LTE e DTT:
Effetti dei segnali per la telefonia mobile di 4ª generazione sugli attuali impianti d'antenna televisivi

Davide **Milanesio,** Bruno **Sacco,** Vincenzo **Sardella**

Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Sommario

A partire dal 2015, la porzione della banda UHF compresa tra 790 e 862 MHz, oggi utilizzata per il broadcasting televisivo terrestre, sarà assegnata a servizi di telefonia mobile a standard LTE. La coesistenza di segnali DVB-T/T2 e segnali LTE in bande contigue potrebbe però comportare problemi alla ricezione dei segnali televisivi in zone in prossimità delle Base Station LTE, a causa di una eccessiva potenza interferente che rientra nella banda passante dei dispositivi domestici esistenti. In particolare, questo articolo analizza il caso degli impianti centralizzati d'antenna, in cui i segnali LTE potrebbero causare l'intermodulazione dell'amplificatore di testa, con conseguenti disturbi su tutti i canali TV. Simulazioni e misure sperimentali hanno confermato questo rischio: si è infatti stimato che, in assenza di tecniche di mitigazione, in condizioni sfavorevoli gli impianti riceventi potrebbero essere affetti da disturbi fino ad una distanza di oltre 1 km dalla Base Station. In questi casi sarà pertanto necessario attuare di volta in volta opportune tecniche di mitigazione sia da parte degli operatori (riduzione del segnale LTE in aree specifiche, cross-polarizzazione, ecc.) sia da parte degli utenti finali (aggiunta di filtri, utilizzo di centralini canalizzati, spostamento di antenne, ecc.).

1. Introduzione

Tra gli obiettivi del cosiddetto "switch-off" della televisione analogica, il cui completamento nell'Unione Europea è previsto entro il 2012, oltre alla moltiplicazione dell'offerta televisiva e alla possibilità di rendere disponibili agli utenti nuovi servizi quali multimedialità, alta definizione e 3D, va senz'altro annoverato il "dividendo digitale", ovvero la possibilità di liberare una porzione dello spettro nella banda UHF grazie alla maggiore efficienza spettrale della tecnica trasmissiva digitale.

In Europa si è stabilito [1] che questo dividendo digitale, corrispondente alla porzione della banda UHF tra 790 e 862 MHz (detta brevemente "banda 800 MHz"), dal 2015 sia sottratto al broadcasting televisivo e destinato invece ai servizi di telefonia mobile a standard LTE, il cosiddetto 4G, recependo una delibera della Conferenza Mondiale sulle Radiocomunicazioni (WRC-07). Le frequenze 4G della banda 800 MHz sono state recentemente assegnate anche in Italia mediante gara pubblica, come stabilito dalla manovra di stabilità per il 2011.

La coesistenza in bande di frequenza contigue di servizi broadcast e cellulari, con diverse aree di copertura ed esigenze in termini di potenze emesse, potrebbe però comportare nuovi problemi alla rice-

zione dei segnali televisivi. Le zone particolarmente critiche sono quelle ai limiti dell'area di copertura dei trasmettitori DTT, a standard DVB-T o DVB-T2, se una BTS 4G è installata a breve distanza. Infatti, i sintonizzatori dei televisori potrebbero risentire di una eccessiva potenza interferente ("in-band" o "out-of-band") generata dal segnale 4G; inoltre, nel caso di ricezione mediante impianti centralizzati d'antenna, si evidenzia il rischio di intermodulazione dell'amplificatore a larga banda del centralino, con conseguenti disturbi su tutti i canali della banda UHF.

È quindi importante studiare a fondo le problematiche che potrebbero sorgere nella ricezione televisiva domestica e individuare possibili tecniche di mitigazione. In quest'ottica sono stati avviati numerosi studi a livello internazionale: tra questi ricordiamo i lavori ad opera del CEPT [2], dell'EBU [3], di ITU [14,15] e del Consorzio DVB. In particolare, i risultati riportati in questo articolo derivano da simulazioni e misure sperimentali realizzate presso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai nell'ambito delle attività promosse dal DVB.

Acronimi e sigle	
4G	4th Generation
AWG	Arbitrary Waveform Generator,
BER	Bit Error Ratio
BTS	Base Transceiver Station
CEPT	Conférence Européenne des Postes et des Télécommunications
DTT	Digital Terrestrial Television
DVB	Digital Video Broadcasting
EBU	European Broadcasting Union
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power
FDD	Frequency Division Duplex
IMD	InterModulation Distortion
LTE	Long Term Evolution
MATV	Master Antenna TeleVision
MER	Modulation Error Ratio
UHF	Ultra High Frequency

2. Condivisione della banda UHF tra servizi broadcast e 4G

2.1 Allocazione dei canali 4G

A seguito dell'assegnazione della banda 800 MHz ai servizi 4G a standard LTE, la banda UHF dedicata ai servizi broadcast sarà limitata alle frequenze tra 470 e 790 MHz (canali 21÷60), rinunciando agli attuali ulteriori 9 canali televisivi.

I 72 MHz residui, destinati ai servizi LTE, sono stati allocati in Europa secondo il sistema FDD, come riportato nella figura 1 [4].

La banda per canale LTE è di 5+5 MHz, o multipli; la banda LTE complessiva è pari a 30+30 MHz.

La banda di guardia tra i canali broadcast e i canali LTE downlink (DL) è di solo 1 MHz.

Si nota che i canali in uplink (UL) sono a frequenze più lontane rispetto ai canali broadcast, al fine di ridurre l'interferenza a livello domestico.

In Italia sono state assegnate 3 licenze FDD (2x10 MHz ciascuna).

Fig. 1 – Allocazione dei canali per servizi LTE nella banda 790÷862 MHz (FDD).

790-791	791-796	796-801	801-806	806-811	811-816	816-821	821-832	832-837	837-842	842-847	847-852	852-857	857-862
Banda di guardia	Downlink						Duplex gap	Uplink					
1 MHz	30 MHz (6 blocchi da 5 MHz)						11 MHz	30 MHz (6 blocchi da 5 MHz)					

2.2 Livelli dei segnali

È previsto che i livelli massimi di EIRP dei segnali LTE emessi dalle BTS (downlink) e dai terminali mobili (uplink) siano indicati dalle singole amministrazioni, in accordo comunque con le raccomandazioni emesse dal CEPT, che prevedono che non si superino i valori seguenti [2]:

- ✓ 56 ÷ 64 dBm su 5 MHz (o 59 ÷ 67 dBm su 10 MHz) in downlink[Nota 1];
- ✓ 23 dBm in uplink[Nota 2].

3. Possibili tecniche di mitigazione

I primi test di laboratorio effettuati a livello internazionale per valutare il comportamento dei ricevitori DVB-T e DVB-T2 commerciali in presenza di segnali LTE hanno dimostrato che i disturbi possono essere piuttosto critici sui canali alle frequenze più elevate (e in particolare sul canale 60), a causa della limitata separazione in frequenza rispetto alla banda assegnata ai segnali LTE e della limitata selettività del tuner del ricevitore DVB-T/T2 [5]. In caso di limitata schermatura dei cavi e dei componenti dell'impianto di distribuzione è possibile anche l'interferenza dei segnali LTE in uplink, generati dal terminale mobile d'utente all'interno della stessa abitazione .

Per ridurre gli effetti dell'interferenza dei segnali LTE sui segnali DTT è quindi necessario prevedere tecniche di mitigazione, eventualmente da applicarsi in combinazione tra loro [6], [7], [8].

Queste tecniche, che hanno nel loro complesso costi piuttosto elevati, ricadono sotto la responsabilità di diversi degli attori della catena trasmissiva (operatori di telefonia mobile, broadcaster, costruttori di apparati, costruttori di ricevitori DVB T/T2, utenti finali):

- ✓ Riduzione della potenza trasmissiva del primo canale LTE: questo consente un migliore C/I (Carrier to Interference Ratio) sul canale DTT adiacente;
- ✓ Filtraggio particolarmente selettivo presso la BTS del segnale LTE: questo riduce le emissioni fuori banda con benefici sul canale DTT adiacente;
- ✓ Cross-polarizzazione: trasmettendo i segnali DTT e LTE con diagrammi di irradiazione tra loro perpendicolari, il segnale interferente è ricevuto in antenna attenuato (di circa 10÷14 dB). Va però osservato che, per motivi di spazio, le BTS utilizzano generalmente una polarizzazione ±45° ("Tx diversity"): l'attenuazione dovuta alla cross-polarizzazione in questo caso è pari a circa 3 dB[Nota 3];
- ✓ Installazione delle BTS LTE di maggior potenza nei pressi dei siti trasmittenti DTT: questo consentirebbe di ridurre la differenza di livello tra segnali DTT e LTE[Nota 4];
- ✓ Spostamento o diverso orientamento dell'antenna ricevente;

Nota 1 - Ad esempio, nelle licenze assegnate in Germania è previsto un massimo valore di EIRP in downlink (su 5 MHz) di 56 dBm in ambiente urbano e di 64 dBm in ambiente rurale.

Nota 2 - L'utilizzo di antenne esterne da parte dell'utente potrebbe aumentare questo valore (guadagno tipico: 9 dBi per antenne direttive, 5 dBi per antenne non direttive).

Nota 3 - La discriminazione di polarizzazione è efficace soltanto nella regione di "far field", ovvero a distanze superiori a $2D^2/\lambda$ (dove D è la dimensione complessiva della sorgente e λ è la lunghezza d'onda), mentre a distanze inferiori sono ancora presenti le componenti di campo vicino. In particolare, ponendo D = 2 m, il far field nella banda 800 MHz corrisponde a distanze superiori a circa 21 m. Ciò significa che questa tecnica di mitigazione non è comunque efficace per le antenne riceventi poste sullo stesso tetto della BTS LTE.

