

**Elisa Ricci**

**Manuela Vaser**

Università degli Studi di Roma  
"Tor Vergata" - Dipartimento  
di Ingegneria Elettronica

**Giuseppe Pierr**

**Elio Restuccia**

**Gianmarco Fusco**

**Massimo Ferrante**

Istituto Superiore delle  
Comunicazioni e delle  
Tecnologie dell'Informazione -  
ISCOM

## **Il servizio radiomobile LTE in banda 2300 MHz? Potenziali effetti sulle radio LAN operanti in banda 2400 MHz. Sperimentazione in laboratorio.**

**LTE mobile radio service in 2300 MHz band?  
Potential effects on radio LAN working in 2400 MHz  
band. Laboratory experimentation.**

**Sommario:** Si assiste oggi ad un cambiamento significativo nella fruizione dei contenuti di Internet. Gli utenti si affidano sempre di più alle tecnologie radiomobili, complice anche una maggiore diffusione di terminali cellulari.

Per venire incontro alle esigenze di maggior velocità di trasmissione e volume di traffico, si è pensato ad un nuovo assetto della banda dei 2000 MHz che prevede l'attribuzione al servizio radiomobile di un'ulteriore porzione dello spettro elettromagnetico.

Ciò porta all'urgenza di valutare la coesistenza con le altre tecnologie radio che lavorano in bande adiacenti, e quindi fornire suggerimenti per gestire i possibili problemi di interferenza tra i sistemi.

Il potenziale impatto, prodotto dai segnali TDD-LTE, sulla qualità di servizio percepita dagli utenti Wi-Fi e sotto diverse condizioni operative, è stato simulato nei laboratori dell'Istituto Superiore C.T.I., che a tal fine ha condotto una campagna di misurazioni.

**Abstract:** A significant change in the use of Internet content is actually ongoing. Users rely more and more on mobile radio technologies, thanks to a capillary diffusion of mobile terminals.

In order to face with the transmission speed and traffic volume requirement, a new configuration of the 2000 MHz band has been proposed, in order to provide the new electromagnetic spectrum allocation to the mobile service.

The assessment of the coexistence between radio technologies, working in adjacent bands, becomes urgent, providing suggestions for dealing with the possible interference problems between systems.

The potential impact of TDD-LTE signals on quality of service perceived by the Wi-Fi users, under different operating conditions, has been simulated in the Istituto Superiore C.T.I. laboratory, and a measurement campaign has been conducted.

## 1. Introduzione

Nel 2014 la CEPT (Conferenza Europea delle amministrazioni delle Poste e delle Telecomunicazioni) ha approvato la ECC Decision (14)02 [1] con lo scopo di armonizzare le condizioni tecniche delle reti di comunicazione mobili/fisse nella banda 2300-2400 MHz, includendo l'utilizzo della banda larga wireless. Si prevede nel prossimo futuro un sempre maggior sfruttamento di questa porzione dello spettro da parte di sistemi quali Wi-Fi o tecnologie radiomobili. È pertanto di interesse valutare la possibile coesistenza di apparecchiature LTE (Long Term Evolution) in questa banda con dispositivi che operano nella banda adiacente superiore, come ad esempio i dispositivi Wi-Fi nella banda di funzionamento di 2400-2500 MHz [2].

I sistemi Wi-Fi operano per definizione in uno scenario di banda condivisa [3], e devono gestire la coesistenza con sistemi appartenenti ad altre tecnologie che sfruttano la stessa banda [4]. Inoltre, molti dispositivi Wi-Fi non godono di ottime caratteristiche di selettività, e per questo motivo potrebbero essere soggetti agli effetti interferenziali provocati da segnali LTE trasmessi in banda adiacente.

Diversi studi presenti in letteratura stanno dimostrando che, in determinate condizioni, i sistemi LTE possono generare livelli di interferenza tali da interrompere il normale funzionamento dei sistemi Wi-Fi [5], [6], [7]. I risultati mostrano come una separazione di frequenza possa mitigare tali effetti di interferenza. In particolare, Mass UK ha condotto diversi studi sulla coesistenza tra LTE e sistemi operanti nella banda 2400-2500 MHz [8].

In questa sede si trattano in particolare gli effetti che i segnali TDD-LTE potrebbero potenzialmente produrre sulla qualità di servizio avvertita dagli utenti Wi-Fi.

Nei laboratori dell'Istituto C.T.I. è stata condotta un'attività sperimentale, articolata in un programma di misurazioni con la finalità di valutare gli effetti di una eventuale coesistenza di segnali TDD-LTE nella banda 2300-2400 MHz e di segnali Wi-Fi nella banda 2400-2500 MHz.

Si parla in questo contesto di "effetti eventuali" in quanto, nella banda sopra indicata, l'operatività del servizio LTE è considerata solo in ipotesi.

Nel contesto sperimentale in esame il segnale Wi-Fi gioca il ruolo di segnale vittima, mentre il segnale LTE è considerato interferente.

Gli effetti sono valutati sulla base del rapporto I/C (Interference to Carrier), espresso in dB, tra il livello di potenza del segnale interferente LTE ed il livello di potenza del segnale utile Wi-Fi, misurati entrambi all'ingresso del ricevitore Wi-Fi sotto prova che verrà denominato DUT (Device Under Test).

Il throughput, indice dell'effettivo utilizzo della capacità del collegamento tra i Wi-Fi, espresso in Mb/s, rappresenta il parametro di qualità scelto per misurare l'impatto dell'interferente LTE. Una riduzione delle prestazioni è riscontrata come una riduzione del throughput.

## 2. Tecnologie coinvolte

### A – Dispositivi Wi-Fi

Oltre all'uso diffuso in reti aziendali e domestiche, i dispositivi Wi-Fi sono in uso in una vasta gamma di applicazioni consumer, quali cellulari, laptop, tablet, televisori, console di gioco, assistenza sanitaria. Per questi motivi, riveste una certa importanza la questione riguardante l'eventuale degradazione delle prestazioni dei ricevitori Wi-Fi a causa di un nuovo servizio operante in una banda adiacente.

I dispositivi Wi-Fi si basano sulle specifiche dello standard IEEE 802.11 [9], che indica un insieme di standard per le reti WLAN, con particolare riguardo al livello fisico e MAC (Media Access Control) della pila protocollare ISO/OSI, specificando sia l'interfaccia tra client ed access point, che quella tra client wireless. La famiglia 802.11 comprende attualmente quattro versioni dello standard dedicati alla trasmissione delle informazioni (a, b, g, n). Altri standard (c, d, e, f, h) riguardano invece estensioni e miglioramenti del servizio.

I dispositivi Wi-Fi utilizzati durante le misurazioni in laboratorio appartengono agli standard 802.11b e 802.11g.

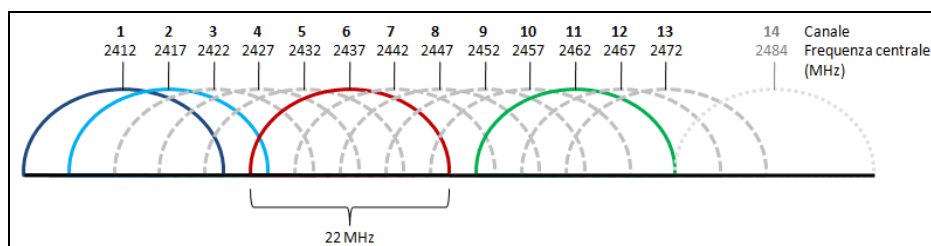
L'IEEE 802.11b utilizza la banda dei 2400 MHz e prevede una velocità di trasmissione teorica di 11 Mb/s, che si traduce spesso in 6 Mb/s reali con modulazione DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum).

L'IEEE 802.11g utilizza la stessa banda di frequenze dello standard 802.11b, ma incrementa il throughput passando ad una velocità nominale di 54 Mb/s, con una velocità reale che si attesta spesso a 24 Mb/s, utilizzando la tecnica di modulazione OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Tale tecnologia è totalmente compatibile con l'802.11b, e prevede una riduzione della velocità ed un adattamento della modulazione quando si trova ad operare con dispositivi appartenenti allo standard con prestazioni inferiori.

I sistemi Wi-Fi che operano nella banda dei 2400 MHz utilizzano la canalizzazione mostrata in Figura 1. In Europa vengono utilizzati i primi 13 canali, parzialmente sovrapposti tra loro in frequenza. Per questo motivo, sono stati definiti 3 canali preferenziali non sovrapposti, indicati come canale 1, 6 e 11, distanziati di 25 MHz, evidenziati in Figura 1.

L'operatività contemporanea negli altri canali è comunque resa possibile grazie alla particolare modalità a burst (trasmissione dati a pacchetti in brevi periodi di tempo con traffico regolato tra le due unità connesse), e anche grazie alle tecniche di ascolto del canale e di *collision avoidance* adottate dal protocollo di comunicazione.

Fig. 1. Canalizzazione prevista dallo standard 802.11 per la banda 2400 MHz, con evidenza dei canali non sovrapposti 1, 6 e 11.



La sensibilità dei dispositivi Wi-Fi può essere valutata in termini di MUS (Minimum Usable Signal), noto come il valore minimo di potenza ricevuta, in assenza di agenti interferenti, per garantire un throughput del dispositivo al di sopra di 1 Mb/s [8].

Una caratteristica interessante di alcuni sistemi Wi-Fi è la possibilità di variare lo schema di modulazione numerica adottato dalle sottoportanti OFDM (IEEE 802.11g per i dispositivi utilizzati nella sperimentazione), in funzione della quantità di informazione da trasmettere e in dipendenza delle condizioni di propagazione, più o meno degradate, del canale.

L'adattabilità dello schema di modulazione (64QAM, 16QAM e QPSK) consente di mantenere operativo il collegamento, anche se con capacità ridotta, in condizioni ambientali avverse.

