



Caratterizzazione di un sistema in ponte radio a 60 GHz

Massimo Celidonio, Lorenzo Pulcini



Sommario

1. Premessa	3
2. Analisi delle caratteristiche fisiche del collegamento	5
3. Vantaggi e svantaggi dei collegamenti a 60 GHz	7
4. Caratteristiche tecniche degli apparati impiegati nei test.....	10
5. Descrizione del test-bed approntato	12
6. Descrizione ed analisi degli strumenti di misura e degli applicativi software impiegati nei test	15
7. Confronto ed analisi delle prove sperimentali	17
7.1 Simulazione di una situazione di link failure	18
7.2 Analisi del comportamento del collegamento radio con traffico di livello 2.....	24
7.3 Analisi del comportamento del collegamento radio con traffico TCP/UDP.....	27
8. Possibili temi di sviluppo futuri.....	29
9. Appendice	30
10. Riferimenti.....	44
11. Ringraziamenti.....	44

1. Premessa

Il presente studio riguarda l'analisi delle caratteristiche tecniche e la valutazione delle relative prestazioni di un sistema di comunicazione wireless bidirezionale a banda larga, operante secondo una topologia di tipo punto-punto nella banda dei 60 GHz (59.375 – 62.225 GHz).

Tale banda può risultare di notevole interesse per il futuro delle comunicazioni radio *broadband*, in quanto mira a rappresentare una valida alternativa alle sempre più congestionate bande dei 2.4 e 5 GHz dei sistemi Wi-Fi ed HiperLAN. Pur conservando il vantaggio di mantenere una natura *unlicensed*, infatti, la banda in questione presenta un'ampia disponibilità di frequenze utilizzabili per applicazioni multimediali che ne favorirebbero l'integrazione con le reti di nuova generazione, garantendo ampia flessibilità e velocità di trasmissione dell'ordine dei 100 Mbps, a fronte di costi infrastrutturali ridottissimi.

Dalla figura 1 si può notare come già dal 2001 l'FCC statunitense (*Federal Communications Commission*) abbia riservato ben 7 GHz per applicazioni *unlicensed* intorno ai 60 GHz, al pari del Giappone che prevede l'impiego del range di frequenze 54,25-59 GHz per un uso licenziato con massima potenza di uscita dal trasmettitore di 100 mW e minimo guadagno di antenna di 20 dBi, ed i 7 GHz compresi nell'intervallo 59-66 GHz per un uso non licenziato con massima potenza di uscita dal trasmettitore di 10 mW e massimo guadagno di antenna di 47 dBi.

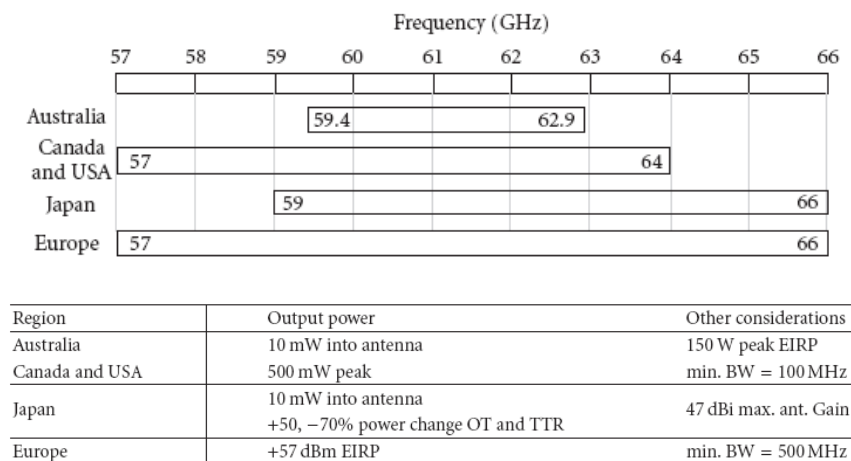


Fig. 1 – Disponibilità di spettro intorno ai 60 GHz in alcuni paesi, con relativi requisiti di emissione imposti (Fonte: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*)

Sulla scia di quanto fatto in questi paesi, anche in Europa, dove al momento la banda 57-66 GHz è riservata ad applicazioni mobili in generale, senza specifiche raccomandazioni o decisioni, si sta pensando di favorirne un uso non licenziato, tenendo conto che, come asserito dal CEPT nella Recommendation T/R 22-03, “*the high-frequency re-use achievable in the oxygen absorption band reduces the requirement for sophisticated frequency planning techniques and offers the possibility of a pan-European deregulated telecommunications environment for various low power, low cost, short-range applications*”.

Al momento, sono due le organizzazioni che si stanno interessando allo sviluppo di uno standard operante a queste frequenze:

- a) l'IEEE 802.15.3, che ha costituito il Task Group 3c (IEEE 802.15.3c) impegnato nello sviluppo di uno strato fisico alternativo MMW-based (*millimeter-wave*) per l'esistente standard 802.15.3 del 2003 per le reti WPAN (*Wireless Personal Area Networks*);
- b) la WiMedia alliance, un'associazione industriale, interessata all'introduzione nello standard della tecnologia OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), allo scopo di ottenere velocità dati dell'ordine del gigabit al secondo.

In base a quanto riportato nel Piano Nazionale di Ripartizione Frequenze, attualmente in Italia la banda 61-64 GHz risulta destinata alle applicazioni industriali, scientifiche e medicali (ISM), e quindi la sua natura di gamma di frequenze condivise, per le quali non occorre una specifica assegnazione ma, al contrario, possono essere impiegate da ciascun utilizzatore interessato ad implementare servizi operanti senza alcuna protezione dai disturbi generati da eventuali altri utilizzatori, ne determina la conseguenza che il suo impiego risulta soggetto al semplice rilascio di un'autorizzazione generale da parte dell'Autorità.

Di contro occorre considerare che, l'attenuazione supplementare dovuta all'assorbimento di potenza dei segnali trasmessi a queste frequenze da parte dell'ossigeno presente nell'atmosfera, suggerisce un impiego di tali frequenze tramite apparati di comunicazione a corto raggio (< 1 Km), rendendoli adatti all'implementazione di applicazioni del tipo di quelle descritte in figura 2 per la classe di utenza *business*, e come alternativa a collegamenti in fibra o DSL per garantire la copertura wireless a banda larga dell'ultimo miglio per la classe di utenza *consumer*.

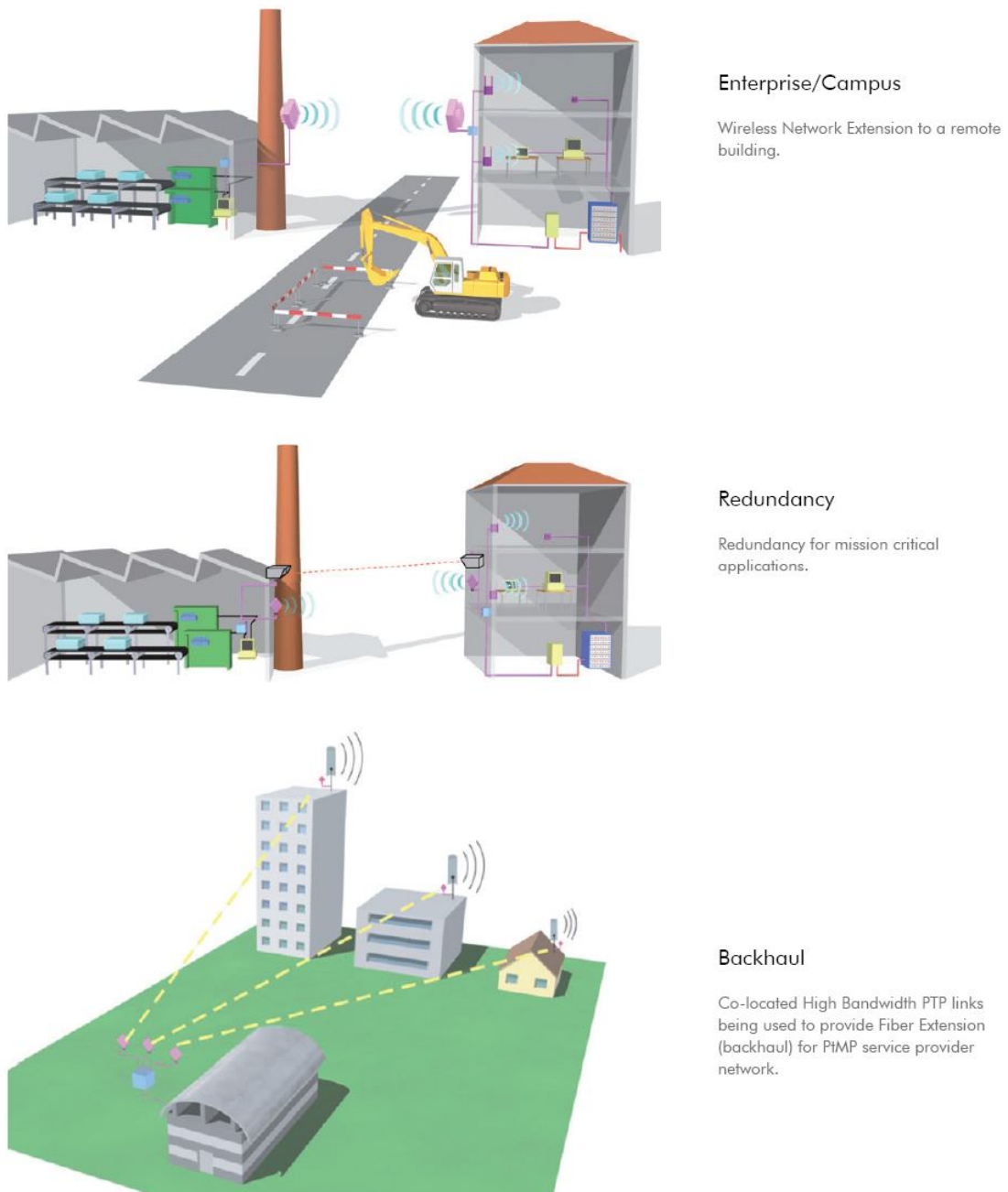


Fig. 2 – Possibili applicazioni dei collegamenti punto-punto a 60 GHz per applicazioni di tipo *business* (Fonte: *Huber Suhner* – www.hubersuhner.com)

2. Analisi delle caratteristiche fisiche del collegamento

Supponendo di trovarsi in condizioni ideali, e cioè:

- 1) nello spazio circostante il collegamento non sono presenti altri corpi, oltre alle due antenne di trasmissione e ricezione;
- 2) lo spazio è isotropo e non dissipativo;

il collegamento Hertziano in esame si comporta come un canale perfetto, e cioè in grado di introdurre solo un semplice ritardo dovuto alla velocità di propagazione del campo elettromagnetico nel percorrere la distanza tra trasmettitore e ricevitore, oltre ad una riduzione di ampiezza del segnale trasmesso, valutabile in termini di attenuazione disponibile secondo la nota formula:

$$A_{d\text{ dB}} = 32.4 + 20 \log_{10} D_{\text{km}} + 20 \log_{10} f_{\text{p MHz}} - G_{\text{T dB}} - G_{\text{R dB}}$$

con:

D = distanza del collegamento tra Tx e Rx

f_p = frequenza portante del collegamento

G_T = guadagno dell'antenna trasmittente

G_R = guadagno dell'antenna ricevente

Dal momento che nell'atmosfera non può essere ritenuta valida l'ipotesi di non dissipatività nel caso di trasmissioni che interessano la gamma di frequenze superiore ai 10 GHz, occorre tener presenti i seguenti contributi, all'attenuazione totale, che subisce il segnale nel percorrere la distanza tra la stazione trasmittente e quella ricevente:

- a) contributo supplementare dovuto all'assorbimento da parte dell'ossigeno: il suo effetto inizia a manifestarsi a frequenze superiori ai 30 GHz, con un massimo proprio intorno ai 60 GHz (vedi fig. 3);
- b) contributo supplementare dovuto alla concentrazione di vapor d'acqua presente nell'atmosfera: sicuramente meno importante di quello fornito dall'ossigeno alle frequenze di nostro interesse, e che raggiunge un massimo alla frequenza di circa 22 GHz;
- c) contributo supplementare dovuto alla eventuale presenza di pioggia lungo il collegamento: tale contributo è soggetto a rapida e casuale variazione nel tempo durante i periodi di pioggia, ed è dovuto all'assorbimento di potenza (supposto uniforme per tutti i valori di frequenza entro la banda di interesse) da parte delle gocce di pioggia, nel caso in cui il loro diametro risulti di dimensione paragonabile a quella della lunghezza d'onda del segnale.

Da un punto di vista matematico, l'attenuazione risulta direttamente proporzionale alla lunghezza del collegamento (L) soggetto a fenomeni di piovosità e alla intensità di precipitazione sul collegamento (r_o) misurata in mm/h, attraverso due costanti (K e α) dipendenti dalla frequenza portante del segnale e da grandezze fisiche specifiche della pioggia quali la temperatura, la forma e la distribuzione del diametro delle gocce di pioggia, la velocità del vento, ecc.

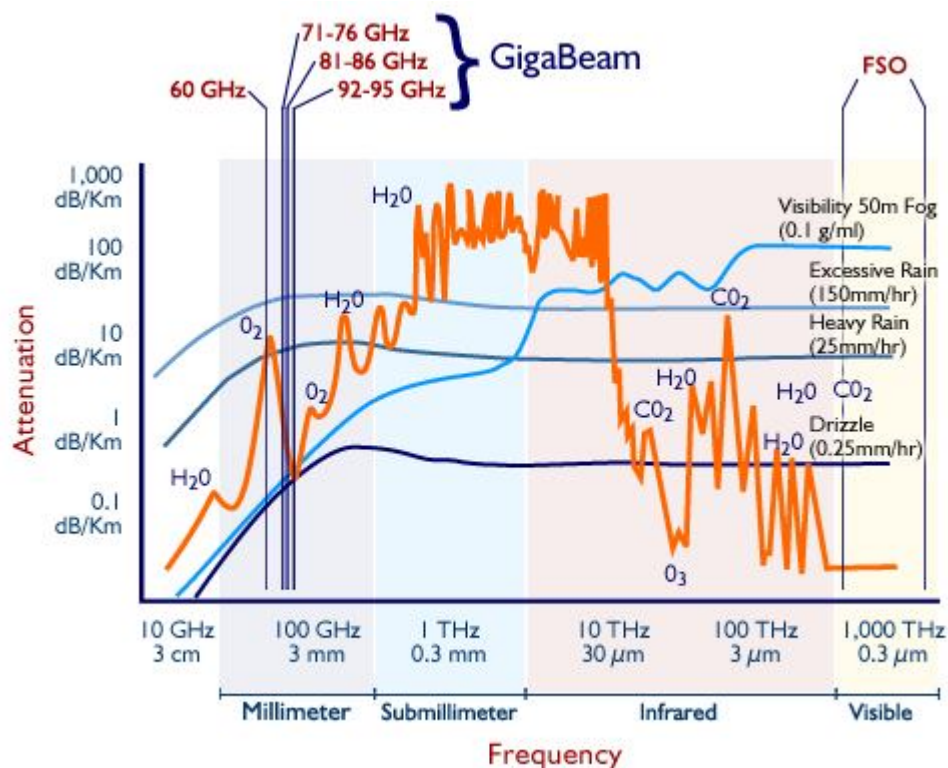


Fig. 3 – Attenuazione supplementare in funzione della frequenza del collegamento (*Fonte: GigaBeam Corporation - www.gigabeam.com/technology.cfm*)

3. Vantaggi e svantaggi dei collegamenti a 60 GHz

L'uso che si è fatto fino ad oggi di questo tipo di apparati ha interessato principalmente le comunicazioni *satellite-to-satellite*, specie in ambito militare, in quanto la naturale propensione dell'ossigeno contenuto nell'atmosfera terrestre ad assorbire energia elettromagnetica a queste frequenze svolge una funzione di barriera naturale atta a prevenire intercettazioni *earth-based*.

La stessa caratteristica, comunque, può rappresentare un aspetto vantaggioso anche nel caso di impiego come ponte radio terrestre per collegamenti di *backhaul* tra edifici non eccessivamente distanti, perché il fenomeno di assorbimento cui si è accennato può provocare:

- 1) rapida diminuzione del rischio di interferire con altri collegamenti a 60 GHz posti nelle vicinanze, all'aumentare della distanza tra trasmettitore interferito e trasmettitore interferente;
- 2) conseguente possibilità di un elevato grado di “riuso frequenziale” per collegamenti operanti nella stessa area geografica;
- 3) elevato grado di sicurezza, specie nel caso di trasmissione di dati sensibili, grazie ad un minor rischio di intercettazione.

La figura 4 fornisce un chiaro esempio di quanto detto, mostrando una comparazione tra il comportamento del livello di potenza del segnale trasmesso in funzione della distanza percorsa, sia nel caso di sistema in ponte radio operante su frequenze che non risentono dell'effetto di assorbimento dell'ossigeno (ad esempio Wi-Fi a 2.4 GHz), sia nel caso di sistema in ponte radio operante su frequenze che ne risentono.

