

Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T

ing. Andrea Bertella,
ing. Bruno Sacco,
p.i. Mirto Tabone

Rai - Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica
Torino

1. Introduzione

L'introduzione della televisione digitale terrestre (DVB-T) in vari Paesi europei rappresenta un importante passo verso la conversione globale del sistema radiotelevisivo alla tecnologia digitale. Il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT), in collaborazione con RayWay, già dalla seconda metà degli anni '90 ha intrapreso una vasta attività di studio e sperimentazione tecnica [1],[2],[3],[4], nel contesto nazionale ed internazionale, contribuendo direttamente alla definizione della normativa [5].

In questo contesto, nell'ambito del progetto europeo ACTS-VALIDATE, presso i laboratori Rai-CRIT di Torino è stata installata una catena completa di trasmissione-ricezione DVB-T sulla quale sono state effettuate specifiche valutazioni tecniche allo scopo di verificare le effettive prestazioni del sistema e confrontarle con i dati teorici. La catena comprende i codificatori MPEG-2 (per tre programmi TV), un multiplatore DVB-TS (Transport Stream), il modulatore COFDM operante secondo le principali configurazioni di trasmissione previste dalla specifica, un trasmettitore da 50W operante in UHF sul canale 28, o sul canale 43, ed un ricevitore semiprofessionale.

Le prestazioni del sistema sono state valutate in entrambi i modi 2k e 8k, previsti dalla normativa, in presenza di vari degradamenti tipici del canale di diffusione terrestre, quali: rumore gaussiano bianco (AWGN), rumore impulsivo, echi statici (singoli e multipli) soggetti anche

Sommario

La televisione digitale terrestre (DVB-T), già introdotta in Gran Bretagna e in altri paesi europei, è in fase di avanzata sperimentazione nel nostro Paese. Il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT), nell'ambito del progetto DVB (Digital Video Broadcasting) e dei progetti europei RACE-dTTb e ACTS-VALIDATE, ha contribuito direttamente alla definizione e alla validazione del sistema DVB-T. Il sistema, che impiega la modulazione multipor-tante COFDM, con numerose possibilità di configurare i parametri di trasmissione e la codifica di canale, permette la ricezione fissa, portatile e mobile. Sono possibili due modi operativi a seconda del numero di portanti all'interno del canale a radiofrequenza: il primo, con 2k portanti FFT, è destinato all'impiego su reti di diffusione convenzionali multi frequenza (MFN), ed è particolarmente adatto ai servizi per terminali mobili; il secondo con 8k portanti è adatto anche all'impiego su reti a singola frequenza (SFN) permettendo lo sfruttamento ottimale delle risorse in frequenza.

L'articolo presenta i risultati delle prove di laboratorio effettuate da Rai-CRIT e da altri Partner europei in ambito al progetto ACTS-VALIDATE. Tali prove hanno permesso di valutare la robustezza del sistema DVB-T in presenza dei tipici degradamenti introdotti dal canale trasmissivo nelle bande VHF/UHF e dal ricevitore d'utente: rumore (gaussiano e impulsivo), echi, distorsioni non lineari, effetto Doppler, interferenza cocanale generata da altri segnali DVB-T e/o da segnali TV analogici, rumore di fase del sintonizzatore, ecc. Nell'articolo vengono riportati i risultati delle valutazioni di laboratorio confrontandoli con le prestazioni teoriche del sistema.

ad effetto Doppler, distorsioni non lineari (introdotte ad esempio da amplificatori delle reti di distribuzione condominiale in cavo), valutando nei vari casi il margine del sistema per una corretta ricezione. Infine si sono determinati i rapporti di protezione, per alcuni tipiche configurazioni operative, in presenza di interferenti co-canale dovuti sia ad altri segnali digitali DVB-T che a segnali analogici PAL, ciò al fine di pianificare l'introduzione dei nuovi servizi televisivi digitali nell'attuale contesto analogico.

Le valutazioni hanno permesso inoltre di analizzare alcuni aspetti inesplorati della modulazione COFDM, come ad esempio la sensibilità al rumore di fase del sintonizzatore/ricevitore – particolarmente critica nel modo 8k –, il degradamento dovuto ad echi lunghi e profondi – prossimi o addirittura superiori all'intervallo di guardia del sistema – e la possibilità di operare con ricevitori portatili o mobili, normalmente dotati di semplice antenna ricevente omnidirezionale.

I risultati riportati nel seguito ^{Nota 1}, sono stati adottati da VALIDATE come prestazioni di riferimento dello standard DVB-T. Per informazioni generali sullo standard DVB-T si rimanda alla bibliografia [4], [5].

Nota 1 - Per un rapporto completo sui risultati delle misure di laboratorio si rimanda alla [1]

2. Procedimento di misura

La valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema è stata condotta introducendo sul segnale DVB-T i tipici degradamenti imputabili al canale trasmissivo (rumore casuale e impulsivo, interferenze, echi multipli, rumore di fase, off-set di frequenza, non linearità, ecc.) e misurando nei vari casi il tasso di errore (BER) sul segnale ricevuto, dopo il primo livello di correzione degli errori di trasmissione effettuato nel ricevitore

mediante decodifica di Viterbi.

L'effetto dei vari degradamenti si traduce in un aumento del rapporto portante/rumore DC/N [dB], rispetto al canale ideale, necessario per ottenere una ricezione del segnale audio-video sostanzialmente priva di errori. Questa condizione di Quasi Error Free (QEF) si raggiunge ad un tasso di errore (BER) di 2×10^{-4} (dopo decodifica di Viterbi), a cui corrisponde sul segnale audio-video – a valle del secondo livello di correzione degli errori tramite decodifica di Reed Solomon – un tasso d'errore inferiore a 10⁻¹¹. I valori di C/N per il canale ideale (affetto solo da rumore gaussiano bianco e in assenza di distorsioni) assunti dalla CEPT [6] per gli schemi di modulazione presi in esame durante le misure di laboratorio sono:

QPSK 1/2 => 3.1 dB;
16 QAM 3/4 => 12.5 dB;
64QAM 2/3 => 16.5 dB.