Nota 4 - Analogamente, si potrebbe prevedere l'utilizzo di gap filler DVB-T/T2 ("on-channel repeater") installati presso gli stessi siti delle BTS. L'introduzione di questi gap filler però, oltre a comportare notevoli investimenti economici per i broadcaster e un ulteriore contributo all'inquinamento elettromagnetico, richiederebbe anche l'intervento sugli impianti riceventi (diverso orientamento delle antenne, regolazione dei livelli, ecc.).

- ✓ Filtri "in-line", che devono essere in grado di attenuare quanto possibile i segnali LTE, ma con ridotta perdita di inserzione alle frequenze fino a 790 MHz[Nota 5]:
  - Esterni, che l'utente stesso può collegare all'ingresso del ricevitore DVB T/T2 (costo stimato dell'ordine di 15 €, figura 2);
  - Integrati nei ricevitori di nuova produzione[Nota 6];
  - Filtri semi-professionali, destinati agli impianti di distribuzione condominiali, in cui il costo, stimabile in qualche centinaio di euro, può essere ripartito tra tutti gli utenti;
- ✓ Sostituzione del centralino a larga banda con un centralino canalizzato, basato cioè su filtri di canale.

Una prima stima dei costi complessivi relativi a queste tecniche di mitigazione è stata fornita da Ofcom relativamente alla Gran Bretagna. Secondo questa stima, il costo complessivo sarà di circa 100 milioni di sterline inglesi, di cui oltre la metà direttamente a carico degli utenti finali (acquisto filtri, interventi sugli impianti, ecc.) [7].

4. Valutazione dell'impatto dei segnali LTE sull'intermodulazione degli amplificatori negli impianti d'antenna

4.1 Scenario

Gli impianti centralizzati d'antenna (MATV) sono ampiamente diffusi in Italia per la distribuzione dei segnali DVB-T (e in futuro DVB-T2).

Nota 5 - Tra le ipotesi è prevista anche la realizzazione di diverse tipologie di filtro, con diverse frequenze di taglio a seconda che il canale 60 sia utilizzato in una specifica area oppure no.

Nota 6 - In questo caso si avrebbe lo svantaggio di non poter scegliere il tipo di filtro più adatto per la specifica condizione di ricezione.

Fig. 2 – Aspetto esteriore di filtri "in-line".

Questi impianti prevedono un centralino di testa, in cui i segnali televisivi vengono ricevuti dalle antenne, amplificati e distribuiti sulla rete in cavo coassiale di edificio. In molti casi, e in particolare se tutti i segnali sono ricevibili da siti trasmittenti localizzati in una direzione principale, al centralino è utilizzato un amplificatore a larga banda per amplificare l'intera banda UHF: questo consente una notevole riduzione dei costi rispetto ad un centralino canalizzato, offrendo allo stesso tempo all'utente una soluzione già predisposta per ricevere eventuali nuovi multiplex attivati su canali inizialmente liberi.

I segnali LTE saranno trasmessi in una banda attualmente occupata da servizi DTT, pertanto gli amplificatori esistenti, di banda passante 470÷862 MHz, li amplificheranno insieme ai segnali utili. Se la BTS è molto vicina, la potenza dei segnali LTE ai morsetti dell'antenna ricevente dell'impianto centralizzato potrebbe essere molto più elevata rispetto ai segnali DTT, causando la saturazione dell'amplificatore (figura 3).

Gli stessi rischi di intermodulazione possono colpire anche impianti singoli che utilizzino amplificatori da palo o intermedi.

Questo scenario è stato valutato mediante simulazioni software e misure sperimentali di laboratorio, allo scopo di dare una prima risposta alle seguenti domande:

- Quale può essere l'impatto dei segnali LTE sull'intermodulazione degli amplificatori?

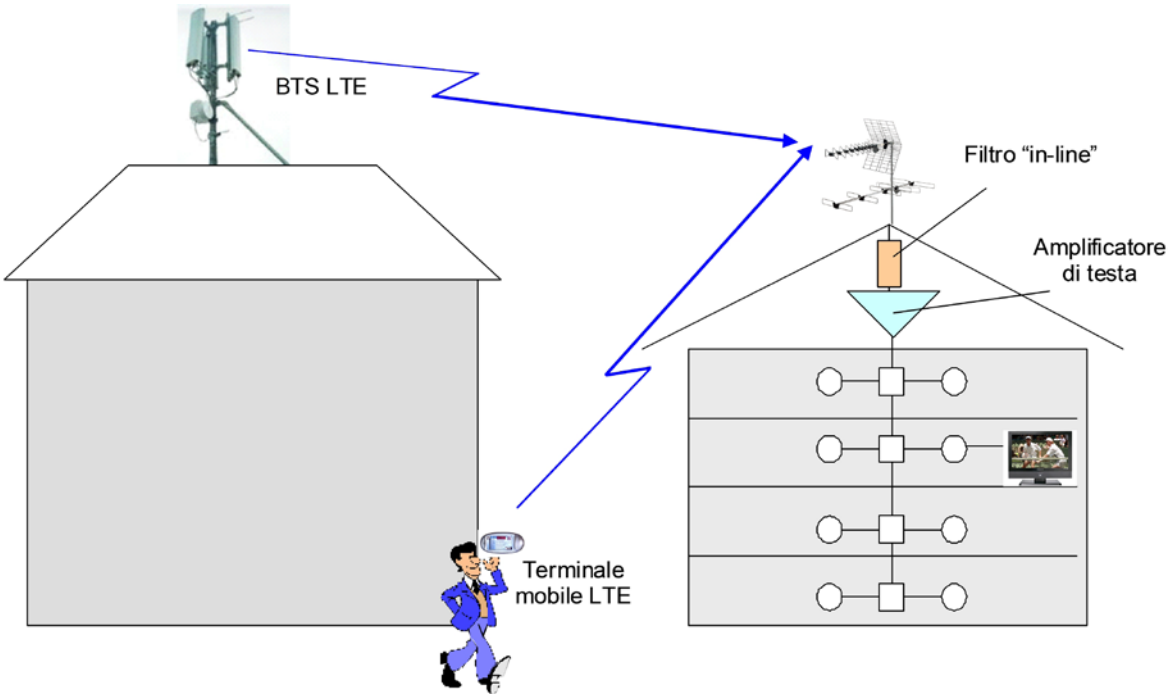


Fig. 3 – Scenario considerato: impatto dei segnali LTE in un impianto centralizzato d'antenna con amplificazione a larga banda.

- Quali sono i canali più penalizzati? Sono penalizzati solo i canali più vicini ai segnali LTE o può essere penalizzata l'intera banda UHF?
- Gli effetti possono essere sufficientemente mitigati mediante un filtro "in-line" condominiale, posto a monte dell'amplificatore?

4.2 Simulazioni

Lo scenario descritto è stato analizzato mediante un simulatore software in grado di valutare, canale per canale, la potenza dei prodotti di intermodulazione generati dall'insieme dei segnali d'ingresso (DTT e LTE).

4.2.1 Modello dell'amplificatore e ipotesi di simulazione

Quando più segnali multiplati in frequenza transitano attraverso un dispositivo non lineare, quale un amplificatore a larga banda, all'uscita di tale dispositivo è presente anche un certo numero di prodotti d'intermodulazione, dovuti ai battimenti tra le frequenze in ingresso.

I livelli di potenza di questi prodotti d'intermodulazione, che possono cadere nella banda del segnale utile rappresentando quindi degli interferenti co-canale, dipendono dalle caratteristiche dell'amplificatore e dal suo punto di lavoro.

In un sistema reale è difficile misurare la potenza interferente, poiché occorre distinguerne il contributo da quello del segnale utile. Un valido modo di conoscere il valore degli interferenti consiste quindi nel calcolo analitico dei prodotti d'intermodulazione.

La caratteristica ingresso-uscita di un amplificatore non lineare può essere approssimata con il suo sviluppo in serie di potenze troncato al 3° ordine, secondo l'espressione:

$$V_o = k_1 V_i + k_2 V_i^2 + k_3 V_i^3$$

dove:

- V_i è la tensione d'ingresso;
- V_o è la tensione d'uscita;
- k_1 è il guadagno dell'amplificatore;
- k_2 , k_3 sono i coefficienti dello sviluppo in serie di ordine 2, 3.

Si noti che questo modello è valido ai normali punti di lavoro dell'amplificatore: per valori di segnali d'ingresso molto alti potrebbe risultare ottimistico, ed occorrerebbe approssimare la funzione di trasferimento fino almeno al 5° ordine [9].

Per maggiore semplicità, il modello utilizzato dal simulatore software è in realtà il seguente:

$$A_o = A_i + k_2 A_i^2 + k_3 A_i^3$$

dove:

- $A = \sqrt{P} = V/\sqrt{R}$, con R = 75 Ω;
- Il guadagno è stato normalizzato a 1.

I coefficienti k_2 e k_3 possono essere calcolati a partire dai valori di IMD del 2° e 3° ordine, disponibili sui cataloghi degli amplificatori o misurabili in laboratorio [10].

Nel caso in esame, è stata considerata una situazione ritenuta tipica (e non eccessivamente pessimistica) di ricezione DTT ai bordi dell'area di ricezione e in presenza di una BTS LTE piuttosto vicina e nella stessa direzione dei siti trasmittenti DVB-T/T2.

È stato modellizzato un amplificatore a larga banda UHF commerciale, con le caratteristiche tecniche riportate nella tabella 1.

Tab. 1 - Caratteristiche tecniche dell'amplificatore modellizzato.