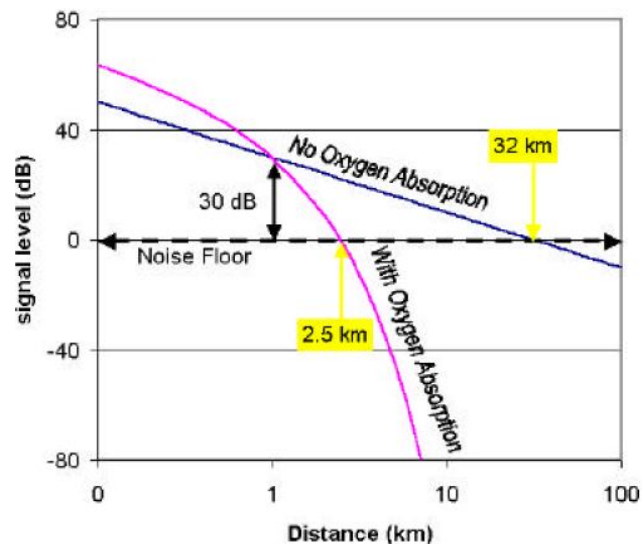


Fig. 4 – Effetto dell'assorbimento dell'ossigeno sulla propagazione di segnali EM (Fonte: YDI Wireless – www.ydi.com)

Appare chiaro come nel primo caso occorre percorrere circa 32 km prima di vedere il segnale trasmesso raggiungere un livello di potenza così basso da essere confuso con il rumore, mentre nel secondo caso ne bastano poco più di 2. Da ciò consegue come sia possibile installare un maggior numero di ponti radio a 60 GHz all'interno di una stessa area rispetto, ad esempio, a ponti radio a 2.4 GHz, senza doversi preoccupare di problemi di interferenza.

Come accennato in precedenza, un altro aspetto importante da tener presente nella caratterizzazione delle prestazioni attese da dispositivi operanti a frequenze dell'ordine dei 60 GHz è legata certamente ai fenomeni atmosferici presenti lungo il collegamento.

In particolare, il tasso di piovosità risulta maggiormente limitante rispetto all'assorbimento dell'ossigeno.

Osservando la figura 5, infatti, si può notare come già nel caso di regioni con moderata piovosità l'attenuazione dovuta alla pioggia risulta circa il doppio di quella dovuta all'assorbimento dell'ossigeno, per divenire quasi il triplo nel caso di regioni sottoposte a forte piovosità.

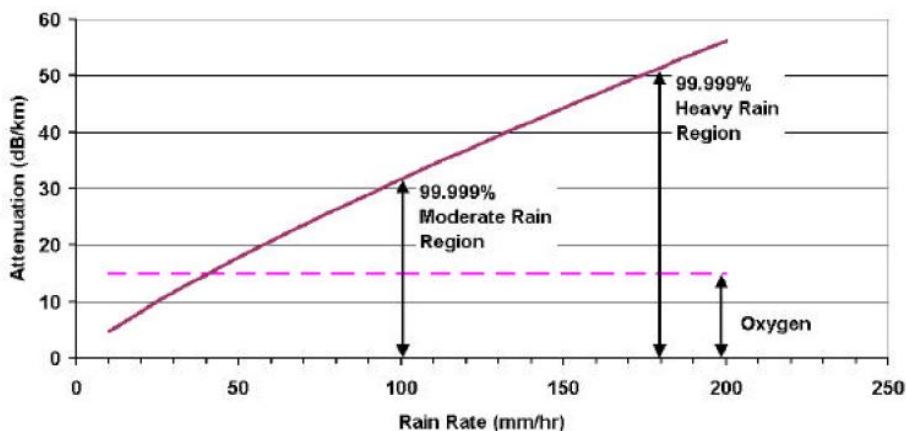














Fig. 5 – Attenuazione supplementare in funzione del tasso di piovosità (*Fonte: YDI Wireless – www.ydi.com*)

Sulla base di tali osservazioni, la valutazione delle prestazioni del ponte radio oggetto di questo studio è stata effettuata anche attraverso un confronto tra i risultati ottenibili nel caso di funzionamento in condizioni atmosferiche ottimali e quelli ottenibili in condizioni di piovosità più o meno accentuata, compatibilmente con il periodo stagionale in cui è stata realizzata la campagna di misura e dell'arco temporale entro cui è stato possibile disporre degli apparati forniti dalla società manifatturiera.

A conferma di quanto detto, si riporta in figura 6 la dipendenza del comportamento del dispositivo in esame dalle condizioni meteorologiche, così come dichiarato dalla casa costruttrice nel *data sheet* dell'apparato, evidenziando come l'unico evento atmosferico che può influenzare in maniera consistente le prestazioni ottenibili appare essere la presenza di eventi piovosi nell'area interessata dal collegamento, la cui intensità può provocare una riduzione della massima distanza raggiungibile al più alto livello di *throughput* consentito.

Meteorological influences

Rain			
	800 m	700 m	500 m
Fog			
	800 m	800 m	800 m
Snow			
	800 m	800 m	800 m
Temperature	 -40		 +50
	800 m	800 m	800 m

Link distance end availability depend only on regional rain rate.

Fig. 6 – Influenza degli eventi atmosferici sulle prestazioni del ponte radio (*Fonte: Huber Suhner – www.hubersuhner.com*)

4. Caratteristiche tecniche degli apparati impiegati nei test

L'apparato utilizzato per svolgere i test è il modello *Sencity Link* fornito dalla società Huber Suhner. Tale dispositivo rappresenta un terminale di rice-trasmissione operante nella banda 59.475-62.325 GHz secondo la tecnica di duplexing FDD con modulazione di tipo QPSK.

L'antenna direttiva, integrata nell'unità esterna (ODU), presenta un guadagno di 37 dBi ed è alimentata tramite un collegamento PoE (*Power over Ethernet*). Ciò ne semplifica la gestibilità, sia

da un punto di vista installativo, in quanto generalmente i punti in cui viene posizionata l'antenna (tetto di un edificio) non sono frequentemente dotati di alimentazione elettrica, sia per quanto riguarda la capacità di accesso all'interfaccia di configurazione dei parametri trasmissivi, ottenibile tramite una comune interfaccia *web-based* (vedi fig. 7).

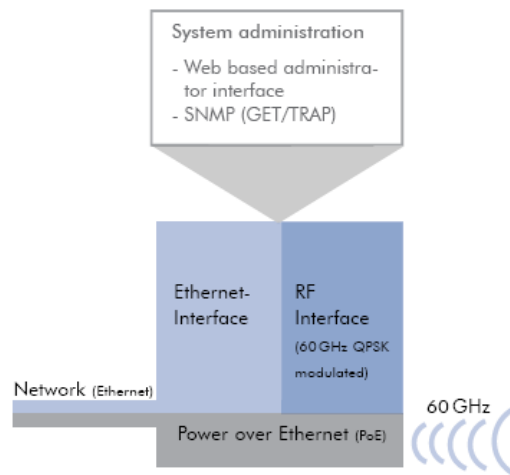


Fig. 7 – Diagramma a blocchi del sistema Sencity Link (Fonte: Huber Suhner – www.hubersuhner.com)

Le prestazioni dichiarate dalla casa costruttrice indicano la possibilità di raggiungere i 100 Mbps in modalità full-duplex, fino ad un massimo di 800 m. ed in condizioni operative comprese tra i -45°C ed i $+55^{\circ}\text{C}$, grazie anche ad un passo di canalizzazione di circa 64 MHz.

Per ragioni di disponibilità di siti, il ponte radio è stato installato ad una distanza di circa 260 m. con un leggero dislivello tra le due stazioni terminali (circa 20 m.), ma comunque in presenza di visibilità ottica, aspetto fondamentale da tener presente data la natura del canale a 60 GHz di presentare un comportamento che risulta scarsamente influenzato da fenomeni di *multipath*, ma fortemente dipendente dalla presenza di condizioni di *Line of Sight* (LOS) o *Non Line of Sight* (NLOS) tra trasmettitore e ricevitore, e quindi in condizioni di funzionamento tali che le conseguenti prestazioni possono essere inficiate solo da eventuali eventi piovosi.

Applicando la formula del calcolo dell'attenuazione in spazio libero, con i parametri forniti, risulta un'attenuazione attesa sul collegamento, in condizioni meteorologiche ottimali, di:

$$A_{d\text{ dB}}=32.4+20\log_{10}0.26+20\log_{10}61.250=32.4-11.67+95.74=116.47\text{ dB} \quad (1)$$

Dal *data-sheet* dell'apparato risulta che la potenza di uscita del trasmettitore, cioè quella disponibile in ingresso all'antenna trasmittente, è di -2.0 dBm. Ciò comporta che, tenendo conto del guadagno di antenna e delle perdite dovute alla connessione del trasmettitore con l'antenna trasmissiva, valutabili intorno ai 5 dB, l'EIRP (*Equivalent Isotropically Radiated Power*) ottenibile in uscita dall'antenna trasmittente è pari a circa 30 dBm (1 Watt), cioè un valore simile a quello ammesso per i collegamenti HiperLAN nella banda dei 5 GHz, con la differenza che essendo questi ad un valore di frequenza portante inferiore, risentono di una minor attenuazione di tratta, con la conseguenza di riuscire a coprire distanze ben maggiori a parità delle restanti condizioni propagative.

Tenendo conto del valore dell'attenuazione $A_{d\text{ dB}}$ calcolata in (1), del guadagno d'antenna di 37 dB sia in trasmissione che in ricezione, delle perdite dovute al collegamento del trasmettitore con l'antenna trasmittente, e specularmente di quelle dovute al collegamento del ricevitore con l'antenna ricevente (stimabili intorno ai 5 dB ciascuna), e dei circa 4 dB aggiuntivi dovuti all'attenuazione dell'ossigeno (valutata in circa 16 dB/km, come è possibile evincere dalla figura 3), si ottiene una potenza in ricezione di circa -58 dBm, cioè un valore ben al di sotto della soglia dei -72 dBm dichiarata dalla casa costruttrice per avere un BER (*bit error rate*) di 10^{-6} , con conseguente margine di circa 14 dB di protezione da eventuali ulteriori affievolimenti del segnale dovuti alla presenza di attenuazione supplementare dovuta a pioggia.

5. Descrizione del test-bed approntato

Teatro della sperimentazione è stato la sede del Ministero dello Sviluppo Economico (ex Comunicazioni) dell'EUR.

Lo schema del collegamento è riportato in figura 8.

Le due stazioni terminali del ponte radio sono state installate sulla Palazzina A del complesso ministeriale e sulla Palazzina K della sede delle Poste Italiane di Viale Europa, per poi essere collegate, tramite link in fibra ottica, al laboratorio di rete multiaccesso multiservizio IP LAB che la FUB ha realizzato presso l'ISCOM (Istituto Superiore delle Comunicazioni) per consentire lo svolgimento di attività riguardanti la parte di rete che va dalla sezione di accesso alla sezione *core*.

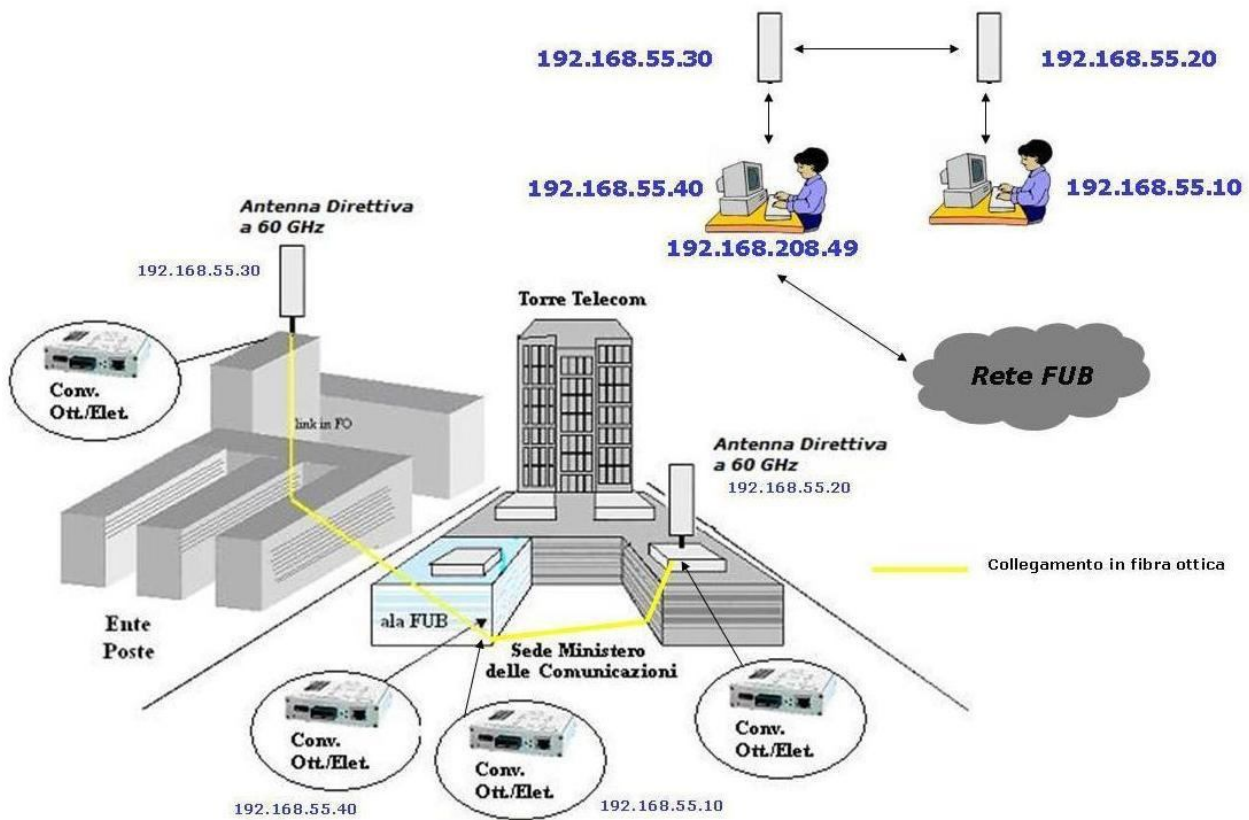


Fig. 8 – Schema del collegamento in ponte radio realizzato

All'interno del laboratorio sono state predisposte postazioni utente, gestibili anche da remoto tramite l'impiego della rete FUB esistente, attraverso le quali è stato possibile sviluppare:

- a) test di analisi dei parametri prestazionali del collegamento radio realizzato, tramite l'impiego di *tools* di misura *open source*, a riga di comando, quali *Iperf*, che, grazie alla sua flessibilità, permette di misurare la massima velocità di trasmissione raggiungibile in connessioni di tipo TCP o UDP, anche attraverso la modulazione di vari parametri di rete (*TCP windows size*, *Maximum Transmission Unit*, ecc.), fornendo come output rapporti su *bandwidth*, *jitter* e *datagram loss* del collegamento;
- b) test di misura del *throughput*, *latency* e *frame loss* sul collegamento, valutati a livello ethernet, cioè a livello 2 della pila ISO/OSI, tramite l'impiego dello strumento di misura SmartBits, capace di generare traffico in modo continuo su una interfaccia *fast ethernet* connessa ad uno dei due lati del link, per poi ricevere lo stesso traffico su una seconda interfaccia *fast ethernet* connessa all'altro capo del link, allo scopo di sottoporlo ad un

conseguente processamento nel tentativo di misurare gli indici prestazionali indicati dall'utente in fase di configurazione del test;

- c) applicazioni video basate sul paradigma *client-server*, attraverso il quale un utente della LAN interna al laboratorio richiede la visione di un opportuno filmato al *video-server* posizionato dalla parte opposta del collegamento, e riceve da questo il flusso video richiesto passando attraverso il ponte radio in esame.

Il sistema è stato dapprima analizzato in modalità *stand-alone*, anche in presenza di pioggia, e ne sono state valutate le prestazioni attraverso la misura di parametri oggettivi (throughput, perdita di pacchetto, jitter). Successivamente è stato integrato con la rete presente nel laboratorio IP LAB (costituita da router Cisco nella sezione d'accesso, e router Juniper, in configurazione *mesh*, nella sezione *core*, tutti connessi tra loro tramite collegamenti in fibra ottica), con l'intento di valutarne la capacità di integrazione con reti di nuova generazione (simulazione dell'impiego del ponte radio come collegamento di *backup* nel caso di presenza di un *link-failure* sul collegamento primario in fibra ottica) e la susseguente attitudine al trasporto di servizi che necessitano il supporto di specifici requisiti di banda e di soddisfacimento di opportuni parametri prestazionali (vedi fig. 9).

