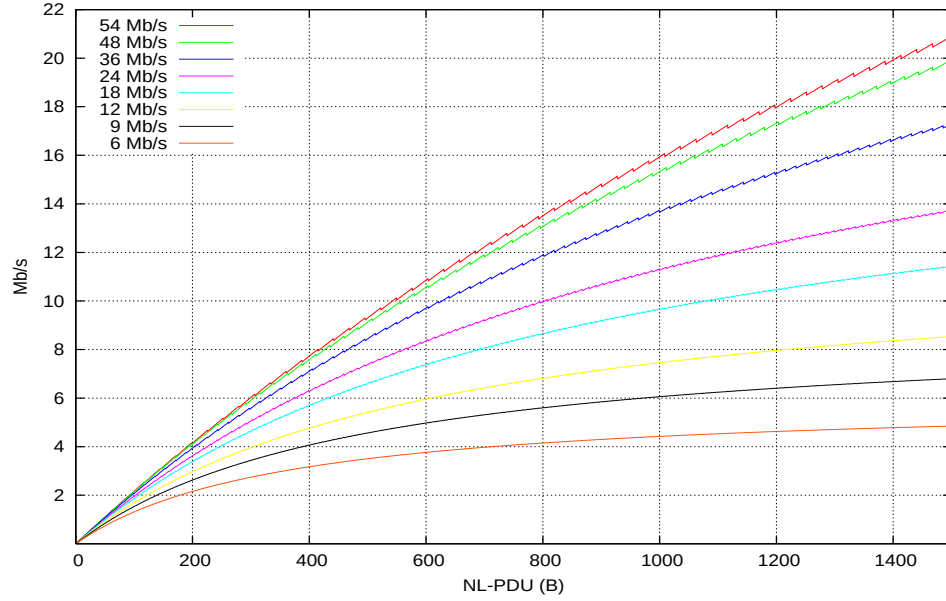


Figura 6.21: 802.11g: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di RTS/CTS con Long Slot Time.

6.3.2.2 Short Slot Time

poiché lo Slot Time è pari a $9 \mu s$, come nel paragrafo 5.3.1.2, si ha che

$$\begin{aligned} T_{DISF} &= aSIFSTime + 2 * aSlotTime = 28 \mu s \\ T_{BO} &= Random() * aSlotTime = 67.5 \mu s \end{aligned}$$

e quindi

$$\begin{aligned} T_{cycle} &= 28 \mu s + 67.5 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{182 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s + 10 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \\ &+ 26 \mu s + 10 \mu s + 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s + 10 \mu s + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +4 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 26 \mu s = \\
= & 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 4 \mu s * \left\lceil \frac{182 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \\
& +8 \mu s * \left\lceil \frac{134 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + 229.5 \mu s
\end{aligned}$$

e T_{cycle} può essere scritto come

$$T_{cycle} = 4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 358 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \Delta_{short}^{RTS/CTS}$$

dove $\Delta_{short}^{RTS/CTS}$ dipende dalla velocità utilizzata per spedire il frame e i cui valori sono riportati in tabella 6.8

rate	N_{DBPS}	$\Delta_{short}^{RTS/CTS}$
6 Mb/s	24	309.5 μs
9 Mb/s	36	285.5 μs
12 Mb/s	48	269.5 μs
18 Mb/s	72	257.5 μs
24 Mb/s	96	253.5 μs
36 Mb/s	144	245.5 μs
48 Mb/s	192	241.5 μs
54 Mb/s	216	241.5 μs

Tabella 6.8: 802.11g: $\Delta_{short}^{RTS/CTS}$.

Quindi possiamo indicare il TMT come

$$TMT(NL-PDU) = \frac{NL-PDU * 8}{4 \mu s * \left\lceil \frac{NL-PDU * 8 + 310 \text{ bit}}{N_{DBPS}} \right\rceil + \Delta_{short}^{RTS/CTS}}$$

In figura 6.22 è riportato l'andamento del TMT in funzione della dimensione del frame a seconda della velocità utilizzata.

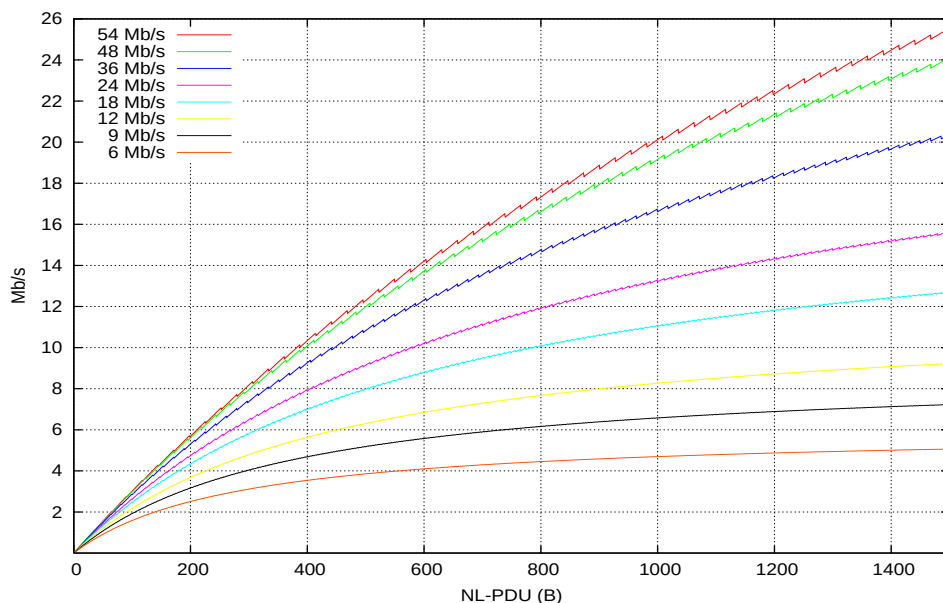


Figura 6.22: 802.11g: Andamento del TMT in funzione della dimensione del frame nel caso di RTS/CTS con Short Slot Time.

6.3.3 Analisi del TMT per 802.11g

Calcolato il TMT secondo la politica di accesso al mezzo e lo Slot Time utilizzato, andiamo ad analizzare i risultati ottenuti confrontando le varianti prese in esame.

6.3.3.1 CSMA/CA: Confronto tra Long e Short Slot Time

In figura 6.23 è mostrata la differenza esistente tra le prestazioni con Long Slot Time e Short Slot Time.

Da questo grafico si può notare, specialmente per velocità più basse, come la differenza nella scelta tra Long o Short Slot Time tenda a diminuire al crescere della dimensione del frame trasmesso.

6.3.3.2 RTS/CTS: Confronto tra Long e Short Slot Time

Riportiamo in figura 6.24 la differenza esistente tra le prestazioni ottenute con Long Slot Time e Short Slot Time. Anche in questo caso, mano a mano che aumenta la dimensione del frame, la scelta dello Slot Time diventa meno influente anche se, rispetto alla scelta di una politica di accesso al mezzo come CSMA/CA, la differenza dovuta allo Slot Time decresce più lentamente che nel caso precedente.

6.3.4 Analisi dell'efficienza di banda per 802.11g

Ricordando che l'efficienza di banda è definita come

$$\varepsilon = \frac{\text{TMT}}{R}$$

con R il basic data rate, andiamo ad applicarla al nostro studio.

In figura 6.25 viene mostrata l'efficienza di banda ottenuta utilizzando il Long Slot Time con politica di accesso al mezzo CSMA/CA.

Come si può notare l'efficienza di banda raggiunge un valore massimo di solo il 45% nel caso di velocità pari a 54 Mb/s, mentre andando a diminuire la velocità sino a 6 Mb/s, si raggiunge un valore pari al 85%.

Nel caso di Short Slot Time, invece, come mostrato in figura 6.26, l'efficienza di banda raggiunge, con rate trasmissivo impostato a 54 Mb/s, il 57% mentre, impostando il velocità a 6 Mb/s, si raggiunge il 90%.

Andiamo a valutare l'efficienza di banda della differenza dell'utilizzo dei due Slot Time. Come si può vedere in figura 6.27 questa varia tra il 8.4%, che equivale al massimo ottenuto per una velocità pari a 6 Mb/s, e il 12% ottenuto come massima differenza per una velocità di 54 Mb/s.

Vediamo ora come varia l'efficienza di banda nel caso di politica di accesso al mezzo RTS/CTS.

In figura 6.28 è mostrata l'efficienza di banda per l'utilizzo di Long Slot Time.

Come si può vedere il valore massimo ottenuto alla massima velocità consentita dallo standard è di appena il 38% mentre si sfiora un 80% diminuendo la velocità sino a 6 Mb/s.

Il caso di utilizzo di Short Slot Time è mostrato in figura 6.29. Come si vede, ancora il massimo valore per l'efficienza di banda è ottenuto alla minima velocità consentita dallo standard mentre il minimo si ha per la massima velocità. Infatti, con velocità pari a 6 Mb/s, l'efficienza di banda arriva ad un valore pari al 84% mentre, con velocità a 54 Mb/s, sfiora il 48%.

Come fatto per CSMA/CA, andiamo ora a vedere la differenza dell'efficienza di banda che è mostrata in figura 6.30. Ancora, la massima percentuale ottenuta varia tra 6.3% a 6 Mb/s e 8.4% a 48 Mb/s.

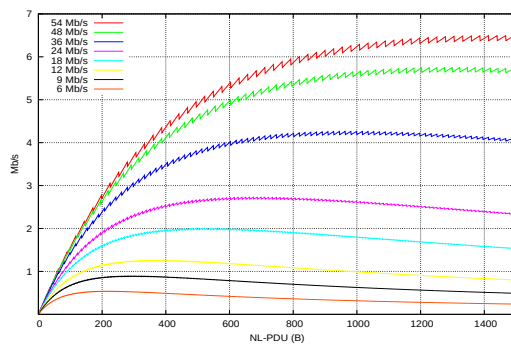


Figura 6.23

802.11g: CSMA/CA: Differenza di prestazione tra Long e Short Slot Time.

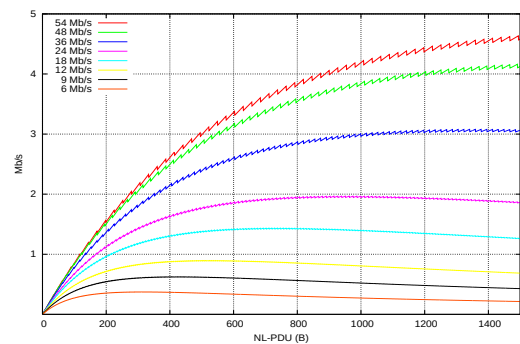


Figura 6.24

802.11g: RTS/CTS: Differenza di prestazione tra Long e Short Slot Time.

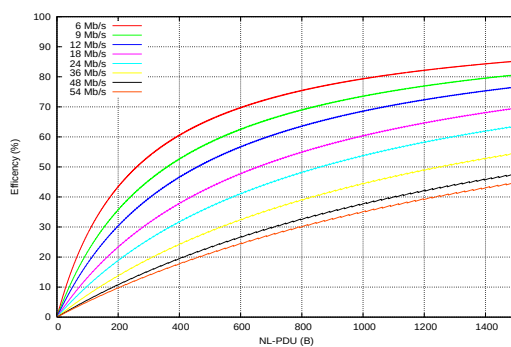


Figura 6.25

802.11g: CSMA/CA: Efficienza con utilizzo di Long Slot Time.

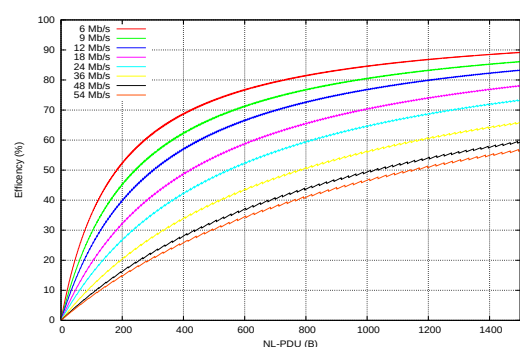


Figura 6.26

802.11g: CSMA/CA: Efficienza con utilizzo di Short Slot Time.

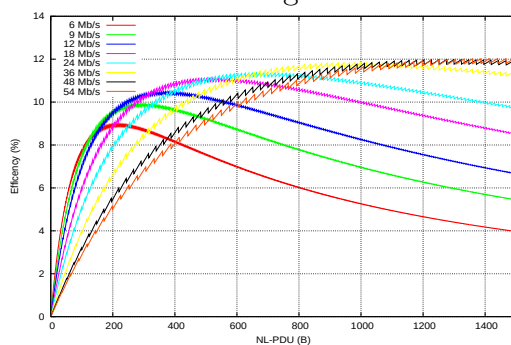


Figura 6.27

802.11g: CSMA/CA: Efficienza di banda della differenza tra l'utilizzo di Long e Short Slot Time.

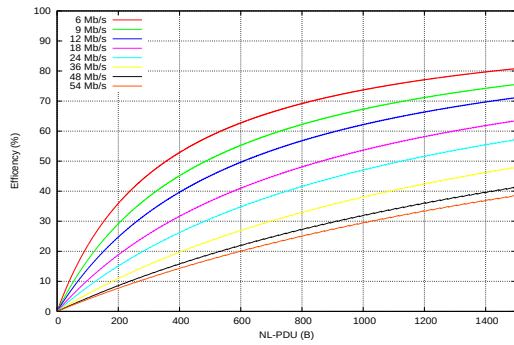


Figura 6.28

802.11g: RTS/CTS: Efficienza con
utilizzo di Long Slot Time

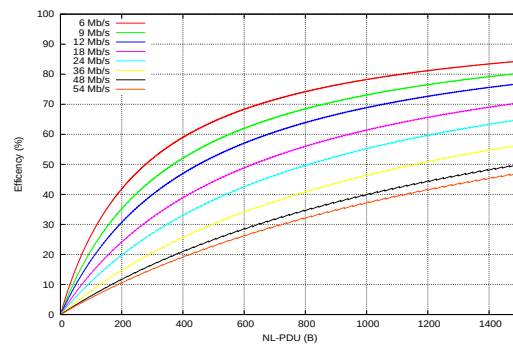


Figura 6.29

802.11g: RTS/CTS: Efficienza con
utilizzo di Short Slot Time

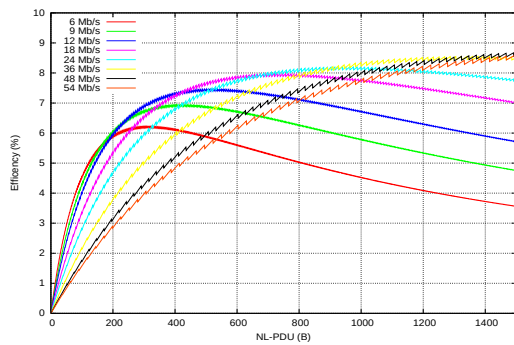


Figura 6.30

802.11g: RTS/CTS: Differenza
dell'efficienza di banda con utilizzo di
Long e Short Slot Time

6.4 Le prove sperimentali

Sono state realizzate prove sperimentali per il protocollo 802.11b al fine di verificare quanto le prestazioni delle schede si avvicinassero al Massimo Throughput Teorico.

Le misure sono state effettuate con le schede D-Link¹ e con due degli IBM¹ a disposizione, rispettivamente *pettirosso* in trasmissione e *passero* in ricezione,

- impostando il valore di ritrasmissioni a 0;
- inviando una sequenza di pacchetti sufficientemente grande, imponendo una trasmissione di 1000 pacchetti di lunghezza 1000 byte per ogni misura eseguita;
- scartando le trasmissioni che hanno registrato perdite di frame;
- disabilitando la frammentazione.

Sono state generate, per ogni velocità prevista dal protocollo, 20 prove ogni 100 byte per la dimensione del frame, in modo da avere un range di errore affidabile.

È stato possibile cambiare la politica di accesso al mezzo, così da effettuare le prove sia per CSMA/CA che per RTS/CTS, ma non la lunghezza del preambolo; questo perché, benché prevista l'operazione che permette tale scelta, nel driver della scheda utilizzata non è presente, nella sua implementazione, la chiamata alla primitiva che esegue tale cambiamento.

Nei due paragrafi che seguono sono riportati i risultati ottenuti con le prove sperimentali.

I grafici che le descrivono sono composti di tre parti:

- nella parte superiore del grafico sono riportati i risultati ottenuti per tutte le misure eseguite, un punto per ogni misura, comparati con la curva del TMT, in rosso, per meglio evidenziare il distacco delle prove sperimentali dal risultato teorico;
- nella parte inferiore si è riportato, per ogni dimensione del frame presa in esame, l'errore commesso dal massimo throughput sperimentale rispetto al teorico;
- infine, nel riquadro, è mostrata la PDF(Probability Density Function) dell'errore commesso da tutte le prove effettuate

Di seguito sono riportate le misure eseguite a 11, 5.5, 2 e 1 Mb/s per le due politiche prese in esame CSMA/CA e RTS/CTS. Come si può notare, diminuendo la velocità di trasmissione, si restringe il range di errore ottenuto rispetto ai risultati teorici.

¹Per i dettagli su hardware e software utilizzato vedere il paragrafo 4.1

6.4.1 Prove sperimentali per CSMA/CA

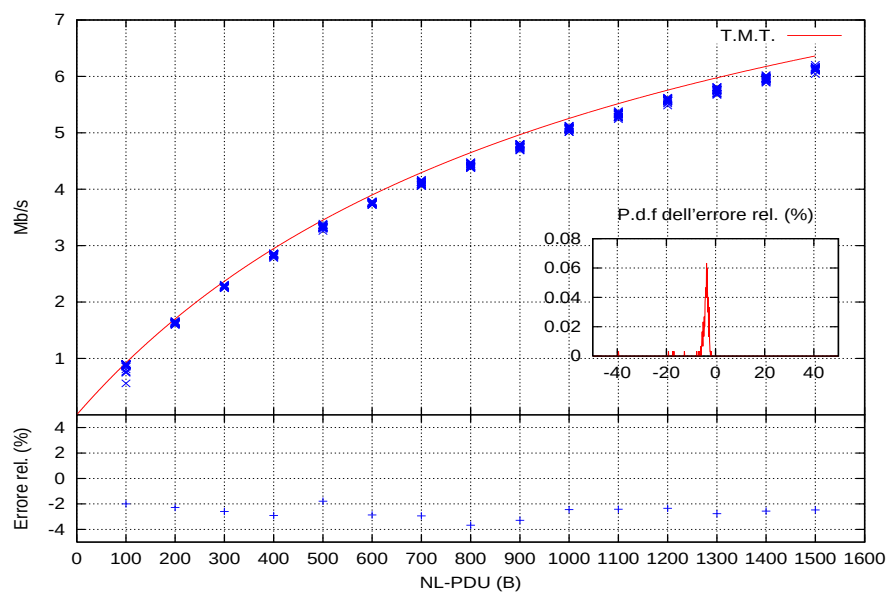


Figura 6.31: 802.11b: CSMA/CA: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 11 Mb/s.

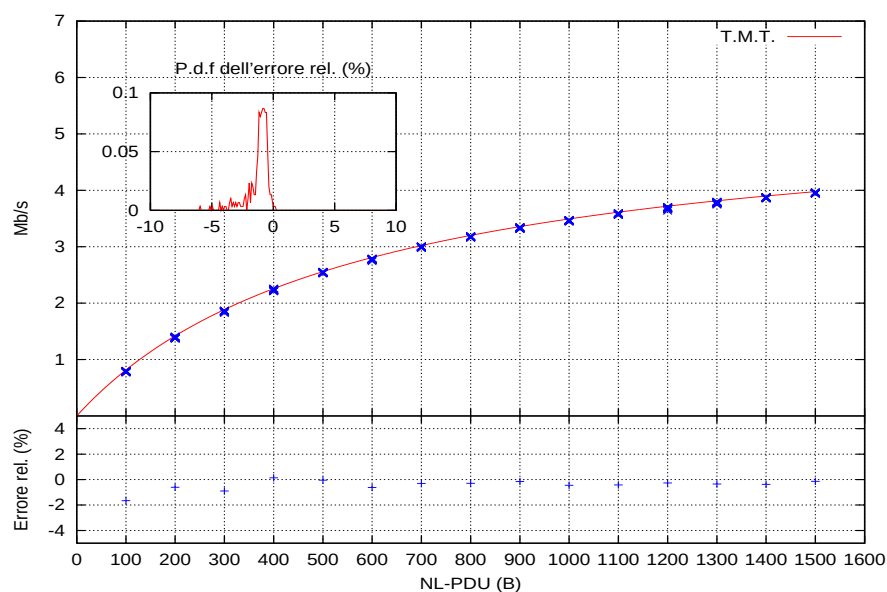


Figura 6.32: 802.11b: CSMA/CA: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 5.5 Mb/s.

