



RELAZIONE DI LABORATORIO

Laboratorio #1 MISURA DEL THROUGHPUT DI UNA RETE WIRELESS 802.11 b/g IN CONFIGURAZIONE INFRASTRUTTURATA

Gruppo A5
Davide Perina (128698)
Nicola Speri (129144)
Stefano Testi (128697)
Michele Vincenzi (128689)

1. INTRODUZIONE

Lo scopo di questo esperimento consiste nello studio del comportamento empirico di una rete wireless 802.11 b/g in ambiente indoor in modalità infrastrutturata, sotto condizioni di traffico semi-controllate e con riferimento al comportamento teorico.

Tutti i test condotti per questa sperimentazione sono stati svolti utilizzando il tool di analisi **Iperf**, che permette di creare uno stream di dati (in questo caso *UDP*) per valutare la qualità del link (tra l'AP e i laptop) e misurare l'andamento del *throughput* all'interno di una qualsiasi rete locale.

In questo contesto, il tool Iperf è stato usato per monitorare il *throughput* nel caso di una singola stazione connessa all'*Access Point* a diverse velocità, e, successivamente, al variare del numero di stazioni connesse (mantenendo fissa la velocità di collegamento). Infine, sono state variate le velocità delle singole stazioni per analizzare il comportamento in condizioni più simili a quelle reali.

2. SETUP SPERIMENTALE

Come mostrato in figura 1, il setup sperimentale è composto da un server **Iperf** (in esecuzione su uno dei laptop), connesso all'AP **Cisco Aironet** per mezzo di uno *switch* e di due cavi *Fast Ethernet* (100Mbps).

Inoltre, nelle tabelle 1 e 2, sono riportate le caratteristiche dei vari laptop e AP utilizzati nell'esperienza.

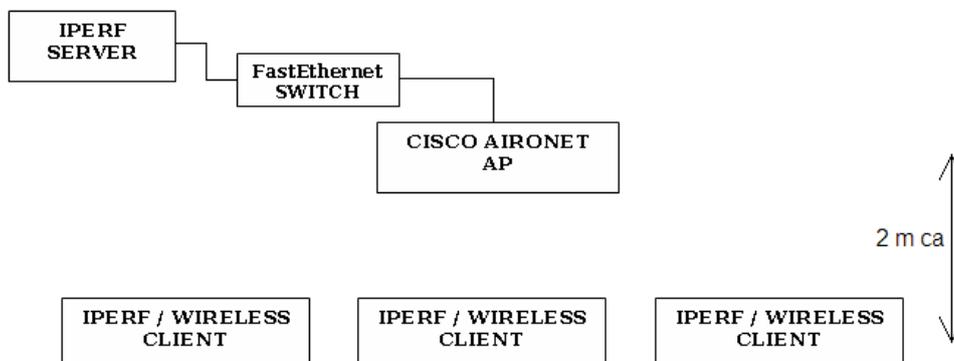


Figura 1

<i>AP</i>	Cisco Aironet 1310
<i>FIRMWARE</i>	12.3(8)JEA3
<i>FUNZIONI SUPPORTATE DAL FIRMWARE</i>	Multiple SSID (fino a 16), per ogni SSID: VLAN, autenticazione via MAC address, 802.1x, WPA, numero massimo di stazioni fissabile

Tabella 1

<i>MODELLO</i>	Dell Latitude 1101
<i>PROCESSORE</i>	Intel Pentium® M - Modello 725 (1.7 GHz, 400 FSB) con Hyper-Threading
<i>RAM</i>	Memoria DDR 333 SDRAM 512MB 333MHz Dual Channel Shared
<i>SCHEDA WIRELESS</i>	Intel® Pro Wireless 2200 802.11b/g

Tabella 2

La sperimentazione è stata inoltre eseguita in parallelo con un altro gruppo di lavoro, dotato di un proprio AP (un secondo Cisco Aironet), anch'esso connesso attraverso lo *switch* al server Iperf.

Tale schema ha comportato quindi la necessità di far cooperare i due differenti AP, i quali devono lavorare ognuno su dei canali non sovrapposti (1, 6, 11).

Tuttavia tale vincolo ha dovuto coesistere con la presenza della rete wireless di facoltà, la quale, seguendo un schema di allocazione dei canali pianificato in altra sede, ha inevitabilmente costituito una fonte di disturbo elettromagnetico.

Le condizioni di traffico della sperimentazione sono quindi semi-controllate: pur essendo fisso il numero delle stazioni connesse all'AP oggetto della misurazione, è stato impossibile controllare altre emissioni, ovvero non è stato possibile proteggere il *test-bed* da interferenze di altri dispositivi simili o di altri oggetti la cui frequenza di lavoro è (in parte o in toto) sovrapposta a quelle utilizzate nella sperimentazione.

Una scansione dei segnali rilevabili ha mostrato come tutti i canali fossero effettivamente occupati (anche da più di un access point), ed è stato quindi deciso un differente metodo di allocazione: ad un utilizzo "cieco" dei canali 1, 6 e 11 si è preferito, in accordo con gli altri gruppi di lavoro, scegliere i canali in modo tale che l'interferenza di altre stazioni sullo stesso canale o su canali adiacenti fosse minima.

Per il presente gruppo di lavoro è stato quindi preferito il **canale 9**, (2441-2463 MHz, $f_c=2452$ MHz), avente un singolo AP operante su di esso con una minima potenza rilevabile nella stanza dell'esperimento (-80 dBm, o 10^{-8} mW). I canali adiacenti (sovrapposti ad esso), risultando comunque occupati, potrebbero aver costituito fonte di interferenza.

Durante la presente sperimentazione, solamente un altro gruppo di lavoro ha utilizzato il proprio AP, operante sul canale 1. Pertanto è stato evitato l'*overlapping* con l'altro AP utilizzato per la sperimentazione, le cui emissioni avrebbero potuto essere potenzialmente più "dannose" rispetto agli AP di facoltà in quanto fisicamente collocato in prossimità dell'AP operante sul canale 9, e quindi delle stazioni utilizzate per la rilevazione del *throughput*.

Di seguito viene mostrato un riepilogo delle reti rilevate.

MAC	SSID	Name	r	Speed	Vendor	Type	Enc...	SNR	Signal+	Noise-	SNR+	IP Addr
0014A8147960	science-wifi		1*	54 Mbps	(Fake)	AP		50	-48	-100	52	
0014A824C440	science-wifi		1	54 Mbps	(Fake)	AP		34	-59	-100	41	
0014A824B8D0	science-wifi		2	54 Mbps	(Fake)	AP		41	-49	-100	51	
0014A824B8F0	science-wifi		2	54 Mbps	(Fake)	AP		36	-63	-100	37	
0014A824BF00	science-wifi		3	54 Mbps	(Fake)	AP		40	-49	-100	51	
0018191F60C1	FbkWiFiGuest		4	54 Mbps	(Fake)	AP		38	-53	-100	47	
0018191F60C3			4	54 Mbps	(Fake)	AP		37	-54	-100	46	
0018191F60C2			4	54 Mbps	(Fake)	AP	WEP	35	-57	-100	43	
0018191F60C0			4	54 Mbps	(Fake)	AP	WEP	36	-62	-100	38	
0014A8147670	science-wifi		4	54 Mbps	(Fake)	AP		21	-76	-100	24	
0014A824BB90	science-wifi		5	54 Mbps	(Fake)	AP		34	-57	-100	43	
0014A824C2F0	science-wifi		5	54 Mbps	(Fake)	AP		30	-57	-100	43	
0014A824C4D0	science-wifi		6	54 Mbps	(Fake)	AP		30	-62	-100	38	
0018191F5FE1	FbkWiFiGuest		6	54 Mbps	(Fake)	AP		22	-70	-100	30	
0018191F5FE3			6	54 Mbps	(Fake)	AP		21	-74	-100	26	
0018191F5FE2			6	54 Mbps	(Fake)	AP	WEP	25	-74	-100	26	
0014A81476D0	science-wifi		7	54 Mbps	(Fake)	AP		38	-60	-100	40	
0014A824B7F0	science-wifi		8	54 Mbps	(Fake)	AP		27	-66	-100	34	
0014A824B860	science-wifi		9	54 Mbps	(Fake)	AP		22	-74	-100	26	
0014A824C160	science-wifi		10	54 Mbps	(Fake)	AP		38	-58	-100	42	
0014A8147E40	science-wifi		10	54 Mbps	(Fake)	AP		28	-62	-100	38	
0014A8147830	science-wifi		11	54 Mbps	(Fake)	AP		17	-83	-100	17	
0014A8147810	science-wifi		12	54 Mbps	(Fake)	AP		36	-58	-100	42	
0014A824B970	science-wifi		13	54 Mbps	(Fake)	AP		40	-59	-100	41	
0014A824BFA0	science-wifi		13	54 Mbps	(Fake)	AP		29	-64	-100	36	

Figura 2: scansione delle reti rilevabili

Le differenti stazioni oggetto della misurazione sono state quindi poste alla stessa distanza dall'AP (2 m).

Dal punto di vista sperimentale sono state effettuate 4 tipologie di test:

TEST A: 1 singola stazione, velocità fissa impostata dall'AP

A1: 802.11b velocità 5.5Mbps

A2: 802.11b velocità 11Mbps

A3: 802.11g velocità 6Mbps

A4: 802.11g velocità 12Mbps

A5: 802.11g velocità 24Mbps

A6: 802.11g velocità 54Mbps

TEST B: 2 stazioni, velocità fissa impostata dall'AP

B1: 802.11b velocità 11Mbps

B2: 802.11g velocità 12Mbps

B3: 802.11g velocità 54Mbps

TEST C: 3 stazioni, velocità fissa impostata dall'AP

C1: 802.11b velocità 11Mbps

C2: 802.11g velocità 12Mbps

C3: 802.11g velocità 24Mbps

TEST D: 2 stazioni, velocità miste impostate dalle stazioni

D1: Prima stazione 802.11b **11Mbps**, Seconda stazione 802.11g **12Mbps**

D2: Prima stazione 802.11g **6Mbps**, Seconda stazione **54Mbps**.

D3: Prima stazione 802.11g **6Mbps**, Seconda stazione **54Mbps**. Il test ha durata 120 secondi, per i primi 60 sono in funzione entrambe le stazioni, dal sessantesimo secondo in poi è in funzione solo la stazione a 54Mbps.

Come già sottolineato precedentemente, è stata utilizzata una configurazione "condivisa", con una singola macchina in cui era in esecuzione il server di **iperf** (IP 192.168.10.30, server attivato con il comando `iperf -u -s`). Tale programma aveva il compito di ricevere i comandi dai differenti client e di scambiare con essi dei dati fittizi per monitorare la qualità del link.

In particolare il comando utilizzato dal client per avviare il test è il seguente:

```
iperf -c 192.168.10.30 -u -b60M -i 5 -t 60
```

i cui parametri utilizzati sono elencati di seguito.