L'entità del degradamento viene correntemente espressa dal Noise Margin Loss (NML) che corrisponde all'aumento del rapporto portante/rumore $\Delta C/N$ rispetto al canale ideale necessario per raggiungere la condizione di corretta ricezione.

La figura 1 mostra uno schema semplificato del banco di misura allestito in laboratorio per realizzare l'intera catena, dalla sorgente al ricevitore; la catena consente di operare sia a frequenza intermedia (IF; 35,5 MHz) che a radio frequenza (canali UHF 28 e 43).

Per ciascun tipo di degradamento è stato utilizzato il seguente procedimento di misura:

a) in assenza di degradamento aggiuntivo, si aumenta il livello del rumore AWGN fino al raggiungimento della condizione QEF e si annota il valore corrispondente

di C/N all'ingresso del ricevitore (misurato nella banda di 7,6 MHz occupata dal segnale DVB-T entro il canale UHF da 8 MHz);

- b) si introduce quindi il degradamento e si riduce progressivamente il livello di rumore fino a ritrovare la condizione QEF. A ciò corrisponde un aumento DC/N (dB) che identifica il Noise Margin Loss (NML) del sistema per il tipo di degradamento in esame.

2.1. Perdite d'implementazione

Le prestazioni dell'intera catena DVB-T, anche in assenza di degradamenti aggiuntivi, sono inevitabilmente inferiori rispetto al caso ideale a causa delle prestazioni dei vari apparati; ciò si riflette in un aumento del rapporto C/N alla soglia di corretta ricezione.

Una prima valutazione ha quindi riguardato la misura del degradamento $\Delta C/N$, dovuto ai vari elementi costituenti la catena

DVB-T, rispetto alla catena ideale simulata al calcolatore [4]. I degradamenti misurati si riferiscono separatamente al processo di mo-demodulazione a frequenza intermedia (IF-IF), al degradamento imputabile al sintonizzatore del ricevitore (IF-RF), e a quello globale introdotto dall'intera catena di trasmissione a radiofrequenza (RF-RF). Gli apparati inclusi nei tre collegamenti IF-IF, IF-RF e RF-RF sono evidenziati in figura 1.

I risultati sono riportati nella tabella 1 per alcune tipiche configurazioni di servizio (QPSK-1/2; 16QAM-3/4; 64QAM-2/3) e per alcuni valori dell'intervallo di guardia Δ della modulazione multiportante COFDM. I parametri 1/2, 3/4 e 2/3 associati a QPSK, 16QAM e 64QAM si riferiscono al code-rate del codice correttore convoluzionale impiegato nello standard (il rapporto 2/3 individua 2 bit utili + 1 bit di protezione).

Dai risultati delle misure si possono trarre

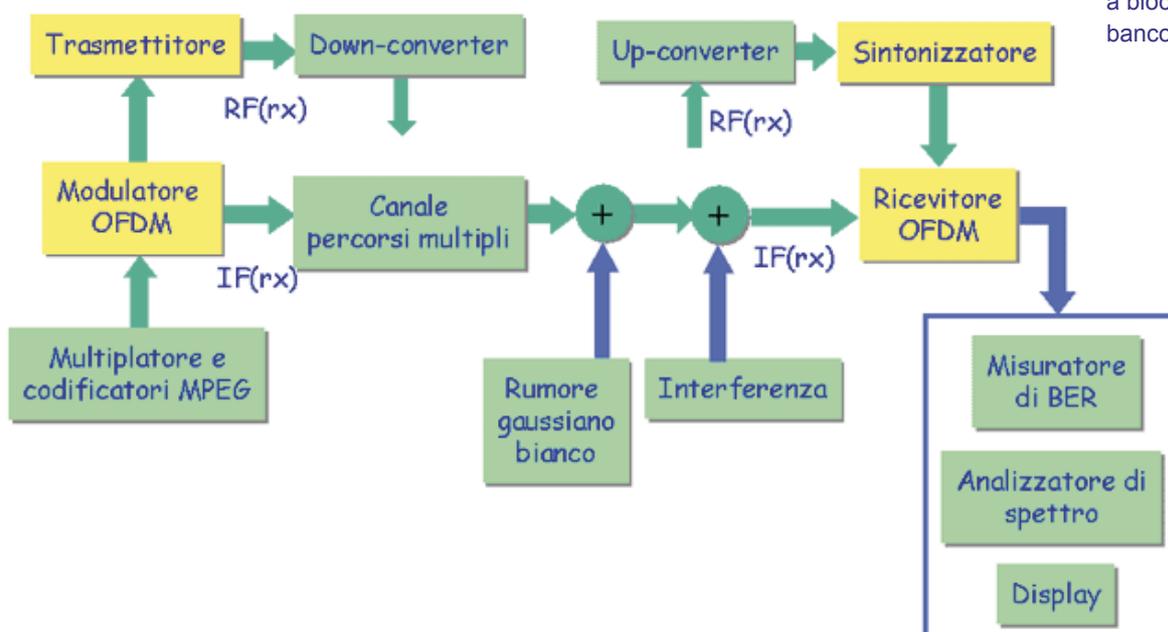


Fig. 1 - Schema a blocchi del banco di misura

Tabella 1. Perdite di implementazione $\Delta C/N$ [dB] rispetto al canale ideale

Configurazione delle connessioni in laboratorio		$\Delta C/N$ [dB]					
Modulazione e codifica	Δ	FFT	IF(tx)-IF(rx)	IF(tx)-RF(rx)		RF(tx)-RF(rx)	
			Degradamento modem base	Degradamento sintonizzatore		Nota Degradamento totale	
				ch. 28	ch. 43	ch. 28	ch. 43
QPSK 1/2	1/8	2k	1.7	0.0		1.7	1.8
		8k	1.6	0.0		1.8	1.8
16QAM 3/4	1/32	2k	1.6	0.0		1.7	1.7
		8k	1.5	0.1		1.7	1.7
64QAM 2/3	1/4	2k	2.4	0.2	0.5	2.8	3.1
		8k	2.3	0.3	0.7	2.9	3.3

Nota: Il degradamento del rapporto C/N del sistema imputabile al trasmettitore dipende dalla configurazione di trasmissione adottata (codifica di canale e modulazione) e dalle distorsioni non lineari introdotte dall'amplificatore di potenza. Nella configurazione in esame si è misurato un degradamento compreso tra 0,1 e 0,3 dB.