Livello nominale	112 dB(μV)
Guadagno massimo	39,9 dB
IMD 2° ordine	-48 dB
IMD 3° ordine	-54 dB

Sulla base di questi parametri, i valori di k_2 e k_3 sono stati determinati rispettivamente pari a -0,0025089 $W^{-1/2}$ e -0,0005283 W^{-1}. La caratteristica ingresso-uscita normalizzata è riportata nella figura 4.

Come condizione di partenza, si ipotizza che l'amplificatore sia stato regolato dall'installatore prima dell'introduzione dei segnali LTE.

Il livello d'uscita nominale dell'amplificatore specificato sui cataloghi (tabella1) è relativo a due soli segnali d'ingresso: se sono presenti più di due segnali, questo livello deve essere ridotto in modo opportuno. Una legge generalmente adottata per calcolare la riduzione del livello d'uscita (espressa in dB) in funzione del numero di canali è la seguente [11]:

$$\Delta P = 7{,}5 \log (n_c - 1) + M_P$$

dove n_c è il numero di canali e M_P è un ulteriore margine di protezione nei confronti di possibili future estensioni in termini di numero di canali distribuiti o per assorbire eventuali aumenti di livello da parte dei canali già distribuiti.

In questo esempio si è supposto di distribuire 40 canali (valore coerente con la situazione in Italia nelle aree densamente popolate) e si è adottato un margine di 3 dB: di conseguenza, la riduzione rispetto al livello nominale risulta di 14,9 dB e il livello di potenza d'uscita dei segnali DVB-T/T2 è di 97,1 dB(μV), pari a 11,7 dBm (inizialmente, si ipotizza che tutti i segnali siano ricevuti con lo stesso livello).

Il guadagno effettivo dell'amplificatore dopo la riduzione applicata è di 25 dB: ne consegue che il livello dei segnali DTT ricevuti in antenna sia di -36,7 dBm, pari a 72,1 dB(μV).

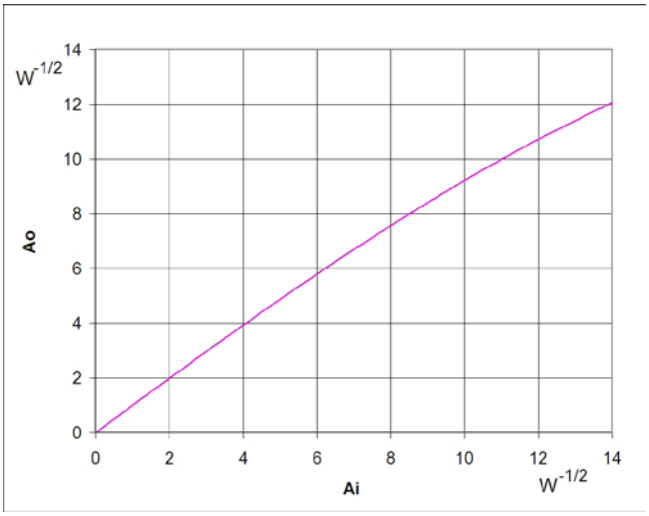


Fig. 4 – Caratteristica ingresso-uscita normalizzata dell'amplificatore modellizzato.

Lo scenario simulato prevede che i segnali DTT siano inviati all'amplificatore insieme ad un certo numero di segnali LTE.

I livelli dei segnali LTE in downlink e in uplink ricevuti dall'antenna TV (come in figura 4) sono stati impostati in accordo con la tabella 2, evitando quindi casi estremi più pessimistici.

Si noti che è stata considerata la presenza di una sola BTS LTE: in un caso generale, queste BTS saranno distribuite sul territorio con una certa densità, cumulando i contributi interferenti.

Tab. 2 - Parametri dei segnali LTE considerati.

	Downlink	Uplink
EIRP	59 dBm	23 dBm
Distanza	71 m	22 m
Attenuazione radio	64 dB	56 dB
Livello segnale ricevuto	-5 dBm	-33 dBm

Confrontando questi valori di segnale ricevuto con quelli dei segnali DTT, si ricava un valore di C/I (inteso come rapporto tra il livello del segnale DVB-T/T2 e il livello del segnale LTE su altra frequenza) di -31,7 dB per segnali LTE downlink, e di -3,7 dB per segnali LTE uplink[Nota7].

Il simulatore rappresenta ciascuno dei segnali digitali, DTT o LTE, come un'insieme di N portanti equispaziate (in questo caso si è scelto N pari a 10), distribuite all'interno della propria banda (8 MHz per segnali DTT, 5 MHz per segnali LTE), di potenza pari a 1/N della potenza del segnale. Tutti i possibili prodotti di intermodulazione tra tutte le portanti così ottenute sono calcolati analiticamente, sommando la potenza interferente generata all'interno dei canali d'ingresso e determinando quindi il valore di C/I (inteso come rapporto tra la potenza del segnale utile e la potenza del segnale interferente co-canale dovuto ad intermodulazione) per ciascuno dei canali.

Nota 7 - In casi più sfavorevoli (ai limiti dell'area di copertura DTT), il C/I rispetto a segnali LTE downlink può arrivare a circa -72 dB.

Si noti che i segnali LTE sono stati simulati con livello costante, come se l'occupazione del traffico dati trasportato fosse costantemente pari al 100% (§ 4.3.1): non si è cioè tenuto conto del fatto che, nella realtà, il livello effettivo di un segnale LTE può variare istante per istante in funzione del traffico dati trasportato.

Infine, per valutare gli effetti di un filtraggio "in-line" del segnale a monte dell'amplificatore a larga banda, le simulazioni sono state ripetute anche modificando i livelli dei segnali d'ingresso secondo la funzione di trasferimento di due diversi filtri, denominati nel seguito "a pendenza graduale" e "Ofcom" (figura 5):

- Il filtro "a pendenza graduale" consente una elevata attenuazione sui se-gnali LTE, ma al costo di una elevata perdita di inserzione sugli ultimi canali DTT, che potrebbero quindi non essere più ricevibili se ci si trova ai bordi dell'area di copertura;
- Il filtro "Ofcom" [6] introduce una limitata perdita di inserzione, ma non attenua in modo significativo il primo blocco LTE di 10 MHz: è quindi indicato soprattutto nei casi in cui la BTS non irradia quel primo blocco, o lo irradia a potenza ridotta.

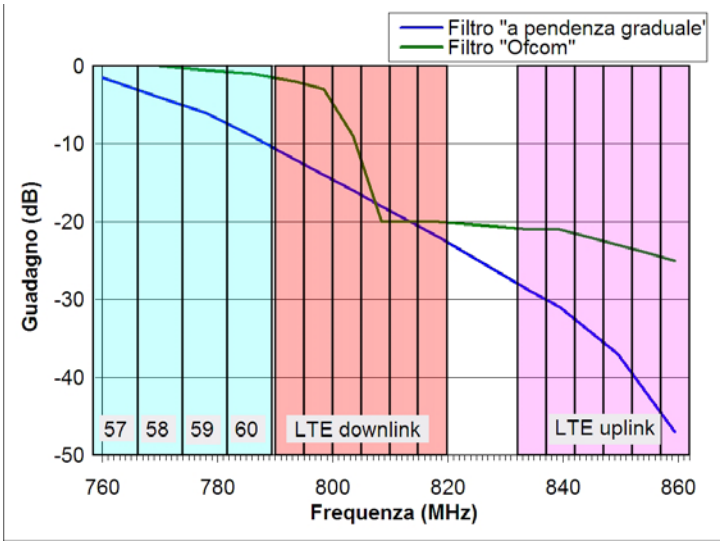


Fig. 5 – Funzione di trasferimento dei due filtri in-line considerati.

4.2.2 Risultati delle simulazioni

Le simulazioni sono state ripetute per un certo numero di scenari, ritenuti rappresentativi di situazioni che si potranno realisticamente verificare in prossimità delle BTS LTE:

1) Scenario A: situazione originaria, in assenza di segnali LTE: in questo caso l'amplificatore opera come da specifiche, permettendo di distribuire tutti i canali con un buon margine al di sopra della soglia;

2) Scenario B: 1 segnale LTE in downlink;

3) Scenario C: 1 segnale LTE in uplink;

4) Scenario D: 6 segnali LTE in downlink;

5) Scenario E: 6 segnali LTE in downlink e 6 in uplink;

6) Scenario A*: situazione in assenza di segnali LTE, con uno dei segnali DTT ricevuto con livello 20 dB inferiore rispetto agli altri;

7) Scenario E*: uno dei segnali DTT ricevuto con livello 20 dB inferiore rispetto agli altri, 6 segnali LTE in downlink e 6 in uplink.