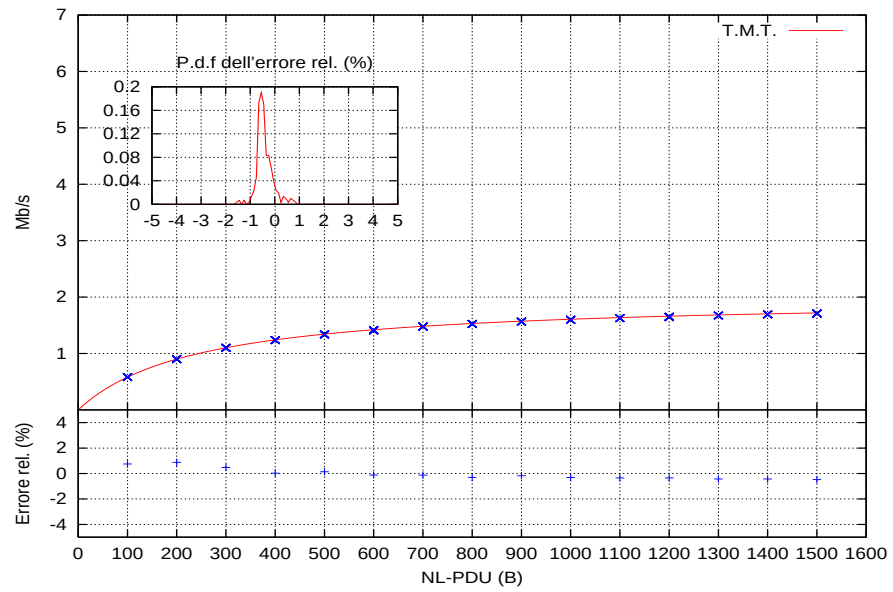


Figura 6.33: 802.11b: CSMA/CA: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 2 Mb/s.

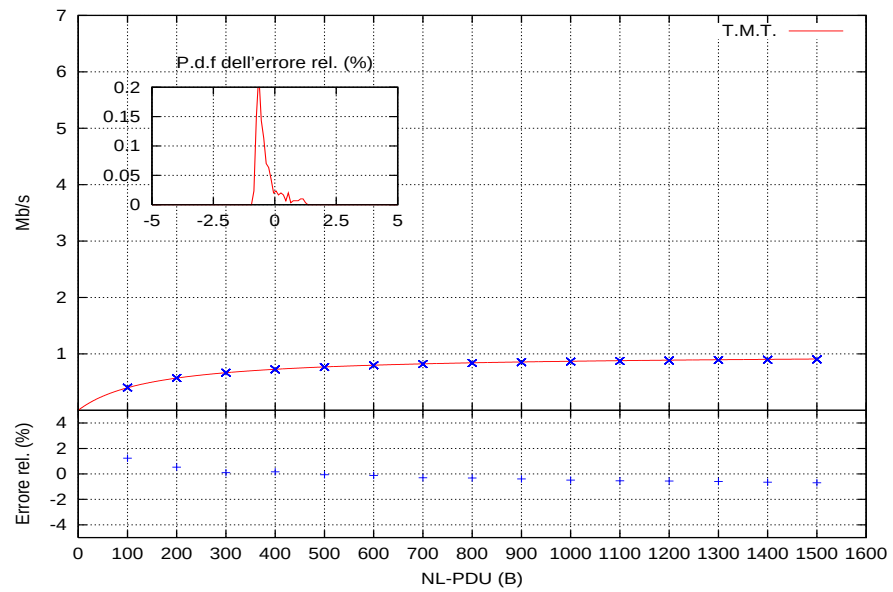


Figura 6.34: 802.11b: CSMA/CA: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 1 Mb/s.

6.4.2 Prove sperimentali per RTS/CTS

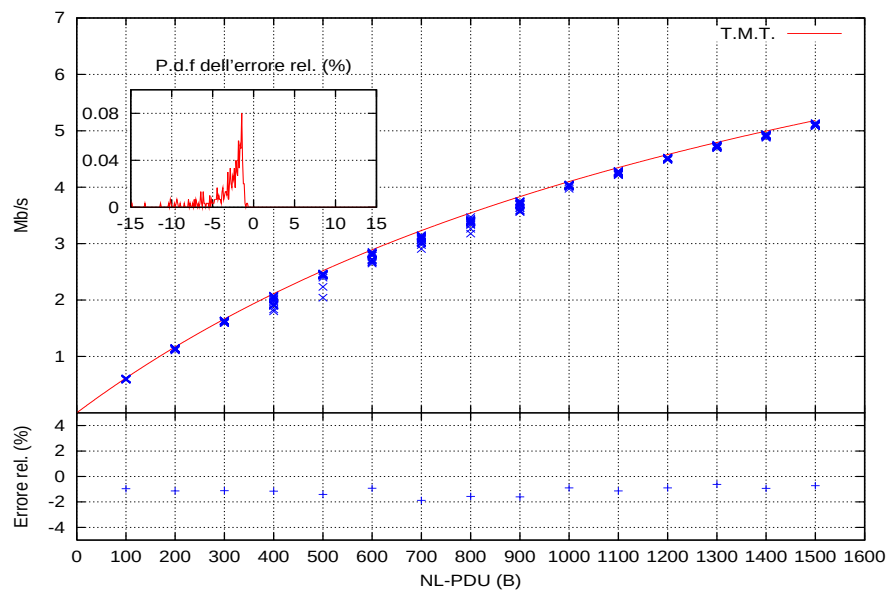


Figura 6.35: 802.11b: RTS/CTS: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 11 Mb/s.

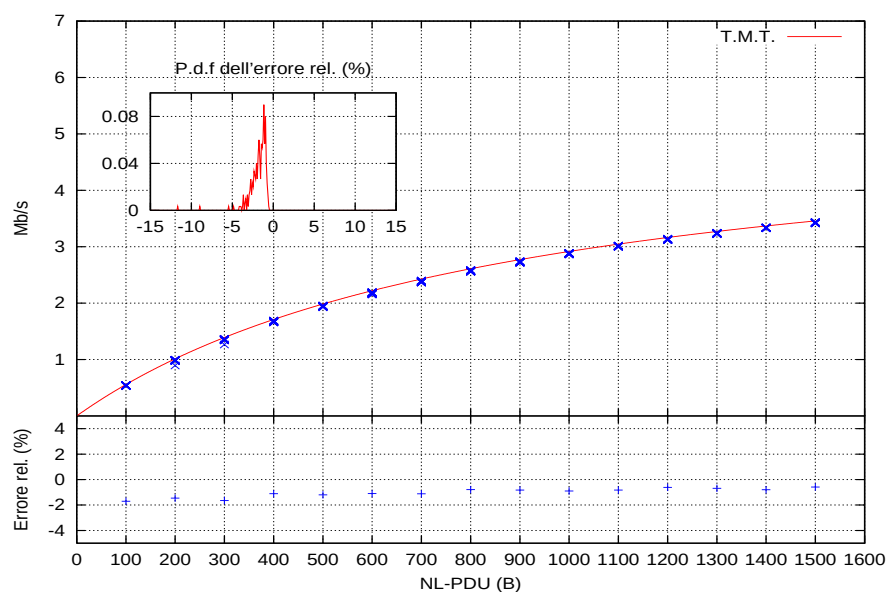


Figura 6.36: 802.11b: RTS/CTS: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 5.5 Mb/s.

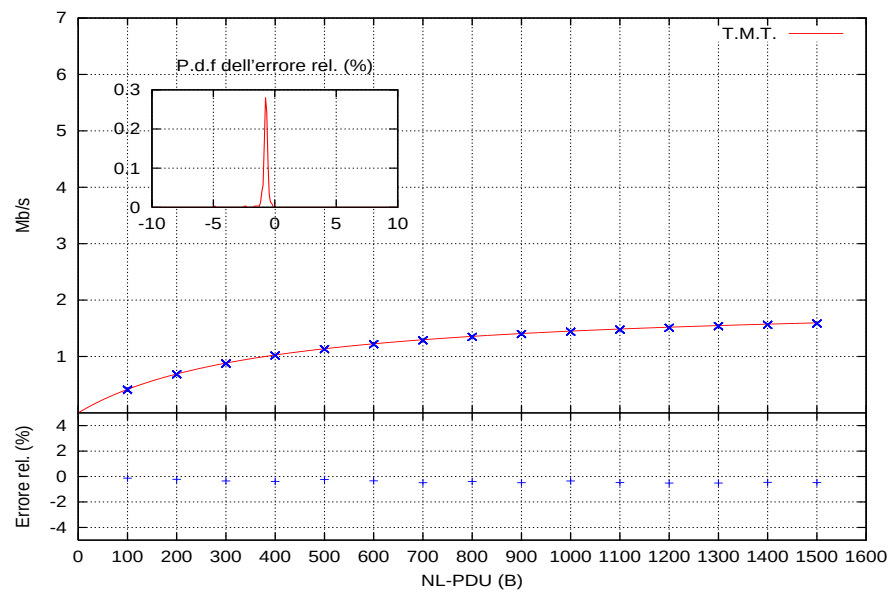


Figura 6.37: 802.11b: RTS/CTS: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 2 Mb/s.

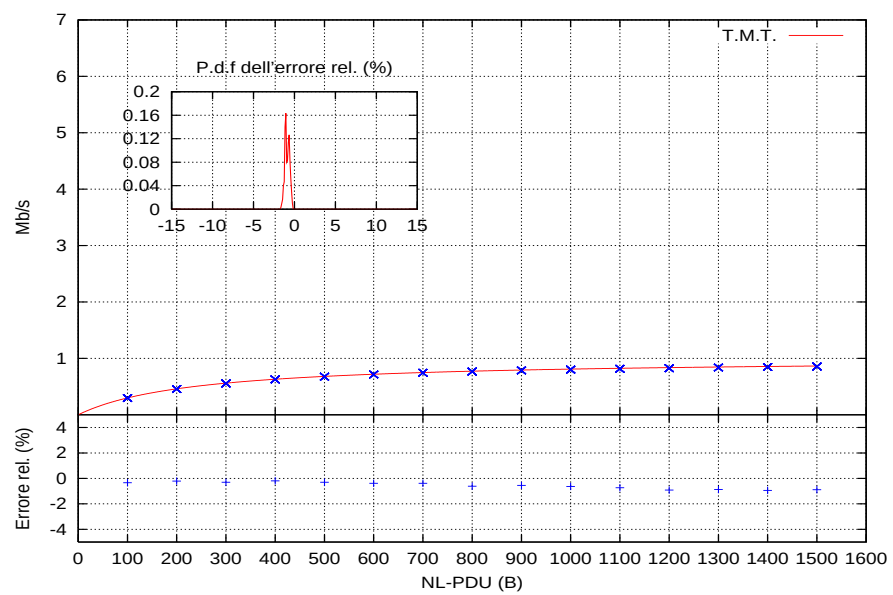


Figura 6.38: 802.11b: RTS/CTS: Prove sperimentali ottenute con velocità pari a 1 Mb/s.

6.5 Conclusioni

Il calcolo esatto del Massimo Throughput Teorico, presentato in questo capitolo, ha permesso di evidenziare quanto le intestazioni e, più in generale, i vari campi inseriti nei diversi strati che costituiscono il modello OSI influiscano sulle reali prestazioni dei dispositivi 802.11.

A tal fine sono stati quindi analizzati i campi introdotti ai vari strati che compongono il modello e il ritardo che questi introducono nella trasmissione dei dati, così come si è analizzato il ritardo introdotto dalle informazioni aggiuntive spedite in base alla politica di accesso al mezzo adottata per eseguire tale trasmissione.

I risultati teorici ottenuti, mostrati nei vari grafici presentati, evidenziano come più si aumenta la velocità di trasmissione e più ci si allontana dalla velocità nominale: la massima velocità teorica a cui si può aspirare per un dispositivo 802.11b supera di poco i 7 Mb/s contro gli 11 Mb/s nominali, mentre per dispositivi 802.11g si raggiungono a stento i 31 Mb/s contro i 54 Mb/s nominali.

Al contrario, velocità più modeste come 2 Mb/s del protocollo 802.11b o 6 Mb/s per 802.11g riescono a raggiungere un'efficienza del 90% rispetto al valore nominale contro una ben più modesta efficienza del 65% per le velocità più alte consentite dai due protocolli.

Al fine di verificare quanto la tecnologia odierna realmente segua l'andamento teorico, sono state eseguite delle prove per ogni velocità permessa dal protocollo 802.11b con politica di accesso al mezzo CSMA/CA e RTS/CTS e con preambolo lungo del frame PLCP in quanto l'operazione per il cambio di preambolo è prevista dallo standard così come dalla API utilizzata, ma non è implementata nel driver utilizzato (vedi par 4.1).

Tutte le prove sono state eseguite imponendo le limitazioni viste per l'approccio teorico: ritrasmissioni nulle, frammentazione disabilitata, scarto delle misure che registrano perdita di pacchetto, non è utilizzata la PCF, il nodo trasmittente ha sempre un numero sufficiente di pacchetti da spedire, nel nostro caso 1000 a misura.

Le misure ottenute seguendo un tale criterio hanno evidenziato un comportamento reale che segue quello dei risultati teorici: la percentuale di errore relativa al massimo throughput registrato per ogni dimensione di pacchetto si è mantenuta inferiore al 2%, con le percentuali di perdita inferiori registrate per velocità di trasmissione minori.

Capitolo 7

Ritardo dovuto alle ritrasmissioni

I dispositivi appartenenti ad una rete wireless comunicano tra loro scambiandosi informazioni sotto forma di onde radio.

Le onde radio non sono altro che onde elettromagnetiche e come tali viaggiano alla velocità della luce.

Il tempo di trasmissione dei segnali scambiati tra due dispositivi appartenenti ad una rete wireless ad hoc, quindi, vista la loro portata radio limitata, risulta essere dell'ordine del μs e come tale trascurabile.

Le trasmissioni sono però affette dal ritardo dovuto al tempo di elaborazione delle informazioni al trasmettitore e al ricevitore così come il ritardo introdotto dal meccanismo di accesso al canale, nel caso in cui questo sia trovato occupato al momento della trasmissione, e di eventuali ritrasmissioni eseguite quando non viene ricevuto il frame ACK di riscontro entro lo scadere del timer ad esso associato.

Nell'ipotesi semplificata in cui l'accesso al canale vada sempre a buon fine, risulta quindi possibile osservare il numero di ritrasmissioni, a cui è sottoposto un frame perché la sua trasmissione avvenga con successo, considerando il ritardo di cui questo è affetto.

Nei prossimi paragrafi vengono presentati i risultati teorici e alcuni risultati ottenuti sperimentalmente riguardanti il ritardo introdotto dalle ritrasmissioni.

7.1 Ritardo teorico introdotto dalle ritrasmissioni

I risultati teorici presentati in questo paragrafo sono validi sotto le seguenti assunzioni:

- la politica di accesso al canale utilizzata è CSMA/CA;
- l'accesso al canale avviene sempre con successo;
- il frame trasmesso ha dimensione pari a 1000B;
- la velocità di trasmissione considerata è di 11Mb/s.

Il tempo necessario per la trasmissione di un frame sotto queste condizioni è dato da

$$T_{tr} = T_{DIFS} + T_{BO} + T_{data} + T_{SIFS} + T_{ACK}$$

dove

$$\begin{aligned} T_{DIFS} &= \text{ritardo imposto dal protocollo pari a} = 50 \mu s \\ T_{BO} &= \text{tempo di backoff} = \\ &= [0, 2^n - 1] * aSlotTime \\ T_{data} &= \text{tempo impiegato a trasferire il PLCP-PDU} = 946 \mu s \\ T_{SIFS} &= \text{ritardo imposto dal protocollo} = \\ &= aSIFSTime \\ T_{ACK} &= \text{tempo di attesa di un ACK di risposta al trasmettitore} \\ &= 203 \mu s \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} n \in [4, 10] &= \text{il suo valore dipende dal numero di ritrasmissioni} \\ aSIFSTime &= 10 \mu s \\ aSlotTime &= 20 \mu s \end{aligned}$$

Da notare che T_{BO} è presente solo se viene invocata la procedura di backoff allo scadere del timer associato al frame ACK. Il tempo di trasmissione di un frame è stato ottenuto considerando PLCP-preamble lungo¹.

Nell'ipotesi in cui non si ha ritardo per l'accesso al canale, quindi, il ritardo introdotto dalle ritrasmissioni è pari al valore di ritardo di più cicli di trasmissione consecutivi.

Indicando con T_{tr}^i il ritardo introdotto dalla i -esima ritrasmissione si ha quindi

$$\begin{aligned} T_{tr}^0 &= T_{tr} = 1209 \mu s \\ T_{tr}^1 &= T_{tr}^0 + [1209 \mu s, 1859 \mu s] = [2418 \mu s, 3038 \mu s] \\ T_{tr}^2 &= T_{tr}^1 + [1209 \mu s, 2469 \mu s] = [3627 \mu s, 5507 \mu s] \end{aligned}$$

¹Per un maggior dettaglio sul tempo di trasmissione di un frame si veda pg. 96.

$$\begin{aligned}
 T_{tr}^3 &= T_{tr}^2 + [1209 \mu s, 3749 \mu s] = [4836 \mu s, 9256 \mu s] \\
 T_{tr}^4 &= T_{tr}^3 + [1209 \mu s, 6309 \mu s] = [6045 \mu s, 15565 \mu s] \\
 T_{tr}^5 &= T_{tr}^4 + [1209 \mu s, 11429 \mu s] = [7254 \mu s, 26994 \mu s] \\
 T_{tr}^6 &= T_{tr}^5 + [1209 \mu s, 21669 \mu s] = [8463 \mu s, 48663 \mu s]
 \end{aligned}$$

Come si può notare, con la seconda ritrasmissione i vari intervalli sono sempre più sovrapposti e questo rende più difficile distinguere le varie ritrasmissioni. Inoltre, se la sesta ritrasmissione dovesse nuovamente fallire, il ritardo continuerebbe ad essere pari a T_{tr}^6 sino ad una trasmissione andata a buon fine e quindi si ritornerebbe ad un ritardo pari a T_{tr}^0 .

7.2 Il risultato sperimentale

In figura 7.1 è mostrato il grafico che descrive i risultati ottenuti valutando sperimentalmente il ritardo introdotto dalle ritrasmissioni dovute alla mancata ricezione del frame ACK.

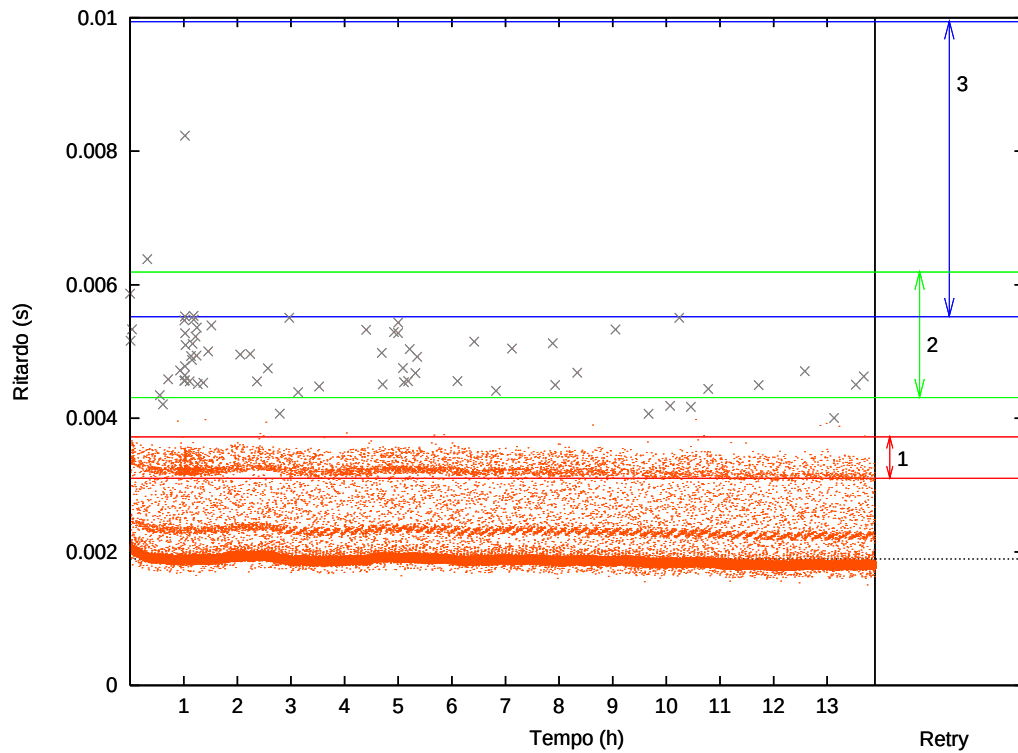


Figura 7.1: Il ritardo ottenuto sperimentalmente introdotto dalle ritrasmissioni in cui sono indicati gli intervalli teorici di ritardo sino alla terza ritrasmissione.