-c 192.168.10.30	Specifica l'indirizzo del server lperf
-u	Per utilizzare il protocollo di trasporto <i>UDP</i>
-b60M	La banda massima per lo stream di dati instaurato tra server e client. Tale banda è stata impostata in modo variabile per ogni test: per i test relativi allo standard 802.11g la banda è stata impostata a 10 Mbps in più rispetto al valore nominale, e a 5Mbps in più per lo standard 802.11b. Per le prove in cui venivano utilizzati entrambi gli standard si è optato per il valore scelto con 802.11g (10Mbps + vel. nominale).
-i 5	Intervallo di misurazione (ogni 5 secondi)
-t 60	Durata del test (60 secondi)

Per quanto riguarda la connessione è stato scelto per il livello di trasporto l'utilizzo del protocollo *UDP*. Se fosse stato adottato il protocollo *TCP*, infatti, sarebbe stato generato ulteriore traffico sul canale, assieme ad altri intervalli di attesa, andando a ridurre di conseguenza il *throughput*.

Ad esclusione del test D3, per ogni test sono state quindi effettuate delle misure della durata di 60 secondi, scartando successivamente il primo e l'ultimo valore, ritenuti meno affidabili in quanto relativi ad un "transitorio" e non al funzionamento a regime della rete.

Il test **A** è stato svolto per comprendere quale sia il reale *throughput* di una rete 802.11 b/g in totale assenza di collisioni (considerando quindi trascurabili eventuali altri *AP* che insistono sulla stessa banda), ovvero quanto influiscano tutte le informazioni "di controllo" aggiunte ai dati veri e propri, unitamente ai differenti intervalli di attesa per poter trasmettere sul canale.

Un'ulteriore analisi effettuabile a partire da tale test riguarda un confronto tra le prestazioni (puramente in termini di efficienza) offerte dallo standard **b** e dallo standard **g**, ovvero dall'utilizzo di una tecnica di trasmissione *DS/SS* o *OFDM*. Ovviamente tale analisi non può essere dettagliata, in quanto vengono confrontate bitrate (es. 11Mbps per **b** e 12Mbps per **g**) che, seppur vicine in termini di grandezza, non sono coincidenti, ma è comunque possibile ottenere un'idea indicativa in termini di vantaggi e svantaggi dell'una o dell'altra tecnica.

I test **B** e **C** sono stati eseguiti per comprendere il comportamento del *throughput* della rete all'aumentare del numero delle stazioni. Oltre alla considerazione relativa alla presenza di più stazioni sul canale, è noto dalla teoria che la finestra di contesa sarà statisticamente più lunga (a causa delle collisioni) aumentando ulteriormente i tempi di attesa e quindi riducendo il *throughput*.

I test **D** sono stati invece effettuati per comprendere quale sia l'effettivo impatto di avere sulla rete differenti stazioni a diverse velocità, avvicinandosi quindi di più ad un comportamento reale. In tali test le velocità non sono state imposte dall'*AP*, ma sono state stabilite sulle singole stazioni appartenenti al *BSS*, in fase di connessione al *BSS* stesso.

Il test **D1** mette a confronto due velocità simili, ma appartenenti alle due diverse versioni dello standard **b** e **g**, per valutare come la rete reagisca alla contemporanea presenza di due stazioni operanti a standard diversi.

I test **D2** e **D3** invece hanno lo scopo di valutare l'impatto sul *throughput* generale della presenza di una stazione a bassa velocità. Per come è implementato il protocollo, tale test dovrebbe intuitivamente mostrare che la presenza di tale stazione influisce drasticamente sul *throughput* generale, in quanto il canale sarà occupato per la maggior parte del tempo dalla trasmissione di questa stazione.

I risultati di ogni singolo test (gli output di lperf) sono stati infine memorizzati su file separati. Per leggere i file è stato scritto un breve programma in C++, il quale, per ogni output di lperf, converte i dati in un file di comandi per il software Matlab™ (The Mathworks™), che a sua volta genera automaticamente gli andamenti grafici delle misure e calcola alcuni valori statistici quali media e varianza.

3. CONSIDERAZIONI TEORICHE E RISULTATI ATTESI

Lo standard definito dall'*IEEE* per le reti wireless è 802.11, che opera sul livello fisico e sul livello *MAC* del modello *ISO/OSI* per la comunicazione nelle reti.

L'elemento base dell'architettura prevista dallo standard è il *BSS* (*Basic Service Set*), composto da un insieme di stazioni che condividono il mezzo. Il *BSS* può essere configurato nel modo "infrastrutturato", nel quale le stazioni accedono alla rete tramite un controllore centralizzato chiamato *Access Point* (*AP*), e nel modo "ad-hoc" (si ha quindi un *IBSS*), nel quale non esistono *AP* e dove le stazioni comunicano direttamente tra loro.

Nel caso vengano collegati tra loro più *BSS* tramite un qualche tipo di collegamento (*DS*, *Distribution System*) si ottiene un *ESS* (*Extended Service Set*).

Lo standard 802.11 è composto da diverse versioni. In questo esperimento sono state testate le versioni maggiormente utilizzate dal punto di vista commerciale: 802.11b e 802.11g.

La differenza sostanziale tra le due versioni consiste nel tipo di modulazione adottata a livello fisico: 802.11b utilizza infatti la tecnica *DS/SS*, mentre 802.11g la tecnica *OFDM*. Come si dimostrerà nel corso di questa relazione, le prestazioni ottenute con le due modulazioni sono diverse e generalmente migliori quando viene utilizzata *OFDM*.

Di seguito vengono presentate le due diverse versioni dello standard.

3.1 802.11b

Lo standard 802.11b è basato su una modulazione *DS/SS*. È una tecnica che prevede la **distribuzione dello spettro di densità di potenza** del segnale da trasmettere su una **banda molto larga**. L'allargamento della banda avviene nel dominio del tempo e consiste nel moltiplicare il segnale da trasmettere con un segnale pseudo-casuale a banda larga (chiamata *sequenza PN*). La potenza media rimane costante, ma, essendo distribuita su un intervallo di frequenze maggiore, il rapporto *W/Hz* diminuisce e raggiunge il livello del rumore bianco. Lo schema di principio del modulatore è riportato in figura 3.

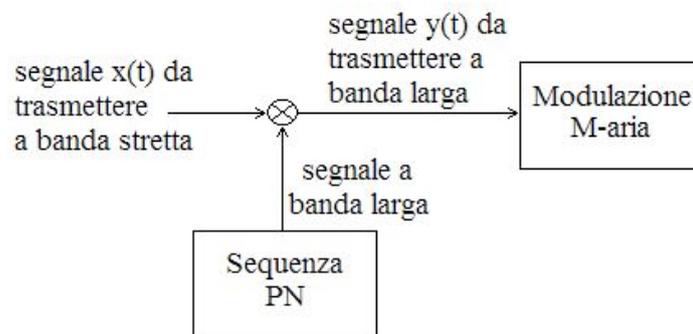


Figura 3

Le principali caratteristiche della modulazione *DS/SS* sono:

- l'utilizzo delle *sequenze PN*,
- lo spettro di densità di potenza a banda larga,
- basso rapporto *W/Hz*.

I vantaggi che si ottengono da queste caratteristiche sono:

per l'utilizzo di *sequenze PN*:

- sicurezza della trasmissione da intercettazioni: l'informazione è intelligibile solo chi ha la stessa *sequenza PN* del trasmettitore;
- accesso multiplo asincrono (*CDMA*): utilizzando *sequenze PN* diverse il canale può essere utilizzato da più utenti. Tuttavia tale tecnica di accesso multiplo non viene implementata nell'802.11b, dove gli utenti accedono al canale mediante un accesso multiplo realizzato nel dominio temporale;

per lo spettro a larga banda:

- riduzione dell'effetto del *multipath fading* causata dai diversi percorsi che le repliche del segnale possono seguire per arrivare a destinazione;
- maggiore resistenza a disturbi di tipo impulsivo: il disturbo distrugge una piccola porzione di banda lasciando inalterato gran parte del segnale;

per il basso rapporto *W/Hz*:

- lo spettro di densità di potenza si confonde con il rumore bianco e pertanto non è individuabile;
- limitato disturbo alle altre trasmissioni.

Negli USA lo standard prevede il funzionamento dell'*AP* su uno tra 11 canali, ognuno con una banda di 22 MHz. Essi sono parzialmente sovrapposti, tranne alcune coppie di canali, come 1, 6, 11. La mancata sovrapposizione tra questi canali viene sfruttata nella pianificazione delle reti (*ESS*) per limitare l'interferenza di co-cella tra *AP* vicini.

Le velocità permesse da 802.11b sono 1, 2, 5.5, 11 Mbps.

3.2 802.11g

Lo standard 802.11g è basato sulla modulazione *OFDM*.

Il concetto base dell'*OFDM* consiste nel **parallelizzare lo stream seriale di bit su N portanti ortogonali**, dette *sottoportanti* o *sottocanali*. Lo schema di principio è riportato in figura 4, mentre in figura 5 è riportato ciò che accade ai bit nel caso di utilizzo di quattro sotto-portanti: la durata di ogni bit viene aumentata di un fattore pari al numero delle sotto-portanti.

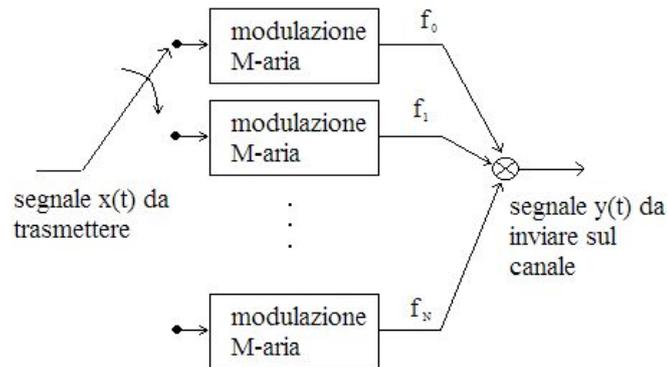


Figura 4

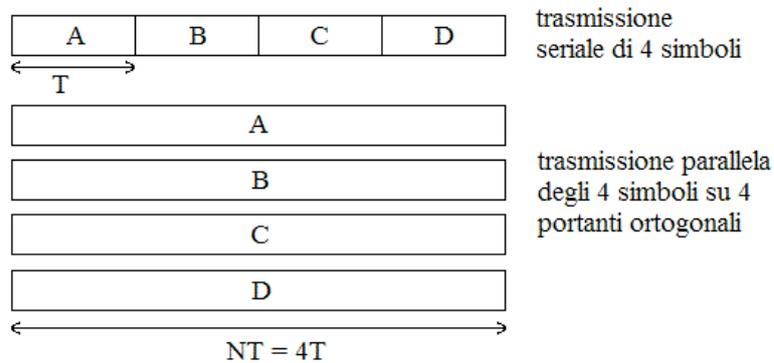


Figura 5

Il concetto chiave di questa tecnica è l'aumento del tempo di trasmissione di ogni singolo bit; infatti, aumentando la durata si ottiene come conseguenza la riduzione della banda occupata da ogni singolo sottocanale. In tal modo si va a risolvere il problema legato alla funzione di trasferimento del canale, la quale, per larghe bande, è molto irregolare e può presentare attenuazioni diverse a ogni frequenza, comportando quindi una complessa equalizzazione. Con la suddivisione in sottocanali si ottiene, per ogni sottocanale, una funzione di trasferimento lineare e quindi facilmente equalizzabile. In figura 6 è mostrato come il canale viene suddiviso in sottocanali lineari.