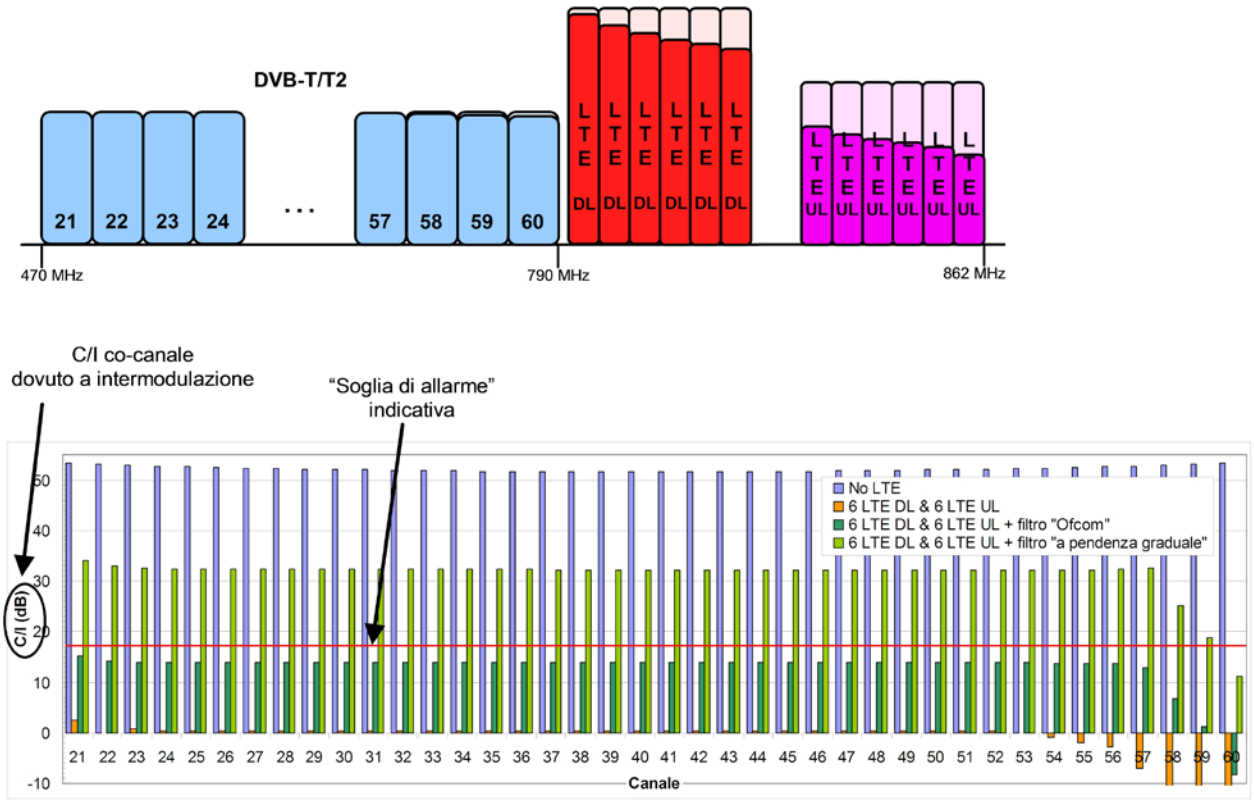
I livelli dei segnali DTT e LTE nei vari casi sono quelli riportati in § 4.2.1. In tutti gli scenari, le simulazioni sono state ripetute anche in presenza dei due modelli di filtri "in-line" considerati.

I principali risultati ottenuti sono elencati di seguito. La figura 6 li riporta più in dettaglio nel caso dello scenario E, a confronto con lo scenario A[Nota 8].

- Nello scenario B, in presenza di un segnale LTE, l'intermodulazione è già evidente su tutti i cana-

Nota 8 - Occorre naturalmente sottolineare che i risultati ottenuti sono rappresentativi da un punto di vista qualitativo più che quantitativo: i valori di C/I in casi reali dipendono fortemente dalla situazione specifica, ovvero dalle caratteristiche dell'amplificatore, dai livelli relativi dei segnali, ecc.

Fig. 6 – Risultati delle simulazioni nello Scenario E (6 segnali LTE in downlink + 6 in uplink) + filtro "in-line"



li: il canale 60 è quello più penalizzato, ma tutti i canali sono sotto soglia in queste condizioni[Nota 9].

- Un filtraggio "in-line" di base può aiutare a ridurre gli effetti dell'intermodulazione, ma solo parzialmente. Il miglioramento dipende dalla risposta in frequenza del filtro (ovvero dall'entità dell'attenuazione sui segnali LTE) e dal canale considerato.
- Nello scenario C, l'impatto sull'intermodulazione di un segnale LTE in uplink, di potenza minore, risulta modesto: tutti i segnali DTT mantengono un buon margine sulla soglia di ricezione anche in assenza di filtri.
- Nello scenario D, in assenza di filtraggio, i segnali DTT non sono ricevibili: tutti i canali sono abbondantemente sotto soglia. Anche in questo caso un filtraggio "in-line" di base può aiutare a ridurre gli effetti dell'intermodulazione, ma solo parzialmente; inoltre, non tutti i canali possono essere correttamente ricevuti in queste condizioni.
- I risultati nello scenario E sono abbastanza simili allo scenario D: con questi livelli relativi i segnali LTE in uplink forniscono infatti un limitato contributo aggiuntivo all'intermodulazione, più visibile sui canali nella parte alta dello spettro.
- Lo scenario A* (in assenza di LTE) introduce una situazione più critica: uno dei segnali DTT (il canale 22) è ricevuto con livello più basso degli altri (di 20 dB), pertanto il suo margine di ricezione è inferiore. Si noti che, a rigore, una situazione di questo tipo, pur non inusuale in casi reali, non è strettamente conforme alla normativa sulla distribuzione dei segnali TV negli impianti condominiali [12], che prevede un minore dislivello tra i vari canali (max. 12 dB in tutte le bande VHF/UHF, 6 dB entro 60 MHz e 3 dB tra canali adiacenti), pertanto, in questo caso, l'installatore avrebbe dovuto non certificare il canale 22 come canale ricevibile, o in alternativa adottare una tecnica di distribuzione canalizzata. Resta comunque inteso che, dal punto di vista dell'utente finale, questo canale risulta ricevibile.
- Nello scenario E* (corrispondente allo scenario A* ma con in aggiunta i segnali LTE), il rapporto tra livello del canale 22 e livello del segnale LTE in downlink è di -51,7 dB (valore comunque migliore di circa 20 dB rispetto a valori che ci si può attendere in condizioni più sfavorevoli). In presenza di intermodulazione, il filtraggio "in-line" a monte dell'amplificatore non è sufficiente a proteggere dall'intermodulazione il canale DTT ricevuto con livello basso.

4.3 Misure di laboratorio

Nell'impossibilità di effettuare al momento test in campo su impianti centralizzati reali, a causa dell'assenza di segnali LTE già irradiati in Italia nella banda 800 MHz, il segnale LTE è stato generato in laboratorio e quindi sommato ai segnali televisivi reali ricevuti da un'antenna UHF, per essere inviato in un amplificatore a larga banda.

4.3.1 Generazione del segnale LTE

Il segnale LTE disturbante è stato emulato in laboratorio utilizzando un generatore di forme d'onda arbitrarie (AWG) Anritsu MG3700A. Tale strumento permette di modulare una portante RF con un segnale complesso in banda base campionato. La sequenza di campioni viene caricata in un hard disk interno, e di qui nella memoria RAM di sistema.

Le sequenze di campioni LTE utilizzate sono quelle adottate dal Gruppo DVB TM-T2. Tali sequenze, che si riferiscono a segnali di larghezza di banda 10 MHz, sono state ottenute catturando con un acquisitore Adivic TCX3000 il segnale generato da apparecchiature LTE[Nota 10]. Le registrazioni sono state poi filtrate, decimate e riformattate in MATLAB in modo da poter essere riprodotte su generatori di segnali vettoriali standard come file dati IQ interleaved.

Nota 9 - La soglia di allarme indicativa, tracciata in rosso sul grafico della figura 6, dipende in realtà dal tipo di modulazione e FEC adottato dallo specifico canale.

Nota 10 - Le configurazioni registrate sono state generate dal fornitore dell'apparato, in modalità test.

I campioni dei file sono stati quindi scalati in modo tale che il segnale di picco sia all'interno del punto 1 dB clip di un DAC a 16 bit.

Sono stati utilizzati tre tipi di segnali LTE campionati:

- Segnale BTS "idle", nella condizione in cui il sistema si trova in assenza di terminali utenti nel raggio d'azione della cella;
- Segnale BTS con un carico di utenti tale da impegnare il 50% delle risorse (blocchi).
- Segnale BTS con un carico di utenti tale da impegnare il 100% delle risorse (blocchi).

Le misure descritte nel seguito si riferiscono pertanto a tre diverse tipologie di segnali LTE downlink disturbanti, come definito nella tabella 3.

Tab. 3 - Tipologie di segnali LTE downlink utilizzate.

Nome configurazione	Larghezza di banda	Data-rate
"LTE 100%"	10 MHz	100%
"LTE 50%"	10 MHz	50%
"LTE idle"	10 MHz	Idle

La Potenza di uscita del generatore AWG è stata controllata con un power meter (bolometro) nella condizione di 100% di carico, e - a frequenza della portante ridotta - con un oscilloscopio, per confrontare il valore di picco del segnale nei tre casi. I valori RMS del segnale interferente LTE nelle diverse configurazioni di carico, una volta allineati i valori di picco, sono risultati quelli dichiarati dal Gruppo DVB TM-T2, ovvero 0 dB nel caso "LTE 100%", -2,3 dB nel caso "LTE 50%" e 8,3 dB nel caso "idle".

Per i test si sono quindi impostati livelli del segnale LTE tali da avere medesimo valore di picco nelle varie condizioni (figura 7).

4.3.2 Banco di misura

Il banco di misura, allestito presso il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica, è mostrato nella figura 8.

I segnali televisivi sono ricevuti mediante un'antenna UHF a larga banda puntata in direzione del sito trasmittente di Torino Eremo. Questi segnali sono combinati con il segnale LTE generato in laboratorio come descritto in § 4.3.1.