## B – Il servizio radiomobile LTE

LTE nasce storicamente come rete di accesso mobile a banda larga, ed è stato sviluppato per rispondere alle nuove e sempre più sfidanti richieste del mercato per la trasmissione di contenuti multimediali di alta qualità, con l'obiettivo di promuovere l'uso della banda larga in mobilità. Iniziato nel novembre del 2004, il progetto LTE della tecnologia mobile UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) si è concentrato sul rafforzamento della UTRA (Universal Terrestrial Radio Access), fino a definire l'E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access). La standardizzazione è in carico al 3GPP (3rd Generation Partnership Project), che con il report [10] ha dettato le direttive principali della nascente tecnologia mobile, ed è stata portata a termine nel 2008.

LTE è in grado di supportare alti data rate con picchi di 50 Mb/s in uplink, e 100 Mb/s in downlink, sfruttando una larghezza di banda scalabile da 1.25 MHz a 20 MHz.

Inoltre, consente configurazioni multi-antenna sia in ricezione che in trasmissione, un elevato supporto alla mobilità, un alto livello di qualità del servizio, latenze ridotte (inferiori ai 100 ms per il passaggio dallo stato *idle* allo stato *active*) ed elevata efficienza spettrale, fino a 3 volte superiore alla più evoluta versione dell'UMTS. Le caratteristiche di livello fisico della tecnologia, in grado di soddisfare questi requisiti, sono dettate dallo standard 3GPP TS 36.211 in [11].

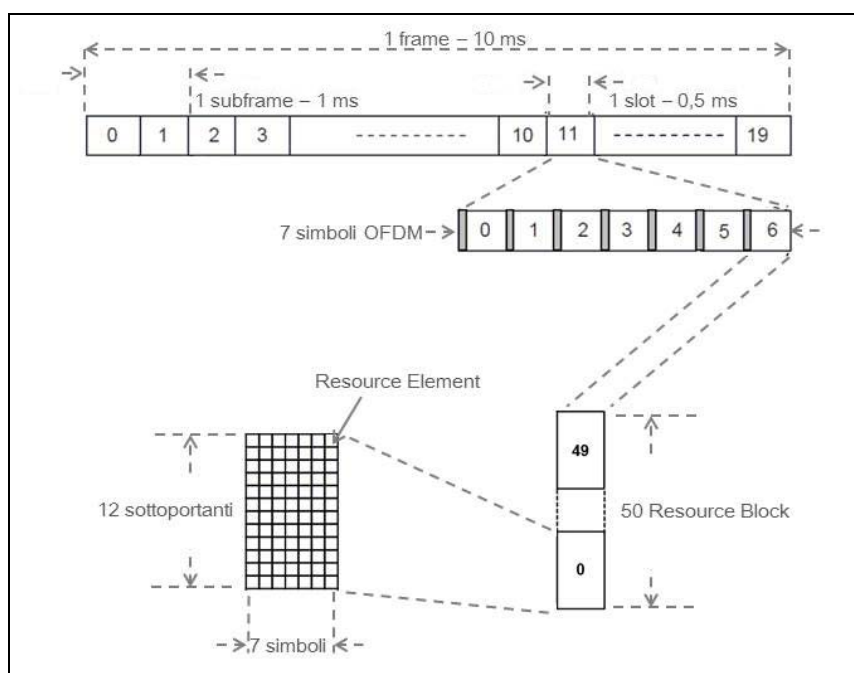
LTE fa uso di due schemi di accesso al mezzo trasmissivo, entrambi basati sull'impegno della banda disponibile con un insieme di sottoportanti ortogonali che consentono la compattazione dello spettro di emissione:

- OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) per la tratta di downlink;
- SC-FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) per l'uplink.

In LTE le risorse disponibili, sia in downlink che in uplink, sono gestite secondo una struttura a griglia tempo-frequenza. In particolare, nel dominio del tempo i dati sono organizzati in frame della durata di

10 ms. Ciascun frame è costituito da 10 subframe della durata di 1 ms, ognuno dei quali diviso in due time slot della durata di 0.5 ms ciascuno. Ogni slot comprende 7 simboli OFDM. Ogni slot è costituito da 12 sottoportanti spaziate di 15 kHz, che nel loro insieme sono indicate come RB (Resource Block).

Un elemento della griglia rappresenta un simbolo OFDM in una determinata sottoportante ed è definito come RE (Resource Element). Quindi, un RB è costituito da 84 RE. La Figura 2 mostra la struttura di un frame e l'organizzazione delle risorse disponibili in una griglia tempo-frequenza in cui sono messi in evidenza la struttura di un RB e di un RE.



LTE supporta due modalità di trasmissione:

- FDD (Frequency Division Duplexing), che prevede una separazione dei flussi di uplink e di downlink nel dominio delle frequenze;
- TDD (Time Division Duplexing), che attua una separazione nel dominio del tempo, allocando intervalli temporali diversi per l'uplink e il downlink, pur impiegando la stessa banda di frequenze.

Lo standard inoltre definisce due differenti radio frame, entrambi di durata di 10 ms:

- Tipo 1, applicabile alle trasmissioni FDD, con bande di frequenze appaiate. Ogni frame di durata pari a 10 ms è diviso in dieci subframe da 1 ms ciascuno, mentre ogni subframe è composto da due slot di durata pari a 0,5 ms, ed è assimilabile ad una struttura come quella presentata in Figura 2;

Fig. 2. Struttura del frame LTE.

- Tipo 2, applicabile alle trasmissioni TDD, con unica banda di frequenze. Ogni frame è di durata pari a 10 ms ed è formato da due half-frame di 5 ms, ciascuno dei quali composto di 5 subframe di durata 1 ms. Ogni subframe è formato da 10 slot di durata pari a 0,5 ms, che comprendono sia slot dedicati al traffico dati in uplink o downlink, sia da tre campi speciali, con lunghezze individuali configurabili e durata totale di 1 ms:
  - DwPTS (Downlink Pilot Time Slot) e UpPTS (Uplink Pilot Time Slot), che contengono informazioni di controllo;
  - GP (Guard Period), che compensa il tempo di switching relativo al passaggio da trasmissione in uplink a trasmissione in downlink, e viceversa.

La tecnica TDD è altamente vantaggiosa nel caso di flussi di trasmissione e ricezione fortemente sbilanciati tra loro, permettendo un'allocazione ottimizzata e dinamica delle risorse, a discapito però di una maggiore complessità realizzativa. Per ottenere questa allocazione dinamica, lo standard [11] definisce 7 diverse configurazioni, che sfruttano periodicità di 5 ms o 10 ms. La Tabella 1 mostra le diverse configurazioni di un TDD-LTE, in cui D indica il subframe dedicato per la trasmissione Downlink, U indica il subframe dedicato per la trasmissione Uplink e S indica il subframe speciale.

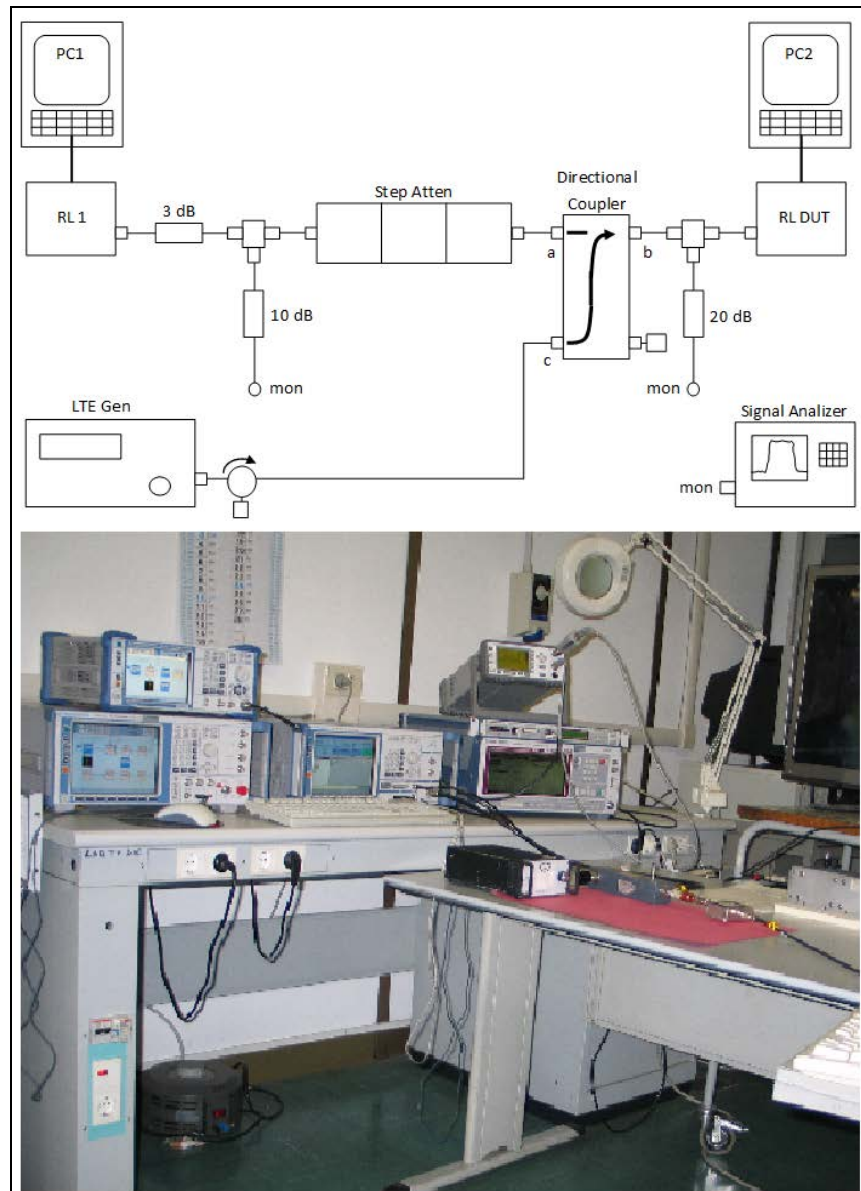
# config	Periodicità	Subframe TDD LTE									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	5 ms	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	5 ms	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	10 ms	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	10 ms	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	10 ms	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	5 ms	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

### 3. Il banco di misura

Dopo aver introdotto le tecnologie oggetto della sperimentazione, è necessario descrivere le linee generali del banco di misura organizzato in laboratorio, e rappresentato in Figura 3.