Tab.1 - Perdite di implementazione $\Delta C/N$ [dB] rispetto al canale ideale

le seguenti conclusioni:

- Comportamento del ricevitore (BER dopo Viterbi):
BER < 10^{-2} : sincronizzazione affidabile, ma qualità video inaccettabile
BER = 10^{-3} : qualità video discreta
BER = $2 \cdot 10^{-4}$: qualità video buona
- Perdita di implementazione DC/N in connessione IF-IF:
QPSK 1/2 e 16QAM 3/4: circa 1,6 dB, vicino al valore teorico per stima di canale 2D [4].
64QAM 2/3: circa 2.4 dB, 0.8 dB peggiore del valore teorico per stima di canale 2D [4].
- Degradamento di 0.2 , 0.7 dB dovuto al rumore di fase del tuner in funzione del canale RF (28 e 43).
- Le prestazioni nei modi 2k e 8k sono sostanzialmente comparabili.

- Le perdite d'implementazione complessive misurate sulla catena RF-RF sono risultate pari a circa 2 dB per QPSK 1/2 e 16QAM 3/4 (2.5 dB con $\Delta = 1/4$) e di 3 dB per 64QAM 2/3.

2.2. Prestazioni in presenza di echi statici

Una importante caratteristica del sistema DVB-T, dovuta alle prestazioni intrinseche della modulazione COFDM, è la possibilità di operare su un canale R.F. soggetto ad echi statici profondi, sia naturali (prodotti da riflessioni del terreno o da vari ostacoli), sia artificiali, dovuti ai segnali dei vari trasmettitori di una rete isofrequenziale (SFN). Ciò consente potenzialmente di estendere il servizio anche alla ricezione del segnale con apparecchi portatili dotati di antenna omnidirezionale incorporata

(“baffo”) che, non essendo direttiva, non offre alcuna reiezione nei confronti degli echi. E’ questo sicuramente un importante valore aggiunto dello standard digitale DVB-T nei confronti della televisione analogica.

Eco singolo

Le prove sono state effettuate sul canale 28 UHF, in connessione IF(tx)-RF(rx), in presenza di un singolo eco con valori di ritardo inferiori e superiori all’intervallo di guardia Δ adottato.

La figura 2 mostra l’andamento di NML relativamente alla configurazione 64QAM rate 2/3 nel modo 8k, in funzione del ritardo e dell’ampiezza dell’eco. Il parametro (C/I) indica in dB il rapporto fra la potenza del segnale principale (C) e quella dell’eco interferente (I). L’intervallo di guardia

$\Delta=1/4$, scelto nelle misure, a cui corrisponde una durata $t_g = 224 \mu s$, è tipicamente adottato nelle reti SFN.

Come si evince dalla figura 2 i risultati per il modo 2k sono simili, previo un opportuno scalamento nel ritardo dell’eco del fattore $2k/8k=0,25$.

Dai risultati si possono trarre le seguenti conclusioni:

- I valori di NML misurati confermano sostanzialmente i risultati delle simulazioni al calcolatore [4].
- L’impiego di bassi code-rate (1/2 o 2/3) per il codice correttore convoluzionale aumenta la robustezza del sistema contro gli echi.
- Echi molto forti, aventi addirittura la stessa ampiezza del segnale principale (C/I=0 dB) ma con ritar-

Eco singolo 8k - 64 QAM 2/3 - $\Delta=1/4$ Intervallo di guardia = 224 μsec

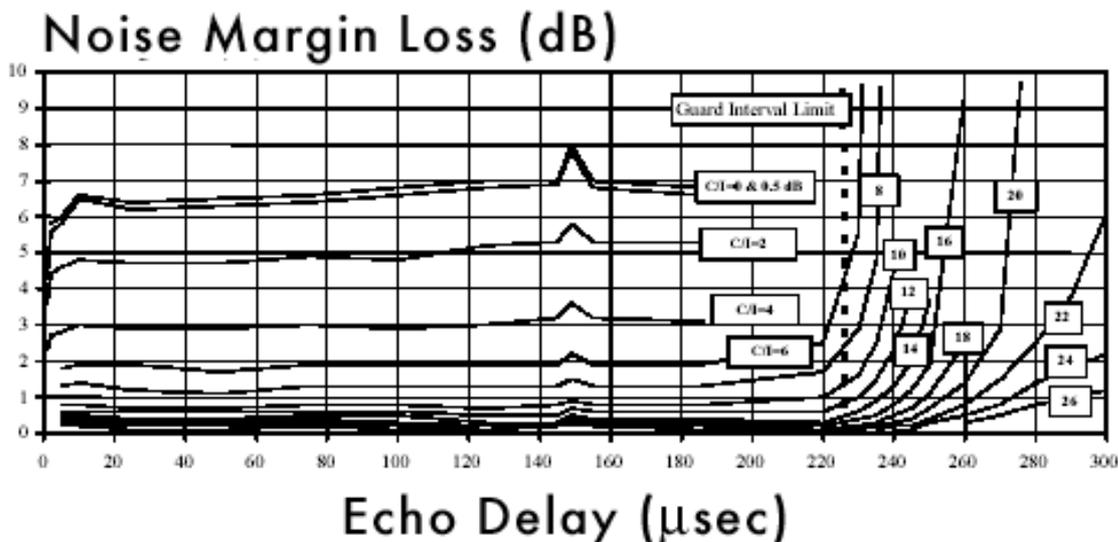


Fig. 2 - Degradamento (NML) dovuto alla presenza di un eco singolo

do contenuto entro l'intervallo di guardia, pur degradando le prestazioni del sistema non compromettono la ricezione in quanto il degradamento è parzialmente recuperato grazie al contributo in potenza sul segnale ricevuto dovuto agli echi medesimi. Si è misurato un NML compreso tra 4 e 9 dB, a seconda del code rate e del ritardo dell'eco.