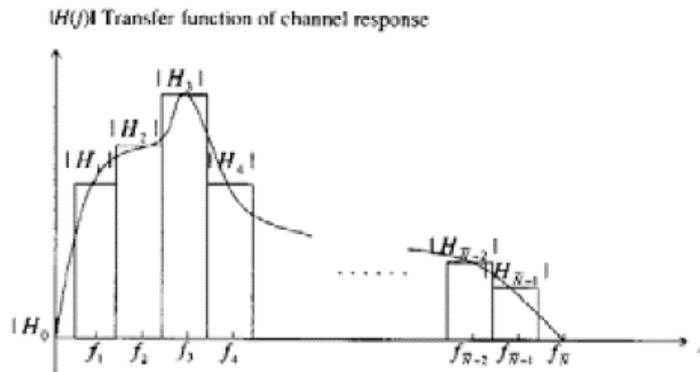


Figura 6

La parallelizzazione della trasmissione comporta anche l'irrobustimento rispetto a rapide attenuazioni di potenza nel dominio del tempo, dal momento che la durata della trasmissione è aumentata. In questa maniera solo una porzione del bit viene persa e non una intera sequenza di bit.

Un ulteriore vantaggio consiste nell'implementare la modulazione mediante la trasformata *FFT*, con la quale si rende il processo molto rapido.

Uno svantaggio è rappresentato dal trasmettere i bit su limitate porzioni di banda. Questo perchè, se per una particolare banda l'attenuazione è alta, tutti i bit inviati su quel canale sono persi. Ciò si può evitare inviando delle sequenze di training, con le quali si studia la funzione di trasferimento del canale per poi evitare di inviare dati sulle sottobande con attenuazioni alte.

Come per lo standard 802.11b, anche 802.11g prevede la possibilità di trasmettere su 11 canali. Inoltre mantiene la compatibilità con lo standard 802.11b al quale aggiunge nuove velocità (6, 9, 12, 18, 24, 36, 48 e 54 Mbps).

3.3 Calcoli teorici 802.11b

Prima di effettuare la sperimentazione sono stati preventivamente effettuati i calcoli sul *throughput* teorico medio attendibile (in termini di traffico *UDP*).

Per fare ciò, è stata presa in considerazione la struttura di tutto il traffico generato e immesso sul canale (figura 7), per stimare quali siano gli effettivi dati e quanto sia influente l'*overhead* ad essi aggiunto per consentire la trasmissione.

La struttura del traffico generato in rete per un singolo frame dati 802.11b è la seguente:

DIFS	CONT. WINDOW	PLCP PREAMBLE + HEADER	HEADER MAC + LLC	HEADER IP + UDP	DATI	SIFS	ACK PLCP PREAMBLE + HEADER	ACK
50µs	15.5 t.s. (t.s.=20 µs)	9 byte @1Mbps + 6 byte @2Mbps	28 byte @DR + 8 byte @DR	20 byte @DR + 8 byte @DR	1470 byte @DR	10µs	15 byte (72 bit @1Mbps, 48 bit @2Mbps)	14 byte @DR

NB: @DR = "alla Data Rate"

Figura 7

Dalla rappresentazione del frame sopra riportato è semplice quindi evincere quali siano i valori di *throughput* ottenibili per le velocità della versione 802.11b che vengono utilizzate nella sperimentazione.

Come da specifiche, per tale versione dello standard l'intervallo di tempo *DIFS* per il quale una stazione deve attendere prima di iniziare la procedura di *backoff* è di 50µs, mentre il periodo di attesa tra l'invio dei dati e quello dell'*ACK* (*SIFS*) è pari a 10µs. Per la stima del *throughput* teorico si è considerata una *contention window* di media lunghezza, ovvero di 15.5 time slot, essendo essa variabile solo tra 0 e 31 in assenza di altre stazioni che partecipino ad eventuali contese.

Per quanto riguarda il livello fisico si è scelto il formato *PPDU* (*Physical Protocol Data Unit*) associato al *PLCP* (*Physical Layer Convergence Procedure*) in versione corta. Si ha quindi che il preambolo è di soli 72 bit (anziché 144 della versione con preambolo lungo) come mostrato nello schema di figura 8; questo per aumentare l'efficienza della trasmissione.

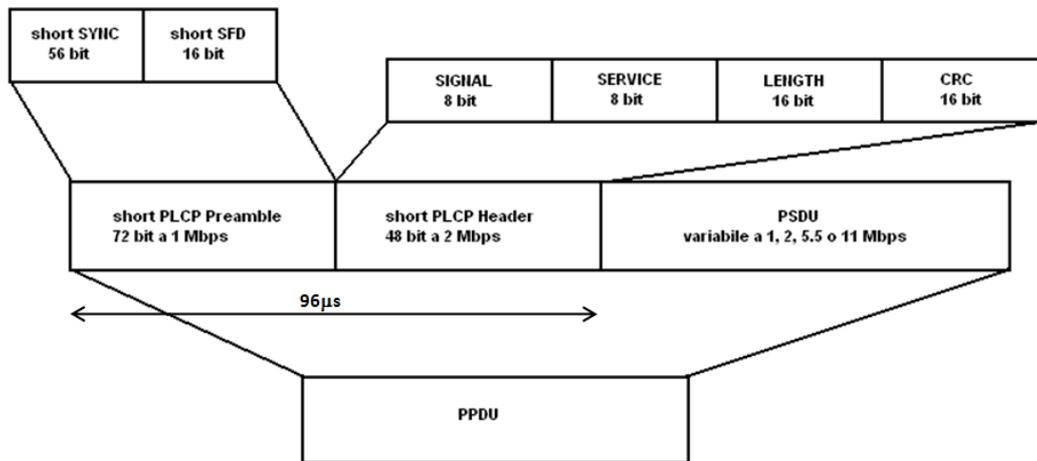


Figura 8

Come si può notare, il preambolo viene trasmesso alle velocità di 1Mbps con una modulazione *DBPSK*, mentre l'header PLCP alla velocità di 2Mbps tramite una modulazione *DQPSK*, per un totale di $96\mu s$ che quindi occorre sempre considerare nell'invio di un qualsiasi pacchetto (inclusi gli *acknowledgment*).

Per gli *headers* vengono utilizzate quindi le velocità di 1 e 2 Mbps, per far in modo che tutte le stazioni presenti all'interno della stessa *BSS* (che potrebbero non supportare velocità elevate) siano in grado di comprendere e rilevare la presenza di una trasmissione.

L'header PLCP contiene informazioni circa il tipo di modulazione e la velocità (rispettivamente campi *Signal* e *Service*), il numero di microsecondi necessari alla trasmissione del PSDU (valutato in accordo alla velocità di trasmissione adottata) e i bit di controllo dell'integrità dei dati (*CRC*).

I successivi bit costituiscono il PSDU (*Physical layer Service Data Unit*) del livello fisico e vengono inviati alla velocità impostata dall'AP e conforme allo standard. In tali bit sono contenuti i veri e propri dati ma anche gli *headers* di tutti gli strati superiori, dei quali per sinteticità verranno ommessi i formati. Al fine di eseguire un calcolo corretto è necessario però conoscere la loro lunghezza: 36 byte per il livello *Data Link*, 20 byte per il livello *IP* e 8 byte per il protocollo *UDP*.

Il livello *Data Link* risulta avere quindi una lunghezza pari a 36 byte, di cui 28 per *MAC* e 8 per *LLC*. Per il sottolivello *MAC* non viene quindi considerato il campo *Address4*, presente solo nella comunicazione tra AP per mezzo di un *DS* (*Distribution System*).

Infine, una volta ricevuti i dati, e dopo aver effettuato il controllo dell'integrità degli stessi, occorre attendere un intervallo di tempo pari al *SIFS* e quindi, successivamente, il destinatario del pacchetto immetterà nel canale un *ACK* che ha una lunghezza pari a 14 byte (trasmessi alla velocità dei dati), ai quali si deve ulteriormente aggiungere l'header ed il preambolo fisico come menzionato precedentemente.

Per completezza, in tabella 3 assieme al *throughput* medio riportato in grassetto, sono stati riportati tra parentesi anche i valori di *throughput* ottenibile nei due casi estremi in cui la finestra di contesa sia sempre nulla o sempre impostata a 31 ("worst case"). La bitrate maggiore si riferisce quindi al caso $CW=0$ e la bitrate minore al caso $CW=31$.

I due *throughput* calcolati quindi si intendono come "valor medio", e vengono stimati mediante le seguenti formule:

$$Th_{FIS} = \frac{(B_{DATI} + B_{HEAD.IP+UDP} + B_{H.MAC}) \cdot 8}{T_{FRAME}} = \frac{1532 \cdot 8}{T_{FRAME}}$$

$$Th_{UDP} = \frac{B_{DATI} \cdot 8}{T_{FRAME}} = \frac{1470 \cdot 8}{T_{FRAME}}$$

	802.11b 1Mbps	802.11b 2Mbps	802.11b 5.5Mbps	802.11b 11Mbps
DIFS	50 μs	50 μs	50 μs	50 μs
CW	310 μs	310 μs	310 μs	310 μs
PLPC PREAMBLE + HEADER	96 μs	96 μs	96 μs	96 μs
H. MAC + LLC	288 μs	144 μs	52.36 μs	26.18 μs
H. IP + UDP	224 μs	112 μs	40.73 μs	20.36 μs
DATI	11760 μs	5880 μs	2138.18 μs	1069.09 μs
SIFS	10 μs	10 μs	10 μs	10 μs
ACK PLPC PREAMBLE + HEADER	96 μs	96 μs	96 μs	96 μs
ACK	112 μs	56 μs	20.36 μs	10.18 μs
TOTALE	12946 μs	6754 μs	2813.63 μs	1687.81 μs
THROUGHPUT TEORICO LIV. FISICO	946.70 kbps (924.56 – 969.93)	1.815 Mbps (1.735 – 1.902)	4.356 Mbps (3.924 – 4.895)	7.261 Mbps (6.135 – 8.895)
THROUGHPUT TEORICO LIV. UDP	908.39 kbps (887.15 – 930.67)	1.741 Mbps (1.665 – 1.825)	4.180 Mbps (3.765 – 4.697)	6.968 Mbps (5.886 – 8.535)

Tabella 3

3.4 Calcoli teorici 802.11g

Per quanto riguarda il calcolo del *throughput* teorico relativo allo standard 802.11g occorre notare che è stata presa in considerazione la modalità "g-only".

La struttura del traffico generato in rete non è molto diversa da quella relativa allo standard 802.11b; variano i tempi di inattività, le velocità di trasmissione dei dati e una parte dell'*overhead* inserito dal livello fisico, come si può osservare nello schema sottostante.

DIFS	CONT. WINDOW	PLCP PREAMBLE	PLCP HEADER	HEADER MAC + LLC	HEADER IP + UDP	DATI	TAIL DATI	SIFS	ACK PLPC PREAMBLE + HEADER	ACK	TAIL ACK
28μs	15.5 t.s. (t.s.=9 μs)	12 simboli (16μs)	3 byte @6Mbps + 2 byte @DR	28 byte @DR + 8 byte @DR	20 byte @DR + 8 byte @DR	1470 byte @DR	6 bit @DR	10μs	12 simboli (16μs) + 3 byte @6Mbps + 2 byte @DR	14 byte @DR	6 bit @DR

Figura 9

Il *time slot* è di 9μs (mentre per l'802.11b è di 20μs), grazie al quale l'intervallo di tempo *DIFS* si riduce a 28μs e la *contention window* si riduce a 139.5μs, nonostante il valor medio del numero di *time slot* resti invariato.