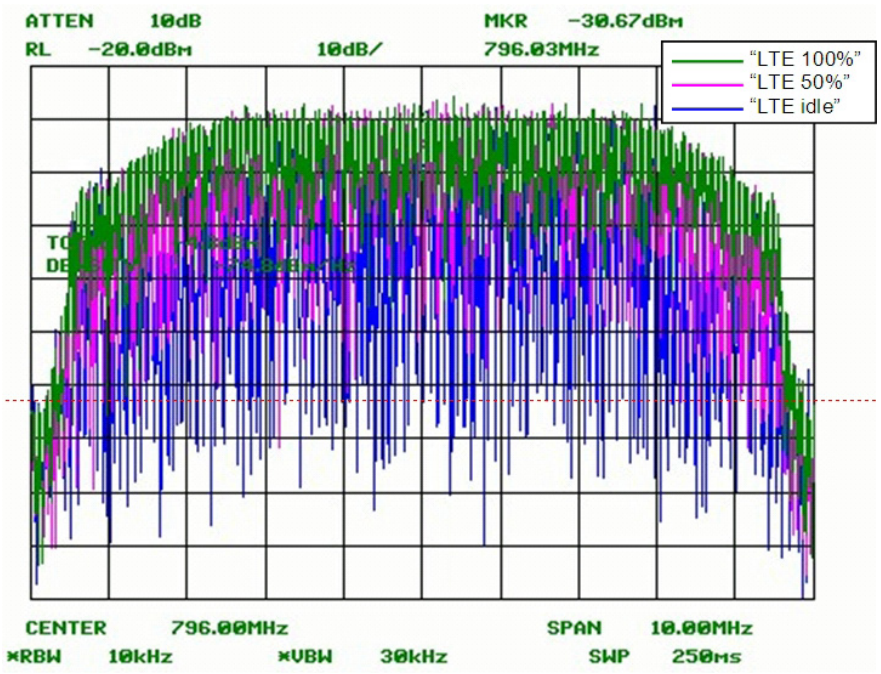


Fig. 7 – Spettro di potenza del segnale LTE nelle tre configurazioni.

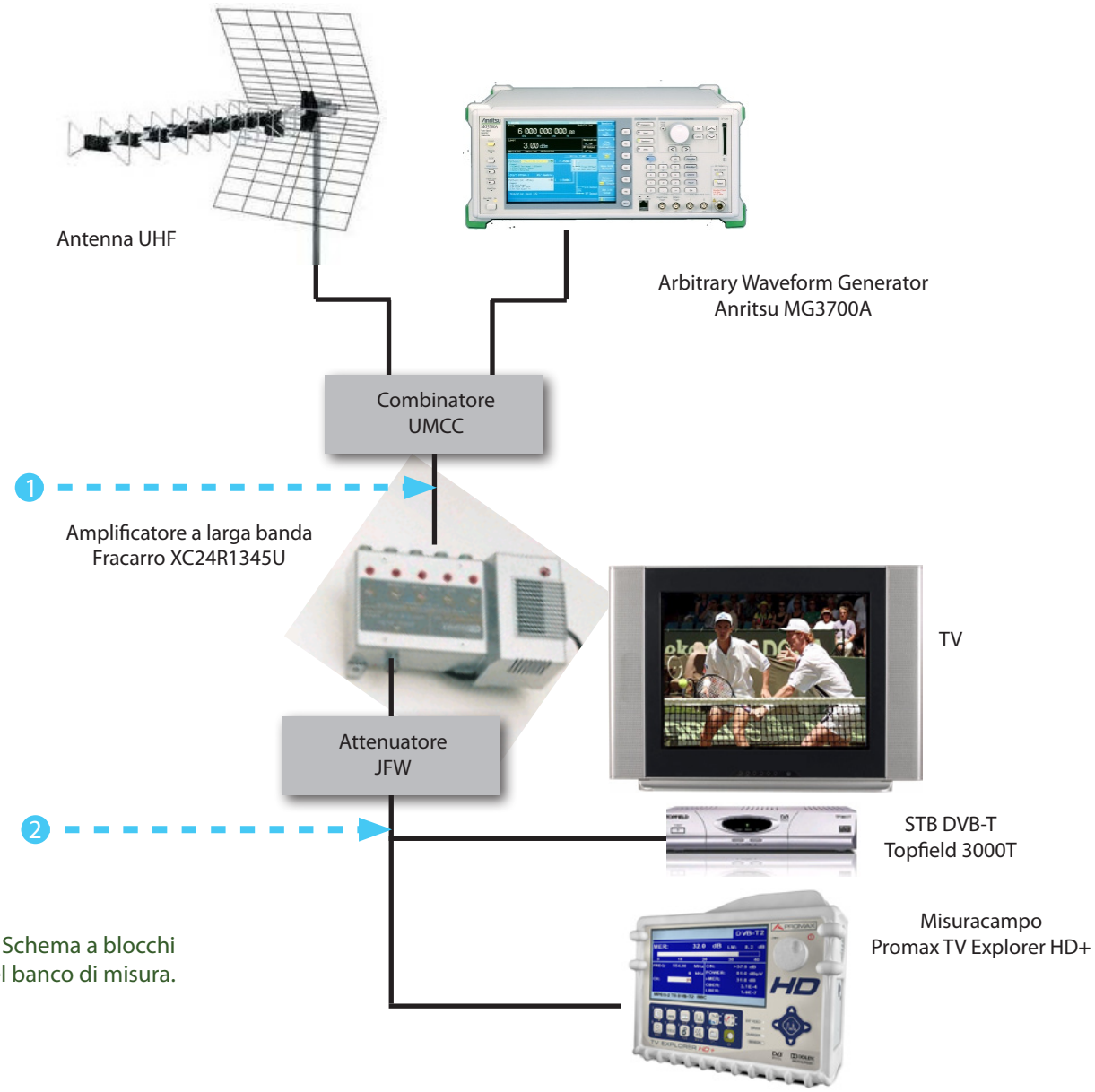


Fig. 8 – Schema a blocchi del banco di misura.

I numeri 1 e 2 indicati nella figura 8 rappresentano i punti di misura sui segnali.

L'amplificatore a larga banda è il modello Fracarro XC24R1345U, caratterizzato nella banda UHF da livello d'uscita nominale 119 dB(μV) e guadagno massimo 42 dB.

L'attenuatore sostituisce la rete di distribuzione di edificio, ed è stato regolato in modo da compensare il guadagno dell'amplificatore: questo consente di confrontare le prestazioni sui segnali nei punti 1 e 2 circa a pari livello del segnale, quindi con una maggiore coerenza delle misure.

4.3.3 Risultati delle misure

L'elenco dei canali TV ricevuti in antenna[Nota 11] è riportato nella tabella 4, insieme ai livelli misurati nel punto 1 della figura 8. La tabella riporta tutti i canali al di sotto di 790 MHz; esistono poi attualmente anche alcuni canali trasmessi nella banda 790÷862 MHz, su cui non sono state fatte misure, ma che comunque danno il loro contributo all'intermodulazione dell'amplificatore.

Nota 11 - L'elenco si riferisce al mese di giugno 2011.

Tab. 4 – Elenco canali ricevuti in antenna.

Canale	Standard	Modulazione e FEC	Livello dB(µV)	Ricezione
21	DVB-T	64-QAM 2/3	70	☺
22	DVB-T	64-QAM 3/4	66	☺
23	DVB-T	QPSK 5/6	65,1	☺
24	DVB-T	64-QAM 3/4	62,3	☺
25	DVB-T	QPSK 1/2	47,4	☺
26	DVB-T	64-QAM 2/3	62,1	☺
27	-			
28	-			
29	DVB-T	64-QAM 3/4	66	☺
30	DVB-T	64-QAM 2/3	67,5	☺
31	DVB-T	64-QAM 3/4	66,7	☺
32	DVB-T	64-QAM 2/3	70,9	☺
33	DVB-T	64-QAM 3/4	66,3	☺
34	DVB-T	16-QAM 2/3	63,4	☺
35	DVB-T	64-QAM 2/3	68,5	☺
36	DVB-T	64-QAM 5/6	65,5	☺
37	-			
38	DVB-H	16-QAM 1/2	63,2	☺
39	DVB-T	64-QAM 3/4	64,1	☺
40	DVB-T	64-QAM 2/3	64	☺
41	DVB-T	64-QAM 3/4	70,6	☺
42	DVB-T	64-QAM 2/3	60,2	☺
43	DVB-T	64-QAM 3/4	71,5	☺
44	DVB-T	64-QAM 3/4	63,8	☺
45	DVB-T	64-QAM 3/4	68,6	☺
46	DVB-T	n.d.	58,5	☹
47	DVB-T	64-QAM 3/4	62	☺
48	DVB-T	64-QAM 3/4	59,2	☺
49	DVB-T	64-QAM 3/4	63,9	☺
50	DVB-T	64-QAM 5/6	59,5	☺
51	DVB-T	64-QAM 3/4	62	☺
52	DVB-T	64-QAM 5/6	63,4	☺
53	DVB-T	64-QAM 3/4	59	☺
54	DVB-T	64-QAM 3/4	65	☺
55	-			
56	DVB-T	64-QAM 5/6	65,1	☺
57	DVB-T	n.d.	50	☹
58	DVB-T	64-QAM 5/6	61	☺
59	DVB-T	64-QAM 2/3	59,4	☺
60	DVB-T	64-QAM 3/4	59,1	☺

Dal momento che i segnali ricevuti in antenna non hanno tutti lo stesso livello, non è semplice applicare la formula teorica di riduzione del livello d'uscita dell'amplificatore illustrata nel paragrafo 4.2.1: si possono infatti individuare 3-4 canali di livello più elevato degli altri, che avranno quindi maggiore peso sull'intermodulazione, ed altri ricevuti a livello più basso.

Si è quindi scelto di regolare l'amplificatore in modo da ricercare un compromesso tra degradamento dei segnali distribuiti (ovvero verificando che i segnali siano ancora tutti ricevibili anche dopo l'amplificazione, e con una minima riduzione del MER) e attenuazione di rete tollerabile a valle dell'amplificatore (in modo da permettere la distribuzione dei segnali in un impianto con un numero di utenti abbastanza elevato).