La misura è stata realizzata inviando sull'interfaccia wireless 500000 frame della dimensione di 1000B ad una velocità impostata a 11Mb/s con tempo di intertrasmissione pari a 100 ms; il numero di ritrasmissioni è stato impostato a 7.

I puntini e le crocette rappresentano la differenza tra il tempo di ricezione e il tempo di trasmissione di un singolo frame; le crocette sono state introdotte per evidenziare quei frame per i quali tale differenza si discosta maggiormente dal valor medio dell'intera misura indicato dalla linea nera tratteggiata.

In figura sono riportati gli intervalli di ritardo teorico delle ritrasmissioni, indicati sul lato destro del grafico, sino alla terza ritrasmissione, ai quali è stato aggiunto un ritardo il cui valore comprende il ritardo introdotto dall'elaborazione e schedulazione dei dati sia a lato trasmettitore che a lato ricevitore.

Come si può notare, l'intervallo associato alla prima ritrasmissione si sovrappone a frame per i quali la trasmissione è andata subito a buon fine ma che hanno riportato un ritardo maggiore rispetto alla media; ciò rende difficile distinguere per quali frame che si trovano in questa fascia sia stata necessaria una ritrasmissione.

I frame che si trovano nella fascia della seconda ritrasmissione con molta probabilità sono stati soggetti a tale ritrasmissione, ma, per alcuni di essi, per esempio quelli nella parte alta dell'intervallo, non è possibile stabilire con certezza se, per la loro trasmissione, siano state necessarie due oppure tre ritrasmissioni.

Per un numero di ritrasmissione maggiore risulta quindi più facile la distinzione con un semplice ritardo superiore al ritardo medio ma, a causa della sovrapposizione degli intervalli teorici, come si è notato nel paragrafo precedente, ancora non è possibile stabilire con certezza quante ritrasmissioni siano state necessarie perché la trasmissione di un dato frame sia eseguita con successo.

Capitolo 8

Misure

La campagna di misure oggetto di questa tesi ha il duplice scopo di studiare la perdita di frame riscontrata e il deterioramento del segnale ricevuto al variare della distanza posta tra trasmettitore e ricevitore e, inoltre, di studiare le fluttuazioni che si hanno sul canale per tempi sufficientemente lunghi in un tipico ambiente di lavoro.

A tal fine sono state eseguite due serie di misure

- in ambiente esterno, la cui descrizione e i risultati ottenuti sono esposti nel paragrafo 8.1, lontano da fonti di interferenze come altre reti wireless, presenti nel canale utilizzato per eseguire le misure o nei canali ad esso adiacenti, o più semplici dispositivi elettronici o ancora oggetti mobili, quali persone o veicoli, che potessero perturbare il canale;
- in ambiente interno, la cui descrizione e i risultati ottenuti sono esposti nel paragrafo 8.2, ponendo il trasmettitore e il ricevitore all'interno di due uffici sui due lati di un corridoio dell'area di ricerca del CNR, in modo che il canale fosse affetto dalle variazioni tipiche di un ambiente di lavoro come il via vai del personale, le eventuali reti wireless presenti e varie riflessioni, diffrazioni e diffusioni prodotte da pavimento, soffitto, pareti, così come dalla mobilia presente in ogni ufficio.

La prima serie ha lo scopo di evidenziare quindi quanto influisca la distanza sulla trasmissione di informazioni tra un'antenna ricevente e una trasmittente; la seconda quanto su tali trasmissioni influiscano invece, mantenendo fissa la configurazione di misura, le condizioni dell'ambiente circostante.

8.1 Le misure eseguite in ambiente esterno

Le misure preliminari eseguite per testare l'affidabilità delle schede presentate nel capitolo 5, hanno permesso di osservare quanto l'ambiente circostante influisca sui risultati ottenuti.

Le misure per il test delle schede sono state eseguite in una zona poco frequentata del parcheggio dell'area di ricerca del CNR: si è notato che se un veicolo non sempre introduceva una perturbazione repentina nella misura in corso, l'aggiungersi dei veicoli nei vari parcheggi, anche non a ridosso dei nostri dispositivi, davano origine a un nuovo ambiente con nuove riflessioni che potevano migliorare o peggiorare il risultato della misura. Inoltre non era possibile controllare, se non rilevandone la presenza, le varie reti wireless eventualmente presenti nel canale utilizzato per eseguire le misure nè in quelli adiacenti.

Si è quindi scelto di eseguire la campagna di misure in un ambiente il più semplice possibile: un campo sufficientemente ampio da poter posizionare i nostri portatili lontano dall'influenza di oggetti fuori dal nostro controllo quali, come già detto, veicoli che transitano in una strada confinante e più semplicemente lontano da persone estranee alle misure.

In questo paragrafo vengono presentati i risultati, ottenuti in tale ambiente, riguardanti la percentuale di perdita di frame e il livello di segnale al ricevitore.

Le misure sono state eseguite secondo le seguenti specifiche:

- **Trasmettitore:** portatile di IBM¹ *pettiroso* con la scheda della casa costruttrice CNet² identificata con CNET3 come mostrato in tabella 5.3;
- **Ricevitore:** portatile di IBM *passero* con la scheda della casa costruttrice CNet identificata con CNET1 come mostrato in tabella 5.3;
- **Distanza:**
 - da 50 metri a 375 metri per le misure riguardanti la perdita di frame;
 - da 1 metri a 375 metri per le misure riguardanti il deterioramento del segnale ricevuto;
- **Altezza dal suolo:** 90 cm per entrambi i portatili;
- **Orientamento:** direzionale; le schede sono state orientate in modo che fossero l'una nella linea di vista dell'altra;
- **Canale utilizzato:** canale 1;
- **Velocità di trasmissione:** 1 Mb/s, 2 Mb/s, 5.5 Mb/s, 11 Mb/s;
- **Numero di ritrasmissioni:** 0;
- **Fragmentation threshold:** 0;

¹Per i particolari tecnici di tali portatili vedere il par. 4.1.

²Per i particolari tecnici di tale scheda vedere il par. 4.1.

- **RTS threshold:** off;
- **Modalità di connessione:** ad hoc con trasmissione unicast;
- **WEP:** disabilitato;
- **Frame trasmessi:** 200000;
- **Lunghezza dei frame trasmessi:** 1000B;
- **Intervallo di intertrasmissione:**
 - 5 ms per le velocità 2 Mb/s, 5.5 Mb/s e 11 Mb/s;
 - 10 ms per la velocità 1 Mb/s.

Analisi utilizzata per caratterizzare la PDF associata alle misure I dati, che vengono utilizzati per generare il grafico presentato in questo paragrafo, sono stati ottenuti partendo dal vettore di 0 e 1, generato dal software al ricevitore di cui un esempio è mostrato in figura 5.2, nella colonna 7 del file di log per le statistiche riguardanti la perdita di frame, dal vettore contenente il livello di segnale registrato dalla scheda e mantenuto nella colonna 5 del file di log del software in ricezione per il deterioramento del segnale ricevuto.

Tale vettore è stato suddiviso in intervalli disgiunti della dimensione di 200 frame, in modo da ottenere un tempo di osservazione di 2 secondi nel caso in cui la velocità utilizzata sia di 1 Mb/s, di 1 secondo negli altri casi; da ogni intervallo così ottenuto è stata estratta la media del valore dei suoi componenti.

Dei valori così ottenuti si è calcolata la densità di probabilità; poiché questa solitamente presenta valori agli estremi con probabilità molto bassa, si è deciso di determinare, per realizzare alcuni grafici a nostro avviso particolarmente significativi, un intervallo della dispersione dei valori in un intorno del valor medio, in modo che l'area della curva all'interno di tale intervallo avesse una probabilità complessiva del 90%. Per fare ciò si sono scartati valori a percentuale più bassa, tali per cui l'area da essi sottesa fosse pari ad un valore del 5%, e valori a percentuale più alta, tali per cui l'area da essi sottesa fosse pari ad un valore del 5%.

Ogni misura viene quindi ad essere identificata dalla propria PDF, dal suo valor medio, dal minimo, calcolato escludendo il 5% dei valori più bassi, e dal massimo, calcolato escludendo il 5% dei valori più alti.

8.1.1 La perdita di frame

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti andando a studiare la perdita riscontrata dei frame trasmessi.

I risultati sono mostrati in grafici tridimensionali che descrivono la distribuzione della percentuale di perdita di frame, in cui vengono indicati sull'asse

X la distanza a cui è stata eseguita la misura mentre sull'asse Y la perdita di frame riscontrata in percentuale.

Tali grafici sono stati ottenuti elaborando la colonna 7 del file generato dal nostro software di ricezione di cui si può vedere un esempio in figura 5.2; questa colonna è formata da 0, ad indicare che il frame è stato perso, e da 1, ad indicare che il frame è stato ricevuto. Come spiegato nel paragrafo ??, questi dati sono stati divisi in intervalli disgiunti, della dimensione di 200 frame e quindi un tempo di osservazione di 1 s, su ognuno dei quali si è eseguita la media della perdita di frame, di cui si è poi calcolata la funzione di densità di probabilità.

Vediamo i risultati ottenuti per le varie velocità.

11 Mb/s In figura 8.1 è mostrata la densità di probabilità ottenuta con una trasmissione ad una velocità di 11 Mb/s.

Sono state eseguite misure sino a 300 metri, oltre i quali il canale presentava instabilità tali da rendere difficile la rilevazione dei frame trasmessi.

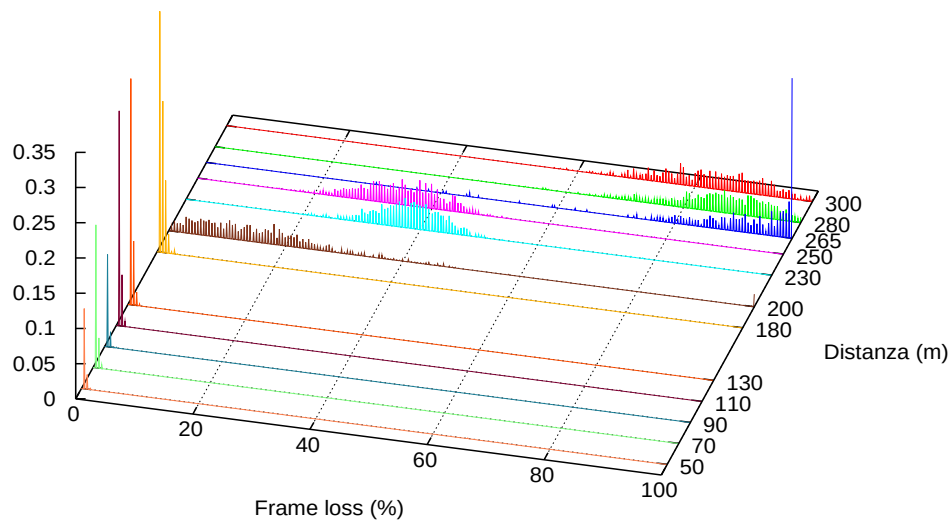


Figura 8.1: Percentuale di perdita di frame ottenuta in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 11 Mb/s.

Come si può notare possono essere distinte tre zone:

- da 50 metri a 180 metri si ha una percentuale di perdita molto bassa, una media inferiore al 3%, che inizia ad aumentare a 200 metri per la quale si ha una perdita molto dispersa tra 0% e 30% che continua poi a degradare sino al 50%;
- da 230 metri a 250 metri la percentuale di perdita sembra stabilizzarsi tra il 20% e il 50%;
- da 265 metri in poi la percentuale di perdita non scende mai sotto il 60% e arriva a valori di perdita del 100%

5.5 Mb/s In figura 8.2 è mostrata la densità di probabilità ottenuta con una trasmissione ad una velocità di 5.5 Mb/s.

Sono state eseguite misure sino a 320 metri, oltre i quali il canale presentava instabilità tali da rendere difficile la rilevazione dei frame trasmessi.

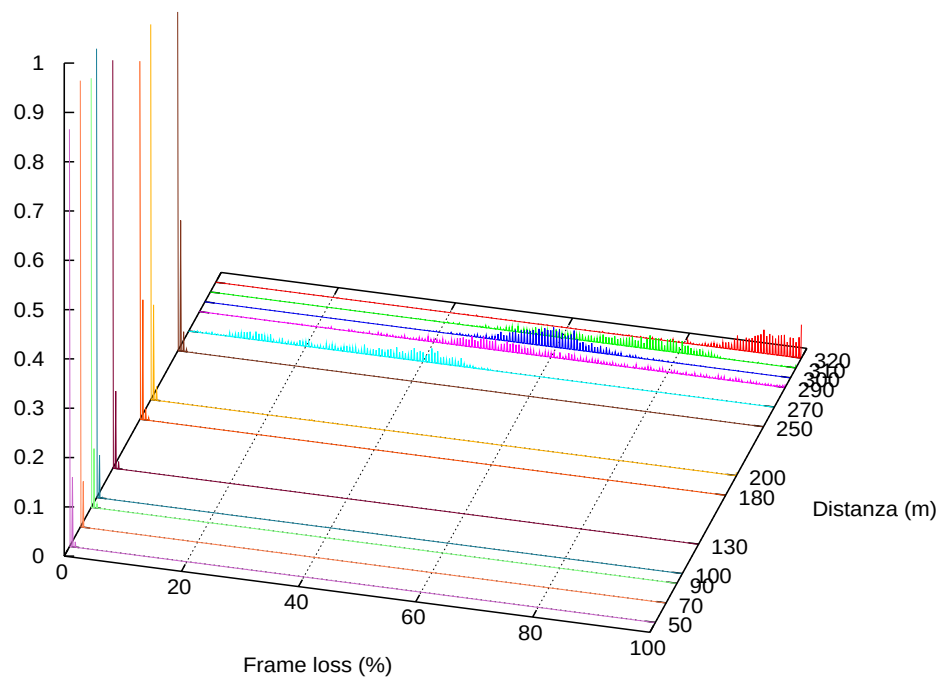


Figura 8.2: Percentuale di perdita di frame ottenuta in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 5.5 Mb/s.

Anche con questa velocità possono essere distinte tre zone:

- da 50 metri a 250 metri si ha una percentuale di perdita molto bassa, una media inferiore al 3% sino a 270 metri per cui si ha una perdita molto dispersa tra il 3% e il 50%;
- da 290 metri a 310 metri si ha una migrazione della percentuale di perdita: a 290 metri la perdita è ancora molto dispersa dal 30% sino al 100%; dopo di che la perdita ritorna a concentrarsi tra il 50% e 80% per la misura eseguita a 300 metri e tra il 45% e 85% per la misura eseguita a 310 metri;
- a 320 metri la percentuale di perdita non scende mai sotto il 80%.

2 Mb/s In figura 8.3 è mostrata la densità di probabilità ottenuta con una trasmissione ad una velocità di 2 Mb/s.

Sono state eseguite misure sino a 350 metri, oltre i quali il canale presentava instabilità tali da rendere difficile la rilevazione dei frame trasmessi.

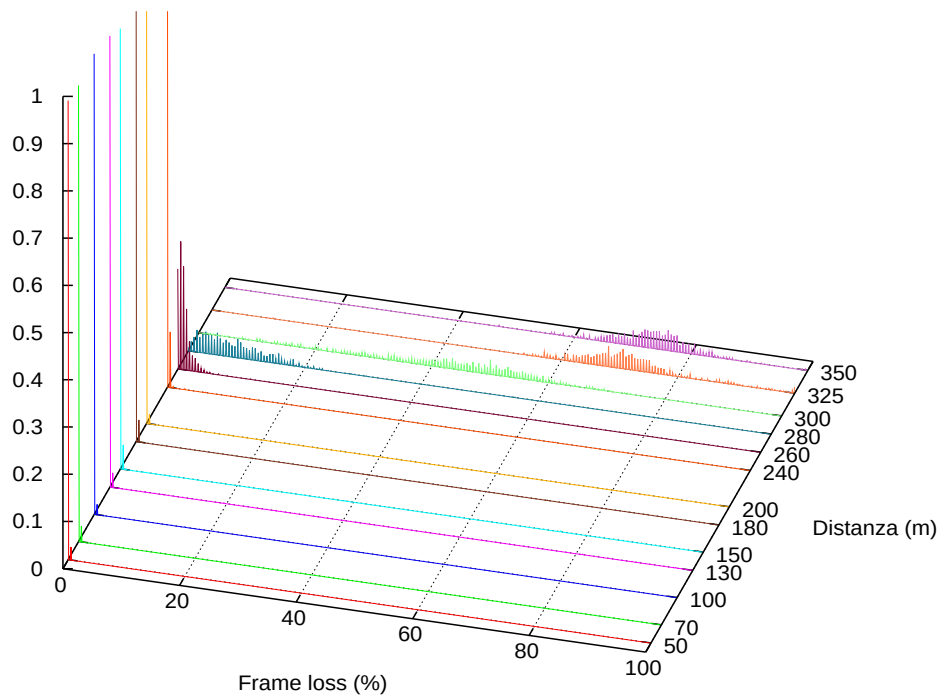


Figura 8.3: Percentuale di perdita di frame ottenuta in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 2 Mb/s.

Ancora si possono distinguere tre zone:

- da 50 metri a 280 metri si ha una percentuale di perdita molto bassa, una media inferiore al 3% sino a 280 metri per cui si ha una perdita molto dispersa tra 0% e il 20%;
- a 310 metri si ha una percentuale di perdita dispersa tra 0% e 70%;
- da 325 metri in poi la percentuale di perdita sembra stabilizzarsi tra 55% e 90%.

Da notare che utilizzando questa velocità non si è ottenuta nessuna curva addossata sul 100% come per le due velocità precedenti.

1 Mb/s In figura 8.4 è mostrata la densità di probabilità ottenuta con una trasmissione ad una velocità di 1 Mb/s.

Sono state eseguite misure sino a 375 metri, oltre i quali il canale presentava instabilità tali da rendere difficile la rilevazione dei frame trasmessi.

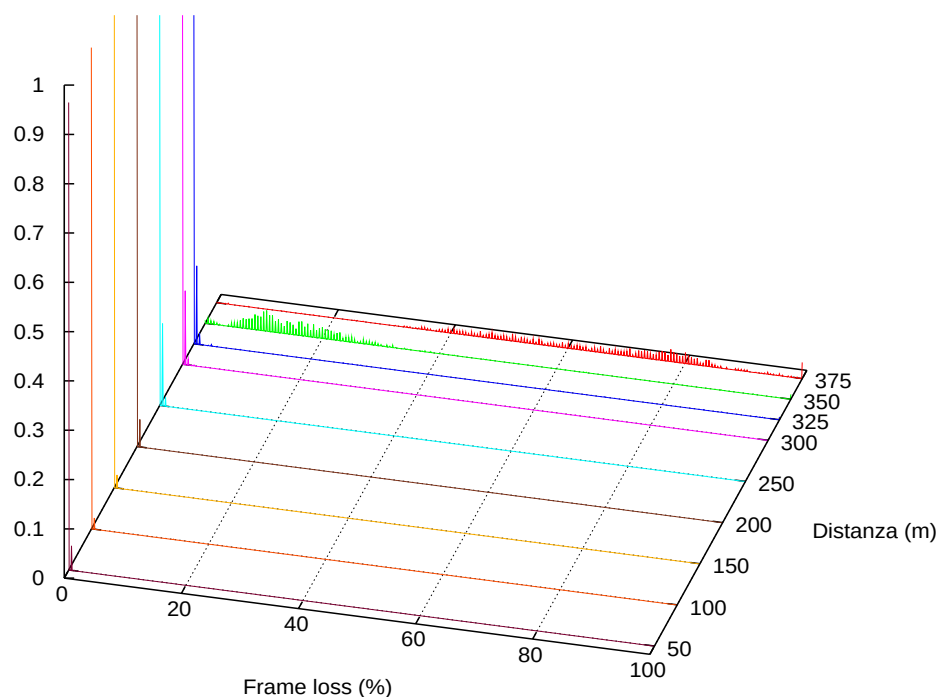


Figura 8.4: Percentuale di perdita di frame ottenuta in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 1 Mb/s.