Per tale versione dello standard esistono varie tipologie di *PPDU* legate alla tecnica di trasmissione, tra le quali *DSSS-OFDM* (il cui formato è simile a quello utilizzato per l'802.11b con l'eccezione dell'utilizzo di una modulazione

OFDM sulla parte dati per ottenere velocità più elevate e una fase di ri-sincronizzazione pari a $18\mu\text{s}$ per passare dalla modulazione *DQPSK* a *OFDM*) e *ERP-OFDM* (*Extended Rate PHY*), per il quale viene utilizzato un formato particolare. Come nel caso precedente esso è costituito da un preambolo *PLCP*, da un *header* e infine dai dati; tali campi sono però inviati a rate diverse rispetto al caso dell'802.11b.

Il preambolo abilita il ricevitore ad acquisire il segnale *OFDM* e viene utilizzato per la sincronizzazione del demodulatore. Esso ha una durata di $16\mu\text{s}$.

Come mostrato nello schema di figura 10, l'*header* *PLCP* è costituito dal campo *Signal* più il campo *Service* (16 bit) trasmesso alla velocità dei dati con una modulazione *OFDM*. Il campo *Signal* è un simbolo *OFDM* (24 bit) modulato con una modulazione *BPSK* e trasmesso alla velocità di 6Mbps (quindi il tempo necessario per la trasmissione è di $4\mu\text{s}$).

In coda al campo *Service* si ha il *PSDU*, ossia l'insieme di ciò che costituisce il dato a livello fisico. Esso viene inviato sul canale alla velocità prescelta con una modulazione *OFDM* costituita da 48 portanti (più 4 portanti pilota), ognuna delle quali modulata con *BPSK*, *QPSK*, *16-QAM*, *64-QAM* e con codici convoluzionali con rate $1/2$, $2/3$, $3/4$. All'interno del *PSDU* non sono presenti solamente i pacchetti *UDP* generati dal client *Iperf*, ma anche tutti gli *header* *MAC*, *IP* e *UDP* che per brevità non verranno indicati; tuttavia, come accennato nel paragrafo precedente, per poter procedere al calcolo del *throughput* occorre conoscere la loro durata (in termini di byte o bit).

Infine gli ultimi campi presenti nel livello fisico sono il *Tail* e i bit di *Padding*, che servono rispettivamente a far ritornare l'encoder convoluzionale allo stato "zero state" e per fare in modo che la lunghezza del messaggio sia un multiplo di N_{DBPS} , il numero di bit di dato per simbolo *OFDM*.

Nella figura sottostante viene mostrata la struttura del frame di livello fisico della modalità *ERP-OFDM*:

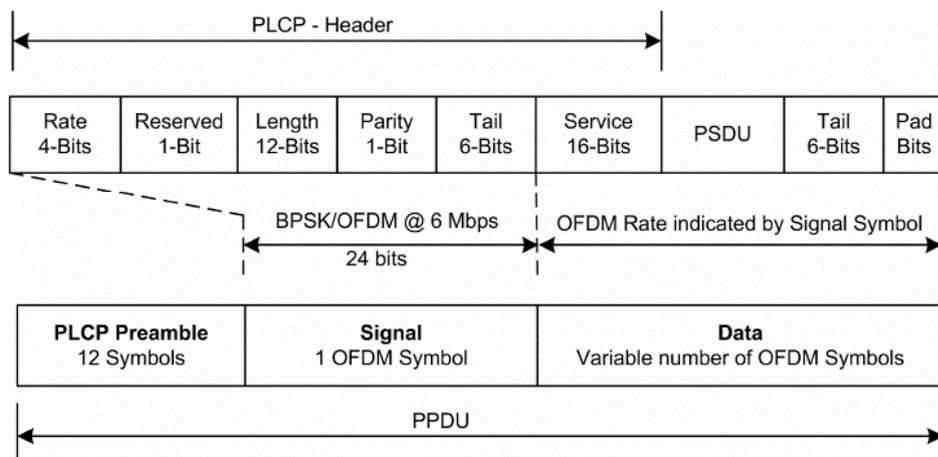


Figura 10

Successivamente all'invio dei dati, e una volta controllata la loro integrità, dopo un intervallo di tempo pari al *SIFS* (come nell'802.11b pari a $10\mu\text{s}$) il destinatario dei dati invia un *ACK* di durata identica a quella del caso precedente (14 byte), che viene trasmesso alla velocità dei dati e al quale si dovranno aggiungere il preambolo *PLCP*, l'*header* *PLCP*, e i campi *Tail* e *Pad* relativi al livello fisico nel quale l'*ACK* è incapsulato.

Dalla rappresentazione del frame di figura 9 è semplice quindi evincere quali siano i valori di *throughput* ottenibili per le velocità dello standard "g" che vengono utilizzate nella sperimentazione.

Nella tabella 4 sono riportati in dettaglio i valori relativi alla durata di ogni singolo campo componente il frame, e il conseguente *throughput* in termini di banda disponibile a livello fisico e a livello *UDP*.

	802.11g 6Mbps	802.11g 12Mbps	802.11g 24Mbps	802.11g 54Mbps
DIFS	28 μ s	28 μ s	28 μ s	28 μ s
CW	139.5 μ s	139.5 μ s	139.5 μ s	139.5 μ s
PLPC PREAMBLE	16 μ s	16 μ s	16 μ s	16 μ s
PLPC HEADER	6.67 μ s	5.33 μ s	4.67 μ s	4.3 μ s
H. MAC + LLC	48 μ s	24 μ s	12 μ s	5.33 μ s
H. IP + H. UDP	37.33 μ s	18.67 μ s	9.33 μ s	4.15 μ s
DATI	1960 μ s	980 μ s	490 μ s	217.78 μ s
TAIL DATI	1 μ s	0.5 μ s	0.25 μ s	0.11 μ s
SIFS	10 μ s	10 μ s	10 μ s	10 μ s
ACK PLPC PREAMBLE + HEADER	22.67 μ s	21.33 μ s	20.67 μ s	20.3 μ s
ACK	18.67 μ s	9.33 μ s	4.67 μ s	2.07 μ s
TAIL ACK	1 μ s	0.5 μ s	0.25 μ s	0.11 μ s
TOTALE	2288.84 μ s	1244.16 μ s	735.34 μ s	447.65 μ s
THROUGHPUT TEORICO LIV. FISICO	5.355 Mbps (5.047 – 5.702)	9.851 Mbps (8.858 – 11.095)	16.667 Mbps (14.009 – 20.569)	27.379 Mbps (20.874 – 39.773)
THROUGHPUT TEORICO LIV. UDP	5.138 Mbps (4.843 – 5.471)	9.452 Mbps (8.499 – 10.646)	15.993 Mbps (13.442 – 19.737)	26.271 Mbps (20.029 – 38.163)

Tabella 4

N.B. Per i calcoli di tabella 3 e 4 non sono stati presi in considerazione l'invio dei pacchetti *RTS* e *CTS*, per i quali il *throughput* teorico diminuirebbe a causa della maggiore durata del processo complessivo di invio di un singolo pacchetto dati.

4. RISULTATI SPERIMENTALI

In questa sezione vengono riportati i risultati delle misurazioni effettuate, in forma numerica e grafica, e vengono confrontati con i valori di *throughput* teorici medi ottenuti al punto precedente.

A fianco di ogni grafico vengono riportati alcuni valori statistici relativi alla prova. Si consideri che tutte le misurazioni (ad esclusione del test D3) sono relative ad un singolo test della durata di 60 secondi, dal quale sono successivamente stati scartati il primo e l'ultimo valore di ogni misurazione. Ogni valore riportato rappresenta la velocità media misurata nei precedenti 5 secondi. Tutti i test sono stati inoltre preceduti da misurazioni (successivamente scartate) effettuate per testare le condizioni del canale.

Si consideri quindi che le linee che congiungono i vari valori non rappresentano la velocità istantanea, ma sono state tracciate per mostrare con maggiore chiarezza l'andamento del *throughput* stesso.

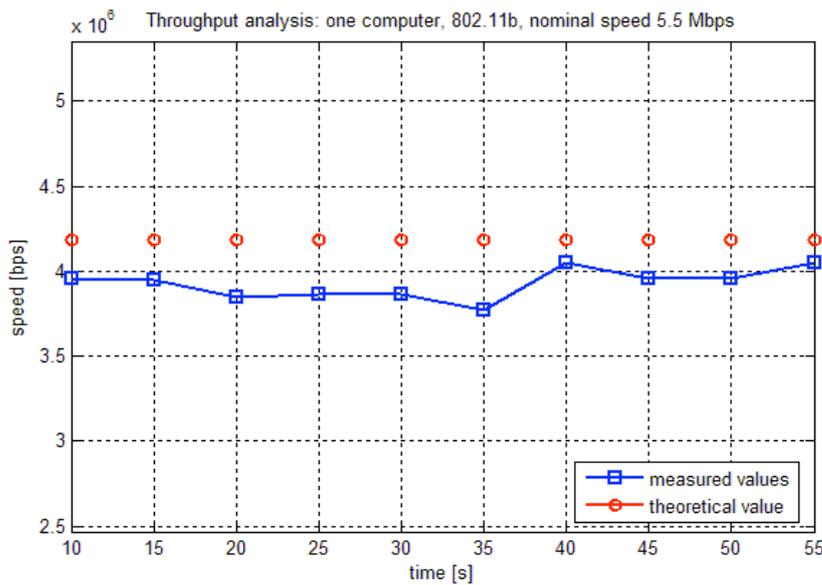
È inoltre stata riportata l'efficienza, intesa come rapporto percentuale tra il valore medio del *throughput* ottenuto sperimentalmente e la velocità fisica nominale della trasmissione (es. 54Mbps).

4.1 Test Categoria A

I test di **categoria A** mostrano l'andamento del *throughput* in presenza di una singola stazione connessa all'*Access Point*. La velocità viene forzata dall'*AP* stesso, mediante indicazioni contenute all'interno del *beacon*.

È da sottolineare inoltre come il valore teorico evidenziato all'interno dei grafici sia effettivamente un valore medio, che fa riferimento ad una finestra di contesa di 15.5 *time slot*. In realtà la finestra di contesa (in presenza di una sola stazione, come in tutti i test di categoria A) per ogni frame trasmesso può assumere qualsiasi valore tra 0 e 31, e quindi il *throughput* può oscillare proprio in funzione di tale variabilità.