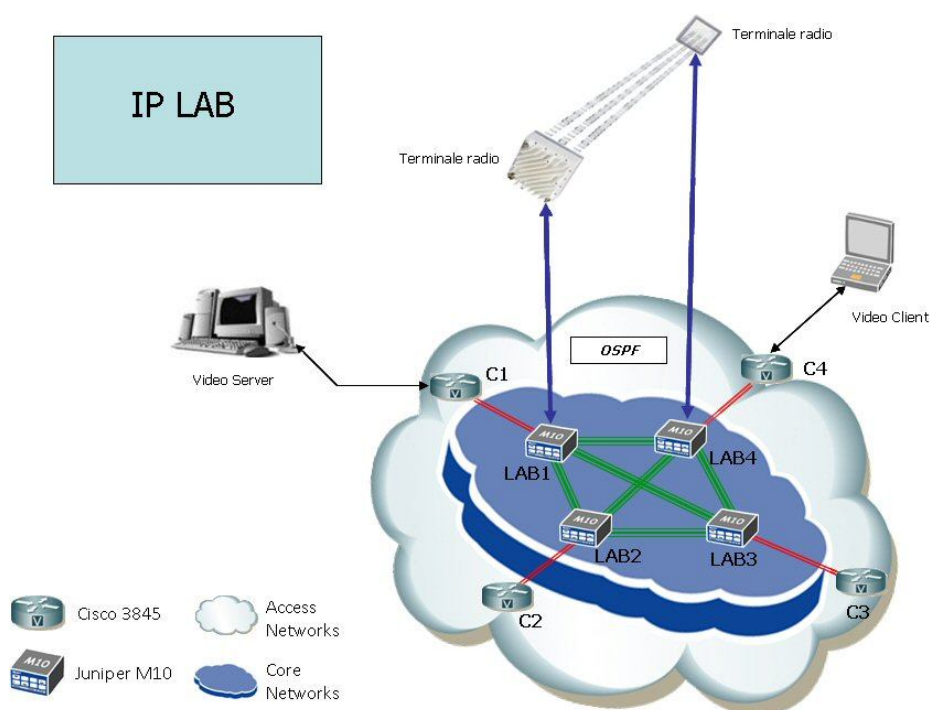


Fig. 9 – Integrazione del ponte radio a 60 GHz con la rete multiaccesso-multiservizio presente nel laboratorio IP LAB

6. Descrizione ed analisi degli strumenti di misura e degli applicativi software impiegati nei test

Come illustrato nel precedente paragrafo, le prove sperimentali eseguite sul ponte radio sono state mirate alla verifica delle reali capacità del sistema di trasportare servizi a banda larga con i necessari requisiti di qualità, soprattutto in condizioni di sovraccarico rispetto al suo normale funzionamento.

Per far ciò, una volta verificata la presenza di piena connettività fisica tra i dispositivi impegnati nella connessione, si è passati all'analisi del comportamento dei protocolli di comunicazione di strato superiore rispetto a quello fisico, deputati all'implementazione di tutte le funzioni necessarie a realizzare il trasporto dei dati senza errori.

In particolare, il ricorso all'uso dell'applicativo *Iperf*, che basa il suo funzionamento sul ruolo di *client* e di *server* con il quale vengono alternativamente configurate le due stazioni terminali, ha consentito di generare un flusso dati di livello 4 (nella pila ISO/OSI) in transito nelle due direzioni possibili del ponte radio, distinguendo il caso di:

- a) trasmissione UDP che, prevedendo una modalità di trasferimento senza connessione non è in grado di fornire alcuna garanzia sulla qualità di servizio (non viene eseguito alcun recupero di errore, controllo di flusso o ri-ordinamento delle unità informative), ed è quindi assimilabile ad un flusso dati con bit rate costante;
- b) trasmissione TCP che, essendo un protocollo *connection-oriented*, prevede l'implementazione di funzioni di controllo e recupero di errore, controllo di flusso e ri-ordinamento delle unità informative, più adatto, quindi, all'analisi del comportamento del link in presenza di servizi che hanno la necessità di un trasferimento affidabile dei loro dati, piuttosto che per servizi *real-time*.

Nello specifico, la trasmissione UDP consente di variare la dimensione dei datagrammi in transito a seconda dell'applicazione per la quale si vuole testare il collegamento; il valore di default, pari a 1470 bytes, è idoneo per reti ethernet. Il server identifica una perdita di datagrammi UDP sulla base di un numero identificativo (ID) del datagramma; usualmente ad un datagramma UDP corrispondono diversi pacchetti IP, e perderne anche solo uno implica la perdita di tutto il datagramma. A sua volta, il client registra un *timestamp* di 64 bit/microsecondo nel pacchetto, che consente al server di calcolare il relativo tempo di transito come differenza tra il tempo di ricezione del server ed il tempo di trasmissione del client. Tuttavia, poiché i clock della stazione trasmittente

e di quella ricevente possono non essere sincronizzati, la loro differenza viene sottratta nel calcolo del jitter.

Un esempio di comando di avvio di una trasmissione di datagrammi UDP, rispettivamente per *server* e *client*, impostato per lo svolgimento dei test eseguiti, assume la seguente struttura:

```
iperf -c 192.168.55.10 -t 86400 -u -b 100M -r -l 1K -w 630K -i 60
```

```
iperf -s -u -l 1K -w 630K -i 60
```

laddove i singoli parametri sono stati inizializzati per definire, nell'ordine:

- la durata del test (t) misurata in secondi (86400);
- la modalità di trasmissione secondo il protocollo UDP (u);
- la banda di traffico (b) che si vuole generare (100M). Deve essere impostata ad un valore elevato rispetto alla velocità massima del collegamento; in questo modo, infatti, non riuscendo a raggiungere la velocità voluta, si dovrà per forza di cose trasmettere alla massima velocità possibile in quel preciso istante. In altre parole, impostando un valore troppo basso di questo parametro, ad esempio 1M, *Iperf* genererà un traffico ad una velocità pari ad 1Mbits/sec, rendendo superflua la misura effettuata;
- la modalità di funzionamento in “*tradeoff*” (r), se si vuole verificare il comportamento del link in entrambe le direzioni, facendo partire lo stesso test prima dal server verso il client e, successivamente dal client verso il server (se tale verifica la si vuole realizzare in contemporanea su entrambe le direzioni, occorre impostare la modalità di funzionamento in “*dualtest*”, sostituendo il comando -r con il comando -d);
- la lunghezza (l) del buffer di lettura/scrittura (1K), impostato di default al valore 8KB per connessioni TCP e 1470 bytes per trasmissioni UDP;
- la dimensione del buffer deputato alla ricezione dei datagrammi (w) per il protocollo UDP (630K), e della *window size* per il protocollo TCP;
- l'intervallo temporale (i), misurato in secondi (60), entro cui vengono periodicamente calcolati i valori dei parametri di *bandwidth*, *jitter* e *datagram loss*.

Ovviamente, le prove sperimentali sono state eseguite in entrambe i versi di trasmissione (sia in modalità *tradeoff* che in modalità *dualtest*), al fine di valutare le prestazioni raggiungibili nei due sensi della connessione.

L'analisi del comportamento del ponte radio nei confronti di traffico di livello 2 in transito (trame ethernet), come detto, è stata resa possibile dall'impiego dello strumento di misura SmartBits,

attraverso il quale è stato possibile evidenziare la variabilità dei tre principali parametri di rete che l'apparato consente di misurare, nelle varie situazioni sperimentali di interesse, tramite le seguenti modalità:

- **Throughput Test:** misura la più grande velocità a cui un dispositivo può inviare trame senza errori. Se una singola trama viene ricevuta errata, il test fallisce e si ripete ad una velocità più bassa.

La velocità iniziale è fissata dall'utente come percentuale rispetto a quella concessa dalla topologia o dalla interfaccia trasmittente, e viene ridotta del 20% rispetto a quella del tentativo precedente nel caso di primo fallimento, mentre viene ridotta del 50% entro l'intervallo delimitato dall'ultimo tentativo fallito e l'ultimo tentativo andato a buon fine, nel caso di fallimenti successivi al primo.

Il test non termina fino a quando non si raggiunge l'approssimazione specificata nella fase di *test set-up* relativamente alla risoluzione con cui ci si vuole avvicinare alla velocità reale del link.

- **Latency Test:** l'interfaccia trasmittente invia un *burst* di trame, al centro del quale è inserito un frame con un *trigger* identificativo (*tag*).

Detto *Transmit Timestamp* il tempo richiesto per la trasmissione completa del tag, e *Receive Timestamp* il tempo impiegato dall'interfaccia ricevente a riconoscere il tag, il calcolo della latenza avviene quindi come:

$$Latency = (Receive\ Timestamp) - (Transmit\ Timestamp)$$

- **Packet Loss Test:** misura la percentuale di trame che sono state inviate e che sono state perse (si invia uno specifico numero di *frames* ad una specifica velocità e si contano i *frames* che sono ricevuti dall'interfaccia ricevente).

7. Confronto ed analisi delle prove sperimentali

La realizzazione delle prove sperimentali volte a fornire un quadro il più completo possibile delle caratteristiche funzionali del ponte radio in esame, è stata organizzata separando l'analisi di natura soggettiva da quella di natura oggettiva.

La prima ha interessato l'esame del comportamento del servizio di *video-streaming*, ottenuto tramite la trasmissione ad una velocità di circa 20Mbps di un video ad alta definizione, dal server al

client in prima istanza, e dal server verso più client contemporaneamente, fino ad ottenere la saturazione della banda disponibile, in una fase successiva.

La seconda, invece, ha coinvolto la misura dei parametri di rete indicati in precedenza, con la successiva rappresentazione grafica dei valori misurati, allo scopo di evidenziare in modo ancora più marcato il differente comportamento nelle varie situazioni sperimentali attuate.

Da notare come già in fase di instaurazione del collegamento fisico vero e proprio tra le due stazioni terminali era stato possibile verificare, tramite la semplice trasmissione di pacchetti di segnalazione relativi all'esecuzione dell'applicazione "ping", che la risposta degli apparati a tali sollecitazioni, in entrambe le direzioni, non risultasse sempre puntuale e continua come ci si sarebbe aspettato da un collegamento operante in condizioni ottimali rispetto alle sue normali condizioni di funzionamento, specie nella fase iniziale di attivazione della comunicazione tra i due apparati terminali.

Questo aspetto risulta particolarmente penalizzante in quelle applicazioni in cui il ponte radio deve trasportare servizi poco tolleranti all'errore, come nel caso del *video-streaming*, tramite il quale è stato possibile verificare che, anche in situazione di link scarico, si registrava la perdita di pacchetti secondo un andamento di carattere impulsivo (cioè perdite concentrate in un intervallo di tempo molto breve). Tale comportamento evidenzia la criticità di questo sistema ad essere impiegato per il supporto di una tale categoria di servizi a banda larga.

Per tale ragione, ulteriori test di *video-streaming* sono stati realizzati solo attraverso la contemporanea trasmissione del video ad alta definizione verso più utenti contemporaneamente, con l'unico scopo di ottenere una verifica sul *throughput* massimo raggiungibile, già misurato tramite l'applicativo *Iperf*, ma non ricercando differenze di comportamento nel caso di link congestionato o nel caso di condizioni atmosferiche peggiorative rispetto al caso ottimale, essendo già risultato inadeguato il livello di qualità che si è riusciti ad ottenere attraverso modalità di trasmissione *unicast* su collegamento non saturato.

7.1 Simulazione di una situazione di link failure

Nell'ottica di un utilizzo del ponte radio in esame come collegamento di backup su una connessione esistente in fibra ottica all'interno di una rete di trasporto, dopo averne realizzato l'integrazione con la rete multiaccesso-multiservizio presente nel laboratorio IP LAB, si è cercato di indagarne il comportamento attraverso le seguenti prove orientate alla simulazione di un *link-failure* sulla rete di trasporto in fibra ottica:

- a) sovraccarico istantaneo del ponte radio con una quantità di traffico superiore a quella che è in grado di sopportare, immaginando che in caso di interruzione del link in fibra ottica, il router cui è connessa diriga tutto il traffico in transito verso il collegamento radio di backup, gravandolo oltre le sue normali capacità di funzionamento.

La simulazione è stata attuata tramite l'impiego del dispositivo SmartBits descritto in precedenza, mediante la generazione di 70 Mbps di traffico di test per un primo intervallo temporale e di 100 Mbps per il successivo intervallo temporale, entrambe della durata di circa 40 secondi. Si è così potuto riscontrare che le stazioni radio sottoposte ad una tale sollecitazione non entrano in situazione di stallo, interrompendo il proprio funzionamento, ma cercano piuttosto di smaltire tutto il traffico che possono, presentando, come ovvio, percentuali di perdita superiori alle normali condizioni operative;

- b) verifica che i tempi di ripristino della comunicazione tra client e server, relativamente alla situazione in cui il ponte radio intervenga in sostituzione di un collegamento in fibra ottica, risultino confrontabili con quelli riscontrabili nel caso di ridondanza di un link ottico con un altro link ottico.

Nello specifico, si è rilevato che tale differenza ammonta a circa 46 msec a favore del collegamento di *backup* in fibra ottica, essendo circa 170 msec il tempo occorrente al protocollo OSPF (*Open Shortest Path First*) per re-instradare il traffico su un percorso secondario in fibra, e circa 216 msec l'equivalente intervallo di tempo misurato nel caso la comunicazione venga dirottata su un collegamento radio di *backup*.

I 46 msec aggiuntivi rispetto ai tempi di ripristino del protocollo, costituiscono un ritardo dovuto alla sincronizzazione della componente trasmissiva del ponte radio.

Va, tuttavia, osservato che questo ritardo non si presenterebbe qualora venissero impiegate tecniche tipo SSP-LSP (*Standby Secondary Path - Label Switched Path*), cui si accennerà nel seguito; in questo caso, infatti, il ponte radio sarebbe già in esercizio e non sarebbero richiesti tempi di sincronizzazione.

Nelle figure 10 e 11 viene fornito un riscontro grafico di quanto misurato con il test b), rappresentando il momento in cui si interrompe il link primario in fibra ottica, sia a livello di qualità visiva percepibile dall'osservatore, sia in termini numerici attraverso la misura ed il confronto dell'intervallo di tempo per il quale si registra assenza di ricezione di pacchetti audio/video sul client.

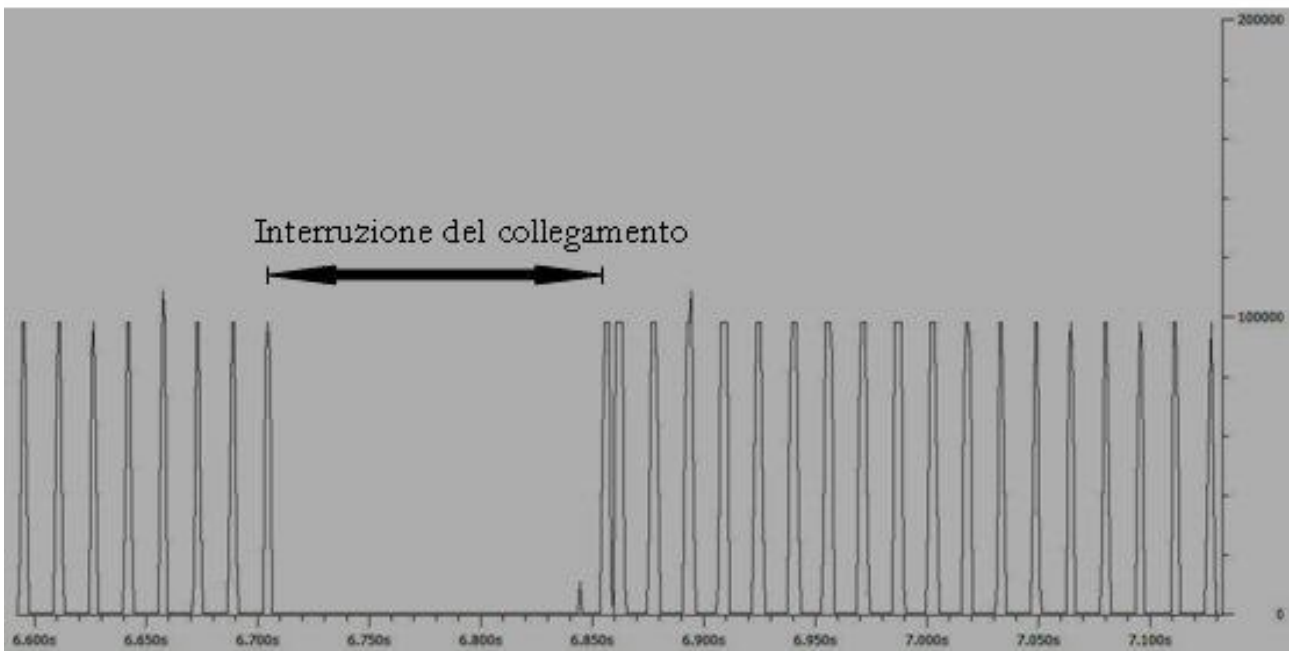


Fig. 10 – Comportamento del segnale trasmesso nel caso di *backup* del collegamento in fibra ottica con un altro collegamento in fibra ottica