Le tre zone distinte per le velocità analizzate precedentemente, alla velocità di 1 Mb/s, sembrano andare oltre la distanza da noi raggiunta; in questo caso:

- da 50 metri a 325 metri si ha una percentuale di perdita molto bassa con una media inferiore al 2%;
- a 350 metri la percentuale di perdita inizia a spostarsi facendo rilevare valori compresi tra 0% e 35%;
- la misura a 375 metri risulta essere molto dispersa: presenta infatti valori compresi tra 35% e 100%.

Conclusioni Come si è evidenziato nell'esposizione fatta per ogni velocità utilizzata, si possono distinguere tre zone con comportamento, per quanto riguarda la percentuale di perdita di frame, differente: una prima zona in cui tale perdita è trascurabile e pressochè costante, inferiore a 3% per tutte le velocità, una seconda zona in cui si ha una migrazione verso destra della curva di densità di probabilità il cui valore si discosta da 0% ma non arriva a 100%, una terza zona in cui la percentuale si mantiene pressochè costante addossata sul 100%.

Da notare come, per esempio, la prima zona arrivi a 180 metri utilizzando una velocità di trasmissione pari a 11 Mb/s, mentre raggiunga i 325 metri con una velocità di trasmissione pari a 1 Mb/s; di conseguenza risultano spostate anche le altre due zone tanto che già trasmettendo con velocità pari a 2 Mb/s non si è riusciti ad ottenere la zona in cui la curva di densità di probabilità sia addossata su un valore di 100%.

8.1.2 Il deterioramento del livello del segnale ricevuto

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti andando a studiare la variazione del segnale al ricevitore in funzione della distanza frapposta tra trasmettitore e ricevitore.

I risultati sono presentati in grafici tridimensionali che descrivono la distribuzione del *signal level*³, registrato dalla scheda per ogni frame ricevuto correttamente, in cui vengono indicati sull'asse X il signal level rilevato elaborato opportunamente mentre sull'asse Y la distanza in cui è stata eseguita la misura.

Il signal level viene memorizzato nella colonna 5 del file generato dal nostro software di ricezione di cui si può vedere un esempio in figura 5.2. Come spiegato nel paragrafo ??, questi dati sono stati suddivisi in intervalli disgiunti della dimensione di 200 frame ottenendo quindi un tempo di osservazione di 1

³Il *signal level* restituito dalle schede wireless utilizzate è solo un valore qualitativo e non quantitativo di RSSI, ossia la stima della potenza del segnale rilevata al ricevitore.

s; su ognuno di questi intervalli è stata eseguita la media del livello di segnale riscontrato e quindi si è applicata la funzione di densità di probabilità.

11 Mb/s In figura 8.5 è mostrata la funzione di densità di probabilità ottenuta con una trasmissione eseguita ad una velocità di 11 Mb/s.

Sono state eseguite misure sino a 300 metri, oltre i quali il canale presentava instabilità tali da rendere difficile la rilevazione dei frame trasmessi.

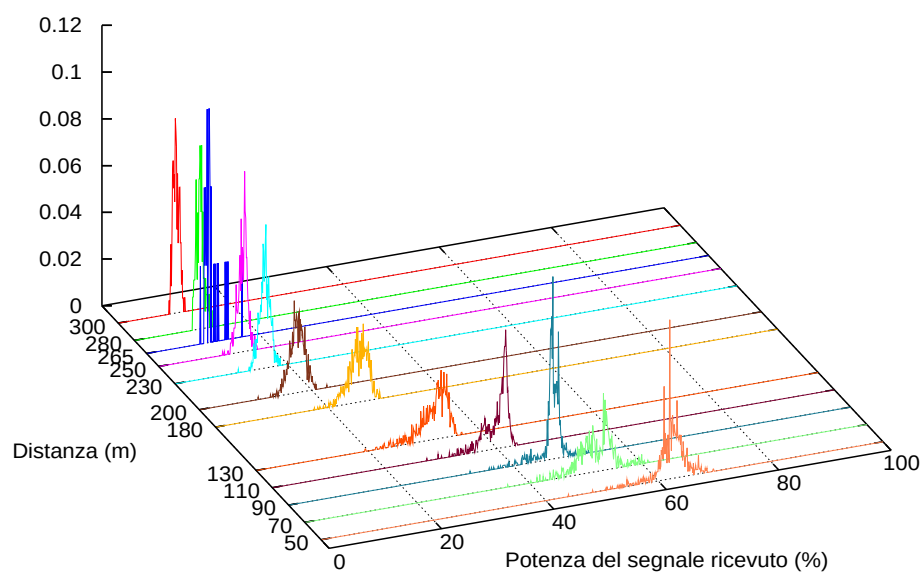


Figura 8.5: Livello di segnale registrato in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 11 Mb/s.

Come si può vedere il livello di segnale ricevuto decresce passando da una media del valore registrato del 65% per una distanza tra trasmettitore e ricevitore di 50 metri a un valore medio del 25% a 180 metri; dopo tale distanza il livello di segnale decresce più lentamente sino a raggiungere una media del 10%.

5.5 Mb/s In figura 8.6 è mostrata la funzione di densità di probabilità ottenuta con una trasmissione eseguita ad una velocità di 5.5 Mb/s.

Sono state eseguite misure sino a 320 metri, oltre i quali il canale presentava instabilità tali da rendere difficile la rilevazione dei frame trasmessi.

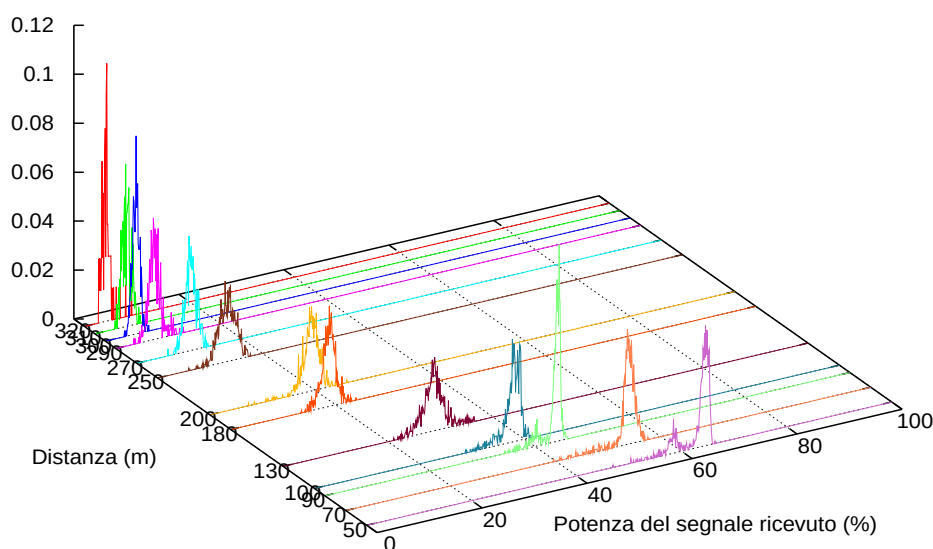


Figura 8.6: Livello di segnale registrato in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 5.5 Mb/s.

Come si può vedere il livello di segnale ricevuto decresce passando da una media del valore registrato del 61% per una distanza tra trasmettitore e ricevitore di 50 metri a un valore medio del 25% a 130 metri; dopo tale distanza il livello di segnale decresce più lentamente sino a raggiungere una media del 5%.

2 Mb/s In figura 8.7 è mostrata la funzione di densità di probabilità ottenuta con una trasmissione eseguita ad una velocità di 2 Mb/s.

Sono state eseguite misure sino a 325 metri, oltre i quali il canale presentava instabilità tali da rendere difficile la rilevazione dei frame trasmessi.

Come si può vedere il livello di segnale ricevuto decresce passando da una media del valore registrato del 61% per una distanza tra trasmettitore e ricevitore di 50 metri a un valore medio del 25% a 200 metri; dopo tale distanza

il livello di segnale decresce più lentamente sino a raggiungere una media del 5%.

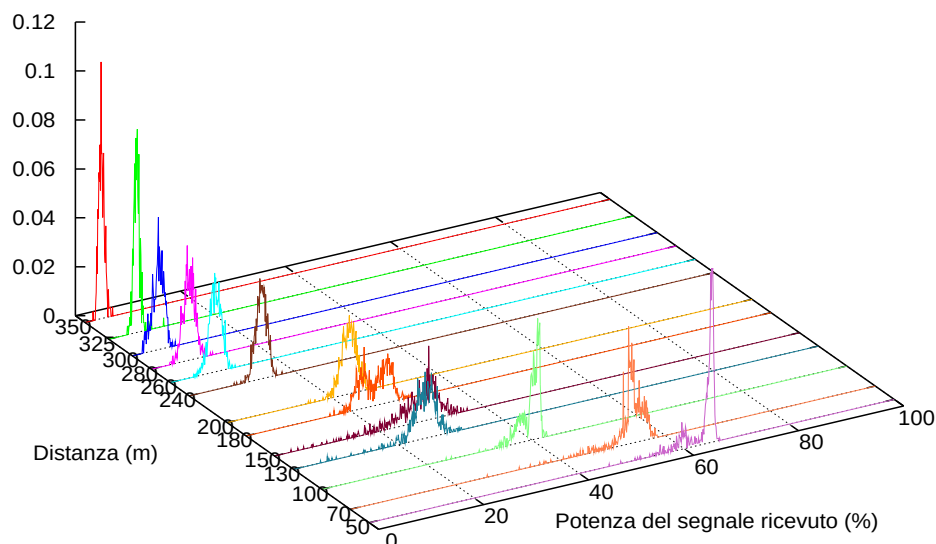


Figura 8.7: Livello di segnale registrato in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 2 Mb/s.

1 Mb/s In figura 8.8 è mostrata la funzione di densità di probabilità ottenuta con una trasmissione eseguita ad una velocità di 2 Mb/s.

Sono state eseguite misure sino a 375 metri, oltre i quali il canale presentava instabilità tali da rendere difficile la rilevazione dei frame trasmessi.

Come si può vedere il livello di segnale ricevuto decresce passando da una media del valore registrato del 61% per una distanza tra trasmettitore e ricevitore di 50 metri a un valore medio del 18% a 200 metri; dopo tale distanza il livello di segnale decresce più lentamente sino a raggiungere una media del 2%.

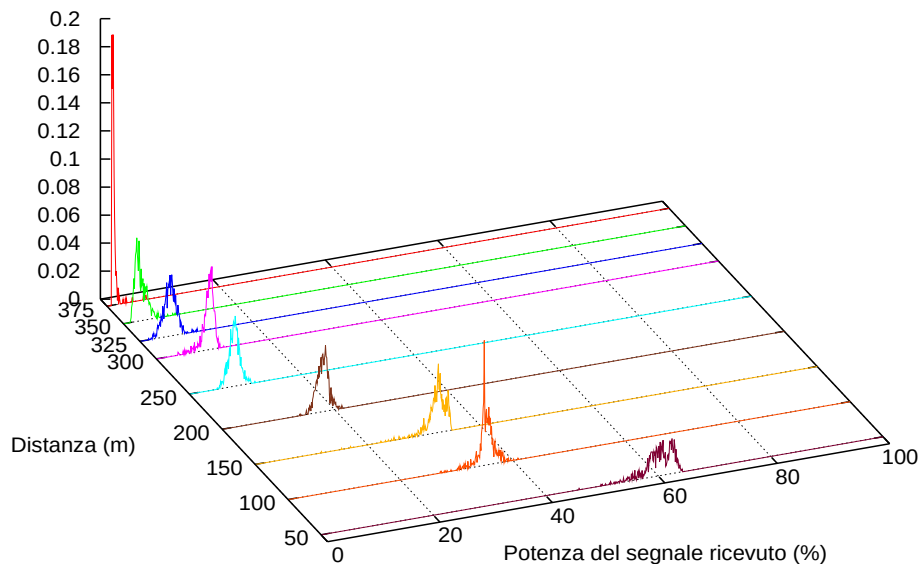


Figura 8.8: Livello di segnale registrato in ambiente esterno ad una velocità di trasmissione pari a 1 Mb/s.

8.1.3 Analisi del livello di segnale rilevato al ricevitore

Dai grafici presentati nel paragrafo precedente, riguardanti il livello di segnale rilevato alle varie velocità consentite dallo standard 802.11b, risulta un'andamento analogo del livello di segnale per tutte le velocità sperimentate.

Per meglio evidenziare tale andamento sono state eseguite misure addizionali tra 1 metri e 50 metri per ognuna delle velocità già presa in esame.

I dati utilizzati per generare il grafico presentato in questo paragrafo sono stati ottenuti partendo dal vettore di 0 e 1 generato dal software al ricevitore nella colonna 5 del file di log ed elaborandoli come spiegato a pagina 135.

Tale procedimento è stato applicato a tutte le misure realizzate alle varie velocità; ogni misura viene quindi ad essere descritta tramite il proprio valor medio, da il minimo e il massimo dell'intervallo della dispersione, calcolato sulla PDF, nell'intorno di tale valor medio.

Il risultato ottenuto è mostrato in figura 8.9.

In tale figura tutte le statistiche ottenute sono poi proiettate sul fondo del

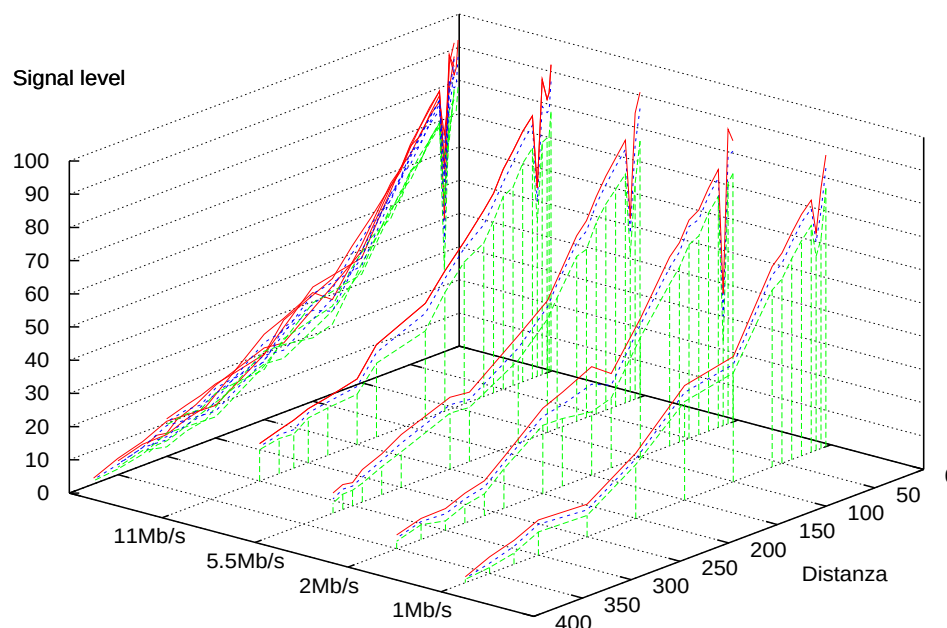


Figura 8.9: Livello del segnale registrato per ogni velocità utilizzata.

grafico per meglio evidenziare l'analogia dell'andamento del livello di segnale per tutte le velocità utilizzate.

Risulta chiaro infatti come il livello di segnale registrato dalle schede alle varie distanze sia indipendente dalla velocità utilizzata per eseguire la trasmissione: le curve disegnate per una velocità si discostano dalle corrispondenti per le altre velocità al massimo di un 10%.

Inoltre la proiezione delle statistiche sul fondo del grafico mette in evidenza l'attenuazione riscontrata in una zona compresa tra 0 metri e 50 metri in cui il livello di segnale al ricevitore raggiunge valori riscontrati a distanze comprese tra 100 metri e 150 metri.

Vista l'indipendenza tra livello di segnale e velocità di trasmissione, analizziamo tutti i dati a nostra disposizione per determinare un andamento generale del livello di segnale in modo dipendente dalla distanza tra trasmettitore e ricevitore.

Il grafico a barre in figura 8.10, in cui è mostrato l'andamento generale del livello di segnale registrato al ricevitore, presenta una barra, per ogni distanza in cui è stata eseguita una misura, realizzata come spiegato a pagina 135 considerando tutti i valori ottenuti per la data distanza indipendentemente

dalla velocità utilizzata.

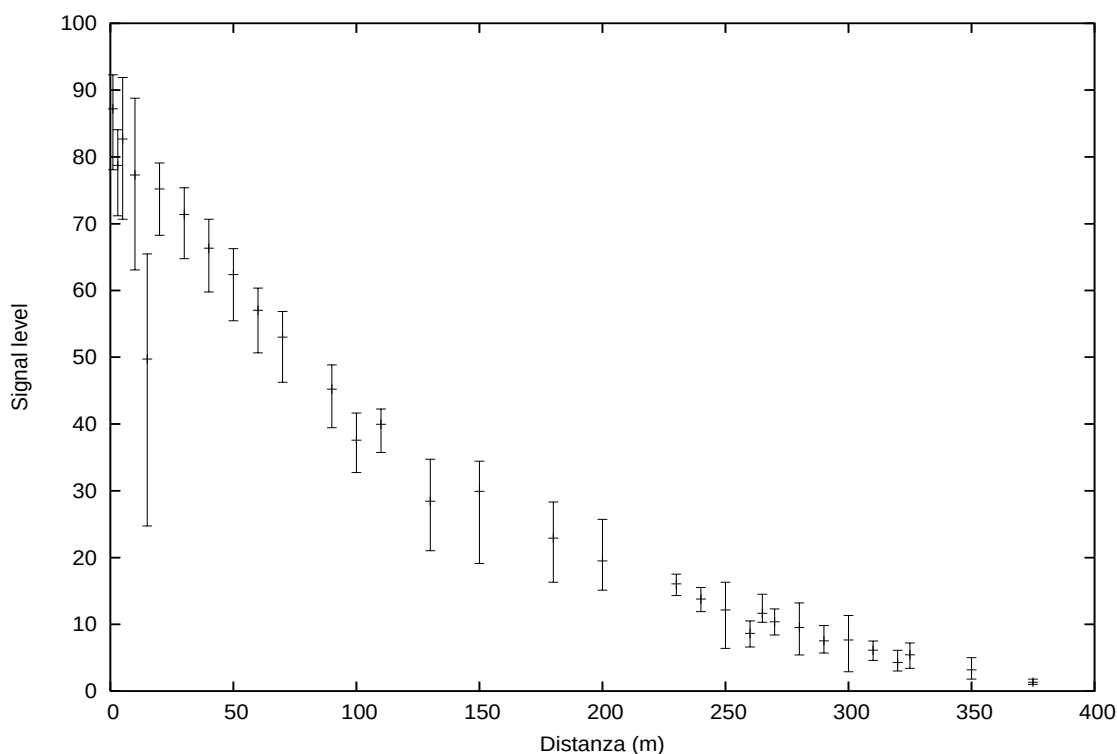


Figura 8.10: Andamento generale del livello di segnale registrato al ricevitore in scala lineare.

In tale misura si vede come il livello di segnale decresce all'aumentare della distanza tra trasmettitore e ricevitore; risulta inoltre evidente l'attenuazione registrata.

Portiamo ora il grafico in scala logaritmica ottenendo la figura 8.11.

Si possono distinguere due andamenti di decrescita differenti: sino a 30 metri il segnale sembra attenuarsi in modo quasi lineare, mentre, oltre questa distanza, l'attenuazione aumenta velocemente.