E' importante sottolineare che la sperimentazione valuta gli effetti della coesistenza tra Wi-Fi ed TDD-LTE in modalità condotta. Per questo motivo sono stati utilizzati, come dispositivi Wi-Fi, radio LAN dotate di antenne esterne non integrate e rimovibili, così da renderne possibile la connessione al banco sotto condizioni controllabili con maggiore facilità ed efficacia rispetto ad una configurazione con modalità irradiata.

*Tab. 1. Configurazioni UL/DL per TDD-LTE.*



Il banco realizza, pertanto, un collegamento bidirezionale tra due radio LAN, e svolge sia la funzione di simulare l'attenuazione di propagazione tra le relative antenne, sia la funzione di immettere un segnale interferente sul ricevitore di una delle due.

Le prove sono state condotte nei laboratori dell'Istituto Superiore C.T.I. con la seguente strumentazione, rappresentata in Figura 3:

*Fig. 3. Banco per la simulazione degli effetti della presenza di segnali LTE TDD in banda 2300-2400 MHz sulle prestazioni delle radio LAN operanti in banda 2400-2500 MHz.*

- PC1: PC che controlla la radio LAN client, indicata come RL1, costituita da una scheda Wi-Fi, appartenente allo standard IEEE 802.11g, integrata con antenna rimovibile, utilizzata nella campagna di misurazioni;
- PC2: PC che controlla la radio LAN server, indicata come RL DUT, costituita di volta in volta dalle diverse radio LAN sotto test;
- Generatore di segnale LTE;
- Analizzatore di segnali;

- Catena di attenuazione;
- Accoppiatore direzionale.

La radio LAN RL1 crea e mantiene un dialogo con la radio LAN DUT, attraverso l'utilizzo del software open-source lperf3 [12], che misura il throughput di una rete client/server.

Sono state testate 4 radio LAN, caratterizzate da diversi livelli di sensibilità (MUS) e performance (throughput), mostrate in Tabella 2:

radio LAN	Standard	MUS	Max throughput
RL2	802.11g	-96 dBm	24,1 Mb/s
RL3	802.11g	-76 dBm	22,8 Mb/s
RL4	802.11b	-94 dBm	5,7 Mb/s
RL5	802.11g	-93 dBm	23,8 Mb/s

La funzione di simulazione dell'attenuazione di propagazione è ottenuta grazie ai vari componenti del banco (attenuatori fissi, divisori di potenza e cavi), alla cui attenuazione si aggiunge quella regolabile dell'attenuatore variabile a passi di 1 dB (da 0 a 109 dB). La variabilità dell'attenuazione è utilizzata per impostare diversi livelli del segnale utile del DUT (C-carrier) scelti per i test: MUS+30 dB; MUS+20 dB; MUS+10 dB.

Il livello di potenza del segnale LTE (I-interferer) è regolabile fino a +1 dBm all'ingresso del DUT. La regolazione è ottenuta tramite l'apposito comando del generatore che simula il segnale, e che garantisce un ottimo grado di accuratezza.

Il banco dispone di punti di monitoraggio per il controllo dei livelli e delle caratteristiche sia spettrali che di modulazione dei segnali.

Una volta eseguita la calibrazione del banco si hanno tutti gli elementi per poter valutare i vari livelli alle porte d'ingresso dei ricevitori e correggere i valori letti sui punti di monitoraggio, senza la necessità di ulteriori misurazioni.

L'accoppiatore direzionale consente una connessione bidirezionale simmetrica tra le due radio LAN, l'immissione di un segnale esterno, proveniente dal generatore che simula il segnale LTE, solo sul DUT ed il mantenimento dell'adattamento di impedenza tra le tre porte utilizzate.

In prossimità delle uscite delle radio LAN sono inseriti divisori di potenza con la funzione di creare punti di monitoraggio dei rispettivi segnali emessi.

Il monitoraggio viene effettuato con un analizzatore di segnali, che copre la banda di funzionamento, in grado di tenere sotto controllo lo spettro, il livello di potenza e le caratteristiche di modulazione delle sorgenti Wi-Fi.

Tutti i dispositivi sono connessi tra loro tramite connettori e cavi coassiali che garantiscono sufficiente schermaggio contro eventuali irradiazioni indesiderate che potrebbero provocare il fenomeno dello scavalco del banco. Ad evitare ciò, le due radio LAN sono state poste il più lontano possibile tra loro, con il DUT alloggiato all'interno di un

---

*Tab. 2. Caratteristiche delle radio LAN testate.*

---



contenitore metallico schermante dotato di fori per il passaggio dei cavi di connessione.

Il parametro misurato è rappresentato dal throughput il cui valore viene monitorato tramite Iperf3 sul PC2. Il valore di tale parametro dipende dalle condizioni configurabili sia per il Wi-Fi sia per il generatore LTE, e misura la velocità del flusso dati del DUT per la particolare condizione di rete e interferenza introdotta. In Figura 4 è mostrata la stringa di configurazione di Iperf3, che consente di simulare un collegamento TCP tra 40 utenti client e 40 utenti server. La ragione di tale numerosità è legata al raggiungimento del throughput massimo previsto dallo standard Wi-Fi in assenza di interferenza, ottenibile con un numero elevato di utenti. In Figura 5 è mostrata l'interfaccia di Iperf3, e nell'ultima riga si può notare il valore di throughput espresso in Mb/s. La Figura 6 rappresenta il Task Manager di Windows, che riporta l'andamento del throughput in funzione del tempo.

#### Iperf3 Configuration String

##### Fields:

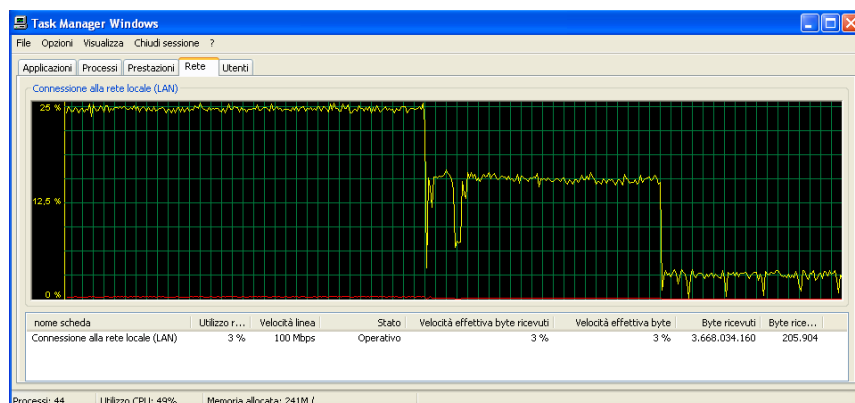
**-c:** client IP address;  
**-i (2):** Sets the interval time in seconds between periodic bandwidth, jitter, and loss reports;  
**-t (20000):** The time in seconds to transmit for;  
**-b (100M):** Set target bandwidth to n bits/sec (default 1 Mb/s for UDP, unlimited for TCP);  
**-4:** IPv4;  
**-P (40):** number of simultaneous connections to make to the server.

```
File Modifica Formato Visualizza ?
@echo off
cd \Documents and Settings\Administrator\Desktop\wifi_lte\iperf32
start iperf3 -c 192.168.0.10 -i 2 -t 20000 -b 100M -4 -P 40
```