L'amplificazione risultante è stata di circa 35 dB. La riduzione del MER corrispondente (misurata nel punto 2 della figura 8) varia leggermente da canale a canale, con un valor medio di 0,4 dB.

È quindi stato inserito il segnale LTE disturbante, generato in laboratorio come descritto nel paragrafo 4.3.1, con livello di picco impostato in accordo con il paragrafo 2.2 tenendo conto della distanza dalla BTS come da esempio della tabella 2.

Questa condizione corrisponderebbe alla presenza di una nuova BTS LTE nella posizione indicata nella figura 9.

In particolare, tenendo conto della larghezza di banda di 10 MHz e delle potenze medie effettive, il segnale LTE è stato inserito con le caratteristiche riportate nella tabella 5.

Tab. 5 – Caratteristiche del segnale LTE inserito.

Configurazione	Potenza media	Frequenza centrale
"LTE 100%"	-5 dBm	796 MHz
"LTE 50%"	-7,3 dBm	796 MHz
"LTE idle"	-13,3 dBm	796 MHz

Questo significa che, nel caso peggiore, il C/I relativo ai segnali DVB-T ricevuti con livello maggiore è di circa 33 dB (anche in questo caso, si tratta di un valore non troppo pessimistico). Successivamente sono stati anche effettuati test con livello del segnale LTE ridotto.

Lo spettro del segnale all'uscita dell'amplificatore (punto 2 della figura 8) è riportato nella figura 10, in assenza o in presenza del segnale LTE disturbante.

Si può notare che, in presenza di un segnale LTE così elevato, ad eccezione del caso "idle" la saturazione dell'amplificatore comporta una riduzione del livello di tutti i canali di circa 2÷3 dB.

Le prestazioni del sistema sono state misurate mediante il misuracampo Promax TV Explorer HD+ in termini di avvenuta ricezione, MER, Noise Margin e BER prima e dopo Viterbi.

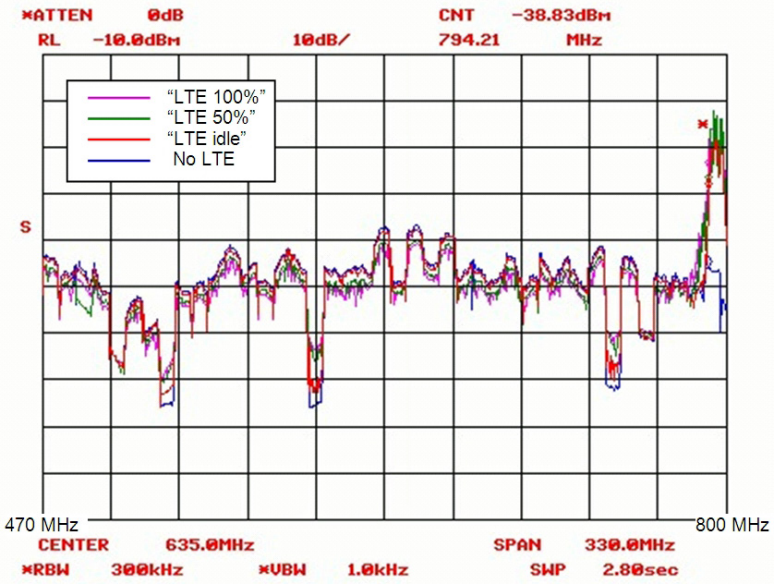
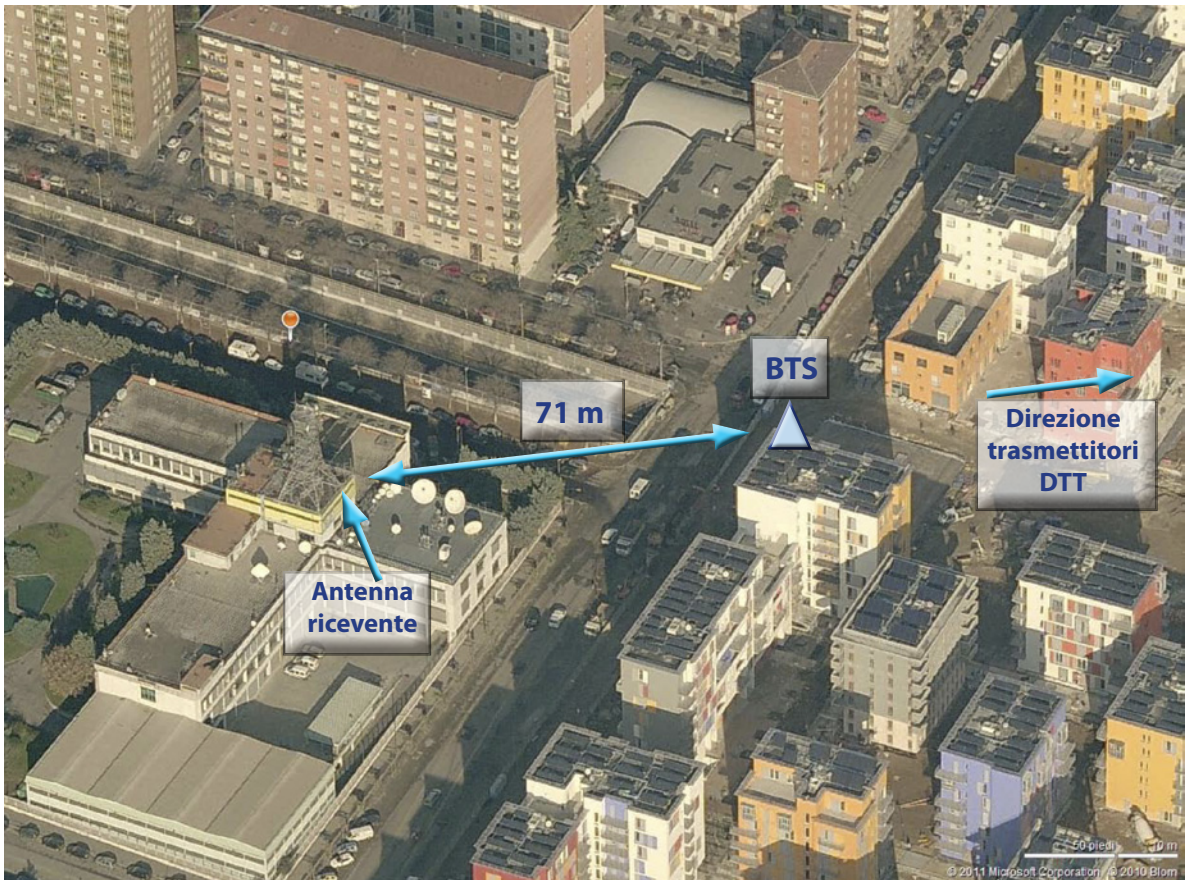


Fig. 10 – Spettro di potenza del segnale all'uscita dell'amplificatore (punto 2 di fig. 8), con o senza se-gnale LTE.

Fig. 9 – Posizione di una ipotetica BTS che generi un segnale LTE equivalente a quello inserito in laboratorio.



Tab. 6 – Canali ricevibili.

Canale	Antenna	Amplif.	LTE 100%	LTE 50%	LTE idle
21	☺	☺	☹	☹	☺
22	☺	☺	☹	☹	☺
23	☺	☺	☺	☺	☺
24	☺	☺	☹	☹	☺
25	☺	☺	☹	☹	☺
26	☺	☺	☹	☹	☺
29	☺	☺	☹	☹	☺
30	☺	☺	☹	☹	☺
31	☺	☺	☹	☹	☺
32	☺	☺	☹	☹	☺
33	☺	☺	☹	☹	☺
34	☺	☺	☹	☺	☺
35	☺	☺	☹	☹	☺
36	☺	☺	☹	☹	☺
38	☺	☺	☺	☺	☺
39	☺	☺	☹	☹	☺
40	☺	☺	☹	☹	☺
41	☺	☺	☹	☹	☺
42	☺	☺	☹	☹	☹
43	☺	☺	☹	☹	☺
44	☺	☺	☹	☹	☺
45	☺	☺	☹	☹	☺
47	☺	☺	☹	☹	☺
48	☺	☺	☹	☹	☺
49	☺	☺	☹	☹	☺
50	☺	☺	☹	☹	☹
51	☺	☺	☹	☹	☺
52	☺	☺	☹	☹	☺
53	☺	☺	☹	☹	☺
54	☺	☺	☹	☹	☺
56	☺	☺	☹	☹	☺
58	☺	☺	☹	☹	☹
59	☺	☺	☹	☹	☺
60	☺	☺	☹	☹	☹

Tab. 7 – Canali ricevibili con segnale LTE attenuato.

Canale	LTE 100%		LTE 50%		LTE idle	
	-6dB	-12dB	-6dB	-12dB	-6dB	-12dB
21	☺	☺	☺	☺	☺	☺
22	☺	☺	☺	☺	☺	☺
23	☺	☺	☺	☺	☺	☺
24	☺	☺	☺	☺	☺	☺
25	☺	☺	☺	☺	☺	☺
26	☺	☺	☺	☺	☺	☺
29	☺	☺	☺	☺	☺	☺
30	☺	☺	☺	☺	☺	☺
31	☺	☺	☺	☺	☺	☺
32	☺	☺	☺	☺	☺	☺
33	☺	☺	☺	☺	☺	☺
34	☺	☺	☺	☺	☺	☺
35	☺	☺	☺	☺	☺	☺
36	☺	☺	☺	☺	☺	☺
38	☺	☺	☺	☺	☺	☺
39	☺	☺	☺	☺	☺	☺
40	☺	☺	☺	☺	☺	☺
41	☺	☺	☺	☺	☺	☺
42	☹	☺	☺	☺	☺	☺
43	☺	☺	☺	☺	☺	☺
44	☹	☺	☺	☺	☺	☺
45	☺	☺	☺	☺	☺	☺
47	☺	☺	☺	☺	☺	☺
48	☺	☺	☺	☺	☺	☺
49	☺	☺	☺	☺	☺	☺
50	☹	☺	☺	☺	☺	☺
51	☺	☺	☺	☺	☺	☺
52	☹	☺	☺	☺	☺	☺
53	☹	☺	☺	☺	☺	☺
54	☺	☺	☺	☺	☺	☺
56	☹	☺	☺	☺	☺	☺
58	☹	☺	☹	☺	☺	☺
59	☹	☺	☺	☺	☺	☺
60	☹	☹	☹	☺	☹	☺

Un raffronto sull'immagine video all'uscita di un Set-Top-Box DVB-T Topfield 3000T ha permesso inoltre di confermare i risultati in termini di avvenuta ricezione.