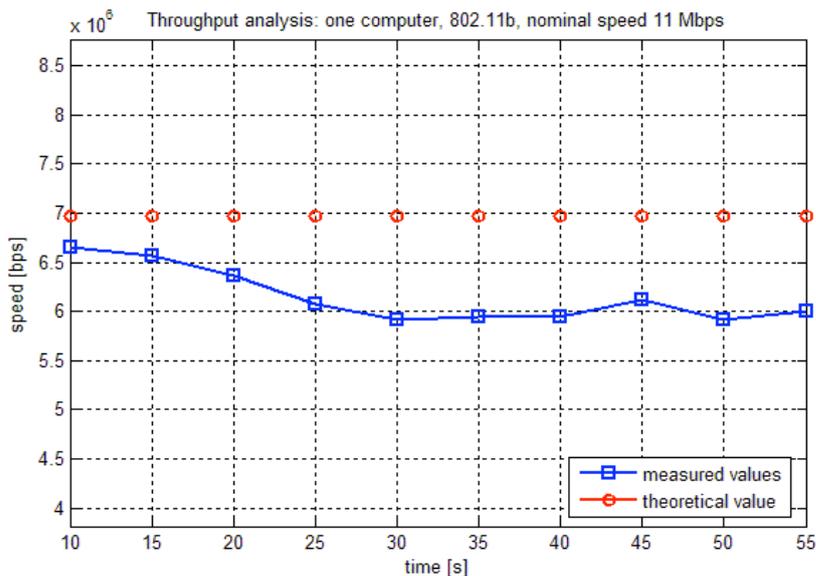
TEST A1: 1 singola stazione, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11b velocità 5.5Mbps



MIN	3.77Mbps
MAX	4.05Mbps
AVG	3.93Mbps
Theor	4.18Mbps
STD	90.4kbps
EFF	71.4%

Dall'immagine si nota come la trasmissione a 5.5Mbps sia una delle più efficienti, introducendo essa un limitato *overhead* (in termini di durata temporale rispetto alla durata dei dati), che consente di raggiungere un'efficienza del 71.4% rispetto al valore nominale.

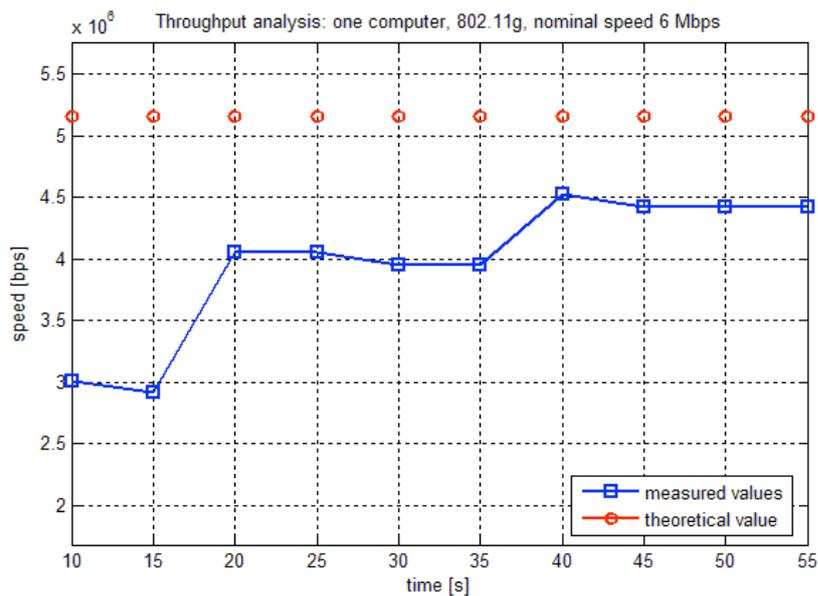
TEST A2: 1 singola stazione, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11b velocità 11Mbps



MIN	5.91Mbps
MAX	6.66Mbps
AVG	6.15Mbps
Theor	6.97Mbps
STD	280kbps
EFF	55.9%

Rispetto al test A1, il test A2 mostra un'efficienza inferiore. Ciò è dovuto al fatto che i dati nel secondo test vengono trasmessi ad una velocità più elevata rispetto al caso precedente, pur rimanendo fissa la velocità di trasmissione dell'*header*. In quest'ottica, l'*header* costituisce quindi una parte più influente rispetto al test precedente, a discapito dell'efficienza dell'intera trasmissione.

TEST A3: 1 singola stazione, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11g velocità 6Mbps



MIN	2.92Mbps
MAX	4.52Mbps
AVG	3.97Mbps
Theor	5.14Mbps
STD	572kbps
EFF	66.2%

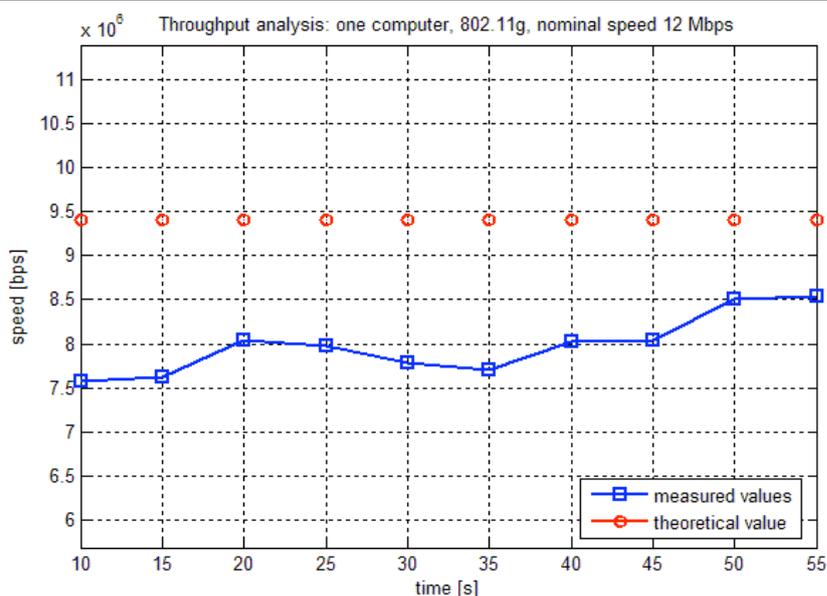
Data la vicinanza in termini di velocità nominale dei test a 5.5 e a 6 Mbps, è possibile comparare il test A1 (5.5Mbps) con il test A3 (6Mbps), e valutare quindi per due velocità di trasmissione simili i vantaggi di una trasmissione 802.11g rispetto a 802.11b.

In tal caso l'efficienza ottenuta con la trasmissione *ERP-OFDM* (6 Mbps) risulta essere inferiore alla corrispondente ottenuta con *DS/SS*. Tuttavia, si può evidenziare che le prime misurazioni relative alla velocità di 6Mbps sono alquanto basse (circa 3Mbps), mentre successivamente la trasmissione si assesta attorno a 4.5Mbps. Tale comportamento è imputabile al canale: se le misure iniziali fossero state anch'esse all'incirca pari al valore a regime si sarebbe ottenuta un'efficienza superiore all'80%, che avrebbe dimostrato l'effettiva maggiore capacità di sfruttamento di banda della tecnica *ERP-OFDM*.

A conferma di ciò, si possono valutare anche i valori teorici ottenuti per il *throughput*: a fronte di un incremento della velocità nominale di 500 kbps, si ottiene un incremento del *throughput* teorico di quasi 1Mbps.

Il basso *throughput* iniziale è spiegabile con diverse motivazioni: potrebbe essersi verificato ad esempio un disturbo momentaneo sul canale, oppure un ostacolo interposto tra AP e stazione, oppure ancora un picco di traffico su uno dei canali adiacenti (v. figura 2), a causa del quale si è verificata la perdita di numerosi pacchetti *UDP*.

TEST A4: 1 singola stazione, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11g velocità 12Mbps

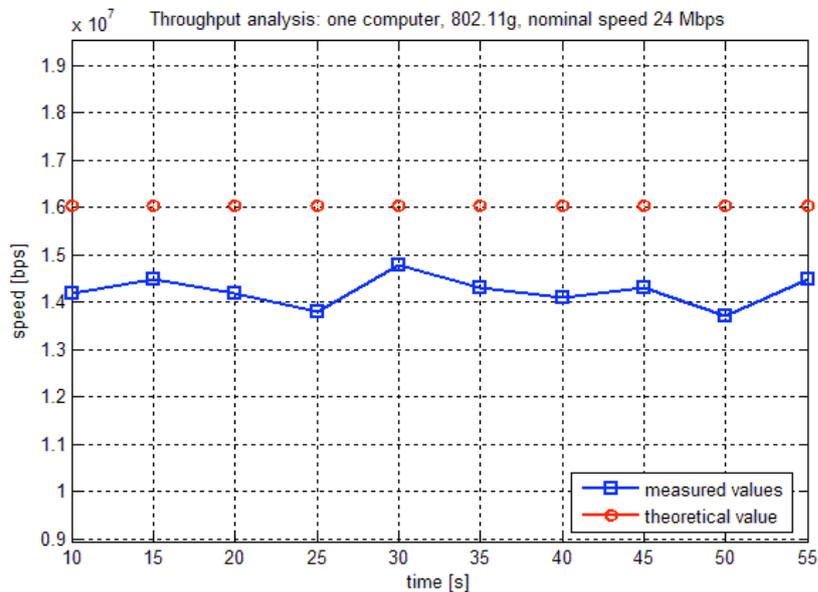


MIN	7.58Mbps
MAX	8.54Mbps
AVG	7.98Mbps
Theor	9.45Mbps
STD	333kbps
EFF	66.5%

Analogamente a quanto svolto per i test A1 ed A3, è possibile comparare il test A2 (11Mbps) con il test A4 (12Mbps). La trasmissione a 11Mbps raggiunge un'efficienza del 55.9%, mentre la trasmissione *ERP-OFDM* a 12 Mbps supera tale

efficienza di oltre 10 punti percentuali. Considerando il fatto che la prova a 12Mbps non ha nemmeno raggiunto il suo *throughput* medio teorico (a differenza della trasmissione a 11, che si è avvicinata di più), si vince che la trasmissione ERP-OFDM permette ancora una volta uno sfruttamento migliore della stessa banda.

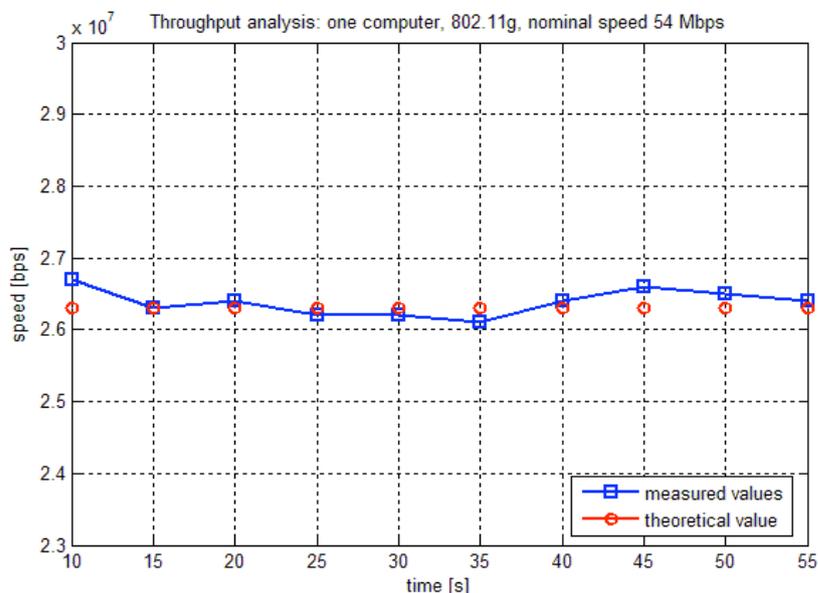
TEST A5: 1 singola stazione, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11g velocità 24Mbps



MIN	13.7Mbps
MAX	14.8Mbps
AVG	14.2Mbps
Theor	16.0Mbps
STD	327kbps
EFF	59.3%

Come per l'802.11b, anche nell'802.11g si può evidenziare che l'aumento di velocità di trasmissione dati non comporta l'aumento della velocità di trasmissione dell'*header*. Analogamente alla versione 802.11b, quindi, l'incremento di velocità nominale comporta un decremento del *throughput* (si confrontino a tale proposito i valori di efficienza del test A5 con quelli dei test A4).