Echi multipli

Sono stati considerati quattro profili di echi statici, indicati rispettivamente come "fixed", "portable", "dense SFN" ^{Nota 2} e "regional SFN"; essi caratterizzano tipiche condizioni di ricezione riscontrabili in area di servizio a seconda anche della tipologia di rete.

I primi due casi "fixed" e "portable", definiti in dettaglio nell'Annex B della specifica DVB-T [5], rappresentano rispettivamente le condizioni di ricezione fissa con antenna

direttiva (distribuzione di Rice) e di ricezione portatile con antenna omnidirezionale (distribuzione di Rayleigh). Per ciò che riguarda gli altri due casi, si è adottata la seguente configurazione degli echi (τ =ritardo in μ s, γ =C/I in dB):

Dense SFN:

- raggio 1: $\tau=0, \gamma=0$;
- raggio 2: $\tau=7.8, \gamma=9.3$;
- raggio 3: $\tau=11.6, \gamma=5.5$;
- raggio 4: $\tau=17.5, \gamma=16.1$;
- raggio 5: $\tau=20, \gamma=14.5$;
- raggio 6: $\tau=23.4, \gamma=23.4$;

Regional SFN:

- raggio 1: $\tau=0, \gamma=0$;
- raggio 2: $\tau=\Delta/3, \gamma=9.3$;
- raggio 3: $\tau=\Delta/2, \gamma=5.5$;
- raggio 4: $\tau=7\Delta/10, \gamma=16.1$;
- raggio 5: $\tau=4\Delta/5, \gamma=14.5$;
- raggio 6: $\tau=9D/10, \gamma=23.4$.

La tabella 2 riporta i risultati delle misure che non si scostano sensibilmente da quelli ottenuti mediante le simulazioni al

Nota 2 - E' una tipica rete SFN che include molti piccoli trasmettitori su un'area limitata

Tab. 2 - Degradamento da echi multipli che cadono all'interno dell'intervallo di guardia

Tabella 2 - Degradamento da echi multipli che cadono all'interno dell'intervallo di guardia

Condizioni di ricezione	Noise margin losses $\Delta C/N$ [dB] (Riferimento: AWGN prestazioni di canale)					
	QPSK 1/2 $\Delta=1/8$		16QAM 3/4 $\Delta=1/32$		64QAM 2/3 $\Delta=1/8$	
	2k	8k	2k	8k	2k	8k
Fisso (Rice, antenna direttiva)	0.4 (0.5*)	0.4 (0.5*)	0.8 (0.5*)	0.6 (0.5*)	0.7 (0.6*)	0.5 (0.6*)
Portatile (Rayleigh, antenna omnidirezionale)	2.5 (2.3*)	2.6 (2.3*)	4.3 (4.2*)	4.4 (4.2*)	3.4 (2.8*)	3.5 (2.8*)
SFN densa (Rayleigh)	2.1	2.2	(**)	3.5	2.6	2.8
SFN regionale (Rayleigh)	2.1	2.2	3.4	3.4	2.5	2.8

(*): simulazioni al calcolatore

(**): non valutabile (presenza nel profilo di canale di un eco oltre l'intervallo di guardia)

calcolatore, indicati fra parentesi.

Il degradamento $\Delta C/N$ riscontrato su canale Rice – che è tipico della ricezione fissa con antenna direttiva (raggio principale di 10 dB superiore agli echi) – raggiunge gli 0,8 dB. Su canale Rayleigh, affetto da propagazione multipercorso con nessun raggio dominante – condizione tipica della ricezione con terminale portatile equipaggiato con antenna omnidirezionale – il degradamento è significativamente inferiore a quello dovuto ad un eco singolo a 0 dB, come si vede dalla figura 2.

2.3. Prestazioni in presenza di echi affetti da Doppler-shift

Benché il sistema DVB-T sia stato sviluppato inizialmente per la ricezione fissa, si possono presentare casi in cui, a causa del movimento di oggetti riflettenti attorno all'antenna ricevente (specialmente per ricevitori portatili con antenna omnidirezionale), la risposta in frequenza del canale subisca lente variazioni che possono degradare le prestazioni del sistema, in particolare nel modo 8k dove si ha la minor durata del simbolo COFDM rispetto al modo 2k.

Nel modo 2k – tipicamente impiegato nelle reti MFN – impiegando modulazioni e code rate robusti (ad esempio QPSK-1/2, 16QAM-1/2) è possibile anche la ricezione mobile^{Nota 3} [3], anche se la specifica del sistema non include il time interleaving – impiegato nel DAB [7] – che consente di assorbire le fluttuazioni a breve termine del segnale.

Si sono pertanto valutate le prestazioni del sistema in presenza di echi singoli e multipli affetti da Doppler shift, che simula la condizione di fluttuazione del segnale suddetto. Nel caso più semplice di due

solli raggi la risposta del canale è caratterizzata da “buchi” in frequenza che si spostano nel tempo a velocità costante generando variazioni di ampiezza e fase della costellazione di ciascuna portante COFDM. In presenza di più raggi la risposta in frequenza e la sua evoluzione si complicano ulteriormente.