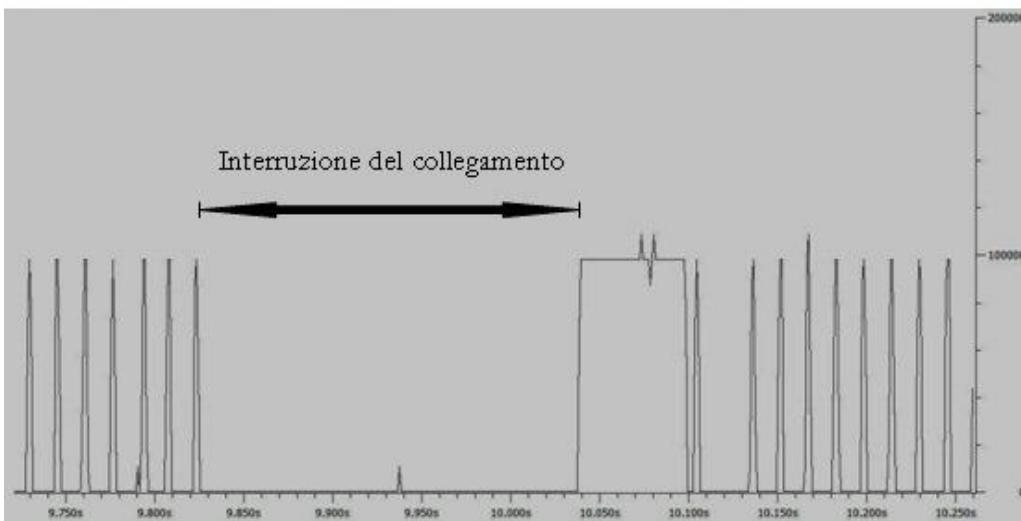
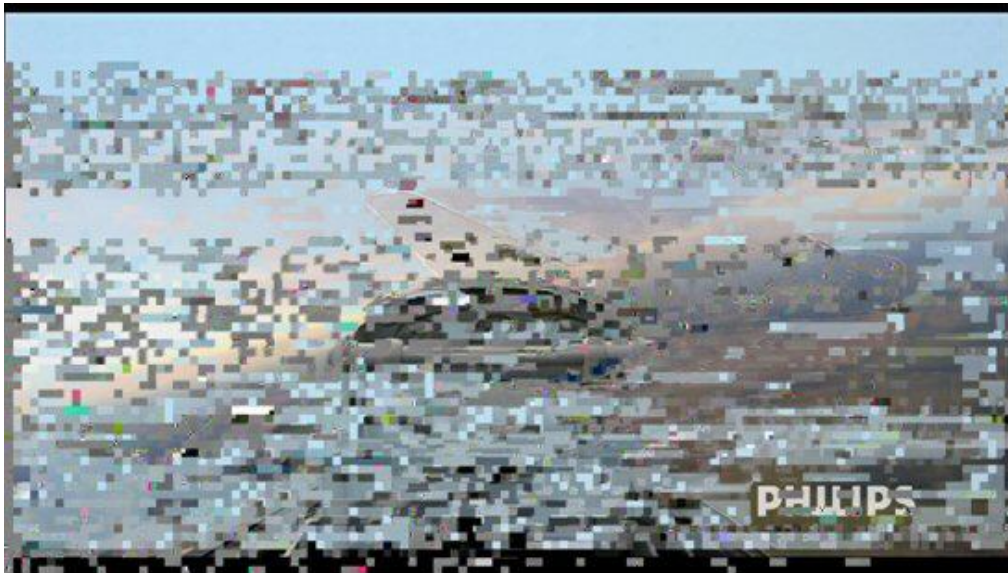


Fig. 11 – Comportamento del segnale trasmesso nel caso di *backup* del collegamento in fibra ottica con un collegamento in ponte radio a 60 GHz

L'analisi condotta in questo paragrafo assume notevole importanza se si considera l'aspetto della salvaguardia di traffico caratterizzato da priorità "*Mission Critical*", di cui il VoIP costituisce il servizio più rappresentativo.

In una connessione da 1 Gbit/s, normalmente utilizzata nelle reti metropolitane, è auspicabile che non più del 10% del traffico (circa 100 Mbit/s) sia riservato a servizi voce con priorità Mission Critical. Una tale classe di servizi, infatti, presenta requisiti molto stringenti in termini di garanzia di banda, ritardo (*delay*), jitter e packet loss, esigenze dettate sia dalla natura real-time del servizio telefonico, sia dai protocolli con modalità di trasferimento senza connessione impiegati per il trasporto di questa classe di dati.

Nello specifico:

- un protocollo con modalità di trasferimento senza connessione non consente la ritrasmissione dei pacchetti persi e ciò impatta sul valore della packet loss;
- un valore eccessivo del *delay* può produrre lo sgradevole effetto della “conversazione in differita”, che risalta all’orecchio umano per valori al di sopra dei 500 ms di questo parametro;
- è necessario ottenere valori prossimi allo zero anche per il jitter, essendo tale parametro diretta conseguenza della variabilità del ritardo.

Per un servizio con priorità Mission Critical, in sintesi, sarebbe auspicabile avere perdite di pacchetto nulle con tempi di ritardo minimi e, soprattutto, costanti.

Di seguito vengono tradotte tali considerazioni come requisiti espressi in forma tabellare con relativa descrizione delle classi di servizio, così come indicato nella normativa di riferimento *ITU-T Y1541-Network Performance Objectives for IP-Based Services*.

Network Performance Parameter	Nature of Network Performance Objective	Class 0	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5
IPTD (IP Time Delay)	Upper bound on the mean IPTD	100 ms	400 ms	100 ms	400 ms	1 s	U
IPDV (IP Delay Variation)	Upper bound on the 1-10-3 quantile of IPTD minus the minimum IPTD	50 ms	50 ms	U	U	U	U
IPLR (IP Loss Ratio)	Upper bound on the packet loss probability	1*10 ⁻³	1*10 ⁻³	1*10 ⁻³	1*10 ⁻³	1*10 ⁻³	U
IPER (IP Error Packet Ratio)	Upper bound	1*10 ⁻⁴					U

Tabella 1 – Requirements dei servizi *triple play* rispetto alle classi standardizzate dall’ITU (*Fonte: ITU-T Y1541-Network Performance Objectives for IP-Based Service*)

QoS Class	Applications (Examples)	Node Mechanisms	Network Techniques
0	Real-Time, Jitter Sensitive, High Interaction (VoIP, VTC)	Separate Queue with Preferential Servicing, Traffic Grooming	Constrained Routing/Distance
1	Real-Time, Jitter Sensitive, Interactive (VoIP, VTC)		Less Constrained Routing/ Distance
2	Transaction Data, Highly Interactive (Signalling)	Separate Queue, Drop Priority	Constrained Routing/Distance
3	Transaction Data, Interactive		Less Constrained Routing/ Distance
4	Low Loss Only (Short Transactions, Bulk Data, Video Streaming)	Long Queue, Drop Priority	Any Route/Path
5	Traditional Applications of Default IP Networks	Separate Queue (Lowest Priority)	Any Route/Path

Tabella 2 – Mappatura di servizi *triple play* nelle classi di riferimento standardizzate dall’ITU
(Fonte: ITU-T Y1541-*Network Performance Objectives for IP-Based Service*)

In base a quanto detto, un potenziale impiego del ponte radio in applicazioni che prevedano la salvaguardia del traffico voce o, comunque, con priorità Mission Critical, richiederebbe una pianificazione della rete cui appartiene mirata all’implementazione di funzionalità di etichettatura dei pacchetti in transito (scelta di una politica di QoS), con preallocazione di risorse in caso di verifica di un *link failure*.

Con riferimento alla figura 9, occorrerebbe configurare la rete in modo che il collegamento tra LAB4 e LAB1 risulti caratterizzato da un tunnel MPLS, con un secondo LSP che faccia da “riserva calda” al primo in caso di perdita accidentale del link. L’idea è quella di creare una *policy* sui router LAB1 e LAB4 tale da favorire il passaggio sul tunnel di backup del solo traffico Mission Critical. Tale tecnica prende il nome di SSP-LSP, ed è in grado di garantire tempi minimi di ripristino (circa 50 ms) tra l’LSP di esercizio e quello di backup, a fronte di un dispendio di banda pari alla capacità dell’LSP di backup.

situazione di carico notevole, mentre per quanto riguarda il throughput è stata impostata una dimensione dei frames pari a 1518 bytes, così da diminuire il numero di pacchetti in transito con una conseguente minore esigenza di processing da parte delle due stazioni terminali, una diminuzione nei ritardi ed una maggiore efficienza nella gestione del collegamento.

I test sono stati condotti trasferendo un traffico crescente, con soglia di partenza di 50 Mbps e soglia di arrivo di 100 Mbps, con *step* di 10 Mbps per ogni intervallo di test, la cui durata ha interessato una finestra temporale di circa 40 secondi per ogni step.

I risultati ottenuti, consultabili nella figura 13, hanno mostrato una percentuale di perdita di frames estremamente bassa, sebbene non nulla, con valori di latenza massima sul collegamento di 94,4 μ sec per tutti i vari livelli di carico impostati, ad eccezione del caso dei 100 Mbps per il quale si registra un rapido peggioramento nelle prestazioni del collegamento radio, non essendo quest'ultimo in grado di sopportare un tale volume di traffico.

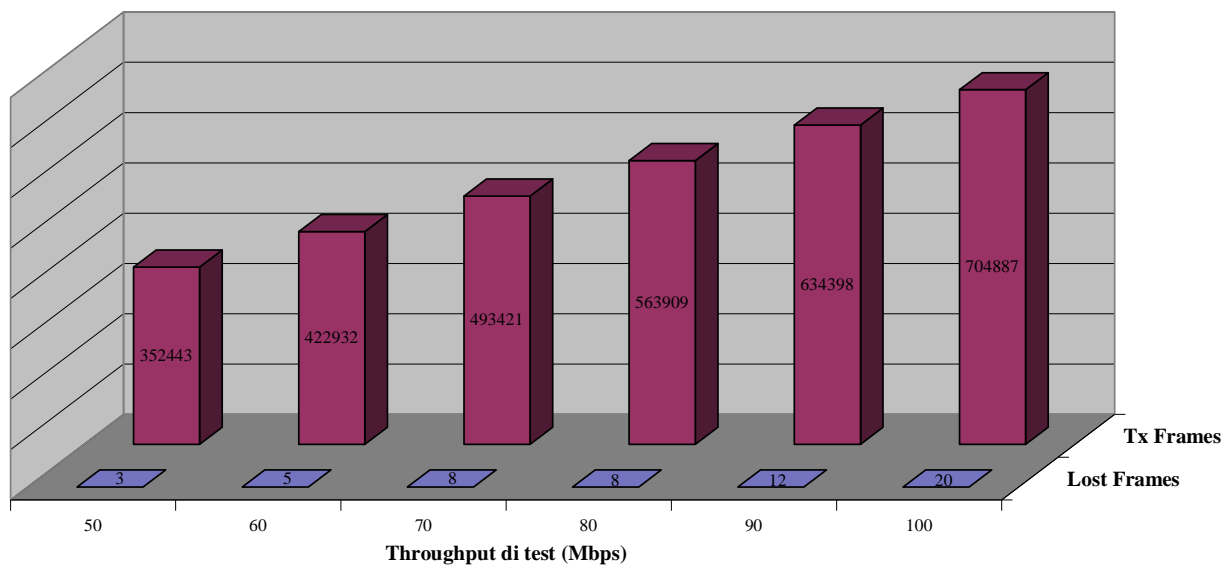


Fig. 13 – Andamento della perdita di *frames* con traffico incrementale da 50 a 100 Mbps e dimensione dei *frames* di 512 bytes

Per disporre di un ulteriore termine di confronto, il collegamento è stato sottoposto anche ad un test del tipo di quello descritto in precedenza, ma con soglia iniziale di 80 Mbps e soglia finale di 100 Mbps del traffico in transito, impostando ora il passo incrementale a 5 Mbps per ciascun intervallo di test della durata sempre di 40 sec, con dimensione dei frames trasmessi pari a 1518 bytes.

Con una tale impostazione dei parametri trasmissivi, è stata ottenuta una latenza massima sul collegamento di 255,6 μ sec, per tutti i vari livelli di carico impostati ad eccezione di quello a 100 Mbps, con percentuali di perdita ancora bassissime, come facilmente riscontrabile in figura 14.

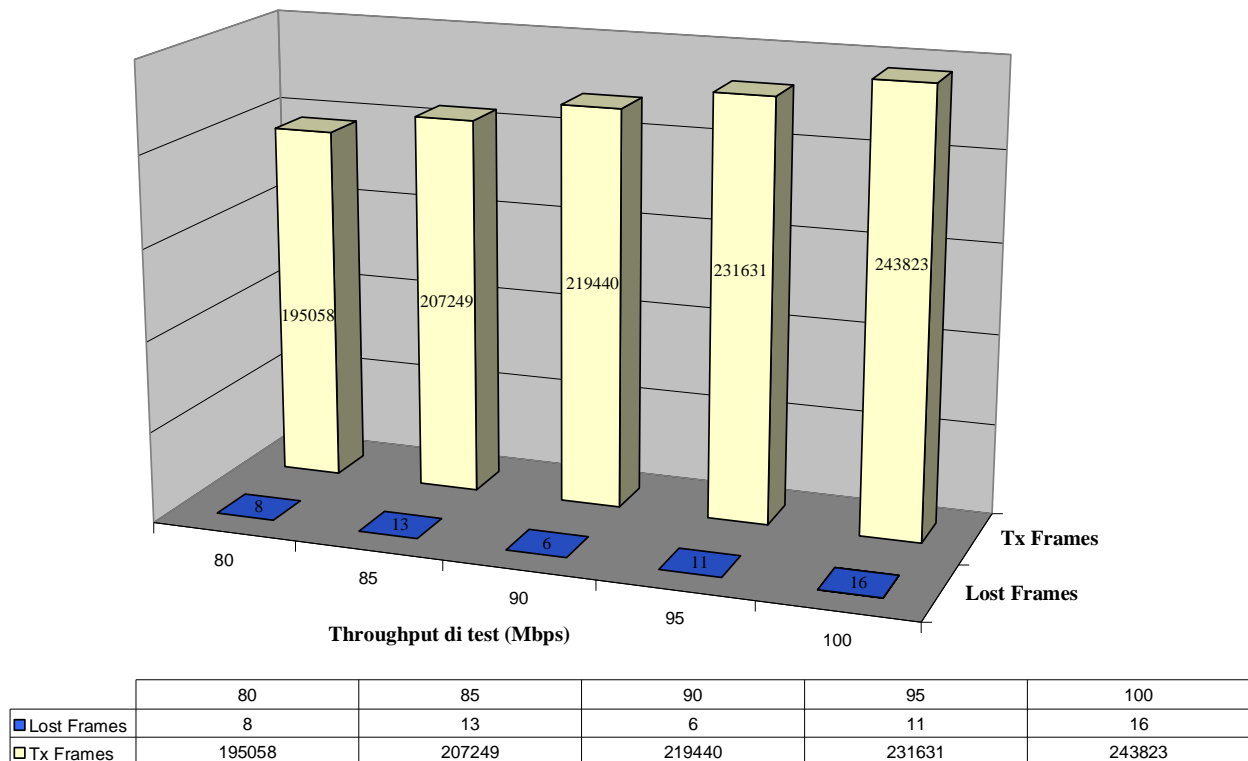


Fig. 14 - Andamento della perdita di *frames* con traffico incrementale da 80 a 100 Mbps e dimensione dei *frames* di 1518 bytes

E' facile notare come, a parità di condizioni, il numero di pacchetti di livello 2 trasmessi sia minore nel secondo caso rispetto al primo, essendo maggiore la dimensione dei pacchetti e, di conseguenza, minore risulta anche il numero di pacchetti persi, pur mantenendo un valore percentuale rispetto al totale dei pacchetti in transito del tutto confrontabile.

Essendo le trame di 512 bytes più numerose di quelle di 1518 bytes, se osservate nell'arco di uno stesso intervallo di tempo, aumenta la probabilità di perdere un frame nel caso di trame di lunghezza minima rispetto al caso di trame di lunghezza massima, in quanto le trame di lunghezza minima sono presenti in numero certamente maggiore rispetto a quelle di lunghezza massima all'interno di una coda di attesa di dimensioni fissate appartenente all'interfaccia di rete di ciascuno degli apparati presenti lungo il collegamento. Questo provoca un aumento della probabilità di avere percentuali di scarto più discontinue al diminuire della lunghezza di trama.

In condizioni di traffico critico i server mandano e ricevono grandi frames più efficientemente dei piccoli frames, in quanto pochi frames implicano pochi interrupt per pacchetto ricevuto dalla NIC (*Network Interface Card*). Ogni interrupt consuma un significativo numero di cicli del processore dell'*host*. Quindi l'uso di grandi pacchetti migliora il *throughput* e le prestazioni del server, perché sono disponibili più cicli CPU (*Central Processing Unit*) per processare dati.

Al contrario, ovviamente, la latenza subisce un incremento nel secondo test rispetto al primo, perché con pacchetti di dimensioni maggiori, risulta maggiore anche il tempo necessario alla trasmissione, alla ricezione ed al conseguente processamento dell'intero frame da parte di ciascun dispositivo attraversato nel percorso sorgente-destinazione.

7.3 Analisi del comportamento del collegamento radio con traffico TCP/UDP

Per la realizzazione di quest'ultimo tipo di prove sperimentali, come detto in precedenza, è stato impiegato l'applicativo *Iperf*, modulando i parametri trasmissivi in modo tale da individuare le condizioni di operatività limite degli apparati radio terminali, e per tale ragione il ponte radio è stato utilizzato in configurazione *stand-alone*, connettendo le due stazioni radio direttamente a due PC in grado di svolgere alternativamente la funzione di client e di server dell'applicativo (vedi fig. 15).