Come si vede da questo grafico il cambio di pendenza della retta di regressione avviene ad una distanza di 30 metri, corrispondente, nelle condizioni di misura in cui ci siamo posti, alla prima zona di Fresnel⁴.

Il modello a due raggi descritto a pagina 25 impone una perdita di potenza con velocità 40 dB/decade per distanze superiori alla prima zona di

⁴Per maggior dettaglio sulla *zona di Fresnel* si veda pagina 21

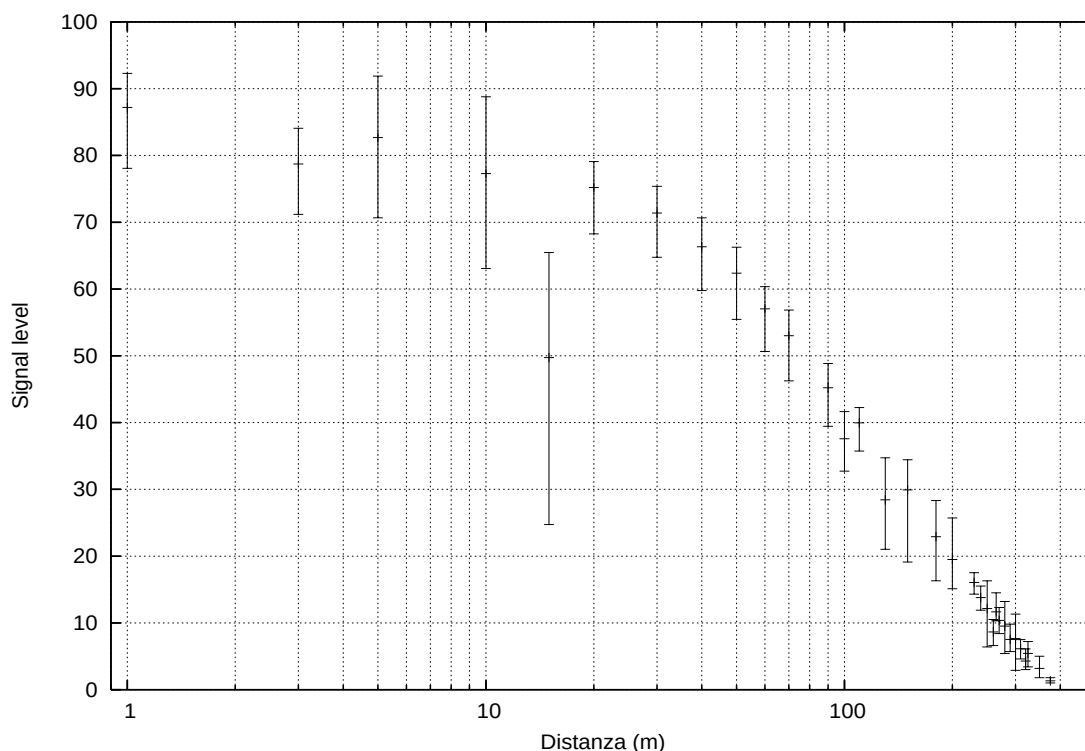


Figura 8.11: Andamento generale del livello di segnale registrato al ricevitore in scala logaritmica.

Fresnel; imponiamo quindi alla retta di regressione lineare una pendenza di -40 dB/decade ottenendo un valore di conversione di 1.7 e quindi si ha che

$$SignalLevel(dB) = \frac{SignalLevel(\%)}{1.7}$$

dove con $SignalLevel(dB)$ viene indicato il livello di segnale rilevato al ricevitore espresso in dB, con $SignalLevel(\%)$ viene indicato il livello di segnale rilevato al ricevitore espresso in percentuale.

Applicando questa conversione ai valori di livello di segnale presentati in figura 8.11 si ottiene l'andamento riportato in figura 8.12.

Ancora, poiché per ottenere il fattore di conversione è stato considerato il caso più semplice in cui il guadagno d'antenna al trasmettitore e al ricevitore sia unitario e che, a contatto con il suolo, le onde vengano completamente riflesse, i valori, riportati sull'asse delle ordinate di tale grafico, devono essere interpretati in modo qualitativo e non quantitativo.

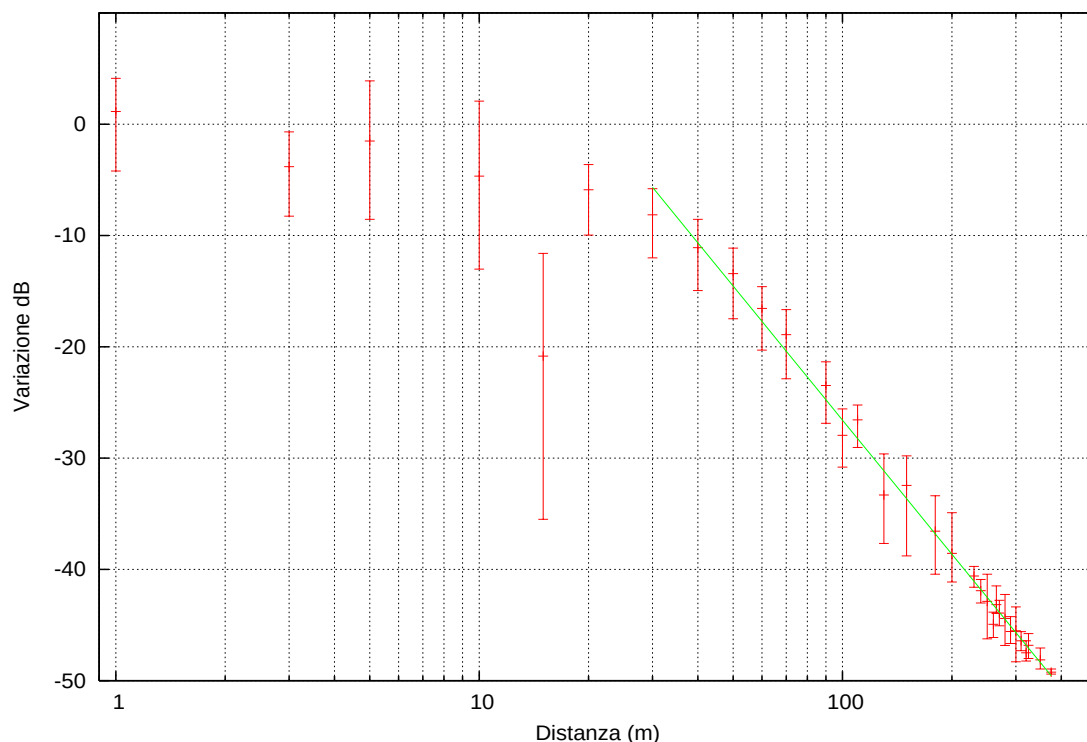


Figura 8.12: Andamento del livello di segnale registrato al ricevitore.

Applichiamo quindi il modello a due raggi al precedente grafico assumendo guadagni d'antenna unitari, coefficiente di riflessione unitario e considerando la rotazione di fase dovuta alla differenza di cammino percorso dal segnale; il risultato ottenuto è mostrato in figura 8.13.

I dati ottenuti sperimentalmente sono quindi confermati dall'andamento teorico del modello a due raggi per distanze maggiori della prima zona di Fresnel; lo stesso modello evidenzia inoltre l'attenuazione rilevata alla distanza di 15 metri dal trasmettitore.

Conclusioni Il livello di segnale rilevato al ricevitore è risultato essere indipendente dalla velocità utilizzata per eseguire la trasmissione. Questo ha permesso di utilizzare le misure, relalizzate per tutte le velocità consentite dallo standard 802.11b a varie distanze, per determinare un andamento generale del livello di segnale dipendente esclusivamente dalla distanza tra trasmettitore e ricevitore.

L'andamento ottenuto, evidenziato dall'utilizzo di una scala logaritmica, presenta due zone, nelle quali livello di segnale decresce in maniera differente: nella prima, compresa tra distanze all'interno della prima zona di Fresnel, il

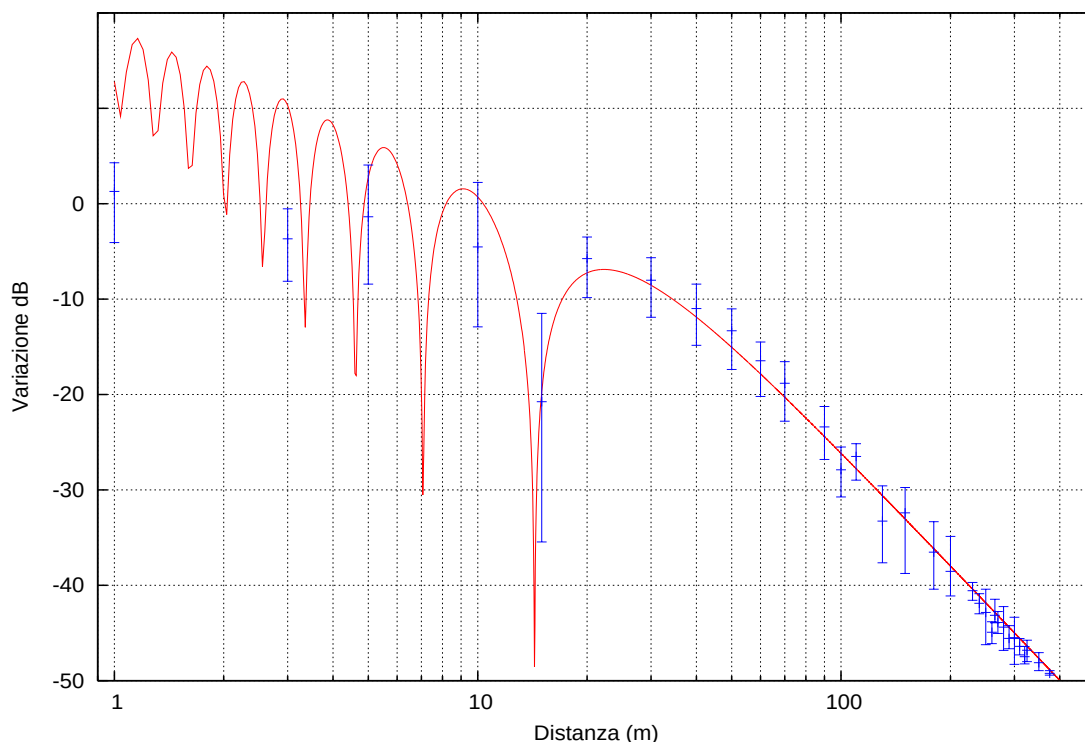


Figura 8.13: Applicazione del modello a due raggi all'andamento del livello di segnale registrato al ricevitore.

livello di segnale diminuisce con una velocità di 10 dB/decade ed è presente un picco che presenta valori di attenuazione ritrovati poi a distanze molto maggiori; nella seconda il livello di segnale diminuisce con una velocità di 40 dB/decade.

8.1.4 La corrispondenza tra perdita di frame e livello di segnale al ricevitore

Andiamo a valutare se esista una corrispondenza, per ogni velocità consentita dallo standard 802.11b, tra il valore di perdita registrato all'aumentare della distanza tra trasmettitore e ricevitore e il livello del segnale ricevuto.

I risultati ottenuti sono mostrati in grafici a barre realizzati elaborando i grafici come descritto a pagina 135.

11 Mb/s In figura 8.14 sono riportate, sulla stessa scala delle distanze, la percentuale di perdita di frame e il livello di segnale corrispondente.

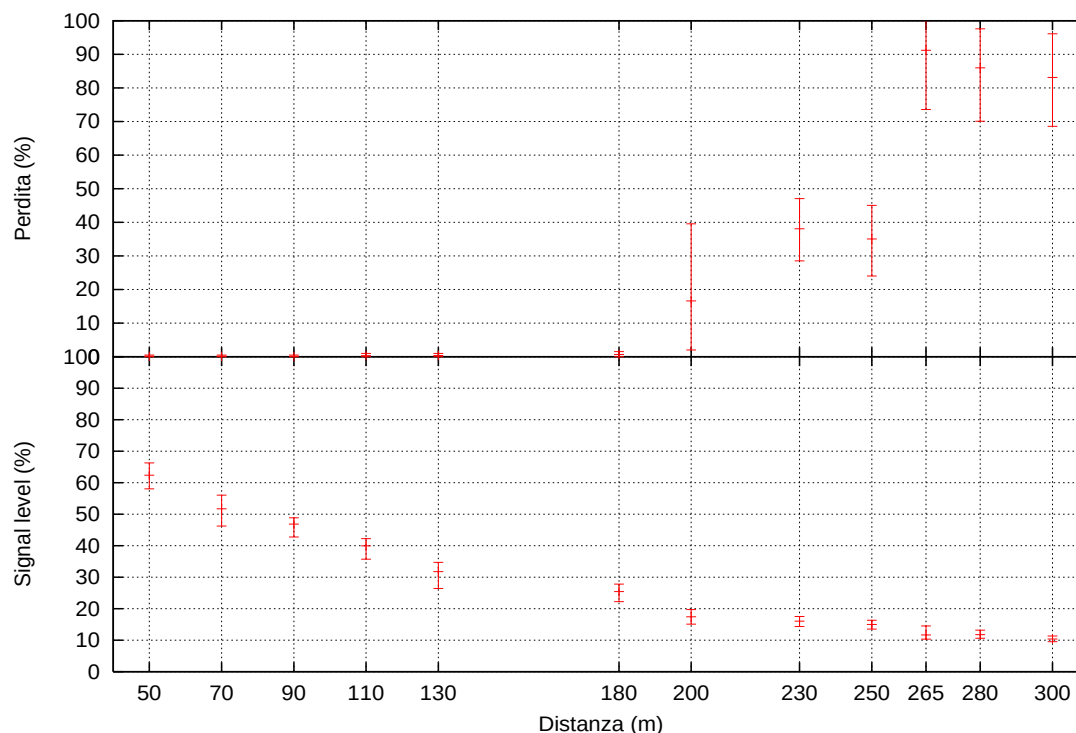


Figura 8.14: Relazione tra percentuale di perdita di frame e livello del segnale rilevato al ricevitore in una trasmissione eseguita a 11 Mb/s.

Consideriamo la parte riguardante la percentuale di perdita: si nota come le perdite più significative si siano registrate a partire da una distanza compresa tra 180 metri e 200 metri.

Considerando il livello di segnale relativo a tale distanza, si ha che il suo valore presenta una media di 18%; dopo tale valore il livello di segnale decresce sino ad un minimo del 10%; in corrispondenza di questi valori la percentuale di perdita di frame aumenta sino a raggiungere valori medi di 86%.

Quindi il 18% come livello di segnale può essere considerato il valore soglia di ricezione in una trasmissione eseguita ad una velocità di 11 Mb/s.

5.5 Mb/s In figura 8.15 sono riportate, sulla stessa scala delle distanze, la percentuale di perdita di frame e il livello di segnale corrispondente.

Consideriamo la parte riguardante la percentuale di perdita: si nota come le perdite più significative si siano registrate a partire da una distanza compresa tra 250 metri e 270 metri.

Considerando il livello di segnale relativo a tale distanza, si ha che il suo valore presenta una media di 13%; dopo tale valore il livello di segnale decresce

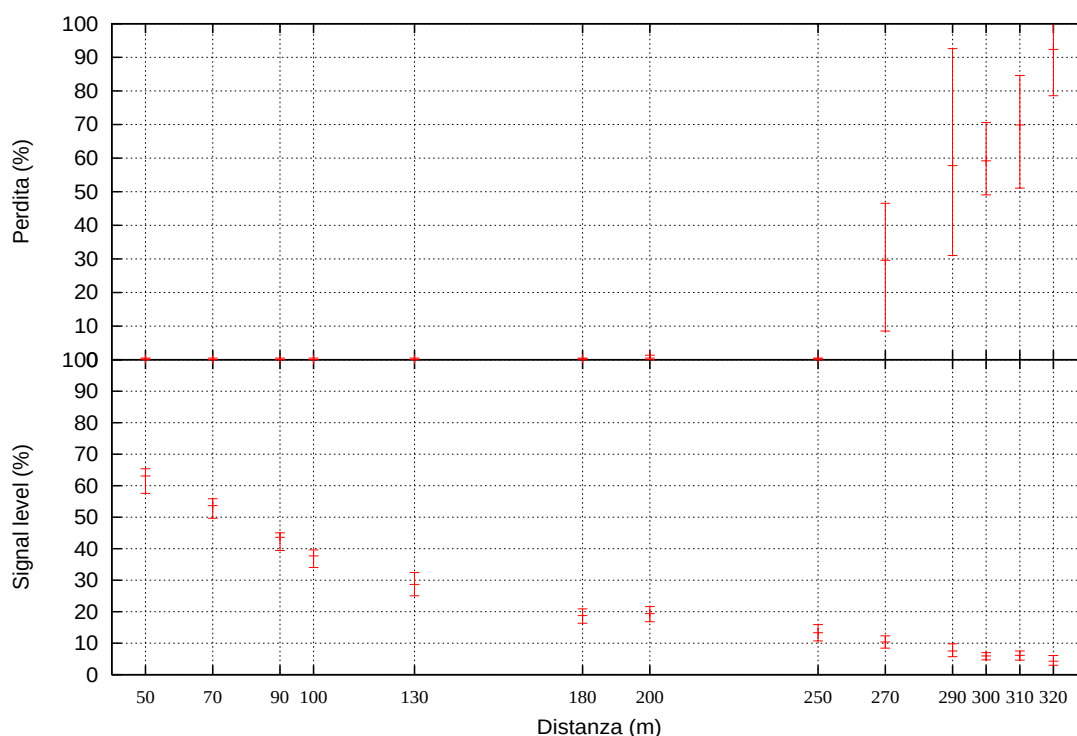


Figura 8.15: Relazione tra percentuale di perdita di frame e livello del segnale rilevato al ricevitore in una trasmissione eseguita a 5.5 Mb/s.

sino ad un minimo di 5%; in corrispondenza di questi valori la percentuale di perdita di frame aumenta sino a raggiungere valori medi di 70%.

Quindi il 13% come livello di segnale può essere considerato il valore soglia di ricezione in una trasmissione eseguita ad una velocità di 5.5 Mb/s.

2 Mb/s In figura 8.16 sono riportate, sulla stessa scala delle distanze, la percentuale di perdita di frame e il livello di segnale corrispondente.

Consideriamo la parte riguardante la percentuale di perdita: si nota come le perdite più significative si siano registrate a partire da una distanza compresa tra 260 metri e 280 metri.

Considerando il livello di segnale relativo a tale distanza, si ha che il suo valore presenta una media di 10%; dopo tale valore il livello di segnale decresce sino ad un minimo di 4%; in corrispondenza di questi valori la percentuale di perdita di frame aumenta sino a raggiungere valori medi di 70%.

Quindi il 9% come livello di segnale può essere considerato il valore soglia di ricezione in una trasmissione eseguita ad una velocità di 2 Mb/s.

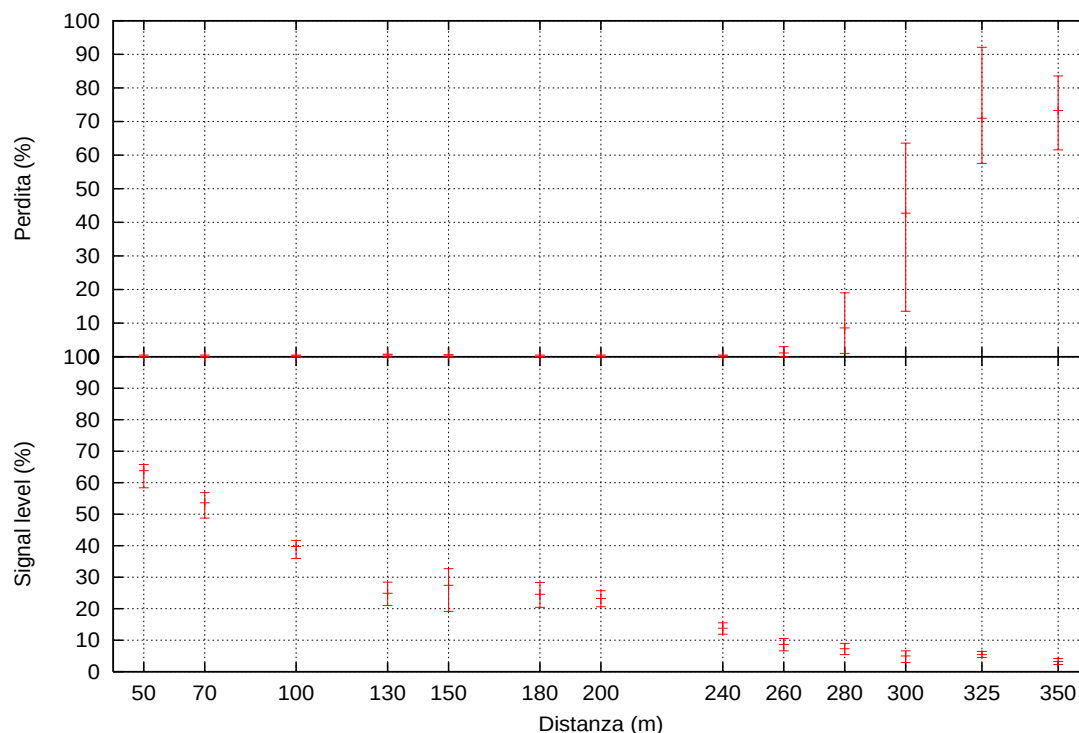


Figura 8.16: Relazione tra percentuale di perdita di frame e livello del segnale rilevato al ricevitore in una trasmissione eseguita a 2 Mb/s.