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
[ 31] 702.00-704.00 sec 126 KBytes 517 Kbits/sec
[ 33] 702.00-704.00 sec 252 KBytes 1.03 Mbits/sec
[ 35] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 773 Kbits/sec
[ 37] 702.00-704.00 sec 126 KBytes 516 Kbits/sec
[ 39] 702.00-704.00 sec 252 KBytes 1.03 Mbits/sec
[ 41] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 774 Kbits/sec
[ 43] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 774 Kbits/sec
[ 45] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 774 Kbits/sec
[ 47] 702.00-704.00 sec 126 KBytes 517 Kbits/sec
[ 49] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 773 Kbits/sec
[ 51] 702.00-704.00 sec 126 KBytes 517 Kbits/sec
[ 53] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 773 Kbits/sec
[ 55] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 773 Kbits/sec
[ 57] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 773 Kbits/sec
[ 59] 702.00-704.00 sec 129 KBytes 528 Kbits/sec
[ 61] 702.00-704.00 sec 126 KBytes 516 Kbits/sec
[ 63] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 773 Kbits/sec
[ 65] 702.00-704.00 sec 126 KBytes 515 Kbits/sec
[ 67] 702.00-704.00 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec
[ 69] 702.00-704.00 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec
[ 71] 702.00-704.00 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec
[ 73] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 774 Kbits/sec
[ 75] 702.00-704.00 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec
[ 77] 702.00-704.00 sec 189 KBytes 773 Kbits/sec
[ 79] 702.00-704.00 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec
[ 81] 702.00-704.00 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec
[ 83] 702.00-704.00 sec 0.00 Bytes 0.00 bits/sec
[SUM] 702.00-704.00 sec 5.78 MBytes 24.3 Mbits/sec
```

Fig. 4. Stringa di configurazione Iperf3.

Fig. 5. Interfaccia Iperf3.



#### 4. Risultati

Per valutare l'impatto del segnale interferente TDD-LTE sulle prestazioni del segnale Wi-Fi, sono state sottoposte a prova alcune radio LAN, includendo nella sperimentazione dispositivi appartenenti allo standard 802.11b (RL4) e 802.11g (RL2, RL3, RL5), tutti dotati di antenne removibili, in modo da consentire misure di tipo condotto.

Per il sistema **Wi-Fi** sono stati identificati i diversi parametri caratteristici.

- **Canale operativo**  
Per ogni dispositivo in esame sono stati considerati i canali 1, a frequenza centrale 2412 MHz, 6 a frequenza centrale 2437 MHz, e 11 a frequenza centrale 2462 MHz, eseguendo quindi prove per ogni canale considerato. Inoltre, per la prima radio LAN testata, è stato considerato anche il canale 2, a frequenza centrale 2417 MHz.
- **Livello del segnale**  
Per permettere il confronto tra dispositivi Wi-Fi diversi si è scelto di utilizzare un livello del segnale utile riferito al MUS, regolandolo di volta in volta a MUS+30 dB, MUS+20 dB, MUS+10 dB. In questo modo è stato possibile confrontare tra loro dispositivi DUT diversi, indipendentemente dalla sensibilità caratteristica di ciascuno.
- **Protocollo di comunicazione**  
La comunicazione tra le radio LAN considerate è avvenuta tramite protocollo TCP (Transmission Control Protocol), simulato dal software Iperf3. Il protocollo TCP è di tipo "connection oriented", che implica la negoziazione della connessione tra sorgente e destinazione prima di poter trasmettere dati. Il protocollo garantisce la consegna dei pacchetti trasmessi in ordine, consegnandoli uno alla volta, e possiede la funzionalità di controllo di errore del flusso dati tra i terminali in comunicazione, consentendo la ritrasmissione dei pacchetti corrotti o persi attraverso il meccanismo degli acknowledgements. Per le misure in laboratorio è stato scelto

*Fig. 6. Andamento del throughput in funzione del tempo.*

questo protocollo, perché in contesti reali il download o l'upload di file, che generano traffico di tipo TCP, sono tra le operazioni più diffuse tra gli utenti Wi-Fi.

L'interferente **TDD-LTE** è stato simulato attraverso un generatore di segnale LTE, impostando i diversi parametri utilizzati nella sperimentazione. Qui di seguito si elencano i più caratteristici.

- **Larghezza di Banda**  
Per la sperimentazione è stata scelta una larghezza di banda di 20 MHz.
- **Frequenza operativa**  
La frequenza centrale LTE è stata impostata a 2390 MHz, un valore di frequenza al limite della banda disponibile ipotizzata, ritenuto il più critico nei riguardi della coesistenza con il Wi-Fi.
- **Modalità Uplink/Downlink**  
Il segnale TDD-LTE è stato simulato in entrambe le condizioni di uplink e downlink. Sono state considerate due configurazioni, configurazione 3 e 0, indicate in Tabella 1.
- **Carico di traffico**  
Il carico di funzionamento TDD-LTE, sia in uplink che in downlink, è stato simulato al 100%, considerando quindi occupati tutti i RB disponibili in trasmissione.

Nelle figure che seguono si mostra lo spettro e l'andamento nel tempo del segnale TDD-LTE in uscita dal generatore. In Figura 7 si rappresenta, a titolo d'esempio, lo spettro in frequenza del segnale in downlink per la configurazione 3. Gli spettri delle altre combinazioni prese in esame sono analoghi.

Nelle Figure 8 e 9 sono rappresentati gli andamenti nel tempo del segnale TDD-LTE in configurazione 3, per l'uplink (Figura 8) e il downlink (Figura 9). Si nota la differente occupazione temporale nei due casi, come suggerito dall'alternanza di subframe dedicati all'uplink o al downlink per la configurazione 3, mostrata nella Tabella 1.

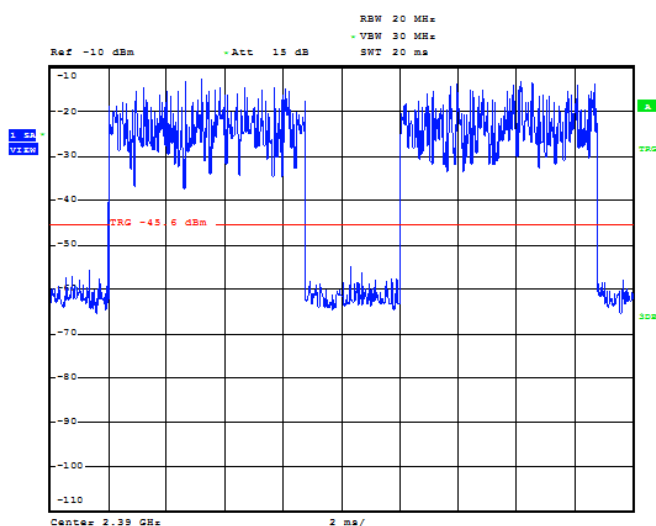