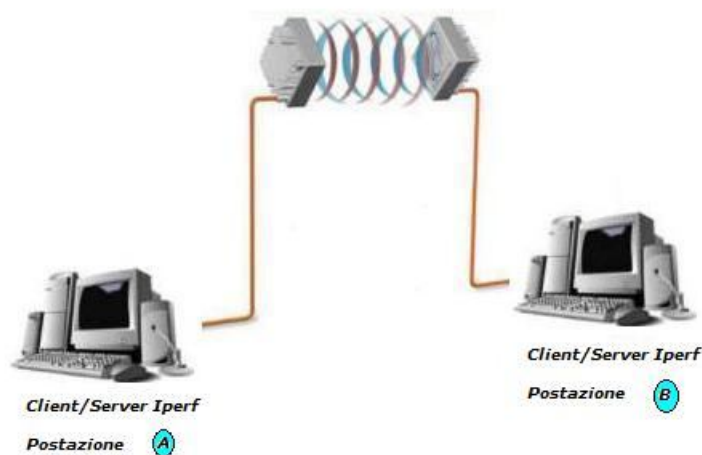


Fig. 15 – *Test bed* realizzato per l'analisi del comportamento del ponte radio a 60 GHz in presenza di traffico TCP/UDP

A seguito dell'implementazione del link fisico, sono stati eseguiti test prestazionali nelle due direzioni di comunicazione, attraverso la trasmissione di traffico UDP e TCP, inizialmente per un intervallo temporale di 4 ore, al fine di valutare il comportamento degli apparati quando risultano utilizzati per un periodo di tempo non eccessivamente lungo ma continuo, e successivamente per un intervallo di 24 ore continuative, al fine di analizzarne la risposta in condizioni di stress.

Ovviamente, tali prove sono state ripetute in presenza di precipitazioni più o meno significative, così da consentire il confronto tra la situazione di operatività ottimale e quella in condizioni peggiorative.

Nelle figure in appendice vengono riportati i risultati di tali test.

Una prima analisi delle misurazioni realizzate ha evidenziato valori mediamente buoni dei principali parametri di rete, facendo registrare velocità di trasmissione sempre comprese tra i 91 ed i 95 Mbps, con *jitter* quasi mai superiori al millisecondo e perdite di pacchetto praticamente sempre inferiori all'1% del totale dei pacchetti trasmessi, a parte sporadici picchi negativi, comunque di durata limitatissima.

Questi risultati sono stati riscontrati sia in presenza che in assenza di precipitazioni; sebbene occorra sottolineare che:

- per esigenze di disponibilità degli apparati, i test sono stati condotti durante il periodo estivo, cioè quando le precipitazioni risultano di scarsa frequenza, ma di notevole entità quando si manifestano;
- i risultati ottenuti in presenza di precipitazioni sono da considerarsi indicativi, dal momento che non essendo stato possibile disporre di una stazione meteorologica dedicata, posizionata nell'area interessata dal collegamento, per ottenere i dati relativi all'intensità di precipitazione presente sulla tratta radio durante il periodo in cui sono state condotte le prove sperimentali, è stato fatto ricorso alla consultazione di uno specifico sito web (<http://italian.wunderground.com>), che forniva i dati di precipitazione in una stazione meteorologica distante circa 1 km dall'area in cui si svolgevano i test, con le logiche approssimazioni che ne conseguono.

Proprio l'analisi del confronto tra l'utilizzo del ponte radio in condizioni climatiche ottimali rispetto a quello in condizioni climatiche avverse ha evidenziato una sostanziale stabilità nelle prestazioni ottenibili, laddove solo in presenza di un tasso di precipitazione dell'ordine dei 10 mm/h di pioggia si è potuta riscontrare una significativa variazione dei parametri prestazionali del sistema.

Ciò lo rende utilizzabile per il supporto di una vasta gamma di servizi a banda larga, certamente più indirizzati verso applicazioni SOHO (*Small Office Home Office*), data l'ampia larghezza di banda che il sistema può garantire se impiegato entro i parametri di distanza e di visibilità dichiarati dal costruttore.

8. Possibili temi di sviluppo futuri

L'analisi svolta ha consentito di evidenziare come gli apparati operanti nella banda dei 60 GHz risultino una valida scelta per l'offerta di servizi *triple play* di voce, video e dati ad alta velocità su brevi distanze, offrendo l'opportunità di usufruire dei vantaggi economici di operare in bande non licenziate, garantendo però la possibilità di supportare comunicazioni sufficientemente protette da un punto di vista interferenziale.

Nell'ottica di migliorarne sempre più le prestazioni, estendendone l'uso anche ad applicazioni di natura *indoor*, può risultare interessante studiare il comportamento di tali sistemi quando vengano sottoposti a modifiche tecniche quali:

- impiego di antenne a polarizzazione circolare, con possibilità di avere un *delay spread* di canale sostanzialmente più basso rispetto al caso di polarizzazione lineare;
- impiego di tecniche di modulazione del segnale diverse dal QPSK implementato dagli apparati testati, orientandosi ad esempio sull'impiego di tecniche *multicarrier* quale l'OFDM, così come avviene per il Wi-Fi, sebbene la caratteristica del canale a 60 GHz di essere poco sensibile al *multipath* e di presentare pesanti attenuazioni in caso di presenza di NLOS sul collegamento, non faccia apparire a prima vista vincente la scelta dell'OFDM.

L'obiettivo potrebbe essere, quindi, quello di definire le caratteristiche di un sistema *dual-band* WiFi/60 GHz e/o UWB/60 GHz capace di sfruttare i vantaggi di una delle due tecniche per superare gli ostacoli dell'altra, a fronte di un incremento contenuto nei costi economici e computazionali che conseguirebbero dall'aumento di complessità delle operazioni richieste agli strati PHY e MAC del dispositivo così ideato.

9. Appendice

Traffico TCP, in modalità tradeoff, in assenza di precipitazioni - durata del test: 4 ore

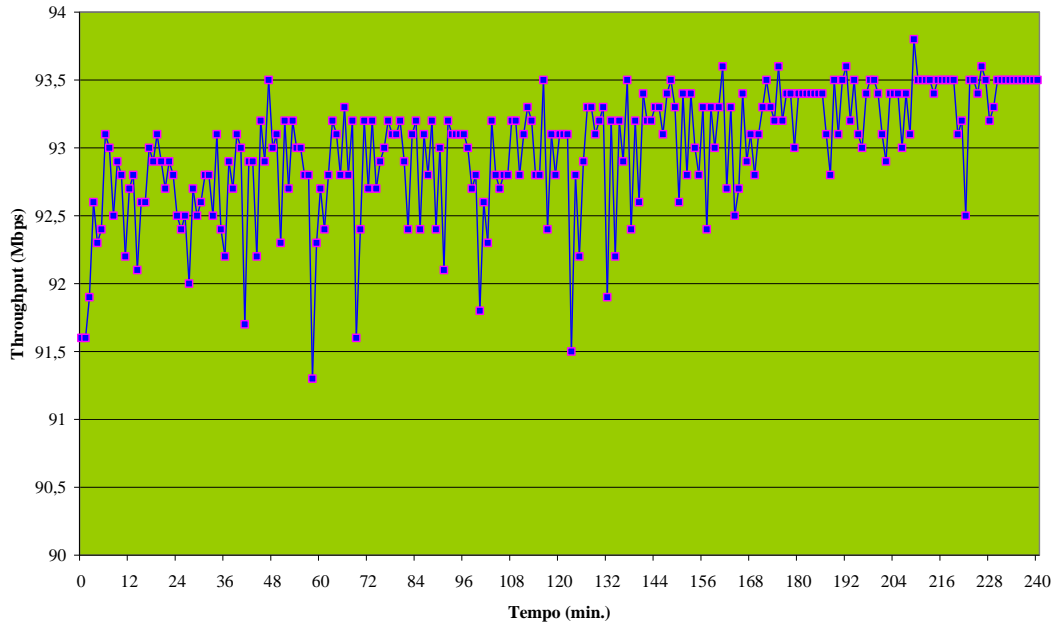


Fig. A.1 – Andamento del throughput – da A verso B

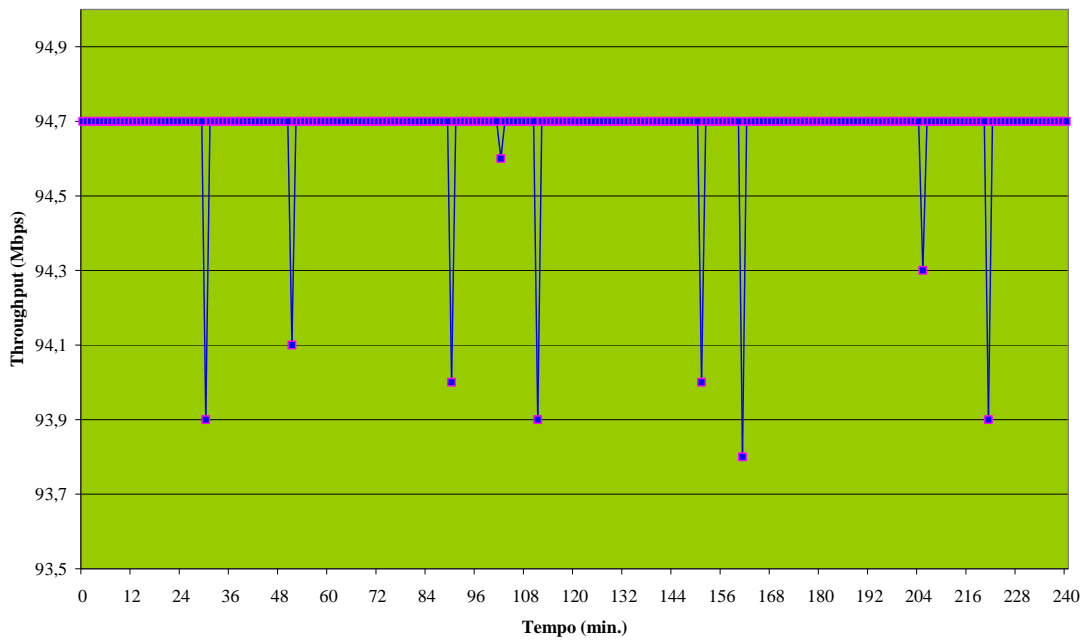


Fig. A.2 - Andamento del throughput – da B verso A

Traffico UDP, in modalità tradeoff, in assenza di precipitazioni – durata del test: 4 ore

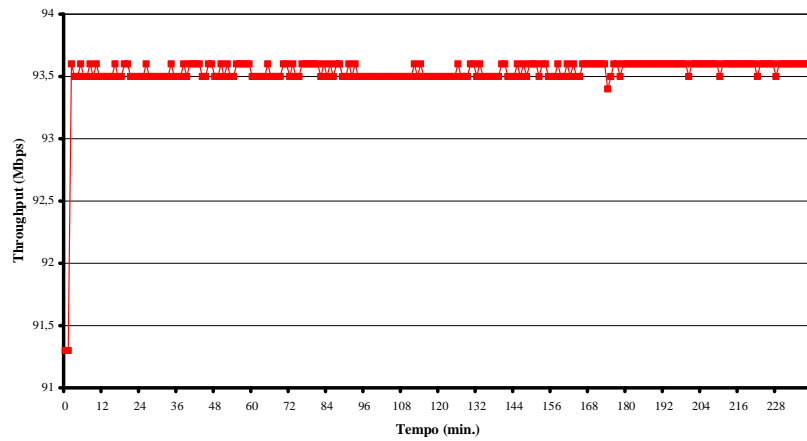


Fig. A.3 - Andamento del throughput – da A verso B

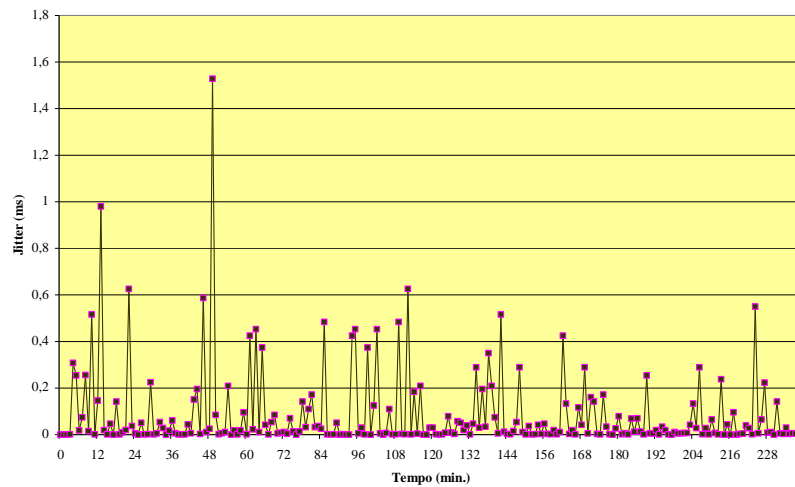


Fig. A.4 - Andamento del jitter – da A verso B

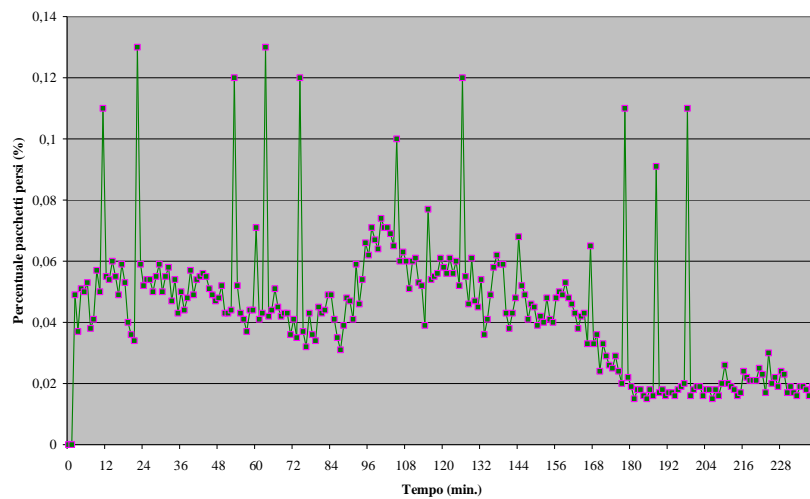


Fig. A.5 - Andamento del packet loss – da A verso B

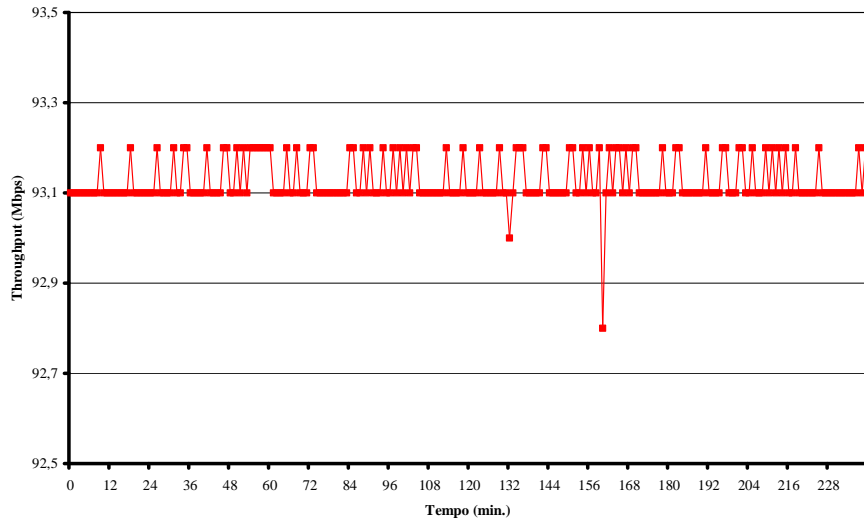


Fig. A.6 - Andamento del throughput – da B verso A

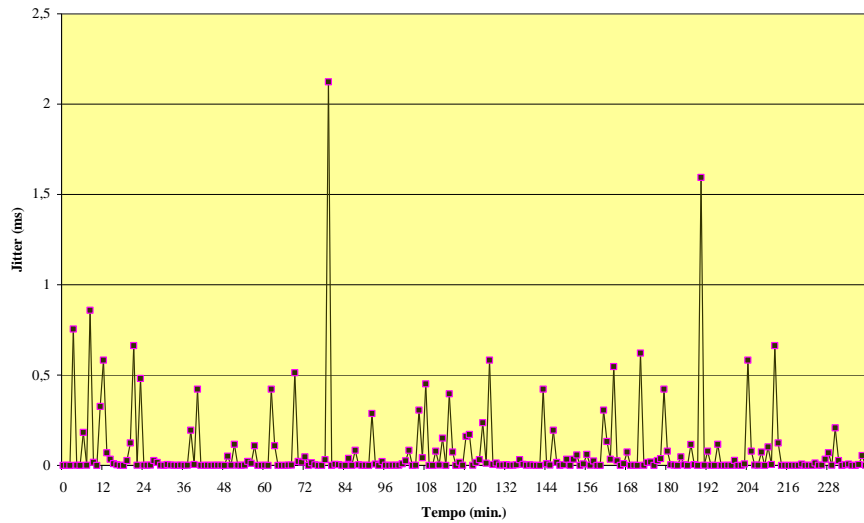


Fig. A.7 - Andamento del jitter – da B verso A

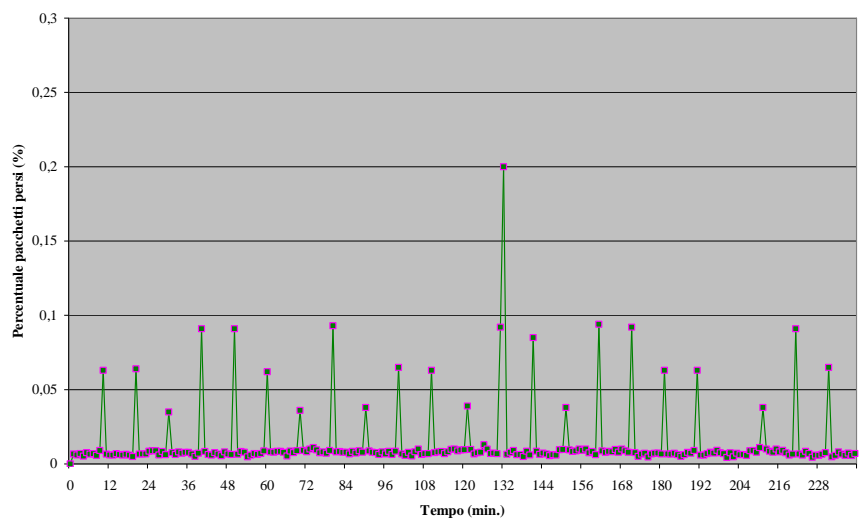


Fig. A.8 - Andamento del packet loss – da B verso A

Traffico TCP, in modalità dualmode, in assenza di precipitazioni - durata del test: 4 ore