Le misure sono state effettuate sul canale 28 – UHF in due tipiche configurazioni caratterizzate da differenti profili di echi con ritardi inferiori all'intervallo di guardia:

Eco singolo:

- Ritardo $0.9T_g$;
- Doppler: $\tau=0$ (raggio principale), $2f_d$;
- Attenuazione dell'eco: 0, 3, 5 e 10 dB;

Echi multipli:

- Ritardi: $t=0$ (raggio principale), $T_g/4$, $T_g/3$, $2T_g/3$;
- Doppler: $+f_d$, $-f_d$, $+f_d$, $-f_d$;
- Attenuazione di ogni singolo eco rispetto al raggio principale di 0, 8.77 dB ($C_m/SI_e = 4$ dB) e 14.77 dB ($C_m/SI_e = 10$ dB).

Con riferimento alla tabella 3, per le tre configurazioni considerate si è determinato il massimo valore del Doppler shift f_d (picco-picco) in Hz tale da introdurre un degradamento NML di 4 dB rispetto al canale con il medesimo profilo di echi ma statici. Poiché, il NML in funzione di f_d degrada molto rapidamente, la scelta del NML= 4 dB come riferimento non è critica ai fini dei risultati ottenuti.

La tabella 3 riporta i principali risultati. Le prestazioni con eco singolo e con echi multipli sono comparabili; come previsto, la configurazione 2k, grazie alla minore durata del simbolo, consente una velocità di equalizzazione delle variazioni del canale circa quattro volte più elevata di quella dell'8k; pertanto il modo 2k offre

Nota 3 - Nel modo 2k la durata del simbolo COFDM è $\frac{1}{4}$ rispetto al modo 8k; pertanto le variazioni della risposta del canale all'interno della durata del simbolo – ed il relativo degradamento – sono inferiori rispetto al modo 8k e tipicamente dell'ordine di $\frac{1}{4}$.

Tabella 3. Massimo Doppler shift (f_d) per un NML=4 dB

Doppler shift f_d [Hz]							
Modulazione e code rate	Modo	Eco singolo			Echi multipli		
		$C_m/I_s = 0$	$C_m/I_s = 3$	$C_m/I_s = 10$	$C_m/\Sigma I_s = 0$	$C_m/\Sigma I_s = 4$	$C_m/\Sigma I_s = 10$
QPSK-1/2 ($\Delta=1/8$)	2k	150	160	>210	115	280 (*)	>425
	8k	24	50	>210	27	70 (*)	>425
16QAM-3/4 ($\Delta=1/32$)	2k	23	58	165	37	80	155
	8k	5	15	40	10	19	45
64QAM-2/3	2k, $\Delta=1/4$	14	19	95	15	28	100
	8k, $\Delta=1/8$	4	8	23	4	8.5	21

(*): sul canale 28 UHF corrisponde a una velocità pari
280 Hz => 137 km/h 70 Hz => 34 km/h

Tab. 3 - Massimo Doppler Shift (f_d) per un NML = 4 dB

prestazioni notevolmente superiori al modo 8k in ricezione mobile.

Il massimo Doppler shift f_d accettabile dipende fortemente dal livello degli echi. In presenza di echi molto forti ($C/I = 0$ dB) il modo QPSK-1/2 (2k) può reggere Doppler shift di oltre 100Hz, rendendo quindi possibile la ricezione mobile con un bit rate utile limitato però a circa 6 Mbps. Il modo 64QAM-2/3 (8k) può invece inseguire solo variazioni lente del canale (pochi Hertz) risultando pertanto essenzialmente adatto alla ricezione fissa, con un bit rate utile di circa 24 Mbps.

Prove successive hanno dimostrato la possibilità di impiegare in ricezione mobile anche il 16QAM- 1/2, che rende disponibile un bit rate utile di circa 12 Mbps.

2.4. Degradamento dovuto al rumore impulsivo

La presenza di rumore impulsivo si può riscontrare in prossimità di linee ad alta tensione, ferrovie, impianti industriali, ecc. e può altresì verificarsi in ambito domestico a causa degli elettrodomestici (frigoriferi, forni a microonde, rasoi elettrici ecc.). E' importante valutare il possibile degradamento introdotto sulla qualità di ricezione del segnale digitale.

Il rumore impulsivo è stato simulato per mezzo di un generatore di impulsi filtrato con un filtro SAW centrato alla frequenza intermedia (IF) del canale; la frequenza di ripetizione dell'impulso (PRF) è stata variata fra 50 Hz e 20 kHz.

Le misure sono state effettuate rilevando il rapporto segnale-interferente C/I_0 a cui corrisponde un degradamento (NML o $\Delta C/N$) di 1 dB, 3 dB e ∞ dB, per un

$BER=2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi. I_0 è la potenza media del rumore impulsivo filtrato e normalizzato rispetto al PRF in modo tale che, mantenendo I_0 costante, l'ampiezza dell'impulso risulta indipendente da PRF.

La figura 3 mostra i risultati più significativi relativi alla configurazione 64 QAM rate 2/3, modo 8K.

L'andamento delle curve può essere così interpretato:

Per valori di PRF che introducono una ripetizione temporale del disturbo impulsivo sul simbolo COFDM inferiori a circa 890 Hz solo un simbolo ogni N risulta danneggiato dall'interferente, dove $N = \text{symbol-rate}/\text{PRF}$. Di conseguenza il BER medio è proporzionale al PRF. L'andamento del C/I_0 in funzione del BER risulta all'incirca piatto (circa 1 dB / decade di BER), e quindi la pendenza che ne deriva è trascurabile. Pertanto la condizione di ricezione è critica essendo possibile passare rapidamente

da una ricezione corretta all'interruzione del servizio allorchè il livello del disturbo impulsivo aumenta anche solo di qualche dB (C/I_0 intorno ai 40 dB).