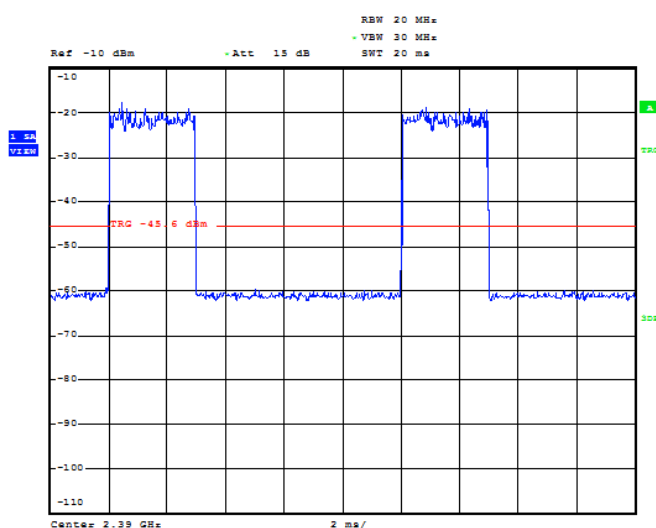
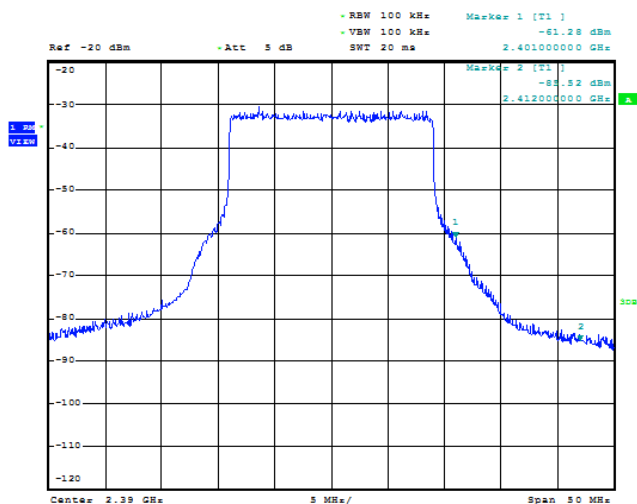


Fig. 7. Spettro del segnale TDD-LTE.

Fig. 8. Andamento nel tempo del segnale TDD-LTE uplink in configurazione 3.

Fig. 9. Andamento nel tempo del segnale TDD-LTE downlink in configurazione 3.

Nella Tabella 3 è riportata, in maniera schematica, la combinazione dei parametri di esercizio dei due servizi impostata.

E' stata condotta una campagna di misurazioni, il cui scopo è stato quello di verificare per quale rapporto I/C il throughput Wi-Fi dei DUT testati (RL2, RL3, RL4, RL5) scende al di sotto di 1 Mb/s. Nel caso del

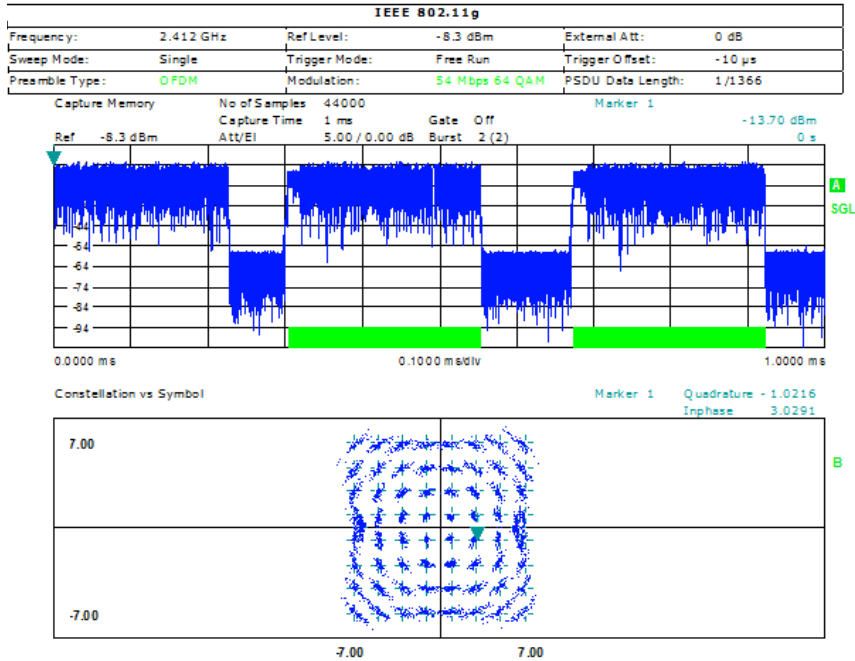
protocollo IEEE 802.11g, per ogni combinazione misurata, è stata registrata, oltre al throughput, anche lo schema di modulazione adottato nella comunicazione fra le radio LAN. Ciascuna serie di misurazioni eseguite, fissati i parametri, prevede la costruzione di un grafico che pone in relazione il throughput del DUT al variare del rapporto I/C tra il livello di potenza I dell'interferente e il livello di potenza C del segnale utile rilevati all'ingresso del DUT. Dal momento che il valore C è fisso, il throughput risulta essere dipendente dalla sola variazione della potenza I dell'interferente.

Impostazioni radiolan WiFi		Impostazioni LTE			
		Configurazione TDD LTE 3		Configurazione TDD LTE 0	
		Downlink 2390 MHz	Uplink 2390 MHz	Downlink 2390 MHz	Uplink 2390 MHz
CH1 2412MHz	MUS+30	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5
	MUS+20	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5
	MUS+10	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5
CH2 2417MHz	MUS+30	RL2	RL2	RL2	RL2
	MUS+20	RL2	RL2	RL2	RL2
	MUS+10	RL2	RL2	RL2	RL2
CH6 2437MHz	MUS+30	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5
	MUS+20	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5
	MUS+10	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5
CH11 2462MHz	MUS+30	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5
	MUS+20	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5
	MUS+10	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5	RL2 - RL3 - RL4 - RL5

In buone condizioni del collegamento Wi-Fi (ossia in assenza di segnale interferente TDD-LTE), la modulazione delle sottoportanti OFDM delle radio LAN 802.11g è sempre 64QAM. Incrementando gradualmente il livello della potenza interferente TDD-LTE, le condizioni del collegamento degradano; a questo punto si osserva un comportamento comune tra le radio LAN sotto test, in base al quale si stabilisce il passaggio ad una modulazione più robusta, come 16QAM e successivamente anche QPSK, in grado di proteggere i dati utili dei pacchetti TCP dall'interferenza che il segnale TDD-LTE provoca.

In Figura 10 è possibile osservare la costellazione concordata tra le due radio LAN, RL1 e radio LAN DUT di tipo 802.11g, in assenza di segnale interferente. Inoltre, si può notare la modalità di trasmissione dati a burst, caratteristica del protocollo di comunicazione 802.11.

*Tab. 3. Principali parametri di prova.*



Le Figure 11-14 che seguono mostrano gli andamenti del throughput, espresso in Mb/s, in funzione del rapporto I/C, espresso in dB.

Per ogni figura sono presenti quattro grafici, uno per ogni combinazione MUS+30 mostrata nella Tabella 3. In ogni grafico è presente una curva per ogni canale Wi-Fi testato, con colori diversi, in cui sono posti in evidenza alcuni punti, indicati con lettera maiuscola, la cui interpretazione è mostrata nella Tabella 4. In prossimità del punto contrassegnato con la lettera A, la modulazione delle sottoportanti OFDM passa alternativamente da 64QAM a 16QAM. Nel tratto di curva che precede localmente la lettera A si riscontra una preponderanza di modulazione 64QAM, nel tratto di curva successivo la modulazione principale registrata diventa la 16QAM.

La lettera B indica il punto del tratto di curva dopo il quale la modulazione osservata è esclusivamente 16QAM.

Infine, la lettera C indica il punto dopo il quale la modulazione osservata si mantiene QPSK fino alla caduta del collegamento.

Nei grafici mostrati nelle Figure 11-14 si può notare come, in corrispondenza della transizione di modulazione indicata con le lettere, in alcuni casi si osservi un temporaneo innalzamento del throughput. Ciò è dovuto al passaggio ad una modulazione più robusta.

Per tutti i grafici, in corrispondenza di bassi valori di I/C, il valore iniziale del throughput Wi-Fi del canale 11 risulta leggermente inferiore a quello degli altri canali, a causa della presenza ineliminabile di un forte segnale presente all'esterno del banco e proveniente da un'altra radio LAN operante nel canale 11 in ambiente prossimo al laboratorio. Ciò non ha comunque tolto validità alle risultanze finali.

Per la radio LAN RL2, i cui relativi grafici sono mostrati in Figura 11, il canale 1 ha un andamento del throughput che si discosta da quello registrato per gli altri canali. Esso evidenzia infatti una vistosa maggiore

Fig. 10. Caratteristiche di trasmissione dati tra la RL1 e il DUT. Modalità di trasmissione a burst e modulazione concordata.

sensibilità al segnale interferente. Questo comportamento potrebbe essere dovuto ad una scarsa reiezione del canale adiacente, piuttosto che all'interferenza co-canale dovuta alla parziale sovrapposizione delle code degli spettri LTE e Wi-Fi.

Infatti si è osservato un comportamento simile per la radio LAN RL5, come si può vedere in Figura 14, ma non per le radio LAN RL3 e RL4 (Figure 12 e 13).