TEST A6: 1 singola stazione, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11g velocità 54Mbps



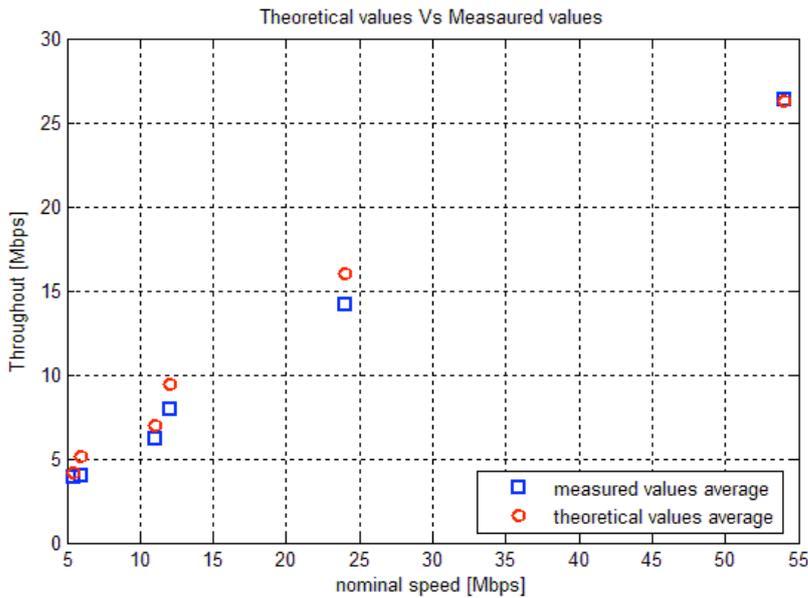
MIN	26.1Mbps
MAX	26.7Mbps
AVG	26.4Mbps
Theor	26.3Mbps
STD	187kbps
EFF	48.9%

Nel test A6 il valore del *throughput* è effettivamente oscillante attorno al valore medio teorico, a differenza degli altri casi, in cui solitamente è sempre minore del valore teorico calcolato. Questo comportamento è probabilmente dovuto alla dimensione della finestra di contesa, che evidentemente durante il test ha assunto un valore medio inferiore a quello stimato nella teoria, pari a 15.5 *time slot*.

Inoltre l'efficienza è la più bassa ottenuta tra tutti i test: inferiore al 50%, il che significa che metà delle risorse sono utilizzate solo ed esclusivamente per permettere la comunicazione.

Viene di seguito riportato uno schema riassuntivo, in cui viene graficata in ascissa la velocità nominale e in ordinata il *throughput* teorico e quello misurato.

TEST A: Grafico riassuntivo



Si nota che il *throughput* medio misurato è in effetti all'incirca coincidente con il valor medio del *throughput* teorico, e che tutti i test di categoria A riportano una deviazione standard al massimo pari a qualche centinaio di kbps, anche a velocità di trasmissione sostenute. Tale valore è indice di una discreta stabilità del canale, senza elevati *fading*.

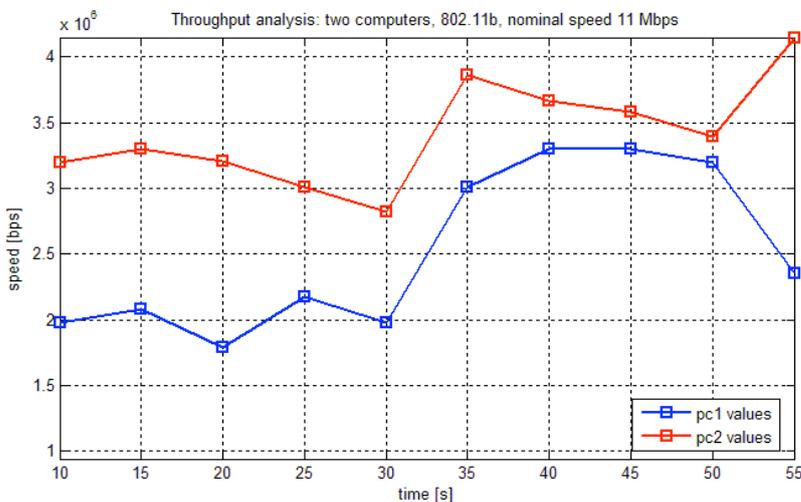
Infine si può evidenziare come al crescere della velocità nominale diminuisca l'efficienza della trasmissione. Ciò è semplicemente dovuto al fatto che, all'aumentare della velocità di trasmissione del *PSDU*, diminuisce la sua durata temporale, ma l'*header* fisico rimane costante. Questo è la conferma del fatto che l'ostacolo maggiore all'ottenimento di elevati *throughput* risiede proprio nell'*overhead* della trasmissione, che oltre una certa velocità diventa predominante rispetto ai dati.

Infatti i test mostrano un trend decrescente per entrambi gli standard: l'efficienza è del 71.4% per la velocità 5.5Mbps e 55.9% per 11Mbps, 66.2% per 6 Mbps (teoricamente più elevato, a causa di due misurazioni afflitte da disturbi del canale), 66.5% per 12Mbps, 59.3% per 24Mbps e 48.9% per 54Mbps.

4.2 Test Categoria B

I test di **categoria B** fanno riferimento a due stazioni presenti sul canale e agganciate allo stesso AP. Differentemente da quanto visto nei precedenti test, in tal caso si ha una ulteriore riduzione dei valori di *throughput* delle singole stazioni, dovuta all'aumento della finestra di contesa.

TEST B1: 2 stazioni sul canale, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11b velocità 11Mbps



PC 1	
MIN	1.79Mbps
MAX	3.30Mbps
AVG	2.52Mbps
STD	613kbps
EFF	22.9%
PC 2	
MIN	2.82Mbps
MAX	4.14Mbps
AVG	3.41Mbps
STD	399kbps
EFF	31.1%
Traffico medio aggregato	
5.93Mbps	
EFF	53.9%

Dal test B1 è palese notare una riduzione del *throughput* delle singole stazioni rispetto ai test precedenti, dovuta

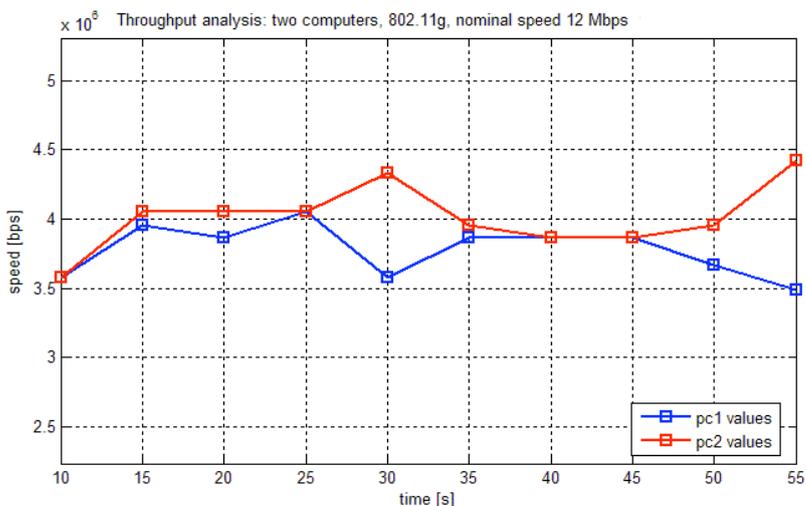
principalmente a due fattori: la presenza stessa di due stazioni che devono condividere le risorse, e la dimensione della finestra di contesa che è mediamente maggiore rispetto al caso di una singola stazione, a causa delle possibili collisioni.

La riduzione del *throughput* rispetto al caso di una singola stazione operante sul canale si può valutare mediante il traffico medio aggregato (ovvero la somma dei valori medi dei *throughput* delle varie stazioni operanti sul canale).

Il test B1 mostra un traffico medio aggregato di 5.93Mbps, che risulta minore del *throughput* ottenuto da una singola stazione sul canale operante alla stessa velocità nominale (6.15 Mbps, test A2), a causa dell'aumento della finestra di contesa.

Dal test B1 si rileva inoltre chiaramente uno dei due fenomeni caratteristici della presenza di più stazioni sul canale, ovvero l'effetto sulla trasmissione della variabilità del canale. Accade infatti che entrambi i *throughput* delle due stazioni subiscano una riduzione attorno ai 30 secondi, per poi risalire a 35 secondi e successivamente ridursi nuovamente in modo analogo tra i 40 ed i 50 secondi.

TEST B2: 2 stazioni sul canale, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11g velocità 12Mbps



PC 1	
MIN	3.49Mbps
MAX	4.05Mbps
AVG	3.78Mbps
STD	184kbps
EFF	31.5%

PC 2	
MIN	3.58Mbps
MAX	4.42Mbps
AVG	4.01Mbps
STD	239kbps
EFF	33.4%

Traffico medio aggregato	
7.79Mbps	
EFF	70.8%

Il secondo effetto riscontrabile nella trasmissione multiutente è invece rilevabile dal test B2: si rileva infatti che in prossimità dell'aumento di bitrate di una stazione si ha un decremento dell'altra, come ad esempio per il valore al 30esimo secondo, e relativo alla media dei 5 secondi precedenti.

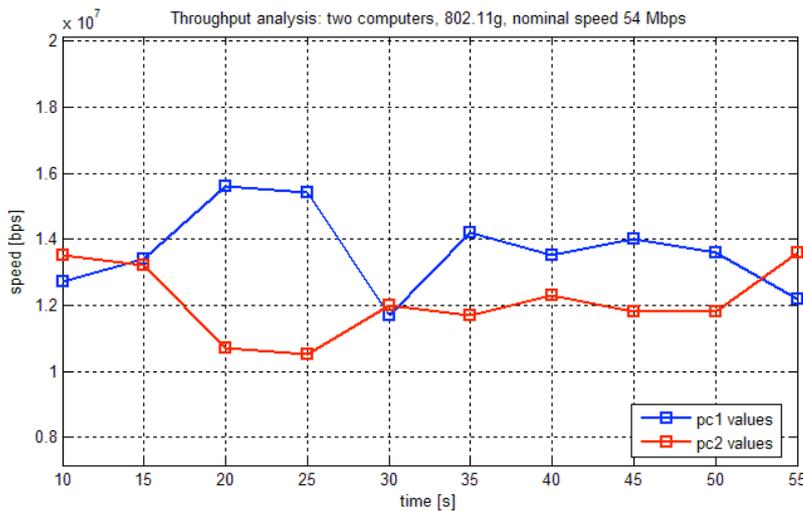
Ciò è spiegabile con diverse motivazioni: è infatti possibile che un ostacolo si sia interposto tra l'AP e la prima stazione, causando un decremento del *throughput* (es. pacchetti UDP persi) e di conseguenza l'aumento di risorse disponibili per la trasmissione della seconda stazione, che ha a sua volta risposto a tale fenomeno incrementando il suo *throughput*. Tale fenomeno si ripresenta infine al termine del test.