1 Mb/s In figura 8.17 sono riportate, sulla stessa scala delle distanze, la percentuale di perdita di frame e il livello di segnale corrispondente.

Consideriamo la parte riguardante la percentuale di perdita: si nota come le perdite più significative si siano registrate a partire da una distanza compresa tra 325 metri e 350 metri.

Considerando il livello di segnale relativo a tale distanza, si ha che il suo valore presenta una media di 5%; dopo tale valore il livello di segnale decresce sino ad un minimo di 1%; in corrispondenza di questi valori la percentuale di perdita di frame aumenta sino a raggiungere valori medi di 68%.

Quindi il 5% come livello di segnale può essere considerato il valore soglia di ricezione in una trasmissione eseguita ad una velocità di 1 Mb/s.

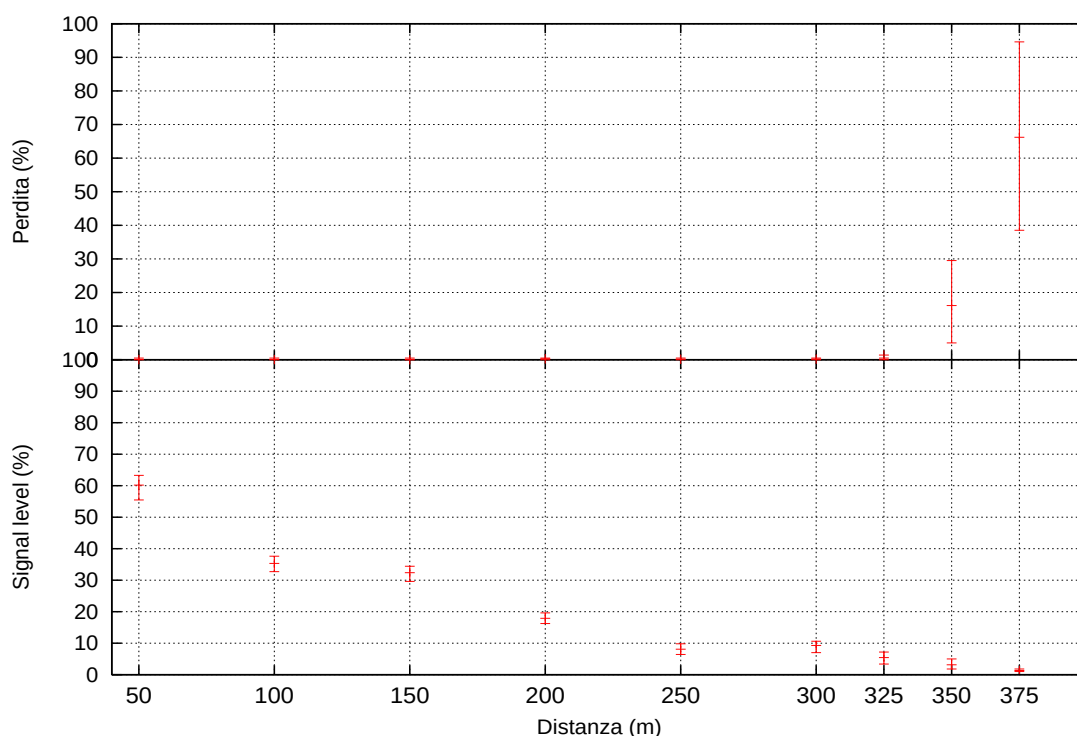


Figura 8.17: Relazione tra percentuale di perdita di frame e livello del segnale rilevato al ricevitore in una trasmissione eseguita a 1 Mb/s.

Conclusioni Riassumiamo in tabella 8.1 i risultati evidenziati nei paragrafi precedenti riguardo la corrispondenza tra la perdita di frame e il livello di segnale rilevato al ricevitore:

Velocità	Distanza	Livello di segnale
11 Mb/s	180– >200 metri	18%
5.5 Mb/s	250– >270 metri	13%
2 Mb/s	260– >280 metri	10%
1 Mb/s	325– >350 metri	5%

Tabella 8.1: Relazione tra la distanza relativa al cambiamento di perdita di frame e livello di segnale rilevato al ricevitore in modo dipendente dalla velocità.

Come si può notare, diminuendo la velocità di trasmissione si ha un aumento della distanza di soglia raggiunta: passando da 11 Mb/s a 5.5 Mb/s si

guadagnano 70 metri; passando da 5.5 Mb/s a 2 Mb/s si guadagnano 10 metri; passando infine da 2 Mb/s a 1 Mb/s si ha un guadagno di 65 metri.

Inoltre è anche presente un guadagno di livello di segnale, questo dovuto anche, come spiegato in [15], ad una diversa codifica utilizzata per la trasmissione passando, per esempio, da una trasmissione a 11 Mb/s o 5.5 Mb/s ad una a 2 Mb/s o 1 Mb/s.

In tabella 8.2 sono riportati i risultati teorici, estratti da [15], e i risultati sperimentali da noi ottenuti eseguendo la conversione da valore in percentuale a valore in dBm.

Velocità	Guadagno teorico	Guadagno sperimentale
11 Mb/s		
5.5 Mb/s	3 dBm	2.9 dBm
2 Mb/s	1.9 dBm	1.7 dBm
1 Mb/s	3 dBm	2.9 dBm

Tabella 8.2: Guadagno teorico e sperimentale dovuto alla codifica utilizzata da ogni velocità

Dalla tabella precedente si ha che i risultati da noi ottenuti per via sperimentale si accostano ai risultati teorici.

La soglia di ricezione indicata in tabella 8.1 per ciascuna velocità di trasmissione viene quindi allontanata, diminuendo la velocità stessa, seguendo il guadagno dovuto alla codifica utilizzata riportato in tabella 8.2.

8.2 Le misure eseguite in ambiente interno

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti eseguendo le misure in un ambiente interno, ponendo il trasmettitore e il ricevitore all'interno di due uffici sui due lati di un corridoio dell'area di ricerca del CNR, in modo che il canale fosse affetto dalle variazioni tipiche di un ambiente di lavoro come il via vai del personale, le eventuali reti wireless presenti e varie riflessioni, diffrazioni e diffusioni prodotte da pavimento, soffitto, pareti, così come la mobilia presente in ogni ufficio.

L'ambiente è descritto in figura 8.18.

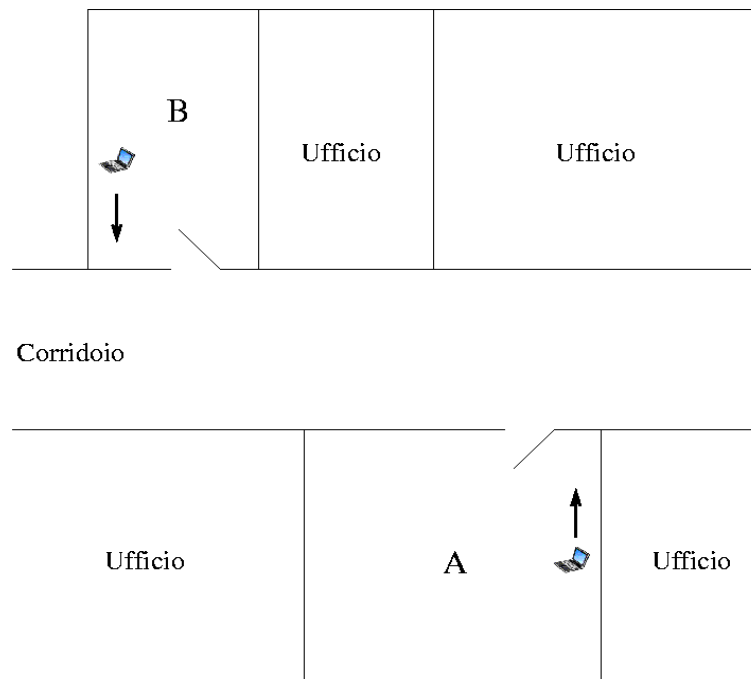


Figura 8.18: Descrizione dell'ambiente utilizzato per le misure interne.

Da notare come nell'ufficio B in cui è stato posto il trasmettitore sia in genere presente una sola persona, mentre nell'ufficio A in cui è stato posto il ricevitore in genere sono presenti quattro persone.

I risultati presentati in seguito riguardano, oltre all'andamento della perdita di frame, la lunghezza e la frequenza con cui appaiano treni di frame ricevuti correttamente e treni di frame andati persi in misure di durata media di quattordici ore.

Le misure sono state eseguite secondo le seguenti specifiche:

- **Trasmettitore:** portatile di IBM⁵ *pettirosso* con la scheda identificata con CNET3⁶ come mostrato in tabella 5.3 e poi con la scheda identificata con DLINK2 come mostrato in tabella 5.4;
- **Ricevitore:** portatile di IBM *passero* con la scheda identificata con CNET1 come mostrato in tabella 5.3 e poi con la scheda identificata con DLINK1 come mostrato in tabella 5.4;
- **Distanza:** 8 metri;
- **Altezza dal suolo:** 80 cm per entrambi i portatili;
- **Canale utilizzato:** canale 1;
- **Canali occupati:** sul canale 11 è stata rilevata una rete con infrastruttura;
- **Velocità di trasmissione:** 11 Mb/s;
- **Numero di ritrasmissioni:** 0;
- **Fragmentation threshold:** 0;
- **RTS threshold:** off;
- **Modalità di connessione:** ad hoc con trasmissione unicast;
- **WEP:** disabilitato;
- **Frame trasmessi:** 100000000;
- **Lunghezza dei frame trasmessi:** 1000B;
- **Intervallo di intertrasmissione:** 5 ms;

Sono state eseguite due misure utilizzando prima unicamente le schede CNet e poi solo le schede D-Link. Ciascuna misura è stata realizzata seguendo le specifiche appena indicate, ottenendo una durata complessiva di circa quattordici ore.

Presentiamo inizialmente, per ciascuna misura, l'andamento della perdita di frame in scala lineare e, successivamente, la densità di probabilità relativa alla frequenza di treni di frame di una data lunghezza in doppia scala logaritmica, considerando separatamente treni di frame ricevuti correttamente e treni di frame andati persi.

8.2.1 La perdita di frame

In questo paragrafo vengono presentati i risultati ottenuti andando a studiare la perdita riscontrata dei frame trasmessi.

I risultati sono presentati in grafici bidimensionali che descrivono l'andamento della perdita di frame in cui viene riportato sull'asse delle ascisse il tempo trascorso e sull'asse delle ordinate la percentuale di frame persi.

⁵Per i particolari tecnici di tali portatili vedere il par. 4.1.

⁶Per i particolari tecnici di tale scheda vedere il par. 4.1.

Tali grafici sono stati ottenuti elaborando la colonna 7, del file di log generato dal software di ricezione, formata da 0, ad indicare che il frame è stato perso, e da 1, ad indicare che il frame è stato ricevuto correttamente.

Come fatto anche per le misure esterne, i dati sono stati divisi in intervalli disgiunti della dimensione di 200 frame, ottenendo quindi un tempo di osservazione di 1 secondo, su ognuno dei quali è stata eseguita la media della perdita di frame, di cui si è disegnato l'andamento.

Trasmissione eseguita con le sole schede CNet In figura 8.19 è mostrata la perdita percentuale ottenuta con una prima trasmissione eseguita ad una velocità di 11 Mb/s utilizzando per la trasmissione la scheda CNET3 e per la ricezione la scheda CNET1.

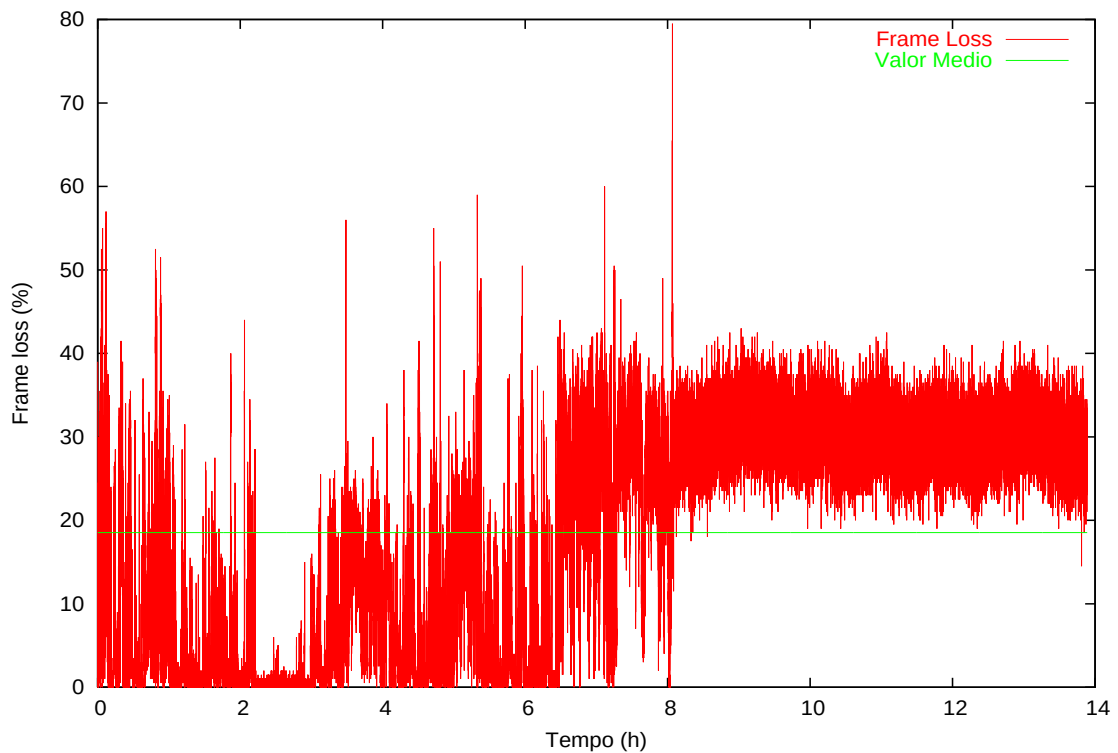


Figura 8.19: Andamento della perdita di frame in una prima trasmissione a 11 Mb/s utilizzando le schede CNet in ambiente interno.

La misura, iniziata alle ore 11:37, presenta un canale con parecchie fluttuazioni nelle prime otto ore di misura per poi stabilizzarsi su un valore percentuale del 30% nelle restanti sei ore, in orari in cui nelle due stanze utilizzate non era presente nessuno.

È stata quindi eseguita una seconda misura, per la quale si sono mantenute le stesse specifiche della precedente, iniziata alle ore 8:30 e mostrata in figura 8.20.

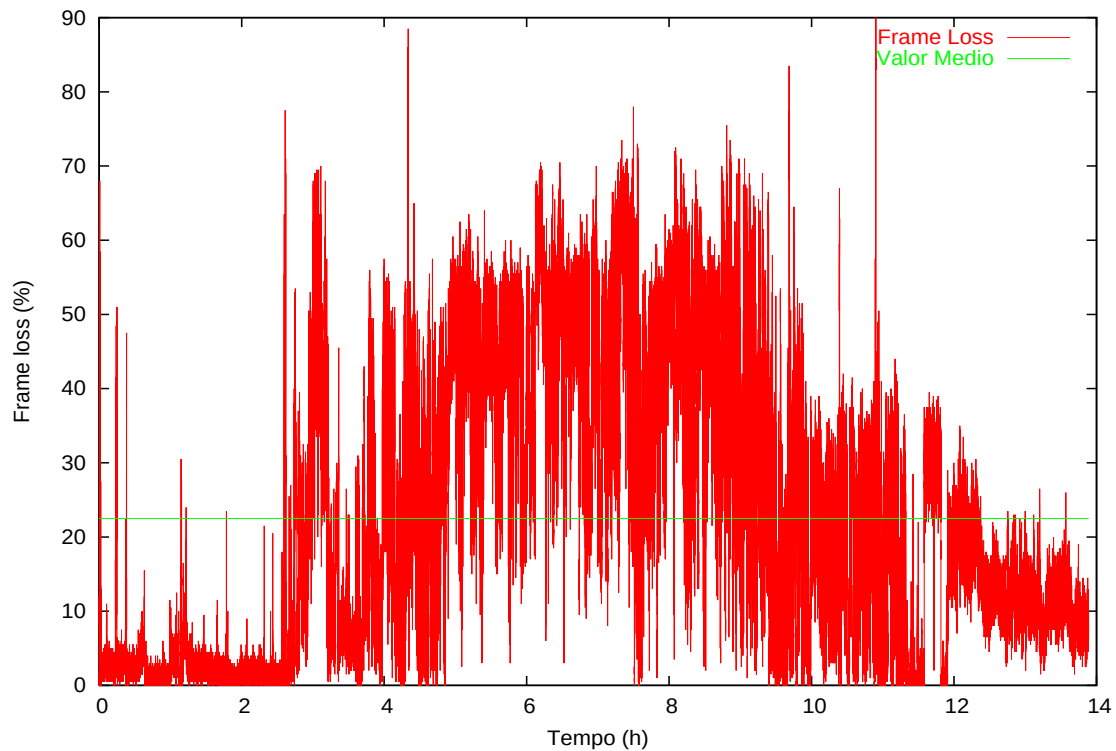


Figura 8.20: Andamento della perdita di frame in una seconda trasmissione a 11 Mb/s utilizzando le schede CNet in ambiente interno.

Ancora si nota come in orari in cui è presente il personale nelle due stanze il canale presenta un andamento differente dagli orari in cui non c'è nessuno.

Ma, se nella prima misure la presenza di persone nell'ambiente di misura sembrava migliorare la qualità di trasmissione, ora sembra peggiorarla portando la perdita di frame da valori inferiori al 10% a valori superiori al 30%.

Trasmissione eseguita con le sole schede D-Link In figura 8.21 è mostrata la perdita percentuale ottenuta con una prima trasmissione eseguita ad una velocità di 11 Mb/s utilizzando per la trasmissione la scheda DLINK2 e per la ricezione la scheda DLINK1.