Per PRF superiori alla durata del simbolo COFDM, ossia per frequenze superiori a 890 Hz, ci sono M impulsi interferenti per ogni simbolo, e la potenza dell'interferente cresce in modo proporzionale al PRF. Di conseguenza la pendenza delle curve nella parte destra del grafico è di circa 10 dB per decade. Ciò significa che, per una corretta ricezione, il livello del disturbo impulsivo accettabile si riduce progressivamente al crescere della frequenza di ripetizione.

2.5. Disallineamento nella risposta in frequenza del canale

Sono state effettuate prove di laboratorio per valutare il degradamento (NML) dovuto ad alterazioni della risposta in frequenza, entro la banda di 7,6 MHz occupata dal segnale COFDM, con una pendenza

Prestazioni con rumore impulsivo 8k, 64 QAM 2/3, $\Delta = 1/4$

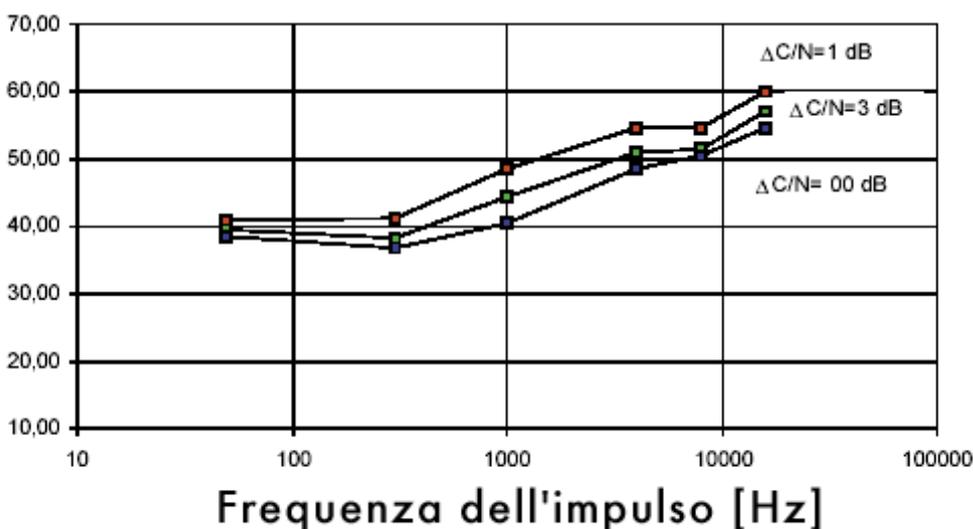


Fig. 3 -
64QAM-2/3:
prestazioni con rumore
impulsivo (modo 8k)

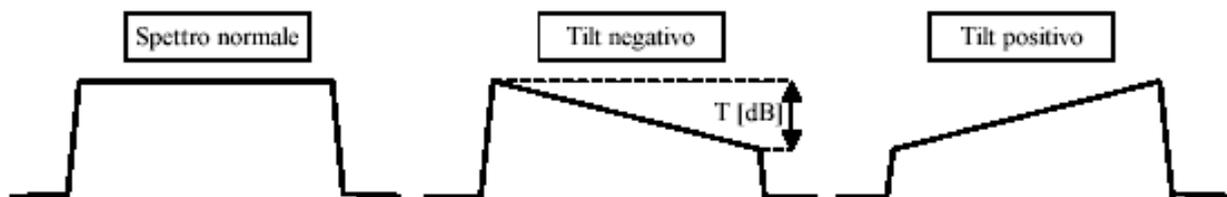
Tabella 4 - Bouquet DVB-T sul canale 66		
Programma	Bit-rate (Mbps)	
	Video	Audio
RaiUno	2÷6 (VBR)	Multiplex statistico: 20 Mbps
RaiDue	2÷6 (VBR)	
RaiTre	2÷6 (VBR)	
RaiSport	2÷8 (VBR)	
RaiEducational	2÷8 (VBR)	
RaiNews24	2 (CBR)	
Dati	1,5	

Tab. 4 - Tilt T [dB]
per un dato noise
margin loss $\Delta C/N$
[dB]

costante (tilt); questo tipo di disallineamento può essere introdotto dai convertitori e/o dagli amplificatori di canale degli impianti centralizzati d'antenna e/o dagli eventuali ripetitori DVB-T in banda (gap-filler) impiegati all'interno degli edifici. La valutazione delle prestazioni del sistema DVB-T con ricezione indoor, in particolare per quanto riguarda l'impiego di gap-filler, sarà oggetto di un prossimo articolo da pubblicare su questa rivista.

Allo scopo è stato simulato in laboratorio un tilt dello spettro di T [dB] (picco-picco), ottenuto introducendo un eco a 0 dB con ritardo di 50 ns (equivalente ad una periodicità dei buchi nello spettro di 1/50 ns = 20 MHz) e con fase tale da generare il tilt desiderato, con pendenza positiva o negativa (slope + o slope -). Si sono quindi ottenuti gli spettri indicati in figura 4.

Fig. 4 - Spettri affetti da Tilt con pendenza negativa e positiva



La tabella 4 riporta i valori massimi del tilt T in dB che generano un degradamento NML (ossia $\Delta C/N$) inferiore di 0.5 e 1 dB rispetto al canale ideale affetto solo da rumore bianco gaussiano. Le valutazioni sono state effettuate sul 64QAM (rate 2/3, $\Delta=1/4$), nei due modi 2k e 8k.

I risultati delle misure mostrano che il valore di tilt sulla risposta in banda accettabile dipende fortemente dal tipo di pendenza (positiva o negativa). Nel caso peggiore (pendenza positiva), il massimo tilt tollerabile è risultato di 2,5-3 dB per un degradamento di 0.5 dB e di 4.5 ÷ 5 dB per un degradamento di 1 dB. Questi valori evidenziano l'importanza di assicurare una corretta risposta in frequenza dei componenti costituenti le reti di distribuzione condominiali (amplificatori, convertitori di canale, ecc.), oltre ad un buon adattamento di impedenza della rete di distribuzione in cavo attraverso una accurata messa a punto dell'impianto.