La radio LAN RL4 mostra una certa uniformità nell'andamento del throughput, indipendentemente dalla modalità di trasmissione del segnale TDD-LTE. Occorre considerare che in questo caso la radio LAN utilizza lo standard 802.11b che prevede una modulazione fissa e robusta del tipo QPSK.

Per le altre radio LAN (RL2, RL3 e RL5), che utilizzano lo standard 802.11g, la modulazione delle sottoportanti OFDM varia in funzione della qualità del canale passando, con l'aumentare del livello del segnale interferente, gradatamente da 64QAM alle modulazioni più robuste 16QAM e QPSK.

Per tutte le radio LAN osservate, con livelli del segnale interferente molto elevati il degradamento delle prestazioni è attribuibile ad effetti di saturazione degli stadi d'ingresso del ricevitore, che provocano il blocking dello stesso, e la generazione di prodotti d'intermodulazione.

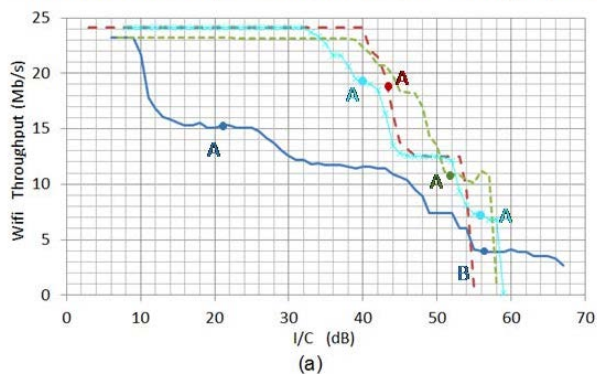
A	passaggio da 64QAM/16QAM a 16QAM/64QAM
B	passaggio a 16QAM
C	passaggio a QPSK

---

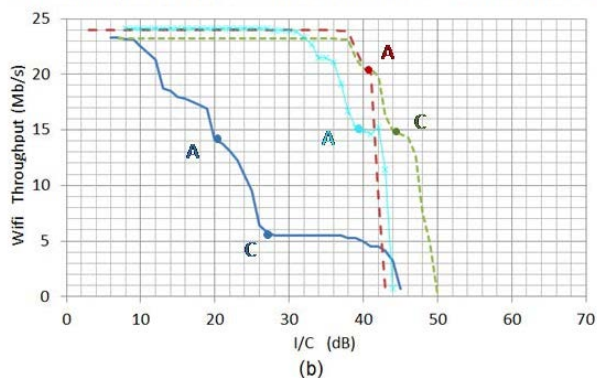
*Tab. 4. Interpretazione delle modulazioni sui grafici.*

---

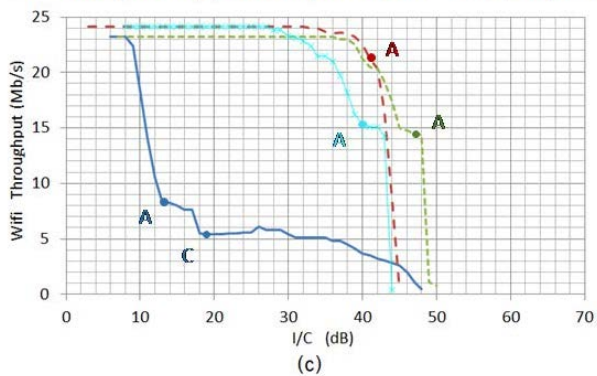
I : LTE TDD UL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100% Conf=3 - C : RL2, TCP, MUS+30



I : LTE TDD DL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100% Conf=3 - C : RL2, TCP, MUS+30



I : LTE TDD UL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100% Conf=0 - C : RL2, TCP, MUS+30



I : LTE TDD DL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100% Conf=0 - C : RL2, TCP, MUS+30

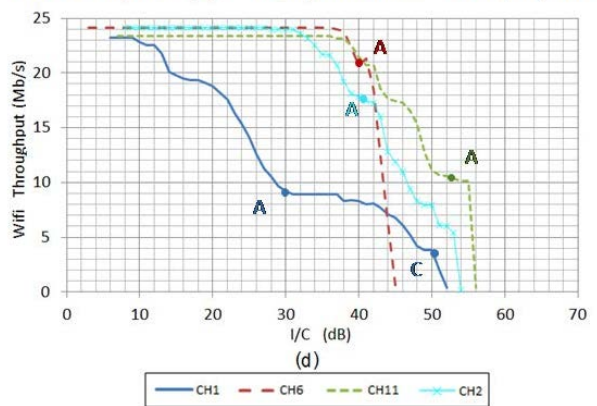


Fig. 11. Andamento del throughput in funzione del rapporto I/C per RL2.  
 (a) Uplink Configurazione 3;  
 (b) Downlink Configurazione 3;  
 (c) Uplink Configurazione 0;  
 (d) Downlink Configurazione 0.



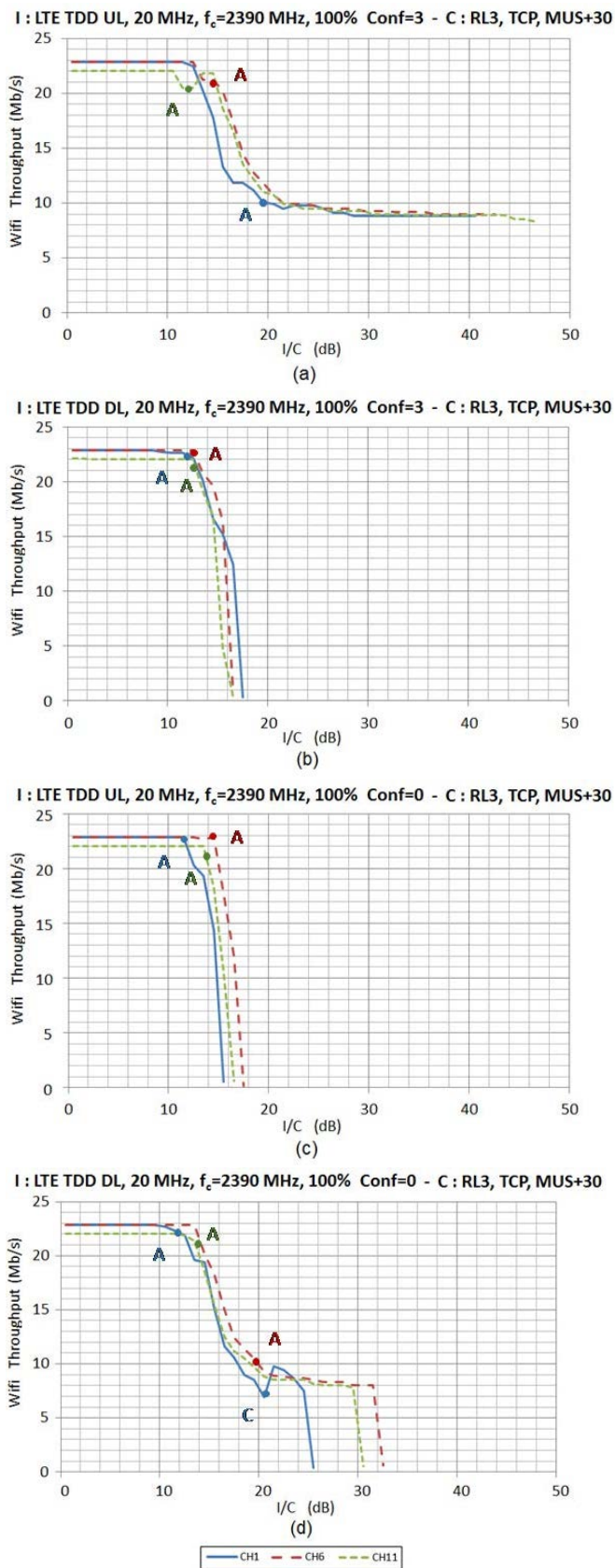
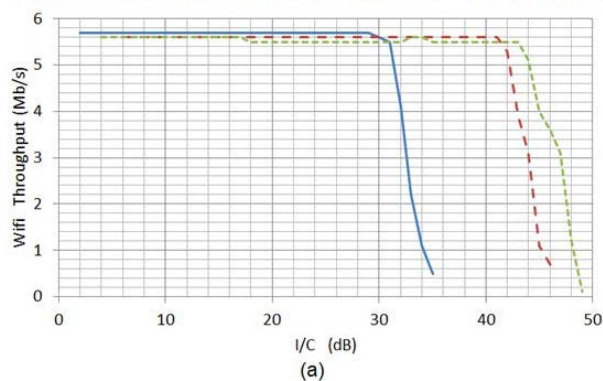
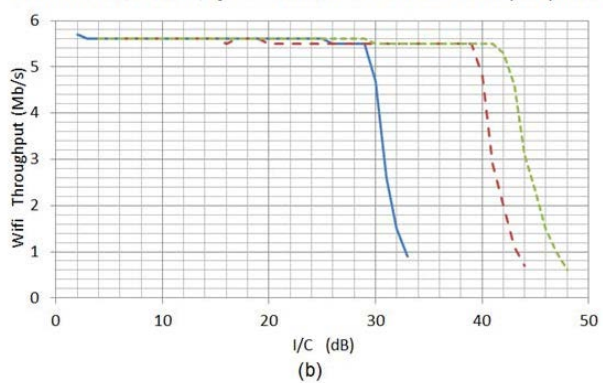


Fig. 12. Andamento del throughput in funzione del rapporto I/C per RL3.  
 (a) Uplink Configurazione 3;  
 (b) Downlink Configurazione 3;  
 (c) Uplink Configurazione 0;  
 (d) Downlink Configurazione 0.

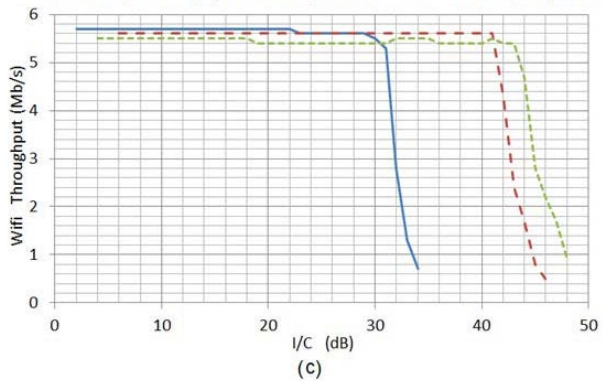
I : LTE TDD UL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100% Conf=3 - C : RL4, TCP, MUS+30



I : LTE TDD DL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100% Conf=3 - C : RL4, TCP, MUS+30



I : LTE TDD UL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100% Conf=0 - C : RL4, TCP, MUS+30



I : LTE TDD DL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100% Conf=0 - C : RL4, TCP, MUS+30

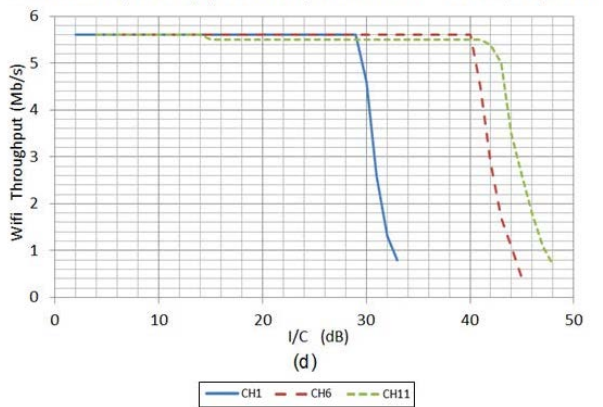
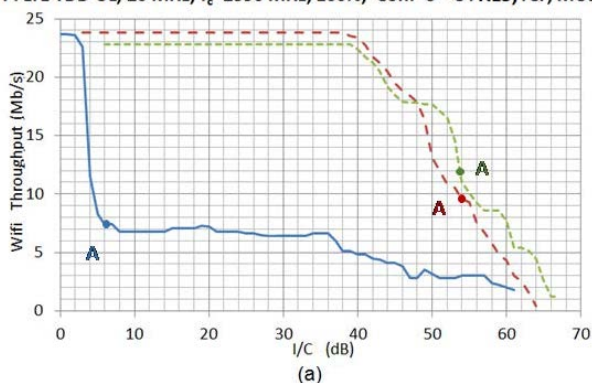


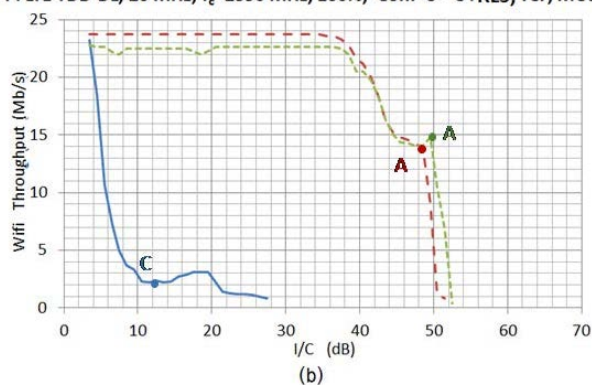
Fig.13. Andamento del throughput in funzione del rapporto I/C per RL4.

- (a) Uplink Configurazione 3;
- (b) Downlink Configurazione 3;
- (c) Uplink Configurazione 0;
- (d) Downlink Configurazione 0.

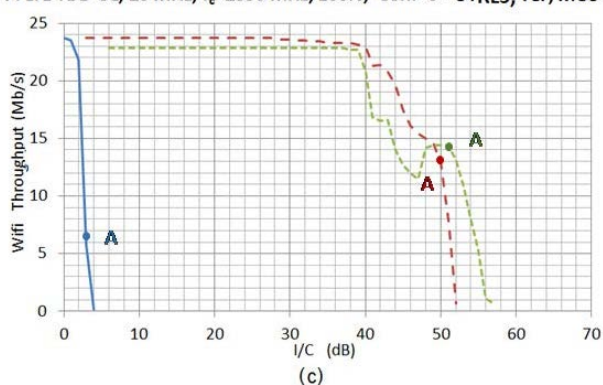
I : LTE TDD UL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100%, Conf=3 - C : RL5, TCP, MUS+30



I : LTE TDD DL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100%, Conf=3 - C : RL5, TCP, MUS+30



I : LTE TDD UL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100%, Conf=0 - C : RL5, TCP, MUS+30



I : LTE TDD DL, 20 MHz,  $f_c=2390$  MHz, 100%, Conf=0 - C : RL5, TCP, MUS+30

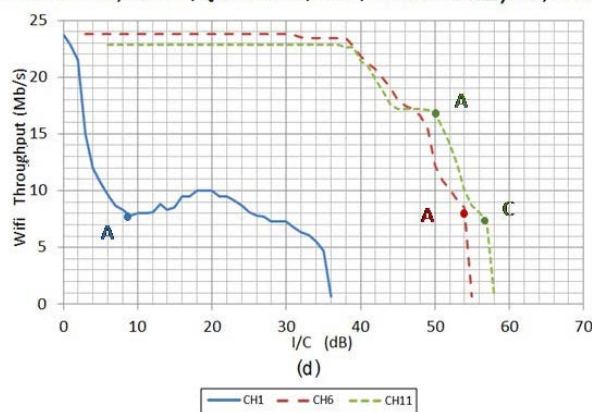


Fig.14. Andamento del throughput in funzione del rapporto I/C per RL5.  
 (a) Uplink Configurazione 3;  
 (b) Downlink Configurazione 3;  
 (c) Uplink Configurazione 0;  
 (d) Downlink Configurazione 0.

### **A – Confronto tra Uplink e Downlink**

Una prima interpretazione dei dati consiste nel valutare le prestazioni di ciascuna radio LAN al variare della modalità TDD-LTE, in uplink o in downlink. In particolare, sono state confrontate le modalità uplink/downlink relative a una stessa configurazione TDD-LTE.

Dalle Figure 11 (a-b), 12 (a-b) e 14 (a-b) si può notare come ciascuna radio LAN sia sensibile alla modalità di funzionamento TDD-LTE uplink o downlink, operante in configurazione 3. In particolare, per tutti i canali (1, 6, 11), le prestazioni del DUT sono maggiormente degradate quando l'interferente TDD-LTE è in modalità downlink (grafici (b) delle 3 figure). Questo è dovuto al fatto che la configurazione 3 ha un numero maggiore di subframe dedicati al downlink piuttosto che all'uplink, come si vede in Tabella 1, dove si contano, per questa configurazione, 6 subframe downlink e 3 subframe uplink. Ragionando in termini di bit fisici trasmessi in un frame, per questa configurazione, l'uplink trasmette approssimativamente 83000 bit, mentre il downlink 202000. Per questo motivo, il segnale interferente in modalità downlink riduce le prestazioni del DUT al di sotto del valore minimo di 1 Mb/s per rapporti I/C minori rispetto alla modalità uplink, come si evince dai grafici (a) delle 3 figure.

La radio LAN RL3 risulta essere la più sensibile allo schema di configurazione del frame TDD-LTE. In particolare, tra le situazioni (b) e (c) della Figura 12 si può notare la grande somiglianza tra gli andamenti del throughput, dovuta al fatto che la configurazione 3 prevede per il downlink 6 subframe, proprio come il numero di subframe attribuiti all'uplink per la configurazione 0. Inoltre, per la RL3, il throughput nella situazione di uplink configurazione 3 (grafico (a)) non scende mai al di sotto di 8,8 Mb/s, anche quando il livello di potenza interferente LTE è molto alto (+1 dBm all'ingresso del ricevitore).