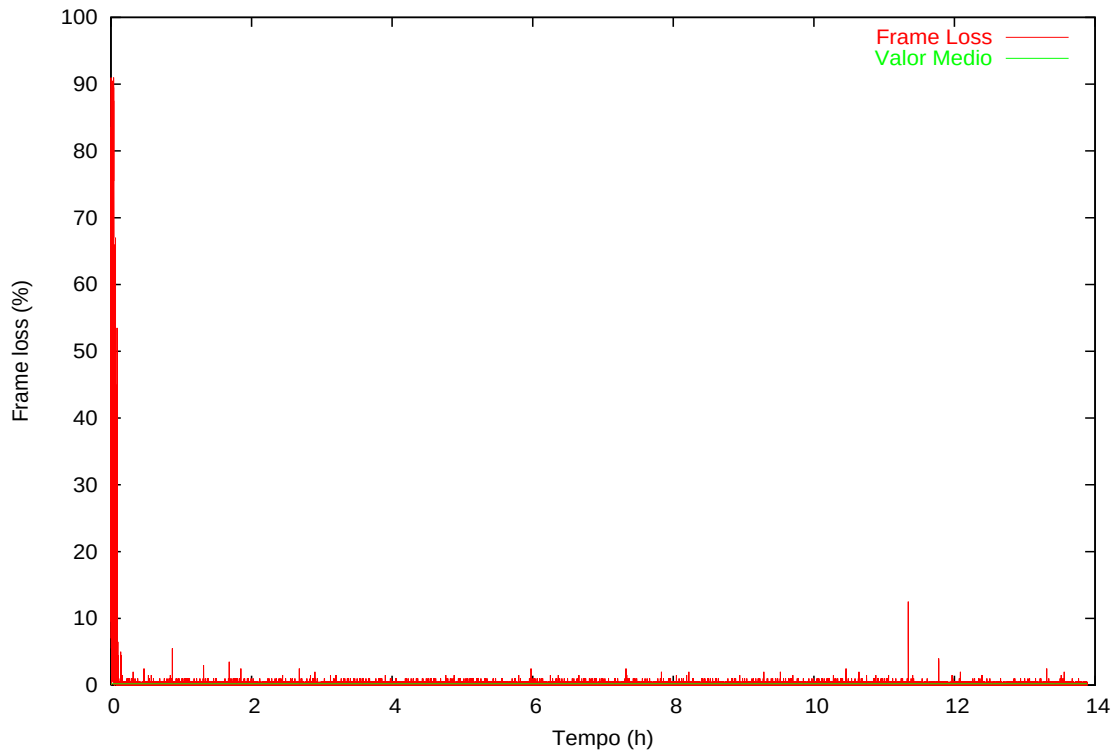


Figura 8.21: Andamento della perdita di frame in una prima trasmissione a 11 Mb/s utilizzando le schede D-Link in ambiente interno.

La misura, iniziata alle ore 18:00, presenta una perdita di frame sino al 90% nella prima mezz'ora, in cui erano cioè ancora presenti persone nelle due stanze, per poi stabilizzarsi su un valore di circa il 2%.

È stata quindi eseguita una seconda misura, per la quale si sono mantenute le stesse specifiche della precedente, iniziata alle ore 19:10 e mostrata in figura 8.22.

La misura è stata realizzata quando all'interno delle stanze utilizzate non era presente nessuno e presenta una perdita di frame costante inferiore a 1%.

Come per l'utilizzo delle schede CNet, quindi, la presenza di persone determina un cambiamento nel canale modificando la qualità della ricezione dei frame.

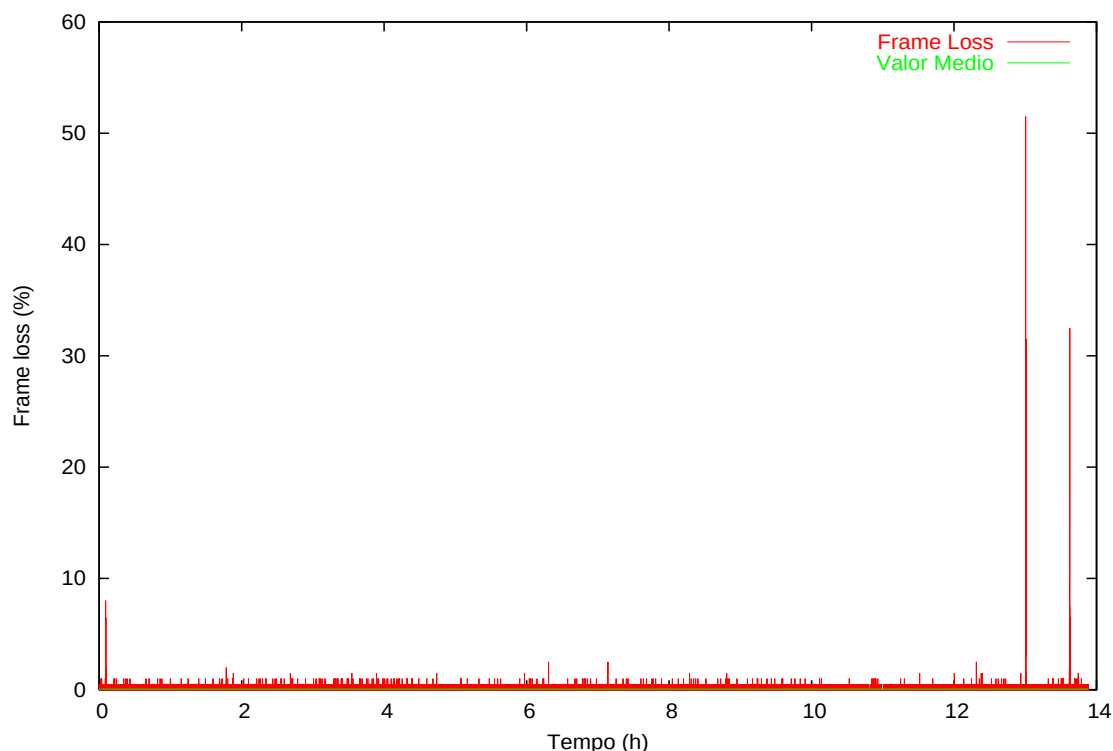


Figura 8.22: Andamento della perdita di frame in una seconda trasmissione a 11 Mb/s utilizzando le schede D-Link in ambiente interno.

8.2.2 Analisi dei treni di frame

In questo paragrafo viene presentata l'analisi della frequenza e della lunghezza dei treni di frame ricevuti correttamente e di treni di frame andati persi.

In figura 8.23 è mostrata la distribuzione di probabilità della frequenza dei treni di frame ricevuti correttamente di una data lunghezza. La legenda di tale figura specifica, oltre alle schede utilizzate per realizzare la misura, il numero di treni di frame ricevuti rilevati nella misura stessa.

Come si vede l'andamento delle quattro distribuzioni è lo stesso per treni di lunghezza minore di 10 frame e poi si diversifica, restando comunque costante per misure realizzate con le stesse schede.

La differenza sostanziale che si può notare tra il comportamento registrato dalle due schede è che la probabilità di avere treni di frame sempre più lunghi con le CNet decresce molto velocemente, mentre con le D-Link decresce molto più lentamente.

Questo può essere interpretato come un comportamento adattivo della scheda al canale: quando la ricezione dei frame è buona la scheda tende a mantenere

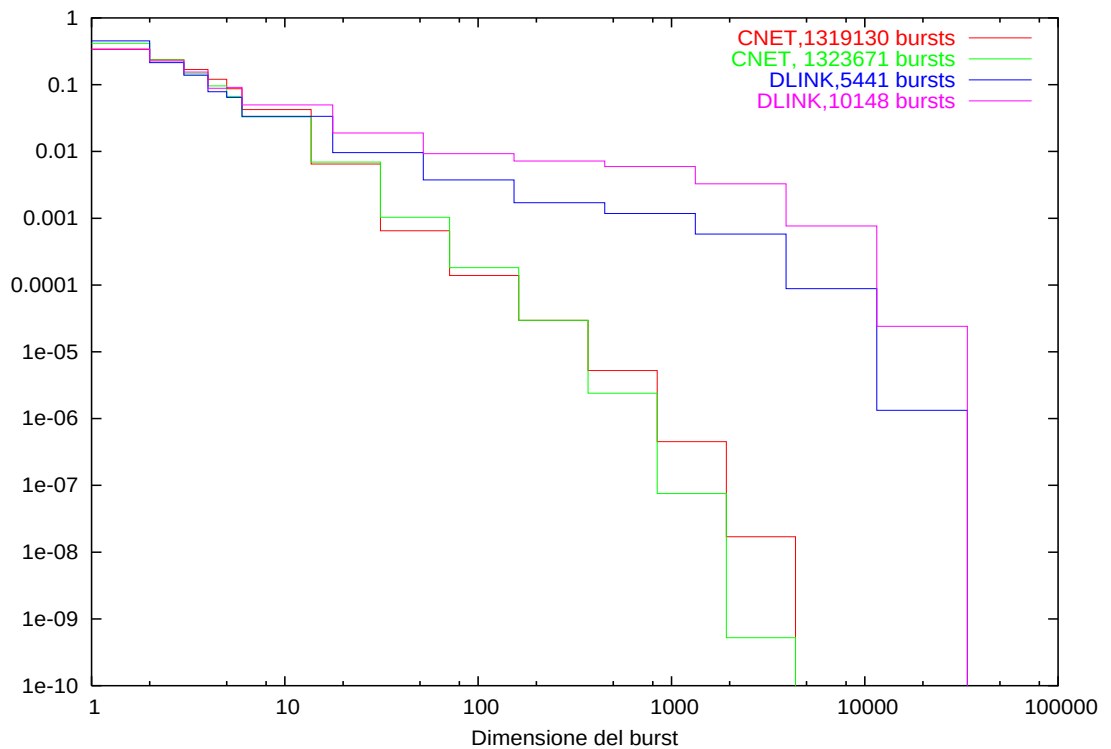


Figura 8.23: Densità di probabilità per la distribuzione dei treni di frame ricevuti correttamente.

questo andamento, o, meglio, subisce più lentamente cambiamenti che vanno a peggiorare il canale stesso.

Inoltre è particolarmente interessante osservare l'andamento rilevato per le misure eseguite con le schede CNet: queste infatti avevano registrato nelle due misure realizzate curve della perdita di frame con un andamento diverso per treni di lunghezza maggiore di 10 frame, mentre ora la distribuzione dei treni segue lo stesso andamento.

In figura 8.24 è mostrata la distribuzione di probabilità della frequenza dei treni di frame persi di una data lunghezza. La leggenda di tale figura specifica, oltre alle schede utilizzate per realizzare la misura, il numero di treni di frame persi rilevati nella misura stessa.

A differenza di quanto mostrato nella figura precedente, risulta uno stesso andamento della distribuzione dei treni di frame in modo indipendente dalla scheda utilizzata; anche se, ancora una volta, si ha una probabilità di avere treni di lunghezza maggiore più alta utilizzando le D-Link che non utilizzando le schede CNet. Questo può ancora essere interpretato come un comporta-

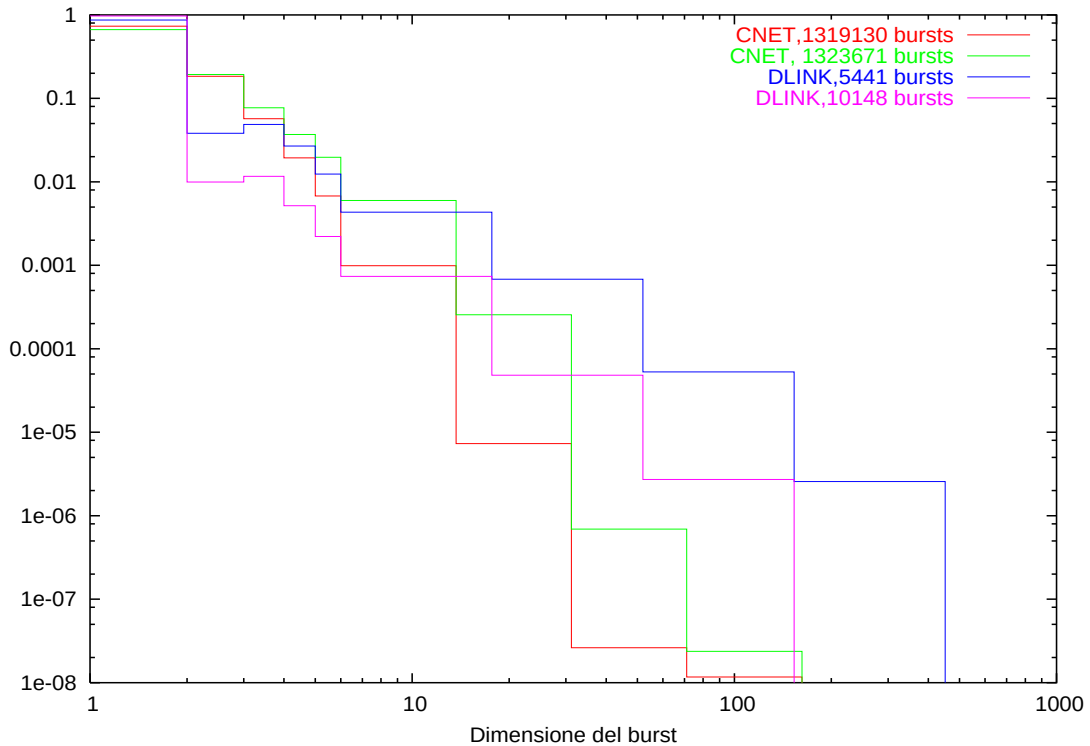


Figura 8.24: Densità di probabilità per la distribuzione dei treni di frame persi.

mento adattivo della scheda al canale: non solo le schede D-Link subiscono meno le variazioni del canale quando rilevano una buona qualità di ricezione, ma questo si ha anche quando la qualità di trasmissione è molto bassa.

8.2.3 L'autocorrelazione della perdita di frame

L'andamento del canale in una rete wireless viene spesso modellato attraverso il modello di Gilbert-Elliot.

Modello di Gilbert–Elliot Il modello di Gilbert–Elliot, schematizzato in figura 8.25, è formato da due stati: uno stato di “good”, indicato con 1, e uno stato di “bad”, indicato con 0; nello stato “good” si hanno solo frame corretti, nello stato “bad” si hanno frame corrotti con una probabilità $p \in (0, 1]$.

In questo modello caratteristica fondamentale è la probabilità di avere una transizione di stato dato lo stato attuale; inoltre, l'autocorrelazione dei dati associati alla perdita di frame decresce sino a zero con velocità esponenziale, come si può vedere in figura 8.26.

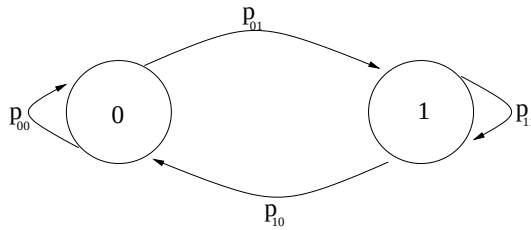


Figura 8.25

Il modello di Gilbert–Elliot.

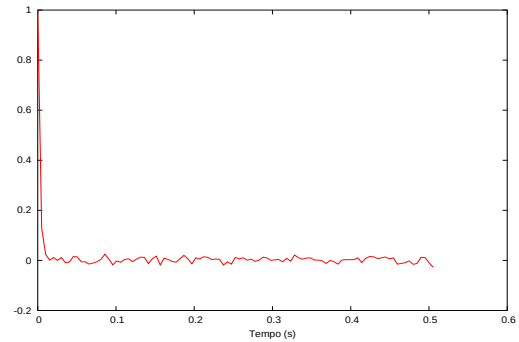


Figura 8.26

Autocorrelazione del modello di Gilbert–Elliot.

Transizione di stato	Percentuale
0 → 0	0.829
0 → 1	0.171
1 → 1	0.412
1 → 0	0.588

Tabella 8.3: Etichette associate agli archi del modello di Gilbert–Elliot.

Tale grafico è stato realizzato eseguendo l'autocorrelazione su un traffico dati generato sinteticamente utilizzando le percentuali, associate alle transizioni di stato, ottenute con la seconda misura eseguita con le schede CNet mostrate in tabella 8.3.

In figura 8.27 è mostrato l'andamento dell'autocorrelazione utilizzando una finestra di 10000 frame calcolata sulla colonna 7 del file di log generato dal software di ricezione; tali dati sono stati suddivisi in intervalli disgiunti di 500 frame sui quali è stata calcolata la media e quindi applicata la funzione di autocorrelazione.

Come si vede si hanno due andamenti molto diversi: i risultati associati alle schede D-Link mostrano un andamento tipico del modello di Gilbert-Elliot, con una curva per l'autocorrelazione che decresce sino a zero in modo esponenziale; i risultati associati alle schede CNet invece presentano una curva dell'autocorrelazione che decresce molto più lentamente sino a raggiungere anche valori negativi.

L'andamento ottenuto dalle D-Link può essere dovuto alla scarsità di perdite registrate: ricordiamo infatti che si è registrato un basso numero di treni e

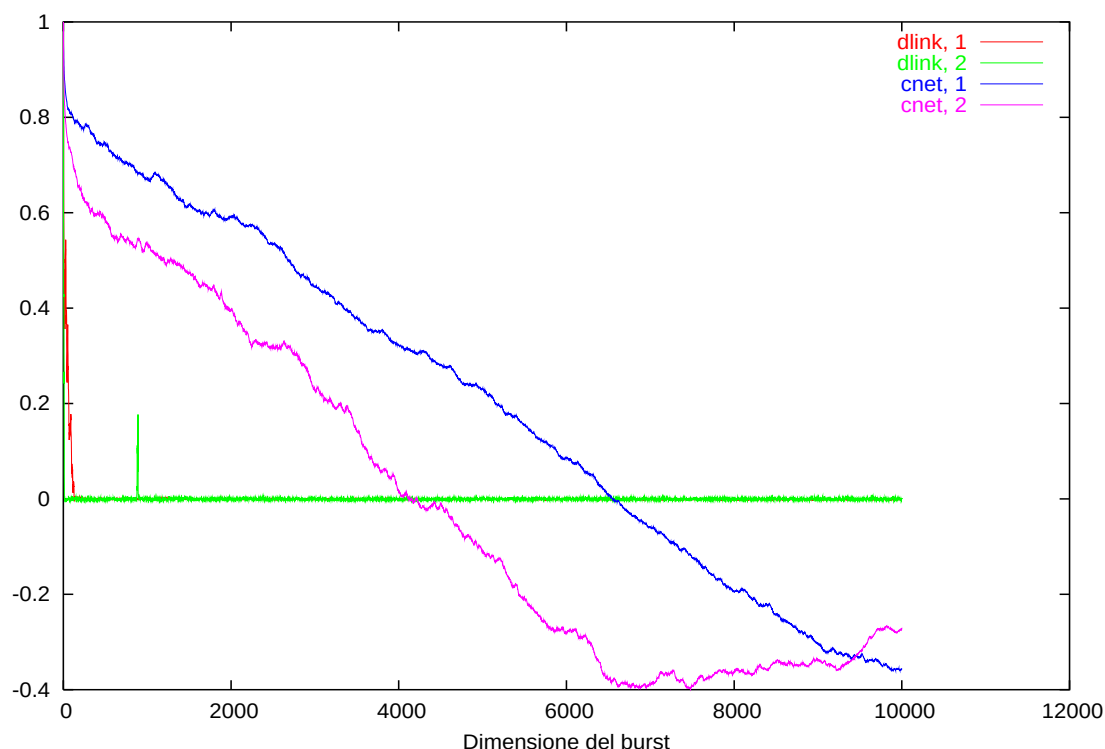


Figura 8.27: Autocorrelazione della perdita di frame.

questo comporta una configurazione mantenuta costante per tempi molto più lunghi di quelli presi in considerazione per l'autocorrelazione.

Da notare inoltre il picco registrato dalla seconda misura eseguita con queste schede che indica un disturbo periodico ogni 40 minuti.

L'andamento ottenuto dalle CNet, in cui la curva dell'autocorrelazione raggiunge anche valori negativi, fa pensare a fenomeni periodici su larga scala, come si può vedere dalla curva associata alla seconda misura eseguita con queste schede che, raggiunto un valore di -0.4 , risale molto lentamente.

Conclusioni Le misure eseguite in ambiente interno sono rivolte alla determinazione di statistiche concernenti la frequenza di treni, sia di frame ricevuti correttamente che di frame andati persi, di una data dimensione in misure sufficientemente lunghe, nel nostro caso la durata della misura è stata di quattordici ore.

Tali misure, oltre a mostrare come la presenza di persone nell'ambiente di misura modifichi il canale peggiorando o migliorando la qualità di ricezione delle informazioni, hanno evidenziato come le curve che descrivono la frequenza

di treni di una data lunghezza abbiano andamenti differenti a seconda del tipo di treni esaminato, ossia se le statistiche sono realizzate per treni di frame ricevuti correttamente o meno. Infatti l'andamento dei treni di frame ricevuti correttamente sembra dipendere, per treni di dimensione maggiore di 10 frame, dalla particolare scheda utilizzata, mentre ciò non avviene andando a disegnare la curva della frequenza di treni andati persi, che presenta un andamento lineare indipendentemente dalla scheda utilizzata.