Inoltre, rispetto al caso precedente, i *throughput* delle due stazioni sono molto più simili.

Confrontando il traffico medio aggregato con il traffico di una singola stazione operante sul canale si ottiene nuovamente un decremento del *throughput*: a fronte di un *throughput* di 7.98Mbps per la singola stazione si ha un traffico aggregato di 7.79Mbps nel caso di due stazioni.

Infine, è possibile fare una comparazione sul comportamento dello standard 802.11b a 11Mbps rispetto all'802.11g a 12Mbps. In questo caso l'efficienza riferita al traffico medio aggregato mostra ancora una volta come la trasmissione basata su ERP-OFDM sia più efficiente della trasmissione dell'header fisico a 1 e 2 Mbps tipica dell'802.11b. Nel test B1 (802.11b, 11Mbps) si ottiene infatti un'efficienza del 53.9%, che si contrappone al 70.8% ottenuto con il test B2 (802.11g, 12Mbps).

TEST B3: 2 stazioni sul canale, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11g velocità 54Mbps



PC 1	
MIN	11.7Mbps
MAX	15.6Mbps
AVG	13.6Mbps
STD	1.26Mbps
EFF	25.2%

PC 2	
MIN	10.5Mbps
MAX	13.6Mbps
AVG	12.1Mbps
STD	1.07Mbps
EFF	22.4%

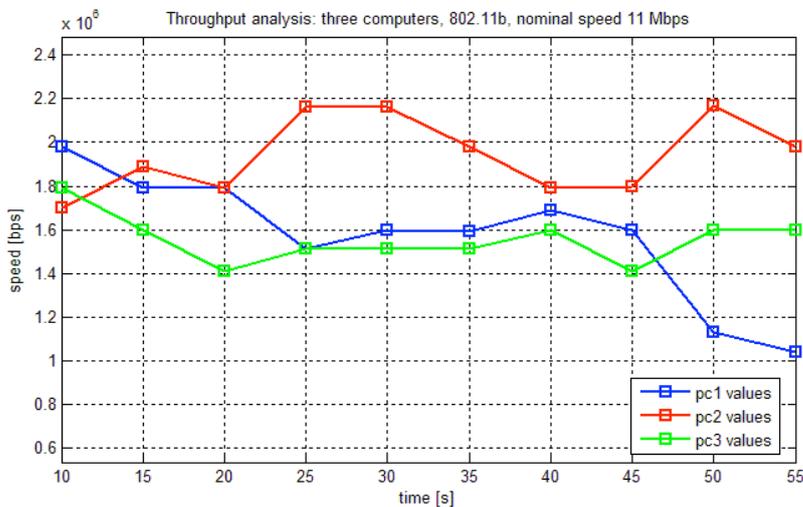
Traffico medio aggregato	
25.7Mbps	
EFF	47.6%

Anche nel test B4 si riscontrano i fenomeni precedentemente accennati, come ad esempio l'aumento di bitrate tra il 50esimo ed il 55esimo secondo per la stazione 2, corrispondente al decremento di *throughput* per la stazione 1. Valgono inoltre le considerazioni sull'efficienza fatte nel caso di una singola stazione trasmittente: anche qui al crescere della velocità nominale corrisponde una diminuzione dell'efficienza dovuta alla velocità di trasmissione costante dell'*overhead*.

4.3 Test Categoria C

Analogamente ai test di categoria B, i test di categoria C mostrano il comportamento dei singoli *throughput* di tre differenti stazioni agganciate all'AP.

TEST C1: 3 stazioni sul canale, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11b velocità 11Mbps



PC 1	
MIN	1.04Mbps
MAX	1.98Mbps
AVG	1.57Mbps
STD	291kbps
EFF	14.3%

PC 2	
MIN	1.70Mbps
MAX	2.17Mbps
AVG	1.94Mbps
STD	176kbps
EFF	17.7%

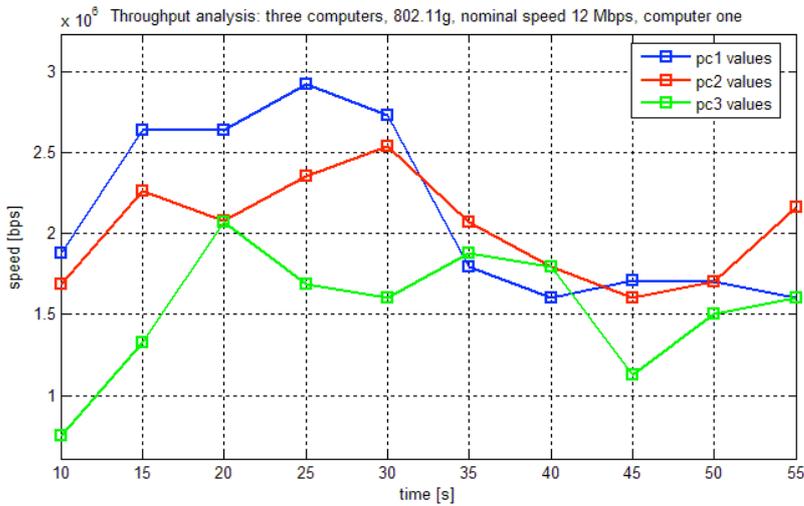
PC 3	
MIN	1.41Mbps
MAX	1.79Mbps
AVG	1.55Mbps
STD	111kbps
EFF	14.1%

Traffico medio aggregato	
5.06Mbps	
EFF	46%

Come per i test di categoria B, anche nel test C1 si nota che ai momentanei aumenti del *throughput* di una stazione corrispondono decrementi di un'altra stazione.

L'analisi del *throughput* aggregato inoltre mostra l'ulteriore decremento che si ottiene all'aumentare del numero delle stazioni. Si ha infatti un'efficienza del 46%, contro il 53.9% (test B1) ottenuto con due stazioni ed il 55.9% (test A2) ottenuto con una singola stazione.

TEST C2: 3 stazioni sul canale, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11g velocità 12Mbps



PC 1	
MIN	1.60Mbps
MAX	2.92Mbps
AVG	2.12Mbps
STD	538kbps
EFF	17.7%

PC 2	
MIN	1.60Mbps
MAX	2.54Mbps
AVG	2.02Mbps
STD	317kbps
EFF	16.9%

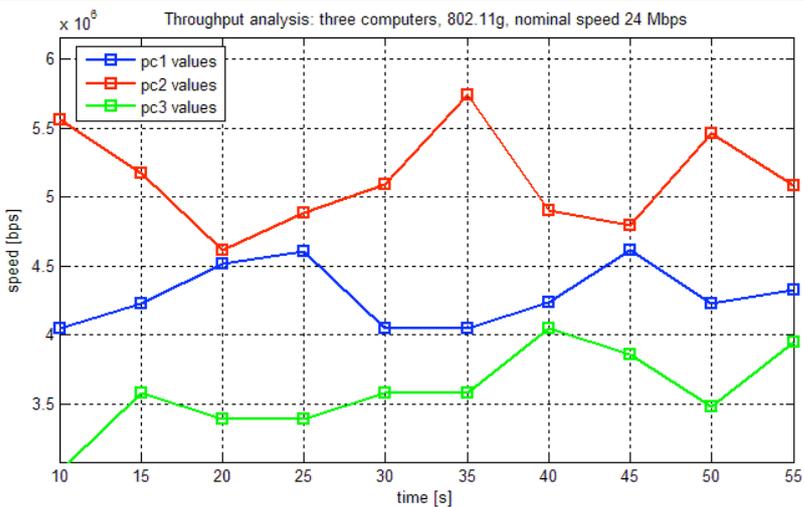
PC 3	
MIN	755kbps
MAX	2.07Mbps
AVG	1.53Mbps
STD	383kbps
EFF	12.8%

Traffico medio aggregato	
5.67Mbps	
EFF	47.3%

Dal test C2 emerge nuovamente il fenomeno del canale afflitto da rumore e disturbi, che in alcuni istanti (vedi media al 45esimo secondo) determina una sensibile diminuzione del *throughput* per tutte le stazioni.

Si confermano tuttavia le analisi precedenti, ovvero la superiorità in termini di efficienza della versione 802.11g (47.3% del test C2 802.11g contro il 46% del test C1 802.11b) e la riduzione del *throughput* all'aumentare del numero delle stazioni (70.8% per 2 stazioni dal test B2, 47.3% per 3 stazioni dal test C2). In ogni caso non è affidabile effettuare un confronto diretto con il caso ad 1 singola stazione (test A4), in quanto il test risulta ampiamente sotto il suo *throughput* medio teorico.

TEST C3: 3 stazioni sul canale, velocità fissa impostata dall'AP, 802.11g velocità 24Mbps



PC 1	
MIN	4.05Mbps
MAX	4.62Mbps
AVG	4.29Mbps
STD	223kbps
EFF	17.9%

PC 2	
MIN	4.62Mbps
MAX	5.74Mbps
AVG	5.13Mbps
STD	358kbps
EFF	21.4%

PC 3	
MIN	3.01Mbps
MAX	4.05Mbps
AVG	3.59Mbps
STD	306kbps
EFF	54.2%

Traffico medio aggregato	
13.01Mbps	
EFF	54.2%

Anche il test A3 mostra un decremento del *throughput* rispetto al caso di una singola stazione: 59.3% del test A5 contro il

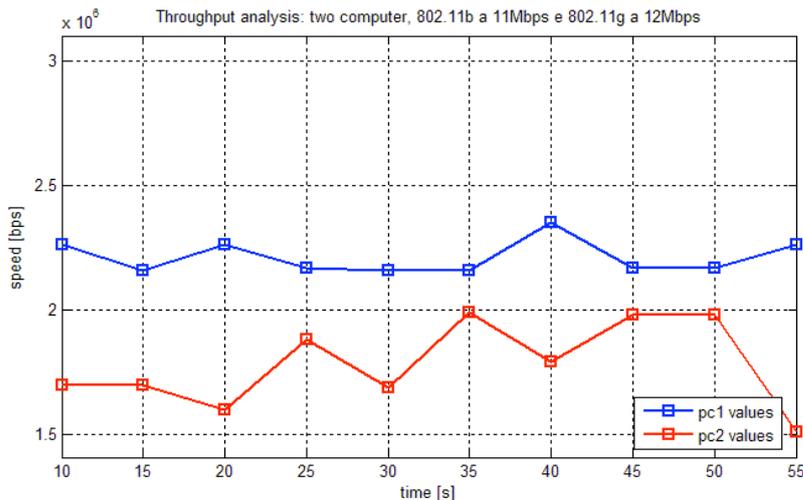
54.2% del test C3.