La tabella 6 riporta i risultati relativi alla ricevibilità dei singoli canali televisivi nelle varie configurazioni esaminate. Dalla tabella sono stati esclusi i canali 46 e 57, non ricevibili neppure in antenna.

Si può notare che, in presenza di "LTE 100%" o "LTE 50%" senza ulteriori attenuazioni, gli unici canali ricevibili sono il 23 (che è trasmesso con modulazione QPSK), il 34 (16-QAM, peraltro non ricevibile con configurazione "LTE 100%") e il 38 (a standard DVB-H). La situazione migliora nel caso di "LTE idle", con prestazioni che rimangono più critiche nella parte alta della banda.

L'intermodulazione introdotta è pertanto più o meno critica in funzione del carico del segnale LTE in termini di data-rate: la condizione più critica si ha con carico 100% e meno critica con segnale LTE in "idle": questo è dovuto al fatto che la potenza media del segnale LTE si riduce al diminuire del carico, riducendo così l'intermodulazione.

La tabella 7 riporta i risultati ottenuti con valori più bassi di segnale LTE interferente: questi risultati offrono anche un'indicazione dei possibili benefici di un filtraggio "in-line" all'ingresso dell'amplificatore.

Le figure 11 e 12 riportano più in dettaglio i risultati, in termini di MER e Noise Margin rispettivamente, nelle varie configurazioni esaminate. Le linee rosse orizzontali danno un'indicazione della "soglia di allarme" Nota 12. Confrontando i due grafici si può apprezzare la maggiore protezione fornita dalle modulazioni più robuste.

Nota 12 - Sul grafico del MER la soglia è riferita a segnali 64 QAM.

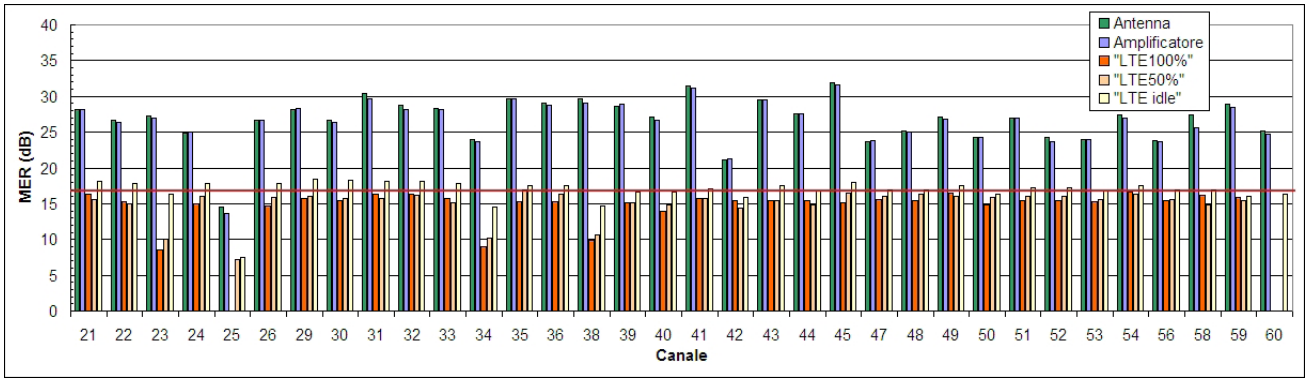


Fig. 11 – Misura del MER sui vari canali, con e senza LTE.

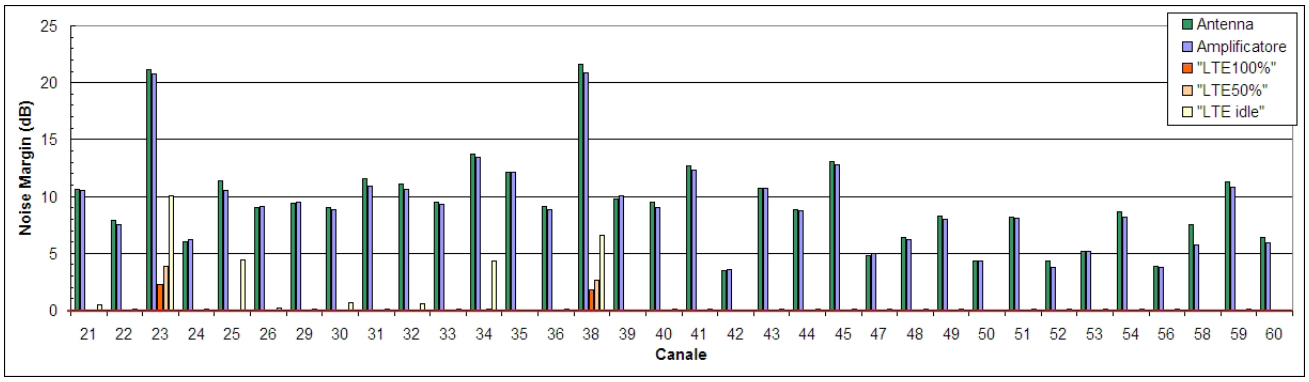


Fig. 12 – Misura del Noise Margin sui vari canali, con e senza LTE.

Infine, la tabella 8 riassume i risultati ottenuti in termini di numero di canali ricevibili e di degradamento medio del MER rispetto alla condizione originaria di assenza del segnale LTE.

Tab. 8 – Risultati cumulativi.

Configurazione	Numero canali ricevibili	Degradamento medio MER
Antenna	34	-0,4 dB
Amplificatore	34	-
"LTE 100%"	2	11,1 dB
"LTE 50%"	3	11 dB
"LTE idle"	30	9,4 dB
"LTE 100%" –6 dB	25	9,5 dB
"LTE 100%" –12 dB	33	4 dB
"LTE 50%" –6 dB	32	8,6 dB
"LTE 50%" –12 dB	34	2,5 dB
"LTE idle" –6 dB	33	4,1 dB
"LTE idle" –12 dB	34	0,6 dB

I risultati di queste misure sono in linea con una campagna di misure recentemente condotta in Inghilterra per conto di Ofcom [13].

4.4 Stima dell'area interessata

Dai risultati esposti nei paragrafi precedenti, si può ricavare che possono sorgere problemi nella ricezione dei segnali televisivi tramite impianti centralizzati d'antenna se il livello del segnale LTE interferente supera il livello dei segnali DTT di oltre 15÷20 dB.

Fermo restando che occorrerebbe considerare la specificità di ogni singolo caso (orografia, densità e altezza degli edifici, ecc.), è possibile fare una stima dell'estensione dell'area interessata in campo libero in modo teorico, a partire dalle leggi sulla propagazione elettromagnetica.

La stima del campo in quota (a 10 m) in assenza di ostruzioni segue la formula:

$$E_{[mV/m]} = \frac{222}{d_{[km]}} \sqrt{ERP_{[kW]}}$$

A sua volta, il campo elettromagnetico in prossimità dell'antenna ricevente può essere correlato con il livello del segnale ricevuto in antenna tramite la seguente formula:

$$E_{[dB\mu V/m]} = V_{L\,[dB\mu V]} + K_{[dBm\text{-}1]}$$

dove

$$K = \sqrt{(120 \cdot 4\pi^2) / (\lambda^2 \cdot R_{rad} \cdot G)} \quad [m^{-1}]$$

Alla frequenza di 800 MHz, considerando un'antenna di guadagno 9 dBi e impedenza d'entrata 75 Ω, il fattore d'antenna K risulta pari a 17,5 dB(m^{-1}).

È quindi possibile calcolare la distanza dalla BTS a cui, in campo libero, gli effetti dovuti al segnale LTE interferente, in assenza di tecniche di mitigazione, sarebbero ancora evidenti.

La tabella 9 riporta, a titolo di esempio, tale distanza (corrispondente a un C/I di 20 dB) per diversi valori di livello dei segnali DTT ricevuti in antenna (ovvero a diverse distanze dai trasmettitori), con riferimento ad una BTS LTE con EIRP di 59 dBm e polarizzazione ±45° (come detto, in questo caso la discriminazione di polarizzazione dell'antenna è di circa 3 dB) e nella stessa direzione dei trasmettitori DTT.

Tab. 9 – Distanza dalla BTS fino a cui si possono prevedere disturbi sui segnali DTT in assenza di tecniche di mitigazione.