Inoltre, l'autocorrelazione eseguita sulle misure realizzate mostra come il modello di Gilbert–Elliot sembra non descrivere in modo corretto il comportamento di un ambiente reale; l'andamento ottenuto con le misure eseguite con le schede D-Link sembra seguire il modello di Gilbert–Elliot, ma bisogna notare il basso numero di campioni ottenuti rispetto alle misure eseguite con le schede CNet.

Conclusioni

Come lavoro preliminare alla campagna di misure vera e propria sono state eseguite misure dirette a testare l'affidabilità dell'hardware utilizzato.

Tali misure hanno evidenziato un comportamento piuttosto instabile, che presumibilmente dipende dall'ambiente circostante piuttosto che dalle caratteristiche hardware dei dispositivi esaminati.

Questo ha portato alla decisione di eseguire la campagna di misure mantenendo fissi il computer ricevente e quello trasmittente, così come le schede impiegate per la trasmissione e la ricezione di frame, così che l'eventuale errore introdotto dall'hardware impiegato sia costante per l'intera durata della campagna di misure.

Inoltre, per limitare l'errore introdotto da un eventuale cambiamento del canale, è stato stabilito di eseguire le misure in un ambiente stabile dal punto di vista della sua configurazione e lontano da fonti di interferenze quali, per esempio, altre reti presenti nell'area di misura scelta.

Le misure eseguite per la rilevazione del throughput massimo raggiungibile dalle nostre schede wireless hanno evidenziato, a meno di un piccolo errore dovuto a ritardi vari, come i risultati sperimentali seguano quelli teorici.

Questo risultato non è stato raggiunto nel riscontro sperimentale eseguito per i ritardi; ricordiamo infatti che le trasmissioni sono affette da ritardi causati dalla mancata ricezione del frame di riscontro entro lo scadere del timer ad esso associato. Il motivo è da ricercare nel fatto che, anche a livello teorico, gli intervalli che caratterizzano un numero sempre maggiore di ritrasmissioni non sono sufficientemente distanziati da poter affermare con certezza a quante ritrasmissioni si è dovuto ricorrere affinché le informazioni siano giunte con successo al loro destinatario.

Le misure eseguite in ambiente esterno hanno portato a vari risultati rilevanti.

Per quanto riguarda la perdita di frame al variare della distanza posta tra trasmettitore e ricevitore, si è evidenziato un andamento schematizzabile

CONCLUSIONI

in tre zone a distanze crescenti: nella prima la perdita rilevata è pressochè irrilevante e costante; nella seconda si iniziano ad avere perdite sempre più consistenti; nella terza la rilevazione della trasmissione risulta difficile a causa dell'instabilità del canale.

Considerando il livello di segnale rilevato al ricevitore dalle schede utilizzate si è potuto concludere come il suo andamento risulti indipendente dalla velocità trasmissiva utilizzata.

Questo ci ha messo a disposizione un numero maggiore di statistiche per ogni distanza considerata, statistiche che hanno evidenziato come il livello di segnale scenda con velocità minore se la distanza considerata si trova all'interno della prima zona di Fresnel. Inoltre, entro la prima zona di Fresnel, è stata rilevata un'attenuazione che ha portato il livello di segnale a valori tipici di distanze molto maggiori.

Le misure eseguite in ambiente interno, rivolte alla determinazione di statistiche concernenti la distribuzione dei frame perduti, oltre a mostrare come la presenza di persone modifichi l'ambiente di misura peggiorando o migliorando la qualità di ricezione delle informazioni, hanno evidenziato come le curve, che descrivono la frequenza di treni di frame di una data lunghezza, abbiano andamenti differenti a seconda del tipo di treno esaminato. Infatti l'andamento dei treni di frame ricevuti correttamente sembra dipendere, per treni di dimensione maggiore di 10 frame, dalla particolare scheda utilizzata, mentre ciò non avviene per i treni di frame andati persi, che presentano un andamento lineare indipendentemente dalla scheda utilizzata.

Inoltre, l'autocorrelazione eseguita sulle misure realizzate mostra come il modello di Gilbert–Elliot non descriva in modo fedele il comportamento di un ambiente reale.

Sviluppi Futuri

Le misure realizzate nel corso di questa tesi sono da considerarsi comunque una piccola parte di una campagna che dovrà analizzare scenari sempre più complicati sino ad arrivare ad un ambiente interno come quello presentato.

Prima di far ciò sarebbe comunque interessante eseguire misure in ambiente esterno, nelle medesime condizioni mantenute sino a questo momento, andando a considerare altre distanze, come quelle all'interno della prima zona di Fresnel per ottenere un andamento più preciso che confermi ulteriormente i risultati ottenuti; o ancora realizzare le stesse misure presentate in questa tesi ponendo trasmettitore e ricevitore ad altezze differenti per verificare così lo spostamento della prima zona di Fresnel.

Nella campagna svolta, l'unico parametro ad essere stato modificato, a parità di velocità trasmissiva, è stata la distanza interposta tra antenna trasmittente e antenna ricevente; interessante sarebbe determinare quanto la direzionalità delle schede influisca sulla qualità della trasmissione.

Per quanto riguarda le misure eseguite in ambiente interno presentate in questa tesi, queste sono da considerarsi solo l'inizio di una campagna molto più approfondita: i risultati riportati hanno evidenziato una certa periodicità nella frequenza con cui appaiono treni di una data lunghezza; dovranno quindi essere eseguite nuove misure molto più lunghe delle quattordici ore di quelle già svolte e in periodi differenti, per determinare quanto il movimento degli oggetti presenti nell'ambiente di misura influisca sulla distribuzione dei treni di frame e sulla qualità della trasmissione stessa.

È stato inoltre riscontrato un andamento della frequenza di treni ricevuti correttamente con decrescita differente a seconda delle schede utilizzate: in futuro dovranno essere quindi seguite tali misure utilizzando anche altre schede per ottenere una conferma, o meno, dell'andamento generale rilevato.

Inoltre dovrebbe essere approfondito il ritardo introdotto dalle ritrasmissioni considerando il caso di fallimento di accesso al canale o una diversa politica di accesso utilizzando, per esempio, il meccanismo RTS/CTS, che, come visto già per il calcolo del throughput, introduce un ritardo maggiore.

Appendice A

La cattura di alcuni frame significativi

Il driver utilizzato dalle schede D-Link permette di impostare la modalità di interazione con la rete wireless.

Oltre alle più comuni modalità *ad hoc*, per reti che non utilizzano access point, *managed*, per reti gestite da un access point, *monitor*, in cui la stazione controlla la rete in modo passivo, è prevista una modalità *monitor*, impostabile tramite comando privato delle API del Wireless Extension, che permette, oltre ad ottenere eventuali messaggi di errore, tutti i frame che viaggiano sul canale.

Utilizzando quindi il comando

```
iwpriv wlan0 set_debug 0x2200
```

si sono potuti catturare frame di tipo data, management, control complessivi di tutta l'intestazione.

Vediamo alcuni frame catturati.

Da notare come per i frame di gestione e di controllo come RTS e CTS, la cattura sia stata realizzata semplicemente ponendo un portatile, l'IBM¹ *passero*, in ascolto sul canale utilizzando la scheda DLINK2; la cattura dei frame DATA e ACK è stata invece realizzata mediante la trasmissione di frame di dimensione pari a 10B ponendo l'IBM *pettirosso* in trasmissione con la scheda DLINK1 e l'IBM *passero* in ricezione con la scheda DLINK2.

¹Per i particolari tecnici relativi a tali portatili vedere paragrafo 4.1.

A. LA CATTURA DI ALCUNI FRAME SIGNIFICATIVI

Frame Data I frame di tipo DATA catturati si presentano nella forma:

```
rx: pkt 28 (DATA/DataOnly): time 97900721 len 42 signal 4 SNR 0 macstat
    03 phystat 14 phyrate 12 mode 0 status 4
rx: 802.11 buf[42]: <4>08 00 2C 00 00 80 C8 2E 1C B7 00 80 C8 2E 1C 94
    5A 1A 52 B4 86 0E F0 18 AA AA 03 00 00 00 20 04 30 30 30 30 35
    30 0A 00 09
rx: payload_offset 24, payload_length 18
rx: frame info: llc.dsap AA, llc.ssap AA, llc.ctl 3, snap.oui 000, snap.type 420
```

Conoscendo il contenuto del frame trasmesso e facendo riferimento alla figura 2.11, si sono identificati, i seguenti campi:

08 00	frame control
2C 00	duration
00 80 C8 2E 1C B7	destination address
00 80 C8 2E 1C 94	source address
5A 1A 52 B4 86 0E	BSSID
F0 18	sequence control
AA AA 03	LLC
00 00 00 20 04	SNAP
30 30 30 30 30 35 30 0A 00 09	DATA

da notare come, comunque, la modalità debug non permetta di catturare il campo FCS.

ACK I frame di controllo di tipo Ack catturati si presentano nella forma:

```
rx: pkt 03 (CTL/Ack): time 51158971 len 10 signal 7 SNR 0 macstat 83
    phystat 14 phyrate 9 mode 0 status 4
rx: 802.11 buf[10]: <4>D4 00 00 00 00 80 C8 2E 1C B7
```

Con riferimento alla figura 2.10 si è quindi in grado di identificare i seguenti campi:

D4 00	frame control
00 00	duration
00 80 C8 2E 1C B7	receiver address

RTS I frame di controllo di tipo RTS catturati si presentano nella seguente forma:

```
rx: pkt 02 (CTL/RTS): time 24608686 len 16 signal 29 SNR 0 macstat 81
    phystat 10 phyrate 20 mode 0 status 4
rx: 802.11 buf[16]: <4>B4 00 26 03 00 08 A1 42 FB C6 00 08 A1 3B C8 6D
```

Con riferimento alla figura 2.8 si è in grado di identificare i seguenti campi:

B4 00	frame control
26 03	duration
00 08 A1 42 FB C6	receiver address
00 08 A1 3B C8 6D	transmitter address

da notare come, comunque, la modalità debug non permetta di catturare il campo FCS.

CTS I frame di controllo di tipo CTS catturati si presentano nella seguente forma:

```
rx: pkt 03 (CTL/CTS): time 24608946 len 10 signal 32 SNR 0 macstat 81
    phystat 00 phyrate 20 mode 0 status 4
rx: 802.11 buf[10]: <4>C4 00 24 02 00 08 A1 3B C8 6D
```

In riferimento alla figura 2.9 si è in grado di identificare i seguenti campi:

C4 00	frame control
24 02	duration
00 08 A1 3B C8 6D	receiver address

Beacon I frame di gestione di tipo Beacon catturati si presentano nella seguente forma:

```
rx: pkt 00 (MGMT/Beacon): time 2002595870 len 56 signal 29 SNR 0
    macstat 65 phystat 00 phyrate 10 mode 0 status 4
rx: 802.11 buf[56]: <4>80 00 00 00 FF FF FF FF FF FF 00 08 A1 3B C8
    6D 02 00 93 87 20 6B 60 01 69 72 17 00 00 00 00 00 64 00 02 00 00 05
    70 69 6F 6C 6F 01 04 82 84 0B 16 03 01 01 06 02 00 00
```

Ricordando il formato di un generico frame di tipo management mostrato in figura 2.11 e del contenuto del corpo di un frame di tipo beacon mostrato in figura A.1

A. LA CATTURA DI ALCUNI FRAME SIGNIFICATIVI

Order	Information	Notes
1	Timestamp	
2	Beacon interval	
3	Capability information	
4	SSID	
5	Supported rates	
6	FH Parameter Set	The FH Parameter Set information element is present within Beacon frames generated by STAs using frequency-hopping PHYs.
7	DS Parameter Set	The DS Parameter Set information element is present within Beacon frames generated by STAs using direct sequence PHYs.
8	CF Parameter Set	The CF Parameter Set information element is only present within Beacon frames generated by APs supporting a PCF.
9	IBSS Parameter Set	The IBSS Parameter Set information element is only present within Beacon frames generated by STAs in an IBSS.
10	TIM	The TIM information element is only present within Beacon frames generated by APs.

Figura A.1: Contenuto del corpo di un frame di tipo Beacon.

si è in grado di identificare i seguenti campi:

80 00	frame control
00 00	duration
FF FF FF FF FF FF	destination address
00 08 A1 3B C8 6D	source address
02 00 93 87 20 6B	BSSID
60 01	sequence control
69 72 17 00 00 00 00 00	timestamp
64 00	beacon interval
02 00	capability information
00 05 70 69 6F 6C 6F	SSID
01 04 82 84 0B 16	supported rates
03 01 01	DS parameter set
06 02 00 00	IBSS

ProbeRequest I frame di gestione di tipo Probe Request catturati si presentano nella seguente forma:

```
rx: pkt 08 (MGMT/ProbeReq): time 269131018 len 42 signal 12 SNR 0
    macstat a5 phystat 10 phyrate 10 mode 0 status 4
rx: 802.11 buf[42]: <4>40 00 00 00 FF FF FF FF FF FF 00 0E 35 0C 93
    BC FF FF FF FF FF 60 A5 00 00 01 08 82 84 0B 16 0C 12 18 24 32
    04 30 48 60 6C
```

Ricordando il formato di un generico frame di tipo management mostrato in figura 2.11 e del contenuto del corpo di un frame di tipo Probe Request mostrato in figura A.2

Order	Information
1	SSID
2	Supported rates

Figura A.2: Contenuto del corpo di un frame di tipo Probe Request.

Si è quindi in grado di identificare i seguenti campi:

40 00	frame control
00 00	duration
FF FF FF FF FF FF	destination address
00 0E 35 0C 93 BC	source address
FF FF FF FF FF FF	BSSID
60 A5	sequence control
00 00	SSID (length=0 -> broadcast)
01 08 82 84 0B 16 0C 12 18 24 32 04 30 48 60 6C	supported rates

Appendice B

La modulazione CCK a 5.5 Mb/s e 11 Mb/s

Le velocità pari a 5.5 Mb/s e 11 Mb/s previste dallo standard 802.11b vengono ottenute mediante l'utilizzo di un codice di spreading a 8 chip trasmessi a una velocità di 11 Mchip/s.

La CCK code word per tali velocità viene derivata dalla seguente formula

$$c = \{e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3+\varphi_4)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_3+\varphi_4)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_4)}, -e^{j(\varphi_1+\varphi_4)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_2+\varphi_3)}, e^{j(\varphi_1+\varphi_3)}, -e^{j(\varphi_1+\varphi_2)}, e^{j\varphi_1}\} \quad (\text{B.1})$$

e quindi la code word $C = c_0 c_1 \dots c_7$.

I termini φ_1 , φ_2 , φ_3 e φ_4 sono distintamente definite per 5.5 Mb/s e 11 Mb/s.

5.5 Mb/s A 5.5 Mb/s vengono trasmessi 4 bit, da d_0 a d_3 , per simbolo.

I bit (d_0, d_1) codificano φ_1 , (d_2, d_3) codificano C mediante DQPSK come mostrato in tabella 2.5.

Dibit pattern (d_0, d_1) (d_0 is first in time)	Even symbols phase change ($+j\omega$)	Odd symbols phase change ($+j\omega$)
00	0	π
01	$\pi/2$	$3\pi/2$ ($-\pi/2$)
11	π	0
10	$3\pi/2$ ($-\pi/2$)	$\pi/2$

Tabella 2.5: Codifica DQPSK.

La codifica per C tramite (d_2, d_3) è specificata in tabella 2.6.

B. LA MODULAZIONE CCK A 5.5 MB/S E 11 MB/S

d2, d3	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8
00	1j	1	1j	-1	1j	1	-1j	1
01	-1j	-1	-1j	1	1j	1	-1j	1
10	-1j	1	-1j	-1	-1j	1	1j	1
11	1j	-1	1j	1	-1j	1	1j	1

Tabella 2.6: Codifica CCK per 5.5 Mb/s.

11 Mb/s A 11 Mb/s sono trasmessi 8 bit per simbolo.

I bit ($d0$, $d1$) codificano φ_1 mediante DQPSK come mostrato in tabella 2.5. I bit ($d2$, $d3$), ($d4$, $d5$), ($d6$, $d7$) codificano rispettivamente φ_2 , φ_3 e φ_4 mediante QPSK come specificato in tabella 2.7.

Dibit pattern [di, d(i+1)] (di is first in time)	Phase
00	0
01	$\pi/2$
10	π
11	$3\pi/2$ ($-\pi/2$)

Tabella 2.7: Codifica QPSK.

Appendice C

Istallare NTP

1. Il comando per installare NTP è : *apt-get install ntp-server*.
2. Se gli orologi dei calcolatori da sincronizzare superano l'offset di 500 secondi NTP non procede alla sincronia in quanto l'allineamento richiederebbe troppo tempo. Sono possibili in questo caso due alternative :
 - a) Eliminare il task ntpd con *pkill ntpd*, e forzare NTP a sincronizzare gli orologi nonostante l'offset con il comando */usr/bin/ntpd -b*.
 - b) Installare sulla macchina client NTPDate con il comando *apt-get install ntpdate*.
Rimuovere il task ntpd con *pkill ntpd* ed eseguire la sincronizzazione del client al server attraverso il comando *ntpdate -b <SERVER_IP_ADDR>*.
A questo punto NTP può essere riavviato attraverso il comando */etc/init.d/ntp-server start*.
3. Per verificare che tutto funzioni si può dare il comando *ntpq -p*, si ottiene una lista di server a cui NTP tenta di sincronizzare l'orologio del calcolatore.
Il server contrassegnato dall'asterisco è quello prescelto per la sincronizzazione.
4. Configurazione del SERVER
 - a) All'interno del file */etc/ntp.conf* commentare con *#* tutte le linee che iniziano con la parola *server* lasciando solo l'interfaccia di loopback (*127.127.1.0*).

C. INSTALLARE NTP

- b) Dare il comando `/etc/init.d/ntp-server restart` per ricaricare la configurazione.
- c) Se tutto funziona il comando `ntpq -p` visualizza come server di sincronizzazione la sola interfaccia locale di loopback.

5. Configurazione del CLIENT

- a) All'interno del file `/etc/ntp.conf` commentare con `#` tutte le linee che iniziano con la parola `server`. Inserire una linea che faccia riferimento al server su cui sincronizzare la macchina client : `server <SERVER_IP_ADDR>`.
- b) Inserire la linea `minpoll 4`.
- c) Dare il comando `/etc/init.d/ntp-server restart` per ricaricare la configurazione.
- d) Se tutto funziona il comando `ntpq -p` visualizza come server di sincronizzazione la macchina server prescelta e da come informazione di strato 13 in quanto il server è sincronizzato sull'interfaccia di loopback.

Bibliografia

- [1] T. S. Rappaport, Wireless Communication, Upper Saddle River, NJ: Practice Hall, 1996
- [2] B. Sklar, Rayleigh Fading Channels in Mobile Digital Communication System, IEEE Communication Magazine, July 1997
- [3] A. Silvennoinen, WLAN radio channel modelling, Postgraduate Course in Radio Communication, Helsinki University of Technology, February 2004
- [4] M. Alonso, E. Finn, Fisica: corso per l'università, Volume II, Masson, 1996
- [5] D. Mills, Network Time Protocol (Version 3), Request For Comment 1305, March 1992
- [6] Telecommunications Network Time Synchronization, National Communication System , NCS TIB 99-4
- [7] D. Mills, On the Accuracy and Stability of Clock Synchronized by the Network Time Protocol in the Internet System, ACM Computer Communication Review, January 1990
- [8] D. Mills, The Network Time Protocol (NTP) Distribution, <http://www.eecis.udel.edu/mills/ntp/html/index.html>, April 2005
- [9] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, IEEE Standard 802.11, 1999 Edition
- [10] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band, IEEE Standard 802.11a-1999, 1999 Edition
- [11] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Higher-Speed Physical Layer Extension in the 2.4 GHz

- Band, IEEE Standard 802.11b-1999,(Supplement to ANSI/IEEE Std 802.11, 1999 Edition)
- [12] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4 GHz Band, IEEE Std 802.11g-2003, June 2003
- [13] The Norwegian research network, Throughput, documentazione on-line su <http://www.uninett.no/wlan/throughput.html>, April 2004
- [14] J.Jun, P.Peddabachagari, M.Sichitiu, Theoretical Maximum Throughput of IEEE 802.11 and its Application, Second IEEE International Symposium on Network Computing and Application (NCA'03), Cambridge, MA, April 2003
- [15] C.Heegard, Range versus Rate in IEEE 802.11g, July 2 2001