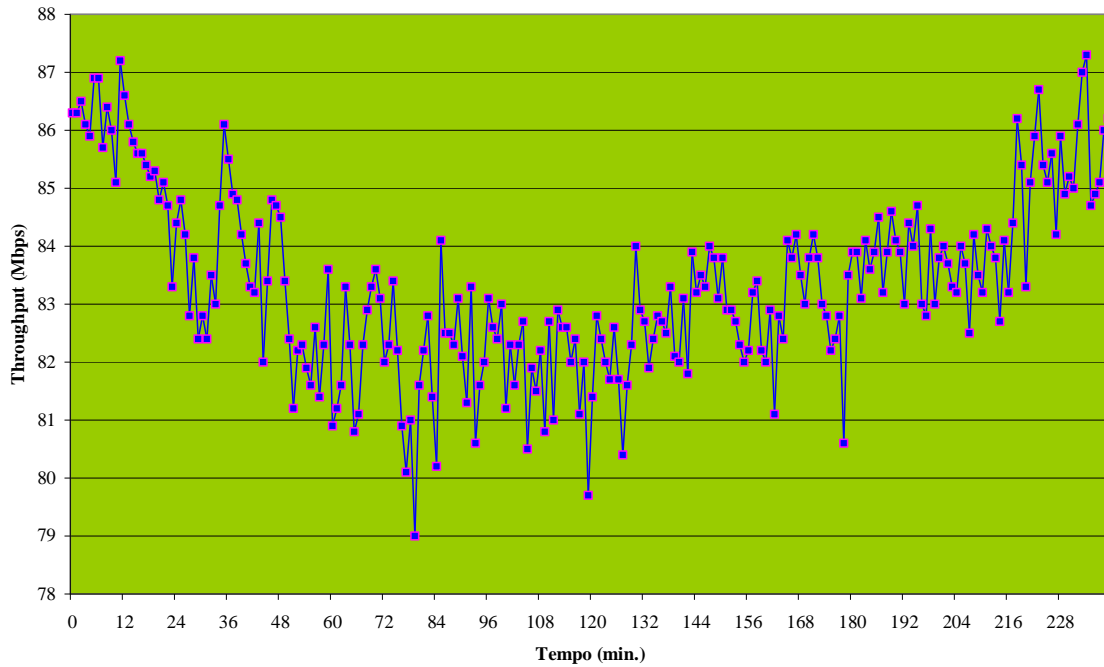


Fig. A.9 – Andamento del throughput – da A verso B

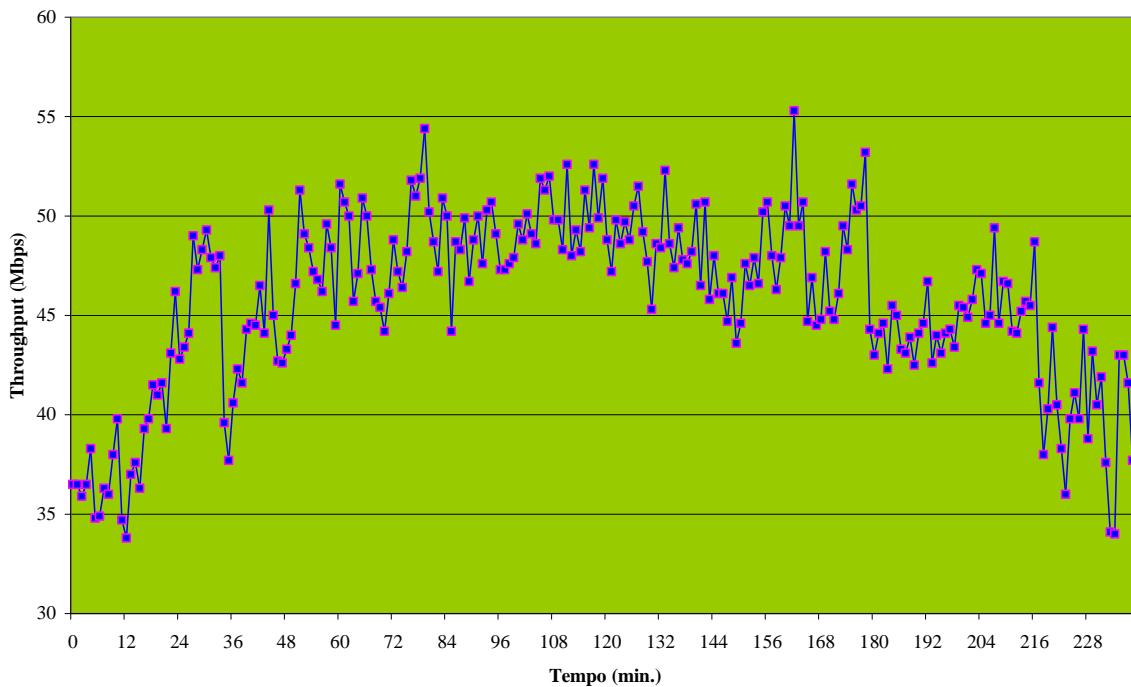


Fig. A.10 – Andamento del throughput – da B verso A

Traffico UDP, in modalità dualmode, in assenza di precipitazioni – durata del test: 4 ore

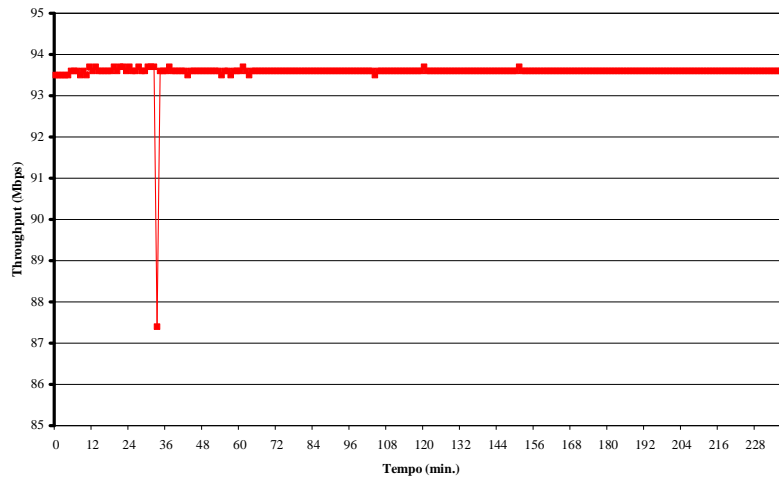


Fig. A.11 - Andamento del throughput – da A verso B

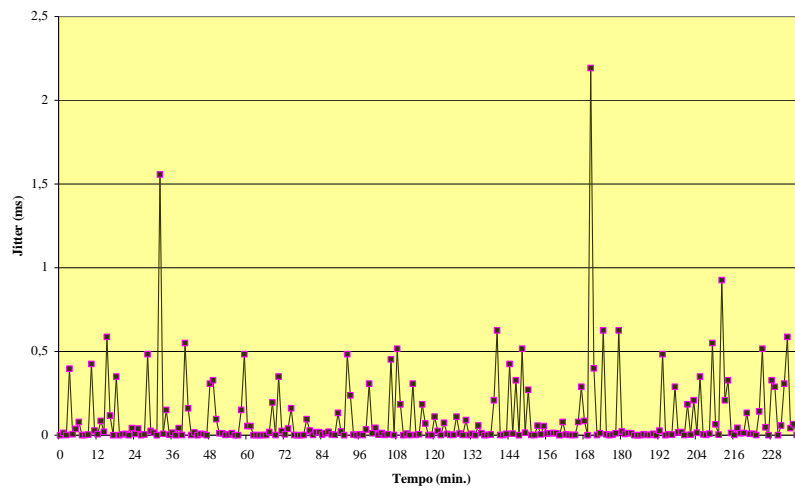


Fig. A.12 - Andamento del jitter – da A verso B

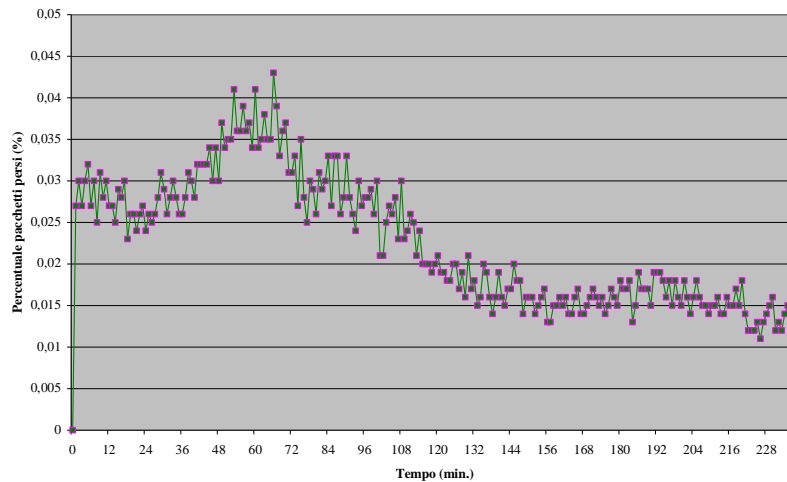


Fig. A.13 - Andamento del packet loss – da A verso B

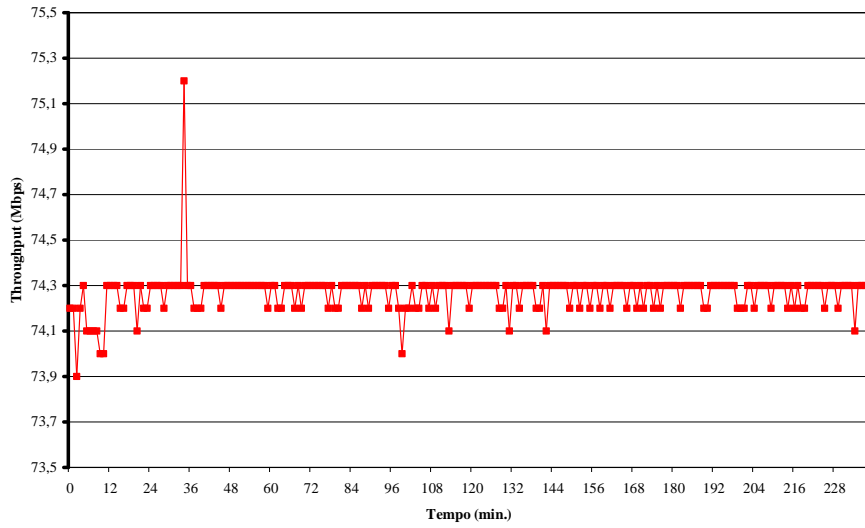


Fig. A.14 - Andamento del throughput – da B verso A

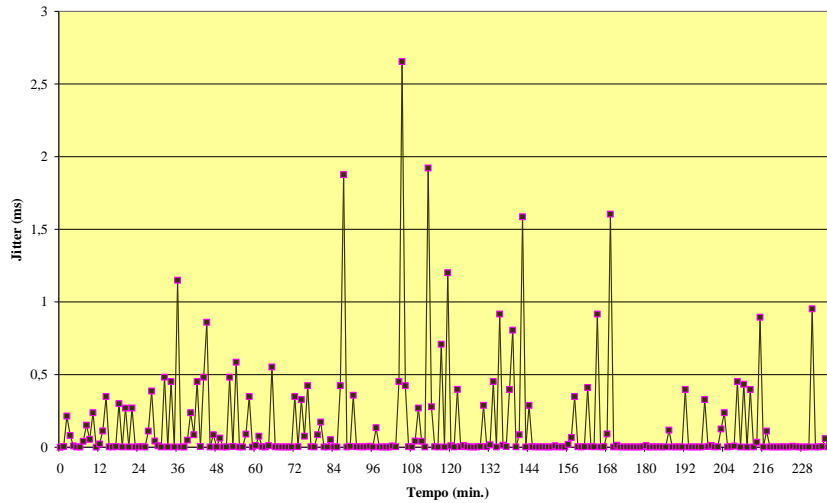


Fig. A.15 - Andamento del jitter – da B verso A

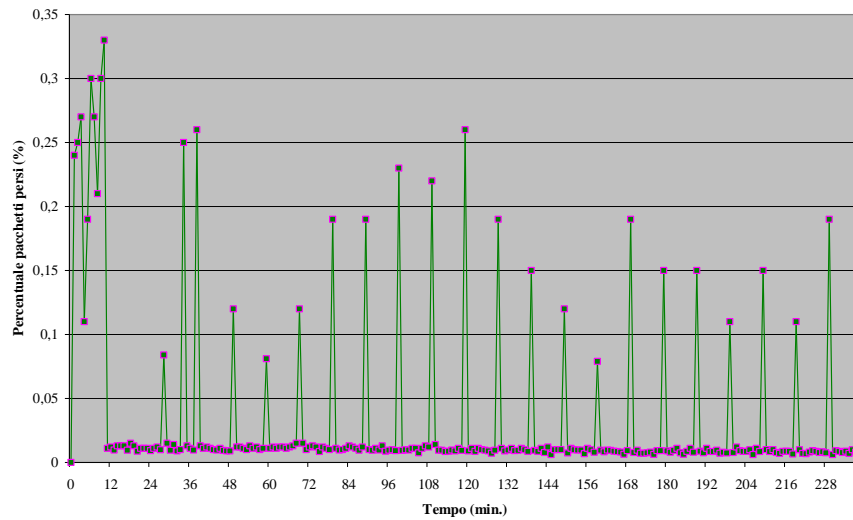


Fig. A.16 - Andamento del packet loss – da B verso A

Traffico TCP, in modalità tradeoff, in presenza di precipitazioni - durata del test: 4 ore