Livello segnali DTT in antenna	Campo e.m. DTT	Minimo campo e.m. LTE disturbante	Distanza dalla BTS
45 dB(μV)	62,5 dB(μV/m)	82,5 dB(μV/m)	10 km
65 dB(μV)	82,5 dB(μV/m)	102,5 dB(μV/m)	1 km
85 dB(μV)	102,5 dB(μV/m)	122,5 dB(μV/m)	100 m

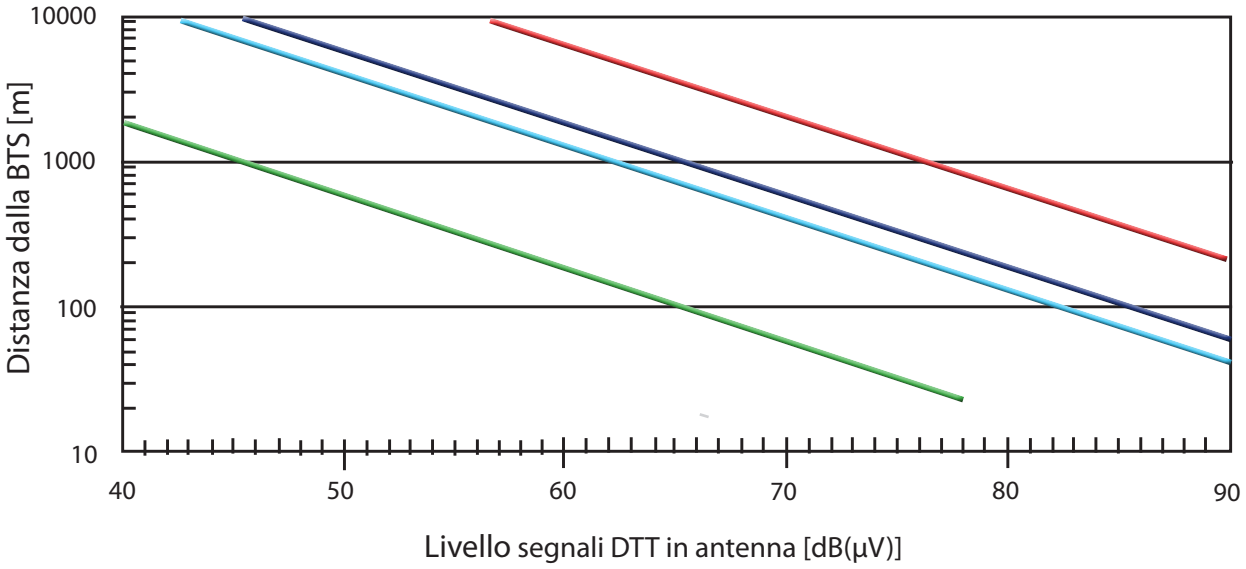


Fig. 13 – Andamento della distanza dalla BTS entro cui si possono avere interferenze, in funzione del livello dei segnali DTT in antenna.

Anche questi valori sono in linea con le conclusioni dell'indagine condotta per conto di Ofcom [13].

La figura 13 riporta infine l'andamento della distanza dalla BTS entro cui si possono avere interferenze, al variare del livello dei segnali DTT ricevuti in antenna, in diverse condizioni. Oltre al caso relativo alla tabella 9, raffigurato in blu, sono considerati anche i casi più favorevoli di ricezione da una diversa direzione (tipicamente, il guadagno d'antenna si riduce di almeno 3 dB per un angolo di 35° e di almeno 20 dB oltre 90°) e il caso più sfavorevole di EIRP del segnale LTE pari a 67 dBm (ad es. in ambiente rurale) e con la stessa polarizzazione dei segnali DTT.

Come si può vedere, se l'antenna ricevente è orientata in una diversa direzione rispetto alla BTS LTE, la distanza può essere ridotta del 30% per angolo di 35°, o di un fattore 10 per angolo superiore a 90°.

Va comunque ribadito che i valori calcolati in questo paragrafo sono soltanto indicativi, per le seguenti ragioni:

- La formula utilizzata per il calcolo del campo elettromagnetico è valida in campo libero: in ambiente urbano, il valore effettivo potrebbe essere più basso;
- Una ulteriore riduzione del campo ricevuto potrebbe essere apportata dal tilt dell'antenna, in funzione dell'altezza relativa di antenna BTS e antenna ricevente;
- I calcoli si riferiscono ad un solo blocco LTE da 10 MHz (o due blocchi da 5 MHz) irradiato da una singola BTS: in presenza di più blocchi e di una moltitudine di BTS presenti in un ambiente urbano, il valore effettivo del campo elettromagnetico ricevuto potrebbe essere più alto;
- Nel calcolo si è fatto riferimento ad un C/I limite di -20 dB: scegliendo invece il valore più conservativo di -15 dB, le distanze calcolate aumenterebbero circa dell'80%.

5. Conclusioni

Le simulazioni al calcolatore e le misure di laboratorio hanno permesso di analizzare il comportamento degli amplificatori a larga banda degli impianti centralizzati d'antenna in presenza di segnali LTE.

Simulazioni e misure, effettuate in condizioni realistiche e non eccessivamente pessimistiche, hanno concordemente mostrato che, in alcune situazioni, l'impatto dei segnali LTE sull'intermodulazione degli amplificatori potrebbe essere serio, a conferma dei risultati pubblicati in ambito internazionale. Gli effetti più evidenti si hanno sui canali adiacenti (in particolare sul canale 60), ma tutti i canali nella banda UHF possono essere degradati fino alla mancanza di ricezione. È infatti opportuno che il livello del segnale LTE interferente sia ridotto ad un valore non superiore a circa 15÷20 dB rispetto ai segnali DTT.

Si può stimare che, in assenza di filtraggio preventivo o di altre tecniche di mitigazione, in condizioni sfavorevoli gli impianti potrebbero essere affetti da disturbi fino ad una distanza di oltre 1 km dalla BTS.

Un filtraggio di base del segnale d'ingresso al centralino può aiutare a ridurre gli effetti dell'intermodulazione, ma per essere efficace è necessario l'utilizzo di filtri ad elevata selettività, abbastanza costosi, mentre l'impiego dei semplici filtri "in-line" a basso costo in alcuni casi potrebbero fornire risultati insoddidsfaceenti. Nei casi in cui il filtraggio non fosse sufficiente, saranno necessarie ulteriori contromisure sull'impianto, da valutare caso per caso (spostamento delle antenne riceventi, utilizzo di centralini canalizzati, ecc.). Si può presumere infine che i componenti di futura progettazione (antenne, amplificatori, miscelatori, ecc.) avranno già banda limitata a 790 MHz, agevolando le altre tecniche di mitigazione almeno sui nuovi impianti.

È poi auspicabile che opportuni vincoli siano fissati per l'operatore LTE, in modo da limitare in determinate aree l'entità del segnale interferente ricevuto in antenna: a tale proposito si possono adottare tecniche quali cross-polarizzazione, limitazione della massima EIRP, ecc.

In ogni caso, la convivenza di servizi broadcast e 4G nella banda UHF richiederà una adeguata collaborazione tra tutti gli operatori coinvolti, in modo da evitare di far ricadere i relativi costi interamente sull'utente finale.

Bibliografia

1. EC Decision 2010/267/EU: Commission Decision of 6 May 2010 on harmonised technical conditions of use in the 790-862 MHz frequency band for terrestrial systems capable of providing electronic communications services in the European Union, Official Journal of the European Union, maggio 2010, http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/2010267EU.pdf.

2. CEPT Report 30: Report from CEPT to the European Commission in re-sponse to the Mandate on "The identification of common and minimal (least restrictive) technical conditions for 790 - 862 MHz for the digital dividend in the European Union", ottobre 2009, http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/CEPTREP030.pdf.

3. W, Sami: How can mobile and broadcasting networks use adjacent bands?, EBU Technical Review, 2011, http://tech.ebu.ch/docs/techreview/trev_2011-Q1_digital-dividend_sami.pdf.

4. CEPT Report 31: Report from CEPT to the European Commission in re-sponse to the Mandate on "Technical considerations regarding harmonisation options for the digital dividend in the European Union", ottobre 2009, http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/CEPTREP031.pdf.

5. B. Randhawa, I. Parker, S. Antwi: LTE Interference into Domestic Digital Television Systems, Cobham Report 2010-0026, gennaio 2010, http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/800mhz/statement/2010-0026.pdf.

6. R. Karimi: Considerations related to the licensing of the 800 MHz band in the UK, EBU ECS Workshop, ottobre 2010, http://tech.ebu.ch/docs/events/ecs10/presentations/ebu_ecs10_workshop_karimi.pdf .

7. Ofcom: Coexistence of new services in the 800 MHz band with digital terrestrial television, Consultation, giugno 2011, http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/dtt/summary/dttcondoc.pdf.

8. Ofcom: Technical analysis of interference from mobile network base sta-tions in the 800 MHz band to digital terrestrial television, Technical Report, giugno 2011, http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/dtt/annexes/Technical-Report.pdf.

9. F. Mussino: Measurement approaches for 5th order intermodulation products, CENELEC TC 209 Workshop, novembre 2010, ftp://ftp.cenorm.be/CENELEC/TC209/Mussino.pdf .

10. CEI EN 60728-3: Impianti di distribuzione via cavo per segnali televisivi, sonori e servizi interattivi - Parte 3: Apparecchiature attive a larga banda per impianti con cavi coassiali, ottobre 2006.

11. A. Deotto, A. Ditto: Impianti d'antenna TV singoli e centralizzati, CO.EL, 1992.

12. CEI 100-7: Guida per l'applicazione delle Norme sugli impianti di ricezione televisiva, febbraio 2005.

13. P. Barnett, L. Mercer: The Impact of LTE on Communal Aerial Systems – A short study for Ofcom, ManderCoM, Issue 1.1, Giugno 2011, http://stakeholders.ofcom.org.uk/binaries/consultations/dtt/annexes/The-impact-of-LTE.pdf.

14. ITU-R Recommendation BT.1368-9: Planning criteria, including protection ratios, for digital terrestrial television services in the VHF/UHF bands, dicembre 2011.

15. ITU-R Report BT.2215: Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers, maggio 2011.