4.4 Test Categoria D

I test di **categoria D** fanno riferimento a due stazioni presenti sul canale e agganciate allo stesso AP. La differenza rispetto ai test precedenti riguarda le velocità delle singole stazioni; infatti, la loro bit-rate viene impostata manualmente sulle NIC delle stazioni anziché essere impostata dall'AP. In tal caso l'AP annuncia come disponibili (mediante il beacon) tutte le velocità di entrambi gli standard.

I test di questa categoria simulano quindi ciò che accade in un ambiente reale, quando più stazioni operanti a diverse velocità si trovano a cooperare all'interno dello stesso BSS.

TEST D1: 2 stazioni sul canale, velocità miste impostate dalle stazioni, prima stazione 802.11b 11Mbps, seconda stazione 802.11g 12Mbps



**PC 1 = 11Mbps,
reali 6Mbps**

MIN	2.16Mbps
MAX	2.35Mbps
AVG	2.21Mbps
STD	60kbps

PC 2 = 12Mbps

MIN	1.51Mbps
MAX	1.99Mbps
AVG	1.78Mbps
STD	170kbps

**Traffico medio
aggregato**

3.99Mbps

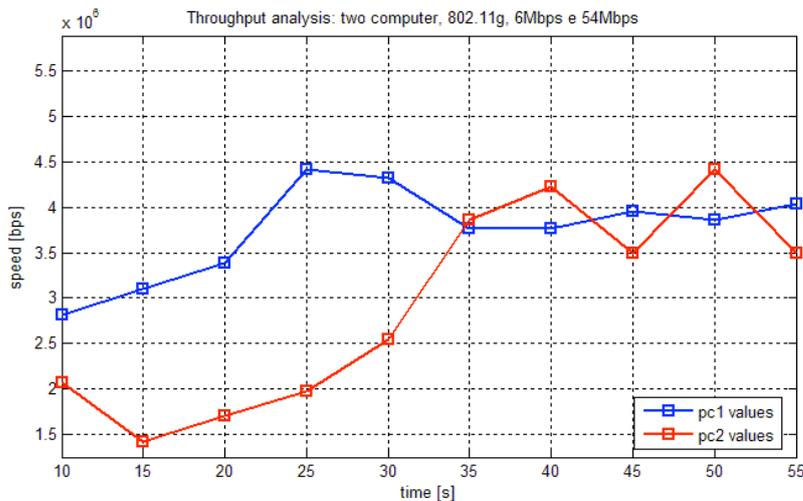
Nel test D1 le stazioni coinvolte sono state impostate sulle **due diverse versioni dello standard**: la stazione 1 è settata sulla versione 802.11b alla velocità di 11Mbps mentre la seconda stazione è settata sulla versione 802.11g alla velocità di 12Mbps.

Dopo l'analisi è stato verificato che le schede di rete avessero lavorato effettivamente secondo le impostazioni assegnate ma per la stazione 1 (inizialmente impostata a 802.11b 11Mbps) **la scheda si era automaticamente portata sulla versione 802.11g alla velocità di 6Mbps**. Tale comportamento si è presentato anche in successive misurazioni effettuate per comprenderne il motivo. Questo problema è probabilmente legato al *driver* della scheda di rete stessa, che impedisce il corretto settaggio della velocità della scheda in presenza di diverse versioni dello standard. Essa si è posta in modalità 802.11g adattandosi alle altre stazioni presenti sul canale e alle velocità indicate come disponibili dai beacon dell'AP.

Avendo quindi una delle stazioni operante alla velocità di 6Mbps, si ottiene un traffico aggregato di 3.99Mbps, decisamente minore del caso di due stazioni a 12Mbps (tr. aggregato pari a 7.79Mbps, test B2).

Si è in grado di dimostrare quindi in ogni caso come la presenza di stazioni a diverse velocità comporti una riduzione drastica dell'efficienza dell'intero sistema.

TEST D2: 2 stazioni sul canale, velocità miste impostate dalle stazioni, prima stazione 802.11g 6Mbps, seconda stazione 802.11g 54Mbps



PC 1 = 6Mbps	
MIN	2.82Mbps
MAX	4.42Mbps
AVG	3.75Mbps
STD	510kbps
EFF	62.4%

PC 2 = 54Mbps	
MIN	1.41Mbps
MAX	4.42Mbps
AVG	2.92Mbps
STD	1.11Mbps
EFF	5.41%

Traffico medio aggregato	
6.67 Mbps	

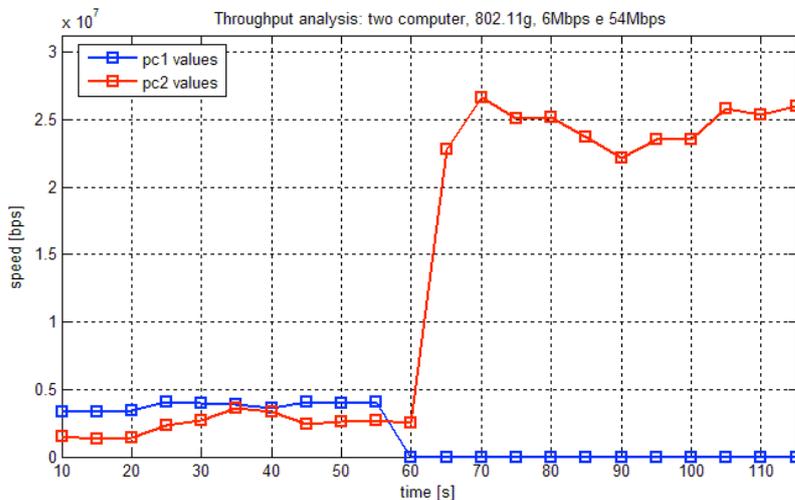
Il test D2 evidenzia il comportamento della rete in presenza di due stazioni operanti rispettivamente alla massima e alla minima velocità permessa dalla versione 802.11g dello standard.

Si evince chiaramente che, pur operando ad una velocità nominale di trasferimento dei dati 9 volte maggiore, la seconda stazione (54Mbps) è fortemente limitata nel suo *throughput* dalla presenza della stazione a 6Mbps.

Infatti, il tempo impiegato per trasmettere un frame a 6Mbps è di 2282.5 μ s (v. tabella 4), mentre il tempo impiegato per trasmettere un frame a 54Mbps è di 446.95 μ s, e quindi il frame a 6Mbps occupa il canale per la maggior parte del tempo.

Infine il traffico medio aggregato è drasticamente inferiore rispetto al caso di due stazioni operanti a 54Mbps (6.67Mbps contro 25.7Mbps del test B3).

TEST D3: 2 stazioni sul canale, velocità miste impostate dalle stazioni, prima stazione 802.11g 6Mbps per 60 secondi, seconda stazione 802.11g 54Mbps per 120 secondi



PC 1 = 6Mbps	
MIN	3.30Mbps
MAX	4.05Mbps
AVG	3.75Mbps
STD	320kbps
EFF	62.5%

PC 2 = 54Mbps	
MIN	1.32Mbps
MAX	26.6Mbps
AVG	13.5Mbps
STD	11.4Mbps
EFF	24.9%

Traffico medio aggregato fase 1	
6.17Mbps	

Traffico medio aggregato fase 2	
24.5Mbps	

Il comportamento descritto per il test D2 è maggiormente visibile dal test D3. In tal caso la misurazione si è protratta per 120 secondi, sempre escludendo la prima e l'ultima misura.

Durante il primo minuto di simulazione entrambe le stazioni hanno trasferito dati sul canale, mentre nel secondo minuto solo la seconda stazione (54Mbps) è rimasta attiva.

Al termine del trasferimento dati della prima stazione, la seconda stazione è libera di trasmettere al suo *throughput* massimo ottenibile, dal momento che non sono più presenti i frame della prima stazione a "monopolizzare" le risorse.

Tali conclusioni si evincono dal traffico aggregato, calcolato in modo separato per le 2 fasi del test. Durante la fase 1 (primi 60 secondi) si ottiene un *throughput* aggregato pari a 6.17Mbps, drasticamente inferiore a quello del test B3 (25.7Mbps, due stazioni operanti a 54Mbps), e analogo a quello del test D2 (6.67Mbps). Durante la fase 2, la seconda stazione è libera

di trasmettere, e quindi il *throughput* medio aggregato (che è composto solo ed esclusivamente dal traffico della seconda stazione) sale a 24.5Mbps, avvicinandosi quindi ai risultati ottenuti nel test B3.

5. CONCLUSIONI

Velocità nominale	Throughput medio 1 stazione	Traffico aggregato 2 stazioni	Traffico aggregato 3 stazioni
11 Mbps	6.15 Mbps	5.93 Mbps	5.06 Mbps
12 Mbps	7.98 Mbps	7.79 Mbps	5.67 Mbps
24 Mbps	14.2 Mbps	-	13.01 Mbps
54 Mbps	26.4 Mbps	25.7 Mbps	-

Tabella 5

La presente esperienza ha dimostrato come le velocità nominali degli standard 802.11b e 802.11g si discostino dal valore di *throughput* ottenibile sperimentalmente a livello *UDP*.

Durante la sperimentazione sono quindi emersi i seguenti fattori:

- il peggioramento del *throughput* di tutte le stazioni in presenza anche di una singola stazione a bassa velocità;
- la diminuzione del *throughput* generale all'aumentare del numero delle stazioni, a causa dell'aumento della *congestion window* (v. tabella 5);
- la maggiore efficienza dell'*ERP-OFDM* rispetto ad una trasmissione 802.11b (in condizioni di bitrate comparabili);
- la presenza di disturbi transitori sul canale che causano il crollo contemporaneo del *throughput* di tutte le stazioni.

Negli anni si è passati dall'utilizzo di una tecnica di trasmissione a livello fisico di tipo *DS/SS* alla tecnica *OFDM*. Tale passaggio ha permesso, a parità di occupazione di banda, di migliorare le prestazioni ottenibili innalzando la bitrate di livello fisico di circa 5 volte rispetto a quella ottenibile con la tecnica *DS/SS* dell'802.11b (ovviamente considerando delle condizioni di canale adatte a tale trasmissione).

L'incremento di bitrate si è ripercosso a livello *UDP* in un aumento di *throughput*, che presenta però un "collo di bottiglia" dovuto alla trasmissione degli *header*: ammesso che sia possibile incrementare ulteriormente la velocità di livello fisico (e quindi quella della parte dati del frame 802.11), si otterrebbe un effetto controproducente dal punto di vista dell'efficienza, che si ridurrebbe ulteriormente a causa della velocità fissa (a 6 Mbps per la versione *g*) a cui viene trasmesso l'*header*.

Pertanto per ottenere *throughput* più elevati bisognerebbe agire su diversi fronti (e non solo aumentando la velocità di trasmissione dei dati), considerando ad esempio l'eventualità di modificare la velocità di trasmissione degli *header* a livello fisico.

Per incrementare invece la bitrate fisica di trasmissione sul canale sarebbe possibile sostituire la tecnica di trasmissione con altre metodologie maggiormente efficienti, come ad esempio la tecnica *MC-CDMA* (*Multi-Carrier CDMA*), costituita dall'adozione mista di *OFDM* e *DS/SS*, oppure la tecnica *MIMO*, che prevede l'utilizzo di più antenne in trasmissione e un uguale numero di antenne in ricezione. In questo modo si implementa la diversità spaziale, il cui scopo è ricevere le singole repliche prodotte del canale multipath, al posto di ricevere la loro somma.