Un comportamento diverso è stato mostrato dalla radio LAN RL4 (Figura 13) operante secondo lo standard 802.11b, per il quale la modulazione risulta sempre del tipo QPSK. In questo caso, si è osservato un comportamento di tipo quasi on-off, ossia il throughput, pari al massimo valore raggiungibile dallo standard, decade rapidamente al di sotto di 1 Mb/s e solo con livelli di potenza del segnale interferente significativi.

### **B – Confronto configurazioni**

Un altro confronto interessante è relativo a configurazioni TDD-LTE differenti. In particolare, sono state confrontate le modalità uplink relative alle due diverse configurazioni prese in esame, configurazione 3 e configurazione 0. Stesso discorso è stato esteso alla modalità downlink.

Dalle Figure 11 (a-c), 12 (a-c) e 14 (a-c) si può notare come il cambiamento di configurazione in modalità **uplink** incida in maniera evidente. In particolare, per tutti i canali (1, 6, 11), il segnale interferente TDD-LTE ha un impatto maggiore sul DUT per la

**configurazione 0** (grafici (c) delle 3 figure). Questo è dovuto al fatto che, in modalità uplink, la configurazione 0 ha un numero maggiore di subframe dedicati all'uplink rispetto alla configurazione 3. Per questo motivo, la configurazione 0 riduce le prestazioni del DUT al di sotto del valore minimo di 1 Mb/s per rapporti I/C minori rispetto alla configurazione 3 (grafici (a) delle 3 figure).

Analogamente, esaminando le figure 11 (b-d), 12 (b-d) e 14 (b-d) si può notare come anche la modalità **downlink** sia sensibile al cambiamento di configurazione. In particolare, per tutti i canali (1, 6, 11) il segnale interferente TDD-LTE ha un impatto maggiore sul DUT per la **configurazione 3** (grafici (b) delle 3 figure), in maniera complementare rispetto alla modalità uplink. Questo è dovuto al fatto che in modalità downlink è la configurazione 3 ad avere un maggior numero di subframe dedicati al downlink rispetto alla configurazione 0. Per questo motivo, la configurazione 3 riduce le prestazioni del DUT al di sotto del valore di 1 Mb/s per rapporti I/C minori rispetto alla configurazione 0 (grafici (d) delle 3 figure).

Come evidenziato nel paragrafo precedente, la RL4, a differenza delle altre radio LAN, mostra un comportamento non sensibile alle variazioni della configurazione TDD-LTE, come si evince dalla Figura 13.

### ***C – Confronto MUS+30 dB, MUS+20 dB e MUS+10 dB***

Nei risultati esaminati in precedenza il livello C all'ingresso del DUT è stato fissato, per ogni radio LAN testata, al valore MUS+30 dB. Tuttavia è utile valutare le prestazioni delle radio LAN in condizioni più sfavorevoli del livello C.

Le Figure 15-18 mettono a confronto il livello I di potenza del segnale interferente TDD-LTE, espresso in dBm, all'ingresso del ricevitore del DUT, per il quale il throughput del DUT operante a canale 1 scende al di sotto di 1 Mb/s per i tre livelli di segnale Wi-Fi MUS+30 dB, MUS+20dB e MUS+10dB. In ascisse sono riportate le diverse combinazioni tra modalità LTE uplink/downlink, e configurazioni.

Dalle figure si può notare che il valore critico della potenza I dell'interferente TDD-LTE diminuisce con la diminuzione del livello del segnale Wi-Fi, quindi con il passaggio da MUS+30dB a MUS+10dB. Come prevedibile, le prestazioni del DUT sono degradate dall'interferente in misura maggiore quando il livello del segnale DUT è peggiore.

Inoltre, dalle Figure 15-16-18 si può notare come con segnale TDD-LTE in modalità downlink in configurazione 3 e uplink in configurazione 0 le prestazioni delle radio LAN sotto test siano inferiori rispetto alle altre modalità. Questo è dovuto, come spiegato in precedenza, alla maggiore occupazione del frame LTE in questi due casi.

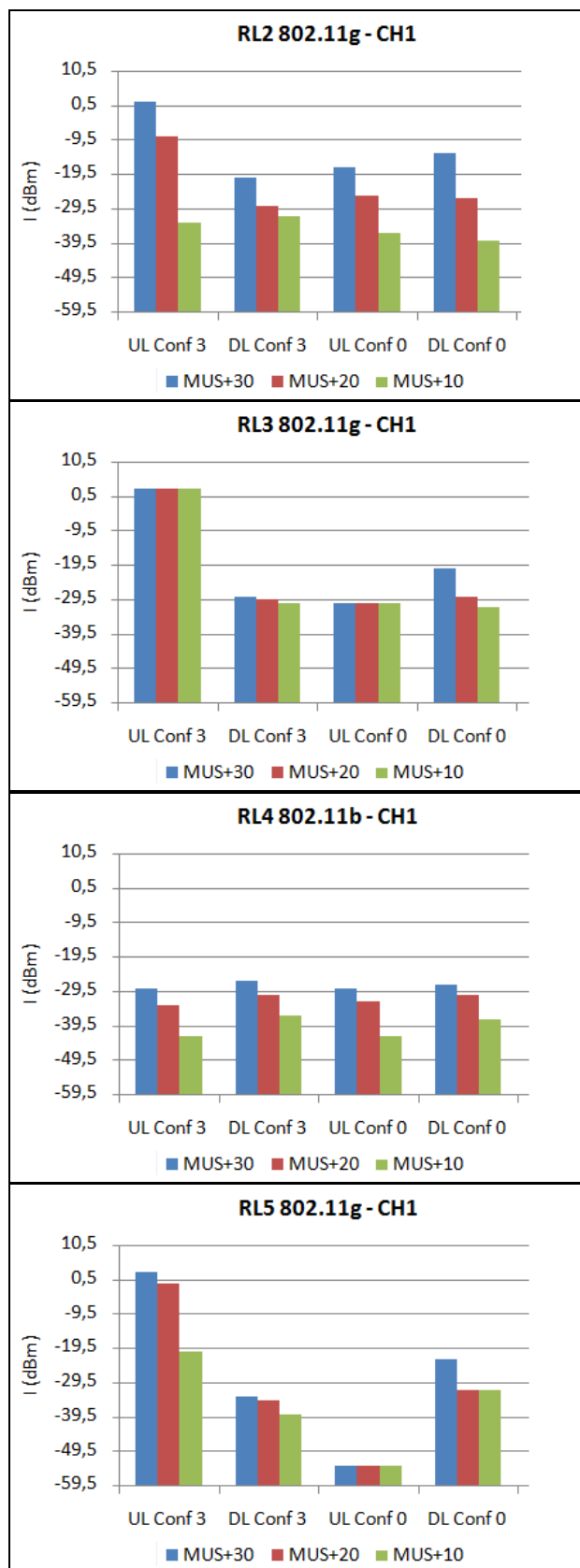


Fig. 15. Confronto prestazioni **RL2** (802.11g), ch 1, con livelli C: MUS+30 dB, MUS+20 dB, MUS+10 dB).

Fig. 16. Confronto prestazioni **RL3** (802.11g), ch 1, con livelli C: MUS+30 dB, MUS+20 dB, MUS+10 dB).

Fig. 17. Confronto prestazioni **RL4** (802.11b), ch 1, con livelli C: MUS+30 dB, MUS+20 dB, MUS+10 dB).

Fig. 18. Confronto prestazioni **RL5** (802.11g), ch 1, con livelli C: MUS+30 dB, MUS+20 dB, MUS+10 dB).

### D – TDD-LTE co-canale con Wi-Fi

I risultati ottenuti hanno suggerito un'ulteriore indagine ipotizzando, anche se non previsto dalla ECC Decision (14)02 [1], la presenza di segnale LTE nello stesso canale in cui opera il DUT.

Nei casi precedenti, la frequenza dell'interferente TDD-LTE era stata impostata a 2390 MHz, frequenza al limite superiore della banda 2300–2400 MHz per uno spettro largo 20 MHz.

In questo caso, invece, con il DUT operante nel canale 1, il segnale TDD-LTE è stato centrato a 2412 MHz, successivamente con il DUT operante nel canale 6 l'interferente TDD-LTE è stato centrato a 2437 MHz. La Tabella 5 riporta la combinazione dei parametri di esercizio dei due servizi impostata per la campagna di misurazioni.

Impostazioni radiolan WiFi		Impostazioni LTE							
		Configurazione TDD LTE 3				Configurazione TDD LTE 0			
		Downlink 2412 MHz	Uplink 2412 MHz	Downlink 2437 MHz	Uplink 2437 MHz	Downlink 2412 MHz	Uplink 2412 MHz	Downlink 2437 MHz	Uplink 2437 MHz
CH1 2412MHz	MUS+30	RL2	RL2			RL2	RL2		
	MUS+20								
	MUS+10								
CH6 2437MHz	MUS+30			RL2	RL2			RL2	RL2
	MUS+20								
	MUS+10								

La Figura 19 mostra l'andamento del throughput in funzione del rapporto I/C della RL2 in condizione di co-canaltà tra DUT e TDD-LTE, per le diverse combinazioni di modalità uplink/downlink e configurazione 3/configurazione 0.

Come previsto, gli andamenti del throughput per il canale 1 (blu) e il canale 6 (rosso) sono simili, non essendoci sostanziale differenza tra le due situazioni.