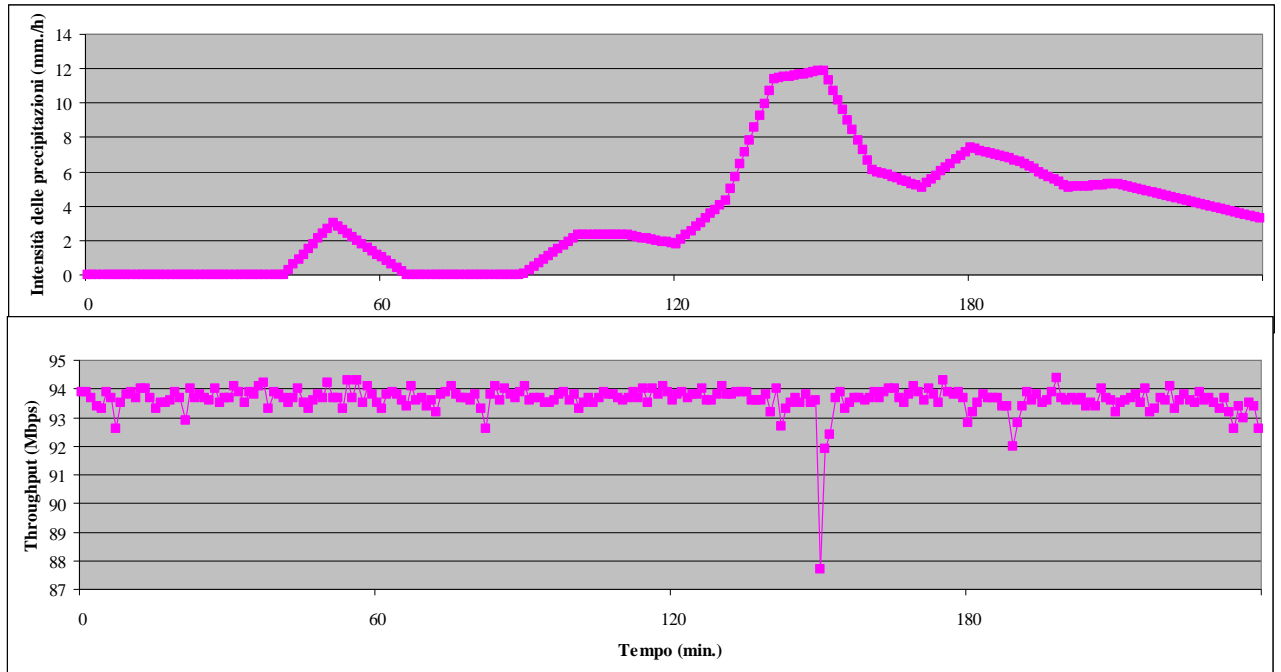


Fig. A.17 – Andamento del throughput – da A verso B

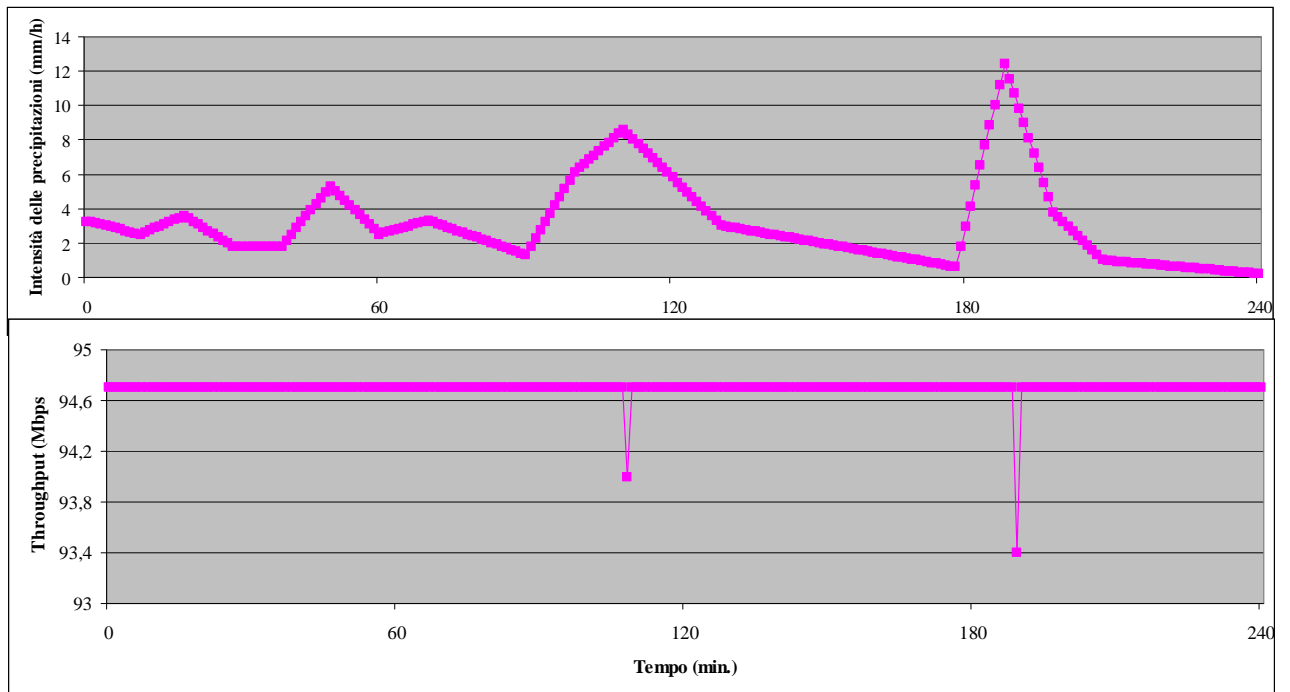


Fig. A.18 – Andamento del throughput – da B verso A

Traffico UDP in presenza di precipitazioni – durata del test: 4 ore

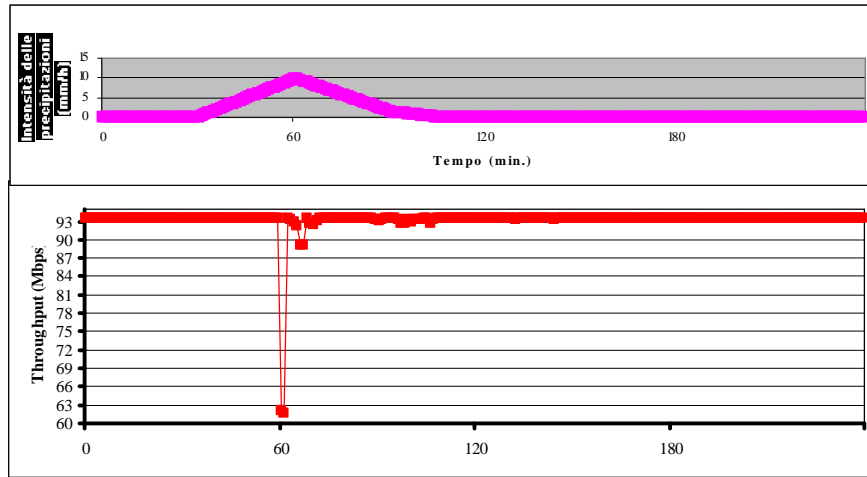


Fig. A.19 – Andamento del throughput – da A verso B

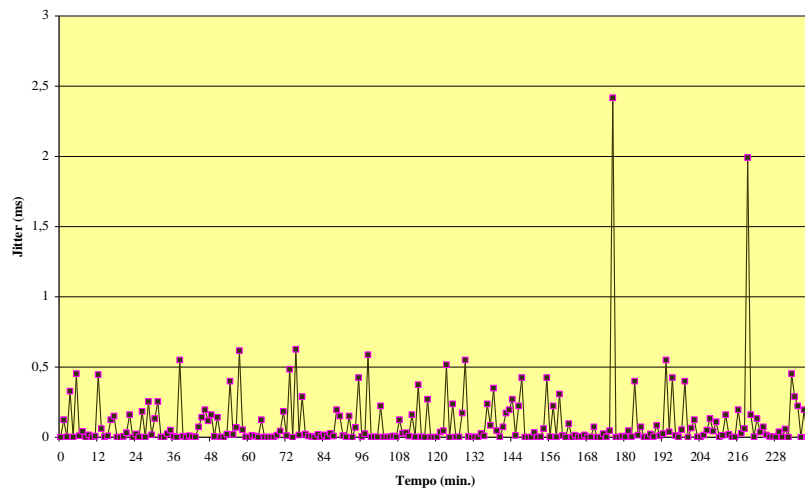


Fig. A.20 - Andamento del jitter – da A verso B

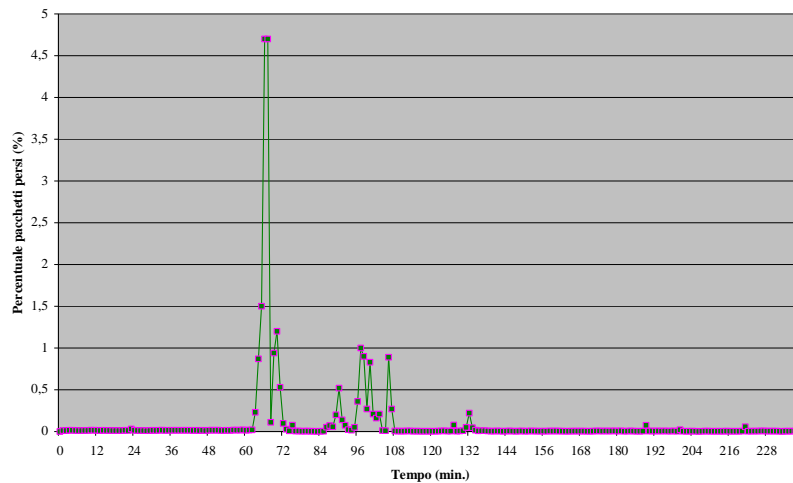


Fig. A.21 - Andamento del packet loss – da A verso B

Traffico UDP, in modalità tradeoff, in assenza di precipitazioni – durata del test: 24 ore

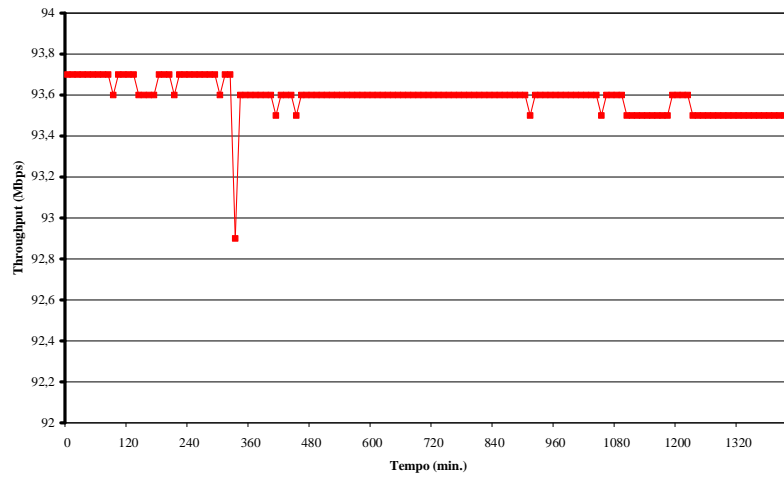


Fig. A.22 – Andamento del throughput – da A verso B

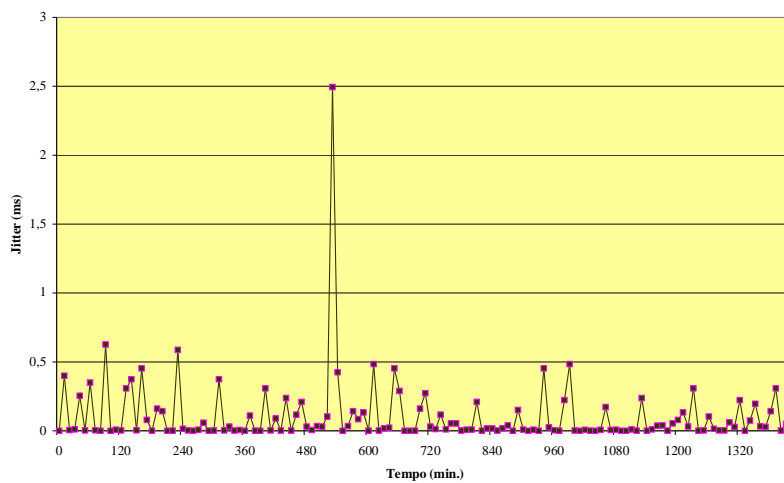


Fig. A.23 - Andamento del jitter – da A verso B

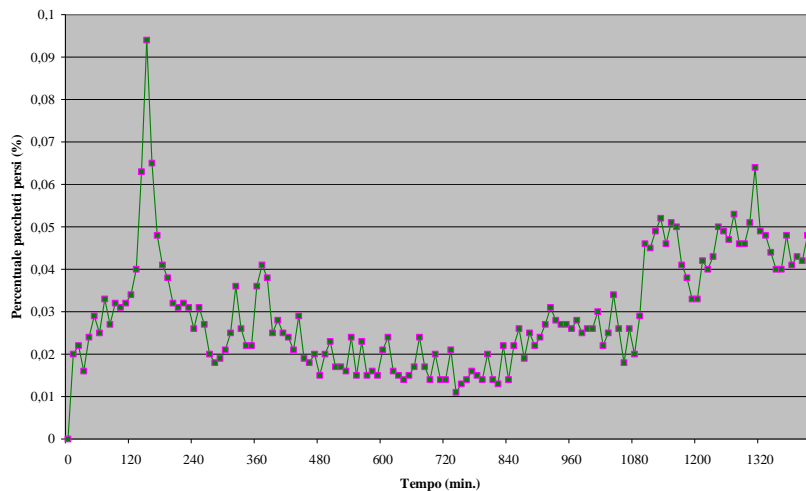


Fig. A.24 - Andamento del packet loss – da A verso B

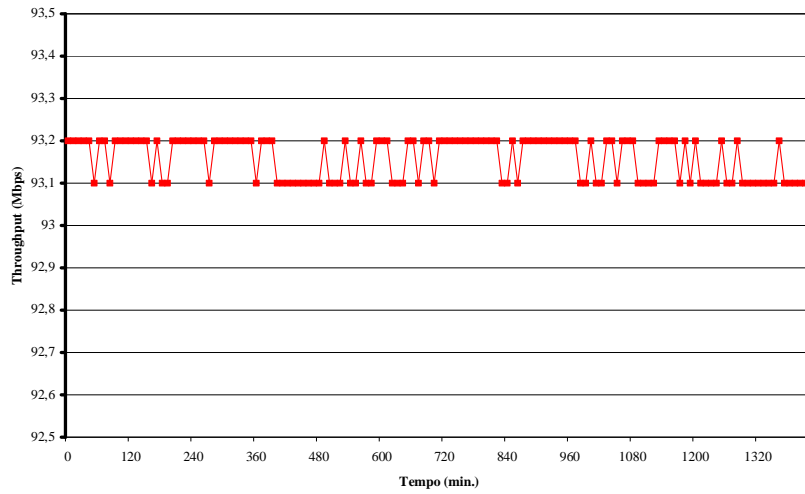


Fig. A.25 - Andamento del throughput – da B verso A

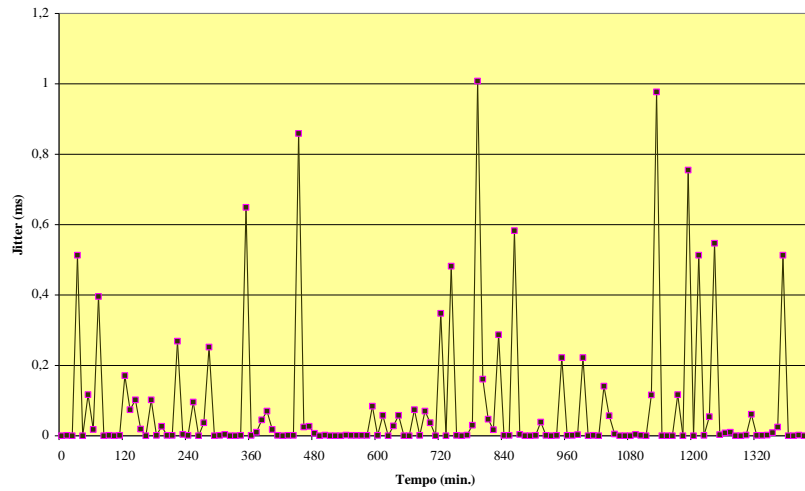


Fig. A.26 - Andamento del jitter – da B verso A

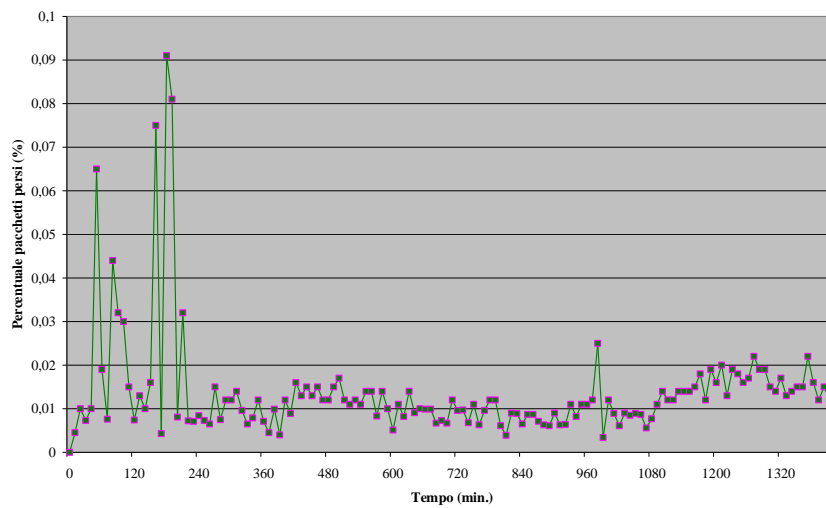


Fig. A.27 - Andamento del packet loss – da B verso A

Traffico TCP, in modalità dualmode, in assenza di precipitazioni - durata del test: 24 ore