Per valutare l'ulteriore possibile degradamento imputabile al sistema di ricezione d'antenna dell'impianto condominiale, è stato applicato un disallineamento di questo tipo ad un segnale che simula la ricezione via etere affetta da echi tipici del canale Rice. Tale situazione si può verificare distribuendo attraverso l'impianto condominiale non perfettamente allineato il segnale ricevuto con antenna direttiva. I risultati delle misure si possono così sintetizzare: nel caso di disallineamento con pendenza positiva (caso peggiore) sono

stati misurati valori simili di degradamento con gli stessi livelli di tilt delle prove precedenti. Al contrario, con pendenze negative (caso migliore), i valori di tilt più alti tollerabili su canale gaussiano (8-12 dB) non erano più applicabili e sono stati misurati valori simili a quanto trovato con tilt a pendenza positiva.

In conclusione, si può dire che il degradamento imputabile ad alterazioni lineari con andamento monotono della risposta in frequenza del canale RF può essere contenuto entro $0.5 \div 1$ dB a condizione che il tilt dello spettro in banda sia inferiore a $3 \div 5$ dB.

La maggior sensibilità alle distorsioni generate da disallineamenti nella risposta in frequenza con tilt a pendenza positiva riscontrata nelle prove è stata oggetto di ulteriori valutazioni di laboratorio che hanno consentito di imputare il comportamento asimmetrico alle prestazioni del ricevitore prototipale impiegato nella catena dTTb. Il ricevitore commerciale impiegato nelle successive prove di verifica ha presentato un comportamento simmetrico nei confronti della pendenza del tilt (slope + o slope -) la cui entità, per un degradamento DC/N= 0.5 dB e 1 dB, è risultata compresa tra 5 e 6.5 dB rispettivamente.

2.6. Prestazioni con interferenza co-canale

L'introduzione dei nuovi servizi televisivi digitali DVB-T richiede la conoscenza del massimo livello d'interferenza accettabile e provocato da altri segnali, sia analogici che digitali, irradiati sulla stessa frequenza (interferenza co-canale) o su canali adiacenti. Queste condizioni del servizio operativo sono individuate dai rapporti di protezione CCI e ACI. La conoscenza di questi valori, già adottati dall' ITU con l'introduzione della televisione terrestre analogica, è fondamentale per la pianificazione dei nuovi servizi televisivi digitali. I valori misurati in laboratorio e riportati nel seguito riguardano esclusivamente l'interferenza co-canale, mentre per informazioni più complete si rimanda al rapporto della CEPT [6].

Interferente digitale DVB-T su DVB-T

Il rapporto di protezione (PR) co-canale (CCI) è definito come:

“rapporto in potenza tra segnale utile e segnale interferente che porta alla soglia di ricezione QEF in assenza di rumore aggiuntivo (BER pari a $2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi)”.

Si osservi che un sistema caratterizzato da un basso rapporto di protezione è in grado di accettare, senza degradamento di qualità, livelli d'interferenza elevati. La tabella 5 riporta i valori di CCI ottenuti sul

Tab. 5 - Valori di PR(CCI) [dB] per interferenza DVB-T su DVB-T

Tabella 5. Valori di PR(CCI)[dB] per interferenza DVB-T su DVB-T

Modulazione	Code rate	PR (CCI)
QPSK	1/2	4.8
16-QAM	3/4	14.3
64-QAM	2/3	19.3

Tabella 6. Valori di PR(CCI) per DVB-T interferito da segnale TV analogico

Segnale voluto	Segnale interferente	PR(CCI) [dB]											
		QPSK, r=1/2				16-QAM, r=3/4				64-QAM, r=2/3			
		8k		2k		8k		2k		8k		2k	
		L	U	L	U	L	U	L	U	L	U	L	U
BBC ^(*)	PAL-I	ND	ND	-11	-9	ND	ND	-4	0.5	ND	ND	-1.5	+1
DTTb	PAL-G	-2	+4	-3	+4	-2	+4	-2	+5	+2	+6	+3	+6
DTTb	Secam	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	-5	+5	+5	+8

^(*)Misure effettuate con soglia "Failure point" (probabilmente tali misure danno dei rapporti di protezione lievemente più bassi rispetto a quanto ottenibile con la misura a BER=2.10⁻⁴).

Tab. 6 - Valori di PR(CCI) per DVB-T interferito da segnale TV analogico

canale 28 UHF per tre differenti configurazioni di trasmissione, in modalità 2k e con intervallo di guardia $\Delta=1/4$.

Il segnale interferente è stato ottenuto dal segnale utile ritardandolo di 360 ms – superiore cioè alla durata totale del simbolo COFDM di 280 ms al fine di riprodurre la condizione di ricezione più critica – ed introducendo progressivamente uno spostamento di frequenza Δf rispetto al centro del canale RF. Sono stati introdotti 17 valori di Δf all'interno del canale (fra -8 kHz e +8 kHz, a passi di 1 kHz), rilevando il valore peggiore del rapporto di protezione CCI che è stato riportato in tabella 5.

I risultati dimostrano, come prevedibile, che un interferente DVB-T ha effetti simili al rumore gaussiano avente medesimo livello di potenza nella banda del ricevitore.

Interferente da TV analogica su DVB-T

In ambito al Progetto RACE dTTb, BBC, CCETT e RAI hanno effettuato numerose prove di laboratorio per valutare i rapporti di protezione del segnale DVB-T interferito da segnale TV analogico negli stan-

dard impiegati in Gran Bretagna (PAL-I), Francia (L/SECAM) ed Italia (PAL-G, nelle bande IV e V).