I grafici (b) e (c) della Figura 19 non riportano alcuna traccia. Questo è dovuto al fatto che le prestazioni del DUT degradano al di sotto del valore minimo di throughput di 1 Mb/s già per livelli di potenza dell'interferente TDD-LTE molto bassi, dell'ordine di -80 dBm.

D'altro canto, il funzionamento della radio LAN sotto test, in modalità uplink in configurazione 3 (grafico (a)) e downlink in configurazione 0 (grafico (d)) è mantenuto, seppur con prestazioni ridotte, coerentemente con quanto rilevato durante le prove di interferenza da banda adiacente. Come accennato in precedenza, questo è dovuto alla modalità di trasmissione dati a burst dei due sistemi. Il sistema Wi-Fi, sfruttando tecniche di ascolto del canale per determinarne lo stato di occupazione, attraverso procedure quali CCA (Clear Channel Assessment), LBT (Listen Before Talk) e CSMA-CA (Carrier sense multiple access with collision avoidance) [9], riesce pertanto a coesistere, entro certi limiti, con il sistema TDD-LTE, utilizzando in maniera temporalmente alternata lo spettro disponibile.

*Tab. 5. Principali parametri di prova, caso co-canale.*

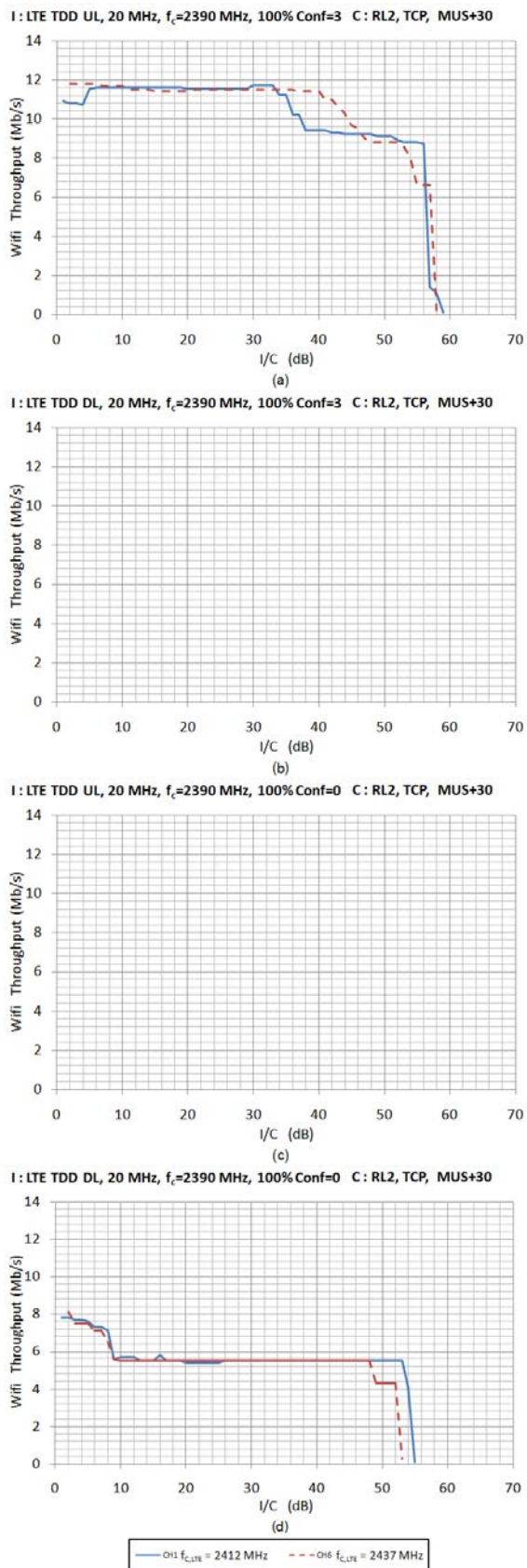


Fig. 19. Andamento del throughput in funzione del rapporto I/C per **RL2** in condizione di co-canali.  
 (a) Uplink Configurazione 3;  
 (b) Downlink Configurazione 3;  
 (c) Uplink Configurazione 0;  
 (d) Downlink Configurazione 0.



## 5. Conclusioni.

Nel lavoro sperimentale descritto è stata valutata la coesistenza tra sistemi 802.11 e LTE in modalità TDD nelle bande di frequenze 2300-2400 MHz, in uno scenario in cui il dispositivo Wi-Fi è interferito da un segnale LTE. In particolare, sono state considerate diverse modalità di funzionamento sia per le radio LAN sia per LTE. I risultati ottenuti mostrano l'andamento del throughput della radio LAN sotto test al variare del rapporto I/C, in altre parole aumentando progressivamente il valore della potenza interferente.

Può essere interessante proiettare tali risultati in uno scenario di utilizzo residenziale quotidiano, considerando un modello di attenuazione come nello standard riportato in [13]. Ipotizzando in modalità LTE di downlink una potenza EIRP in trasmissione di 56 dBm, verso la radio LAN ed in condizione di co-polarità delle antenne, si ottiene che la distanza di soglia tra stazione radio base LTE e radio LAN sotto test, per la quale il throughput della radio LAN scende al di sotto di 1 Mb/s, è approssimativamente di 40 m (mentre in caso di modello di attenuazione in spazio libero è di 200 m circa). Analogamente, in modalità LTE uplink, con una potenza EIRP in trasmissione di 23 dBm, la distanza di soglia tra un dispositivo mobile LTE e radio LAN è di circa 3 m. In quest'ultimo caso, le distanze sono tali da poter supporre che si resti nell'area di una stanza con entrambi i modelli di propagazione. Ciò giustifica, trascurando dove possibile gli effetti dei cammini multipli, l'utilizzo del modello di propagazione in spazio libero nella maggior parte dei casi.

In conclusione, lo scopo di questa sperimentazione è stato raccogliere dati e informazioni che possano essere utili agli addetti ai lavori nel caso di una futura attribuzione della banda di frequenze 2300-2400 MHz ai servizi radiomobili di futura generazione.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (Conférence européenne des administrations des postes et des telecommunications), Decision (14)02, "Harmonised technical and regulatory conditions for the use of the band 2300-2400 MHz for Mobile/Fixed Communications Networks (MCFN)", approvato il 27 Giugno 2014.
- [2] European Telecommunications Standards Institute, Technical Report 102.837 v1.1.1, "Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference Document; Broadband Wireless Systems in the 2300 MHz to 2400 MHz Range", Agosto 2010.
- [3] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (Conférence européenne des administrations des postes et des telecommunications), ERC Recommendation 70-03, "Relating to the use of Short Range Devices (SRD)", Agosto 2011.
- [4] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (Conférence européenne des administrations des postes et des telecommunications), ECC Report 172, "Broadband Wireless Systems Usage in 2300-2400 MHz", Marzo 2012.
- [5] J. He, T. Liang, D. Meng and ChaoSun, "Coexistence studies for indoor distribution systems of TD-LTE with WLAN system," in Cloud Computing and Intelligent Systems (CCIS), 2012 IEEE 2nd International Conference on , Oct. 30 2012-Nov. 1 2012.
- [6] M. Yang, "Discussions on Interference between TD-LTE & WLAN around 2.4GHz Band," IEEE TGax, 2014.
- [7] Ofcom, Public Sector Spectrum Release (PSSR), "Technical coexistence issues for the 2.3 and 3.4 GHz award", Maggio 2014.
- [8] Mass, MC/193, "Study to Determine the Potential Interference from TDD LTE into Wi-Fi", Agosto 2013.
- [9] IEEE Computer Society, IEEE Std 802.11™-2012 Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, 2012.
- [10] 3GPP TR 25.913, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA and UTRAN (Release 7)", Maggio 2005. [4] European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (Conférence européenne des administrations des postes et des telecommunications), ECC Report 172, "Broadband Wireless Systems Usage in 2300-2400 MHz", Marzo 2012.
- [11] 3GPP Technical Specification 36.211, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channel and Modulation", Release 12, Dicembre 2014.
- [12] <https://iperf.fr/>
- [13] Recommendation ITU-R P.1238-8, "Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz", Luglio 2015.