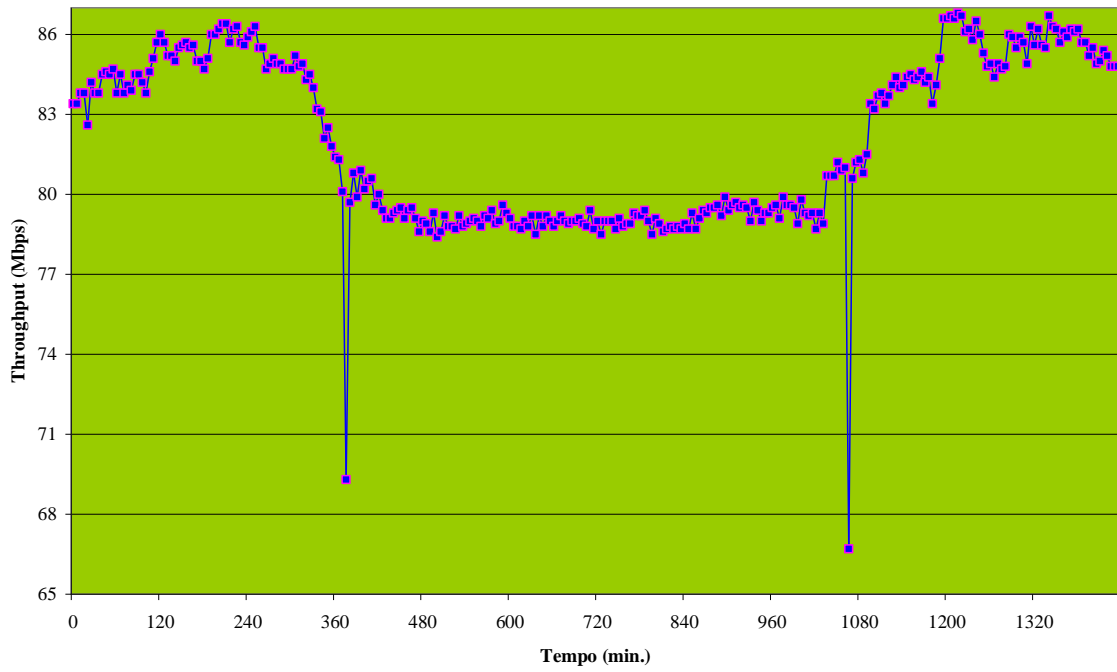


Fig. A.28 – Andamento del throughput – da A verso B

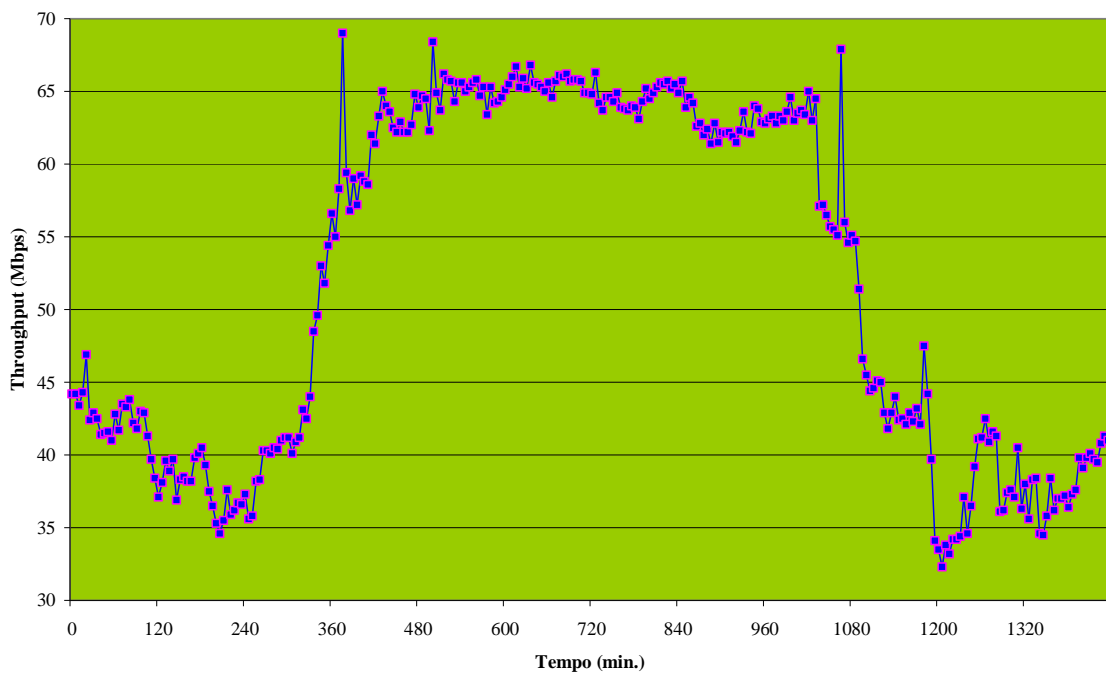


Fig. A.29 – Andamento del throughput – da B verso A

Traffico UDP, in modalità dualmode, in assenza di precipitazioni – durata del test: 24 ore

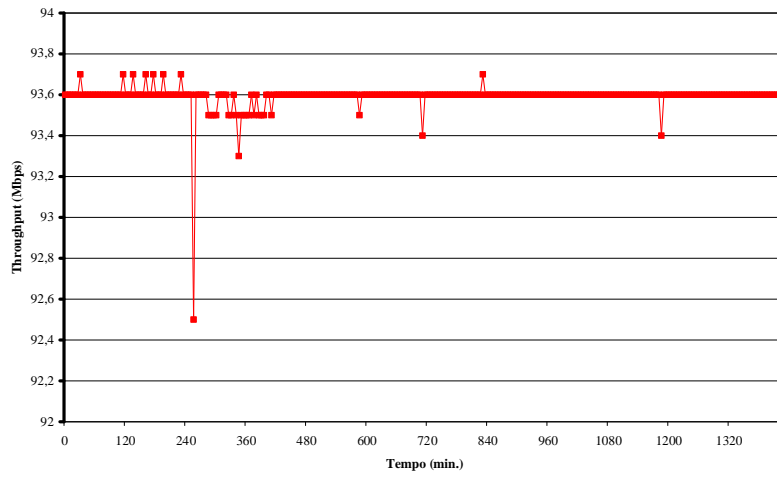


Fig. A.30 – Andamento del throughput – da A verso B

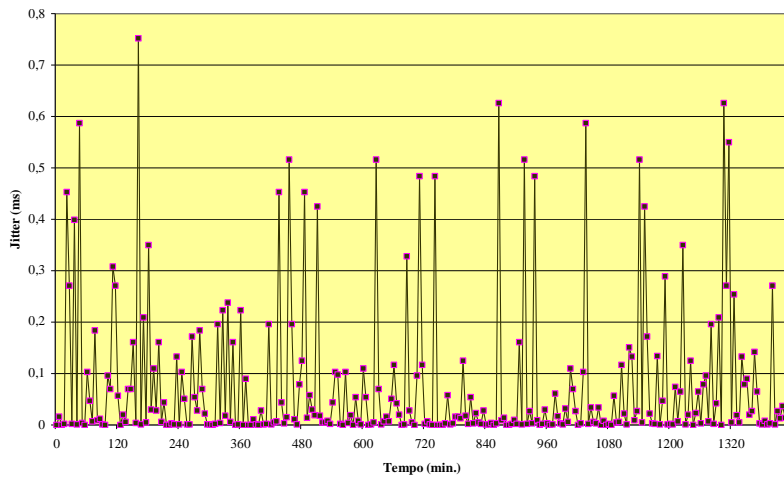


Fig. A.31 - Andamento del jitter – da A verso B

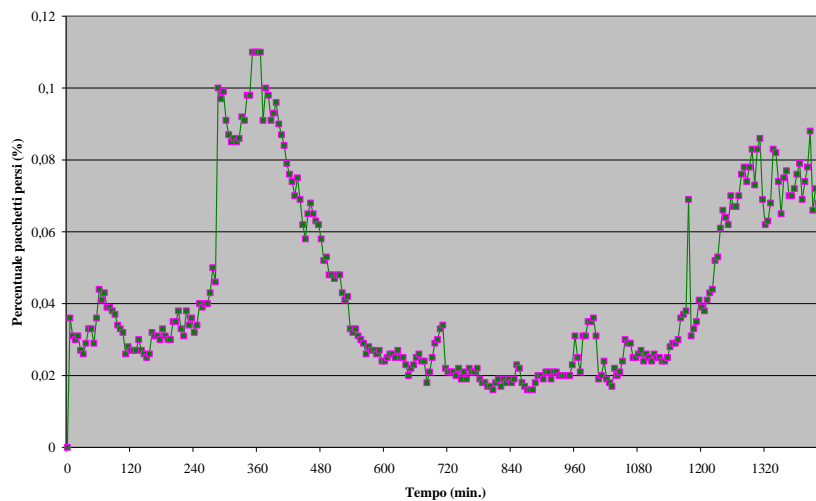


Fig. A.32 - Andamento del packet loss – da A verso B

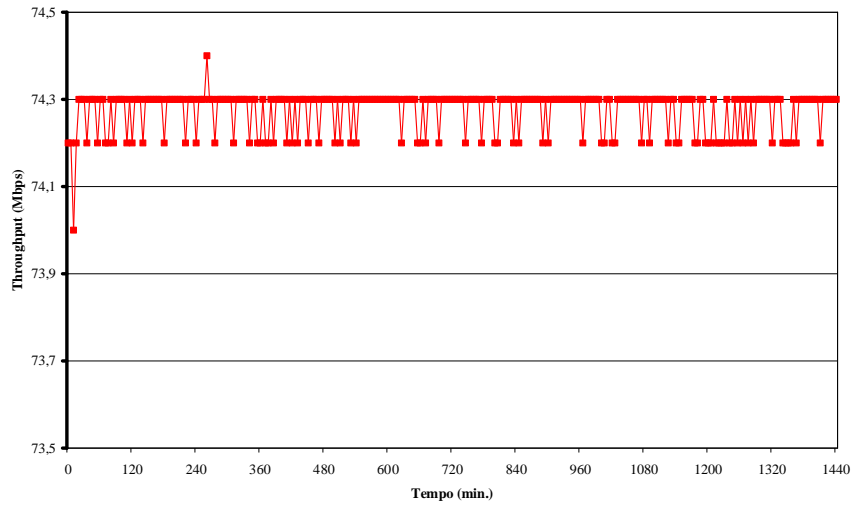


Fig. A.33 - Andamento del throughput – da B verso A

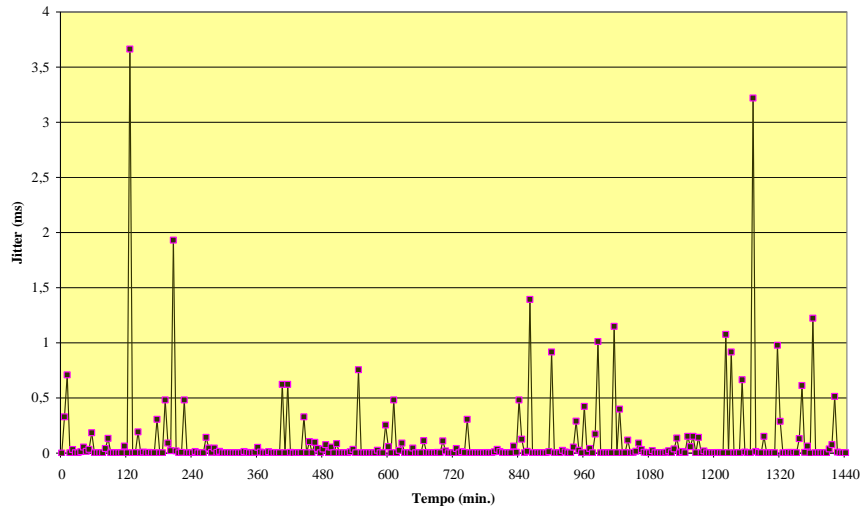


Fig. A.34 - Andamento del jitter – da B verso A

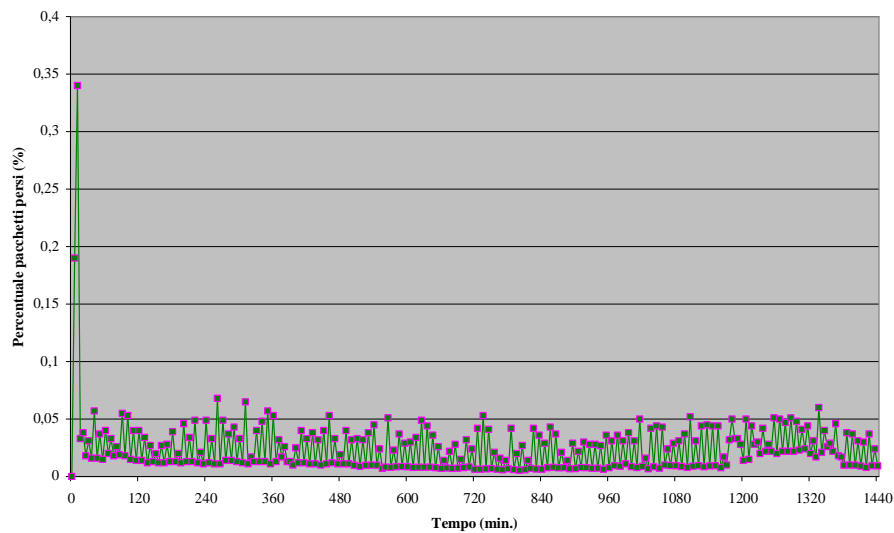


Fig. A.35 - Andamento del packet loss – da B verso A

Traffico UDP in presenza di precipitazioni – durata del test: 24 ore

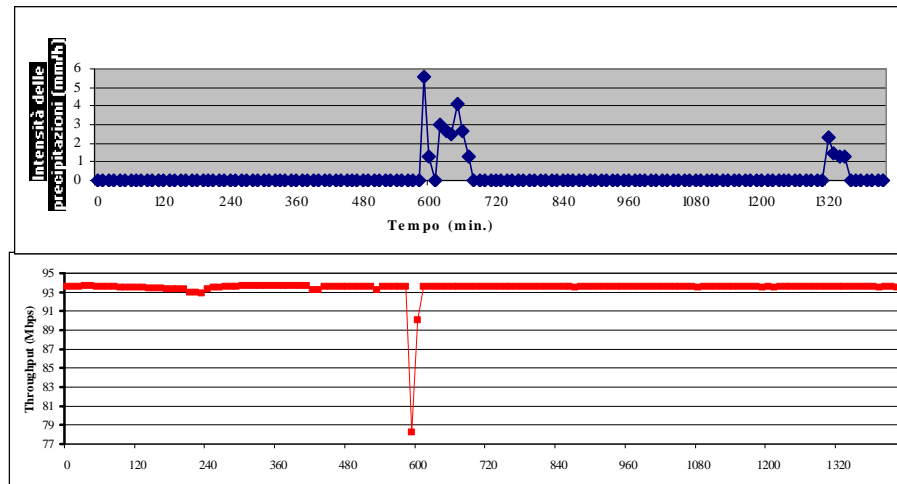


Fig. A.36 – Andamento del throughput – da A verso B

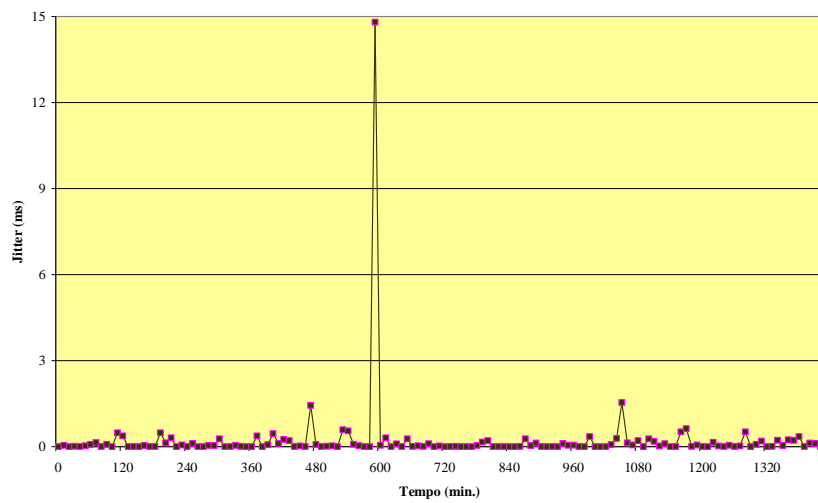


Fig. A.37 - Andamento del jitter – da A verso B

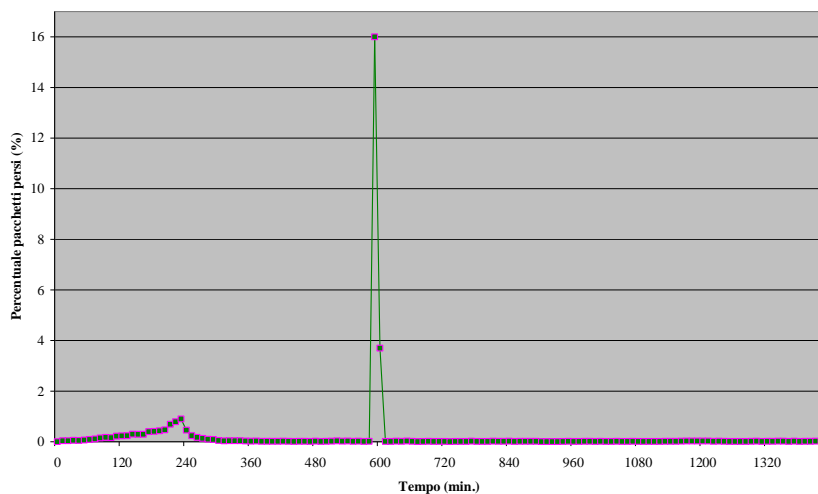


Fig. A.38 - Andamento del packet loss – da A verso B

10. Riferimenti

- [1] P.F.M. Smulders, “60 GHz radio: prospects and future directions”, Eindhoven University of Technology, 2003;
- [2] Nan Guo, Robert C. Qiu, Shaomin S. Mo, Kazuaki Takahashi, “60-GHz Millimeter-Wave Radio: Principle, Technology, and New Results”, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, Settembre 2006.

11. Ringraziamenti

Si ringraziano per la collaborazione prestata in occasione dello svolgimento delle prove sperimentali e della revisione del documento gli ingg. Luca Rea, Sergio Pompei e Alessandro Valenti.