Le misure sono state effettuate nelle seguenti condizioni:

- Segnale PAL-I, con audio FM non modulato e sottoportante audio digitale NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/32
- Segnale PAL-G, con audio FM modulato con tono ad 1 kHz e NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/4
- Segnale L/SECAM, con audio AM non modulato e senza NICAM. Segnale DVB-T: intervallo di guardia 1/4

La tabella 6 riporta i risultati relativi ai rapporti di protezione co-canale CCI di segnali DVB-T interferiti da segnali TV analogici, modulati da un'immagine fissa (barre di colore EBU-75%). Nel caso dei segnali analogici a norma PAL il rapporto di protezione CCI è definito come:

"rapporto fra la potenza media del segnale DVB-T e la potenza del segnale PAL interferente, misurata al picco del sincronismo, che porta alla soglia di ricezione QEF in assenza di rumore aggiuntivo".

Il picco del sincronismo individua infatti il livello della portante r.f. non modulata a cui corrisponde la massima potenza del segnale irradiato.

I valori di CCI in Tabella 6 sono stati rilevati aumentando progressivamente il livello del segnale analogico interferente fino a raggiungere un BER pari a $2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi, tranne quando diversamente indicato. Si riscontra che i valori di CCI misurati presentano una periodicità corrispondente alla spaziatura delle portanti COFDM (4.4 kHz nel modo 2k e 1.1 kHz nel modo 8k). L'ampiezza di queste variazioni è indicata nella Tabella 6 dalle colonne "L" e "U", dove la colonna "L" riporta i valori migliori, mentre la colonna "U" quelli peggiori. In alcuni casi si è riscontrata una più marcata casualità dei risultati.

I valori di CCI misurati nei modi 2k e 8k non sono molti differenti, tranne per quanto riguarda il SECAM, dove la portante audio AM non era modulata e il segnale NICAM non era presente.

Si è osservato un degradamento molto significativo delle prestazioni quando la portante video analogica è vicino alle portanti pilota continue del segnale DVB-T [5]. Nel 64QAM, quando si verifica tale condizione, si riscontra un degradamento notevole. Tali valori non sono stati riportati in tabella 6. E' quindi molto importante evitare questa situazione giocando opportunamente, nella fase di messa a punto della catena trasmittente, sulla posizione dello spettro del segnale COFDM nel processo di conversione FI - RF rispetto alla portante video analogica del segnale co-canale RF interferente.

Benché la posizione dello spettro in frequenza del segnale DVB-T irradiato possa essere attentamente scelta in modo da limitare sensibilmente l'interferenza della portante video analogica con le portanti pilota "continue" del DVB-T, questo po-

trebbe costituire un vincolo stringente per la pianificazione dei nuovi servizi nel nostro Paese, in particolare nella situazione ibrida analogica PAL-digitale DVB-T che caratterizzerà la prima fase.

I valori di CCI ottenuti sul dimostratore dTTb hanno dimostrato una dipendenza dalla configurazione DVB-T adottata superiore a quanto ci si attendeva, probabilmente dovuta alle prestazioni del ricevitore prototipale. Questo vale in particolare per i valori di CCI relativi al 16QAM e al QPSK, che sono risultati superiori a quelli adottati dalla CEPT nella pianificazione dei servizi DVB-T e che hanno trovato successivamente conferma nelle migliori prestazioni dei ricevitori DVB-T rispetto al ricevitore prototipale impiegato nelle prove di laboratorio. I valori di CCI misurati sul 64 QAM-2/3 sono invece risultati molto vicini a quelli adottati dalla CEPT [6].

3. Conclusioni

L'articolo riporta i risultati delle valutazioni di laboratorio effettuati da Rai CRIT sul dimostratore DVB-T, realizzato secondo la specifica tecnica [5] nell'ambito del progetto RACE dTTb. Le misure hanno permesso di valutare la robustezza della modulazione COFDM, che rappresenta il cuore del sistema digitale terrestre europeo, in presenza delle tipiche distorsioni e interferenze che possono essere introdotte dal canale trasmissivo, come il rumore gaussiano e impulsivo, gli echi di diversa ampiezza e ritardo, l'effetto Doppler, l'interferenza generata da altri segnali DVB-T e da segnali TV analogici, il rumore di fase del tuner, ecc.

I valori dei degradamenti rispetto al caso di canale ideale misurati nelle varie condizioni, confermano sostanzialmente le previsioni delle simulazioni al calcolatore

e forniscono una valutazione globale delle prestazioni del sistema DVB-T.

Questi risultati, che hanno rappresentato un contributo della RAI al rapporto CEPT/EBU per la conferenza di Chester [6], forniscono utili elementi per la pianificazione dei nuovi servizi DVB-T, nello scenario ibrido digitale-analogico che caratterizza la fase di avvio, in termini di rapporto portante/rumore C/N e di rapporti di protezione co-canale da e verso i servizi televisivi analogici esistenti per le varie configurazioni di trasmissione previsti nella normativa.

Bibliografia

1. A. Morello, G. Blanchietti, C. Benzi, B. Sacco, M. Tabone: "Performance assessment of a DVB-T television system", Rai-CRIT; Montreux TV Symposium, June 1997.
2. A. Bertella; M. Cominetti; S. Ripamonti; M. Visintin: "The RAI DVB-T pilot trials in Turin", IBC 2000; Amsterdam; September 2000.
3. P. B. Forni, S. Ripamonti, V. Sardella: "Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio"; *Elettronica e Telecomunicazioni*, n°1, 2002
4. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin: "Il sistema europeo per la Televisione Digitale Terrestre", *Elettronica e Telecomunicazioni* 1/2002.
5. ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", EN 300744 - V1.4.1, January 2001.
6. CEPT: "The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement relating to Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the Introduction of Terrestrial Digital Video Broadcasting (DVB-T)", July 1997.
7. ETSI: "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers",