

Elettronica e telecomunicazioni

● ANNO XLXI
NUMERO 1
APRILE
2002

Indice dell'articolo

- 1. Introduzione
- 2. La specifica DVB-T
- 3. Valutazione della copertura
- 4. Conclusioni
- Bibliografia

Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre

V. Mignone, A. Morello, M. Visintin

1. Introduzione

Il rapido progresso delle tecnologie digitali, già a partire dagli anni '90, nei campi della produzione, distribuzione e diffusione televisiva e le nuove prospettive offerte agli operatori del settore e all'industria di consumo, hanno portato alla costituzione nel 1993 del Progetto europeo DVB (Digital Video Broadcasting). Il Progetto, che ora raccoglie oltre 300 Membri europei ed extraeuropei, ha l'obiettivo di armonizzare le strategie volte all'introduzione della televisione digitale e dei nuovi servizi multimediali e interattivi sui vari mezzi trasmissivi e definire le relative specifiche tecniche. Il primo significativo risultato è stato raggiunto con la definizione della specifica del sistema DVB-S per la diffusione diretta da satellite di TV multi-programma, alla quale ha contribuito direttamente il Centro Ricerche Rai [1] [2] [3]; subito dopo sono state definite le specifiche del sistema DVB-C per la distribuzione dei segnali televisivi attraverso le reti via cavo [4] e, successivamente, una intera "famiglia" di specifiche che, partendo dal mondo della televisione, si sono progressivamente allargate a interessare lo scenario delle tecnologie emergenti e dei nuovi media. Le specifiche tecniche approvate dal DVB vengono ratificate dall'ETSI che ne attribuisce la veste di standard europei.

All'interno della famiglia DVB le specifiche per la televisione digitale terrestre (DVB-T) assumono una importanza rilevante data la valenza "universale" del servizio televisivo che, nel nostro Paese, raccoglie quasi il 100% dell'utenza. La definizione della specifica DVB-T risale al novembre 1995, con approvazione come standard ETSI nel febbraio 1997 [5]; il processo di normalizzazione, piuttosto lungo e complesso, è stato influenzato da vari fattori: la complessità tecnica del problema, dovuta anche alla maggiore ostilità della propagazione del segnale elettromagnetico nelle bande terrestri VHF/UHF rispetto alla diffusione via satellite, la congestione dello spettro di frequenza per la diffusione televisiva terrestre in gran parte dell'Europa ed in particolare nel nostro Paese, l'interesse di soddisfare nuove modalità operative su reti isofrequenziali (SFN) anche a grande copertura, i diversi piani di introduzione dei servizi digitali terrestri formulati dalle varie Amministrazioni europee.

Un contributo decisivo alla definizione delle specifiche DVB-T è stato dato dall'attività condotta dai maggiori radiodiffusori in ambito al progetto europeo RACE dTTb ed a progetti nazionali (HD-DIVINE e HDTV-T), che hanno successivamente adeguato i rispettivi piani di ricerca e sviluppo per soddisfare i requisiti di servizio definiti dal Modulo Commerciale del DVB. Fra questi:

- la necessità di mantenere la maggior comunanza possibile con i sistemi DVB-S e DVB-C, al fine di consentire la produzione di ricevitori commerciali multi-standard a basso costo;
- la possibilità di ricezione fissa con terminali portatili, dotati di antenna omni-direzionale, in aggiunta alla ricezione con antenna direttiva posta sul tetto degli edifici;

ing. Vittoria **Mignone**,
ing. Alberto **Morello**,
ing. Michele **Visintin**
Rai -Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica -
Torino

Sommario

In ambito al Progetto DVB (Digital Video Broadcasting) e ai progetti europei RACE dTTb, ACTS VALIDATE e MOTIVATE, il Centro Ricerche ed Innovazione Tecnologica della Rai (CRIT) ha direttamente contribuito alla definizione e alla validazione del sistema per la diffusione televisiva digitale terrestre (DVB-T). Il sistema, che permette la ricezione fissa, portatile e mobile, è basato sulla modulazione multiportante COFDM, una soluzione tecnica avanzata che consente di configurare i parametri di trasmissione in modo flessibile per meglio adattarsi alle caratteristiche del canale di diffusione terrestre. Sono possibili due modalità operative: con 2K portanti per le reti di diffusione convenzionali multifrequenza (MFN), e con 8K portanti per operare anche su reti a singola frequenza (SFN). L'introduzione di reti SFN, non possibile nelle trasmissioni televisive analogiche, consente una utilizzazione ottimale dello spettro. L'articolo presenta le caratteristiche principali del sistema DVB-T, con particolare attenzione alla modulazione COFDM, e ne illustra le prestazioni ottenute da Rai-CRIT mediante simulazioni al calcolatore.

tabella 1

- la possibilità di introdurre reti SFN a larga copertura (regionale e nazionale) impiegando trasmettitori sincronizzati operanti sullo stesso canale a radiofrequenza (RF), al fine di sfruttare i significativi vantaggi in termini di efficienza spettrale rispetto alle reti convenzionali multi-frequenza (MFN).

L'articolo descrive le caratteristiche principali del sistema DVB-T (Sezione 2) e ne illustra in dettaglio le prestazioni valutate per mezzo di simulazioni software al computer (Sezione 3) che hanno trovato un sostanziale riscontro nelle valutazioni effettuate in laboratorio [6] e sul campo [7], in vista della prossima introduzione nel nostro Paese dei primi servizi di televisione digitale terrestre [8].

2. La specifica DVB-T

Il sistema DVB-T, la cui architettura generale è mostrata in Figura 1, è basato sull'adozione degli standard MPEG-2 per la Codifica del segnale audio/video di sorgente e per la Multiplazione: è stato sviluppato per la trasmissione di segnali televisivi multi-programma a definizione convenzionale nel formato MPEG-2 MP@ML, ma è aperto all'evoluzione verso l'alta definizione (HDTV) mediante l'uso di livelli e profili MPEG-2 più elevati.

Gli elementi indicati con un bordo rosso nel diagramma a blocchi di Figura 1 sono comuni al sistema DVB-S. Essi includono: la struttura di trama (derivata dal Multiplatore di Trasporto MPEG-2), la dispersione dell'energia del segnale per uniformare la distribuzione spettrale all'interno del canale RF, una sofisticata tecnica di protezione dagli errori tramite concatenazione di un codice esterno con un codice interno a tasso di codifica variabile mediante processo di interlacciamento. Il codice esterno è il Reed-Solomon RS(204,188, t=8) accorciato, derivato dall'originale codice sistematico RS(255,239, t=8). I codici interni sono convoluzionali punturati, basati su un codice convoluzionale madre a tasso 1/2 con 64 stati. Oltre al codice madre, il sistema permette i tassi punturati di 2/3, 3/4, 5/6 and 7/8. L'interlacciatore è basato sul processo di interlacciamento convoluzionale di Forney ed ha profondità pari a 12.

2.1 Modulazione e Codifica di Canale

Il cuore del sistema DVB-T risiede nell' "Adattatore di canale" che è stato progettato specificatamente per fornire la massima comunanza con i sistemi via satellite e cavo e garantire le migliori prestazioni nella diffusione del segnale sui canali televisivi terrestri. Esso include la modulazione digitale e la codifica di canale per la correzione degli errori di trasmissione.

Il tipo di modulazione digitale adottato dal DVB differisce sensibilmente per i sistemi via satellite, via cavo e sui canali terrestri, in quanto deve adattarsi strettamente alle diverse caratteristiche della propagazione e del canale RF. Il canale via satellite è fondamentalmente non lineare, a larga banda e limitato in potenza: pertanto la modulazione QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) a singola portante adottata nel sistema DVB-S risulta idonea allo scopo. Le reti via cavo sono caratterizzate invece da distorsioni lineari causate dal disadattamento della rete e, sebbene non limitate in potenza, sono soggette a limitazioni di banda; sulla base di questi vincoli, il sistema DVB-C usa modulazioni M-QAM (Quadrature Amplitude Modulation) a singola portante e ad elevata efficienza spettrale, e non include l'interlacciatore e il codice interno; è tuttavia previsto l'impiego nel ricevitore di un equalizzatore adattativo degli echi che possono essere presenti nella rete in cavo.

Il canale terrestre è caratterizzato da propagazione multi-cammino, dovuta alle riflessioni, che può degradare pesantemente il segnale trasmesso (Figura 2). Gli echi naturali dell'ordine di alcuni microsecondi e legati all'orografia del terreno, così come gli echi artificiali dell'ordine

tabella 2

Tabella 4. Parametri caratteristici per la trasmissione terrestre

Rapporto di Frequenza	
Bandwidth di sistema [MHz]	8
Bandwidth di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7

tabella 3

Tabella 5. Parametri caratteristici per la trasmissione terrestre

Rapporto di Frequenza	
Bandwidth di sistema [MHz]	8
Bandwidth di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7

tabella 4

Tabella 6. Parametri caratteristici per la trasmissione terrestre

Rapporto di Frequenza	
Bandwidth di sistema [MHz]	8
Bandwidth di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7

tabella 5

Tabella 7. Parametri caratteristici per la trasmissione terrestre

Rapporto di Frequenza	
Bandwidth di sistema [MHz]	8
Bandwidth di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7

tabella 6

Tabella 8. Parametri caratteristici per la trasmissione terrestre

Rapporto di Frequenza	
Bandwidth di sistema [MHz]	8
Bandwidth di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7
Paradigma di servizio [MHz]	7

tabella 7



Fig. 1 - Diagramma a blocchi funzionale del sistema di trasmissione DVB-T

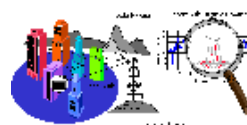


Fig. 2 - Modello di propagazione terrestre

di centinaia di microsecondi dovuti ai segnali provenienti dai vari trasmettitori isofrequenziali presenti nelle reti SFN, non possono essere trattati con tecniche di modulazione a portante singola, anche perché richiederebbero l'impiego di equalizzatori molto lunghi e complessi. Pertanto, sulla base di tali considerazioni e dei risultati di accurate valutazioni tecniche comparative, è stata scelta la modulazione multiportante COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [9] [10], già adottata con successo nel DAB (Digital Audio Broadcasting) [11], il sistema proposto per la diffusione radiofonica digitale.

Il principio su cui si basa questa tecnica di modulazione consiste nel distribuire il flusso dati totale tra moltissime portanti (a banda stretta e quindi a bassa velocità di trasmissione) equispaziate in frequenza, all'interno della banda del canale di diffusione (Figura 3). A ciascuna delle portanti è applicata la modulazione digitale QPSK, M-QAM, ecc...; la mutua ortogonalità è garantita per una spaziatura in frequenza tra le portanti pari alla velocità di simbolo, $1/T_u$. Il processo OFDM è attuato per mezzo di una I-FFT (Inverse Fast Fourier Transform).

Il sistema DVB-T è caratterizzato da due modalità operative, la prima con FFT su 2k portanti per reti convenzionali multi-frequenza (MFN), la seconda con FFT su 8k portanti per coprire anche reti a frequenza singola (SFN).

Il sistema COFDM è inerentemente robusto contro il fading selettivo in frequenza presente sul canale terrestre, affetto da propagazione multi-cammino, in quanto le portanti a banda stretta occupano una piccola porzione dello spettro, dove la risposta in frequenza del canale è "localmente piatta" e non distorcente (Figura 2). La resistenza dei sistemi COFDM contro gli echi è anche basata sulla presenza nel simbolo OFDM di un intervallo di guardia temporale (con durata pari a T_g) che separa simboli OFDM adiacenti (Figura 3). L'intervallo di guardia consiste in una continuazione ciclica della parte utile T_u , del simbolo ed è inserito davanti ad essa. Dei campioni complessi che corrispondono ad un simbolo, il ricevitore scarta quelli relativi all'intervallo di guardia, cosicché gli echi che raggiungono il ricevitore con un ritardo t inferiore a T_g non generano ISI (Inter Symbol Interference).

In aggiunta all'intervallo di guardia, il sistema COFDM fa uso di un potente schema di correzione degli errori che permette il recupero dell'informazione trasportata da quelle portanti che sono state affette da fading selettivo in frequenza. A questo scopo, dopo la codifica interna (con codice convoluzionale), è presente anche un interlacciatore in frequenza che consente di ottenere la massima dispersione delle portanti corrotte nel flusso dati. L'interlacciatore interno consiste nella concatenazione di un interlacciatore di bit, per separare i bit mappati sui punti della costellazione, e di un interlacciatore di simbolo, per disperdere le portanti che trasportano i dati utili. L'interlacciatore di simbolo è stato sviluppato presso Rai-CRIT, con l'obiettivo di ridurre i requisiti di memoria nel terminale d'utente e, contemporaneamente, massimizzare la dispersione delle portanti adiacenti.

La generazione degli indirizzi dell'interlacciatore di simbolo, rappresentata in Figura 4, è caratterizzata da una realizzazione molto semplice che non richiede di memorizzare la regola di interlacciamento nel ricevitore e riduce i requisiti di memoria. Il nucleo è costituito dal classico generatore di sequenza binaria pseudo-casuale a massima lunghezza (PRBS). L'intera sequenza 2k o 8k è ottenuta ripetendo due volte il ciclo PRBS e aggiungendo il bit più significativo (MSB) cambiato ad ogni nuovo valore. La regola di permutazione dei fili è stata ottimizzata con simulazioni al calcolatore per ottenere la massima dispersione delle portanti dati adiacenti. Il blocco di controllo dell'indirizzo verifica che l'indirizzo così generato sia inferiore al numero di portanti dati: se la condizione non è verificata viene generato un altro valore. Al fine di minimizzare ulteriormente l'ammontare di memoria

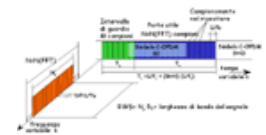


Fig. 3 - Rappresentazione nel dominio del tempo e della frequenza di un simbolo C-OFDM

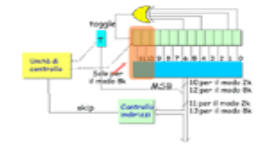


Fig. 4 - Generazione degli indirizzi dell'interlacciatore di simbolo

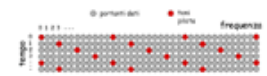


Fig. 5 - Disposizione delle portanti all'interno della trama

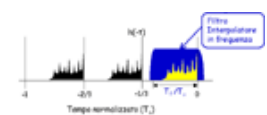


Fig. 6 - Interpolazione nel dominio del tempo della funzione di trasferimento del canale

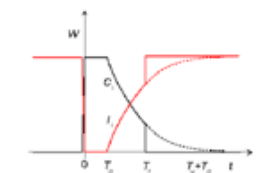


Fig. 7 - Modello DVB-T per pianificazione SFN: suddivisione della potenza dell'eco (W) nei componenti utile (C) e interferente (I).

richiesta, la regola di generazione dell'indirizzo è usata come indirizzo di "scrittura" per i simboli OFDM pari, e come indirizzo di "lettura" per quelli dispari.

Le portanti dati, che portano le informazioni utili, sono modulate in M-QAM ($M=4, 16, 64$), con mappatura di Gray. Costellazioni M-QAM non uniformi sono anche previste nel caso di trasmissione gerarchica.

I parametri principali del sistema DVB-T sono riportati in [Tabella 1](#). Il sistema è ottimizzato per canali a 8 MHz (spaziatura di canale in UHF), ma può essere adattato anche su canali da 7 MHz (utilizzati in molti paesi, tra i quali l'Italia) e da 6 MHz (spaziatura adottata in USA e Giappone), modificando opportunamente la frequenza di campionamento nel ricevitore ([Nota](#)).

Nota - Le tre possibili spaziature di canale in frequenza sono state introdotte nella specifica al fine di permettere la più vasta adozione del sistema DVB-T.

2.2 Segnalazione delle Informazioni Ausiliarie

Il segnale digitale trasmesso è organizzato in trame contenenti ciascuna 68 simboli OFDM; 4 trame costituiscono una super-trama, che contiene un numero intero di pacchetti RS (204, 188), indipendentemente dai parametri di modulazione e codifica di canale. Per aumentare l'efficacia degli algoritmi di sincronizzazione e demodulazione nel ricevitore, si adotta una trama OFDM specifica che, oltre alle portanti dati, che trasportano l'informazione, contiene altre portanti destinate a funzioni ausiliarie:

- portanti pilota diffuse, inserite nello spettro con una densità di 1/12 nel dominio della frequenza e di 1/4 nel dominio del tempo ([Figura 5](#));
- portanti pilota continue, che occupano la stessa posizione in ogni simbolo OFDM;
- portanti TPS (Transmission Parameter Signalling) in posizione fissa nello spettro OFDM, modulate in DBPSK, su cui sono trasportate informazioni sulla modulazione, gerarchia, durata dell'intervallo di guardia, tasso di codifica interno, modalità di trasmissione, numero di trama nella super-trama.

Il numero di portanti che trasportano dati utili è costante in ogni simbolo OFDM: 1512 nella modalità 2k e 6048 nella modalità 8k. Le altre sono: portanti pilota - trasmesse ad un livello di potenza superiore (+2,5 dB) - e portanti TPS, e possono essere usate per la sincronizzazione di trama, di frequenza, di tempo, per la stima del canale, l'identificazione della modalità di trasmissione e per inseguire il rumore di fase.

2.3 Demodulazione

Sul lato ricevente, viene dapprima estratta la parte utile del simbolo dal segnale ricevuto, rimuovendo l'intervallo di guardia. Poi è applicato il processo di FFT, che restituisce il segnale OFDM nel dominio della frequenza, sul quale è realizzata la demodulazione coerente delle portanti dati: le varie portanti vengono equalizzate in ampiezza e fase dividendo i campioni ricevuti per la stima della risposta in frequenza del canale. Nella modalità di demodulazione adottata dai ricevitori commerciali questa stima è effettuata attraverso l'interpolazione nel tempo e nella frequenza (in ampiezza e fase) delle portanti pilota diffuse.

Per quanto riguarda l'interpolazione nel tempo, sono disponibili due metodi per completare il pettine di portanti diffuse relative ad un dato simbolo OFDM: una semplice accumulazione delle portanti pilota appartenenti agli ultimi quattro simboli OFDM (chiamato algoritmo 1-D) oppure una interpolazione lineare delle portanti pilota precedente e successiva al simbolo OFDM (algoritmo 2-D). Quest'ultimo metodo

garantisce al ricevitore una maggiore capacità di inseguire le variazioni del canale, a spese di una maggiore complessità del ricevitore (in particolare, è richiesta maggior memoria).

A causa della densità complessiva del pettine di portanti diffuse nella trama OFDM (una portante pilota ogni tre portanti), la stima della risposta in frequenza del canale, prima dell'interpolazione in frequenza, è sotto-campionata di un fattore 1/3; pertanto la sua Trasformata di Fourier (corrispondente alla stima della risposta all'impulso del canale per tempi negativi, per via della "proprietà duale" della Trasformata di Fourier $F\{F\{x(t)\}\} = x(-t)$) è periodica con periodo normalizzato 1/3.

Al fine di attenuare le ripetizioni spettrali (aliasing) (Figura 6) generate dal processo di campionamento, il filtro di interpolazione in frequenza deve fornire una attenuazione fuori banda pari a 20÷30 dB alla frequenza normalizzata 1/3 alla quale si trova la prima ripetizione dello spettro. Inoltre esso dovrebbe essere "piatto" in una banda normalizzata pari a T_f/T_u (indicato nel seguito come intervallo di corretta equalizzazione). L'interpolazione nel dominio del tempo e della frequenza permette anche una piccola riduzione del rumore Gaussiano da cui è affetta la stima della risposta del canale.

In conclusione, la ricezione del segnale DVB-T effettuata utilizzando algoritmi di equalizzazione che sfruttano solo le portanti pilota diffuse – come avviene in genere nei ricevitori commerciali – risente di un rapido degradamento delle prestazioni in presenza di echi che cadono al di fuori dell'intervallo di corretta equalizzazione, normalmente coincidente con l'intervallo di guardia. Questi echi non possono essere equalizzati e, specialmente nella pianificazione di reti a Singola Frequenza, risultano responsabili di interferenza intersimbolica, e come tali provocano un degradamento simile a quello dovuto a rumore Gaussiano scorrelato.

Un algoritmo di equalizzazione della risposta del canale, denominato CD3, che consente di ridurre sensibilmente il degradamento delle prestazioni dovuto agli echi con ritardo superiore all'intervallo di guardia è stato sviluppato da Rai-CRIT [12] [13] con particolare attenzione alla ricezione di segnali DVB-T su reti SFN.

2.4 Prestazioni e Capacità Trasmissiva

Il sistema DVB-T offre una capacità utile per la trasmissione del flusso binario che varia da circa 5 Mbit/s a 31,7 Mbit/s, a seconda della configurazione di trasmissione adottata: costellazione, tasso di codifica del codice correttore interno e dalla durata dell'intervallo di guardia. Per un dato insieme di questi parametri, le modalità operative 2k e 8k offrono la stessa capacità trasmissiva.

Come risulta dalla Tabella 2, derivata dall'Annesso A della specifica DVB-T [5], l'impiego di una configurazione ad elevata capacità trasmissiva, come il 64-QAM (rate 7/8; intervallo di guardia normalizzato $\Delta = T_g/T_u = 1/32$), comporta però prestazioni meno robuste in termini di rapporto portante/rumore C/N richiesto per una corretta ricezione (circa 26,1 dB su canale affetto da rumore gaussiano). Per contro, un sistema a bassa capacità trasmissiva – come il QPSK (rate 1/2; $\Delta = 1/4$) – è molto robusto e richiede un basso valore di C/N (circa 3,1 dB). La scelta della configurazione è quindi il risultato di un compromesso tra capacità trasmissiva e robustezza del segnale, in modo da soddisfare i requisiti di servizio.

La Tabella 2 riporta, per tutte le combinazioni di costellazione e tasso di codifica previste dalla normativa, le prestazioni del sistema in termini di C/N, valutate per mezzo di simulazioni al calcolatore; riporta inoltre i valori del flusso binario utile (Mbit/s) in funzione dell'intervallo di guardia normalizzato Δ . I valori del rapporto C/N richiesto si riferiscono alla ricezione Quasi Error Free (QEF), corrispondente a meno di un evento di errore per ora sul segnale all'ingresso del demultiplicatore

MPEG-2 ($BER < 10^{-11}$), dopo che è stato sottoposto al procedimento di correzione degli errori tramite algoritmo di Viterbi e decodifica Reed-Solomon.

Nelle simulazioni è stata ipotizzata una perfetta stima del canale e non sono incluse né la perdita di potenza dovuta alle portanti pilota ([paragrafo 2.2](#)), né le perdite dovute alla realizzazione del ricevitore e agli apparati inclusi nella catena di trasmissione. Le prestazioni sono date per un canale ideale affetto esclusivamente da rumore bianco Gaussiano (AWGN) e per due esempi di canale multi-percorso tipici della diffusione terrestre: il canale di Rice (F), rappresenta un tipico caso di ricezione fissa, per il quale è presente la linea di vista con il trasmettitore (segnale principale) più una serie di echi; il canale di Rayleigh (P), è un esempio di ricezione portatile con antenna omnidirezionale, caratterizzato dalla assenza della linea di vista.

I tassi di codifica più alti (5/6 e 7/8), quando vengono associati alla costellazione a più elevata efficienza spettrale (64-QAM), risultano molto sensibili al fading selettivo in frequenza. In pratica, per la stima del massimo numero di programmi TV che possono essere allocati in un canale a 8 MHz, assumendo una ricezione fissa con antenna direttiva, la configurazione più idonea è il 64-QAM a tasso 2/3; essa fornisce una capacità di flusso binario di circa 24 Mbit/s, nel caso di $\Delta = 1/32$, che consente tipicamente la trasmissione di 4 programmi a qualità convenzionale (SDTV a 6 Mbit/s ciascuno) o 6 programmi a qualità news (LDTV, 4 Mbit/s ciascuno). Questa configurazione di trasmissione è particolarmente idonea per le reti multifrequenza (MFN). L'impiego della moltiplicazione statistica associata alla codifica MPEG-2 a bit-rate variabile consente inoltre di aumentare il numero di programmi senza peggiorare la qualità audio/video.

Il processo di equalizzazione nel ricevitore comporta un degradamento del rapporto C/N dovuto alla presenza di rumore sulla funzione di trasferimento del canale stimata. Tale degradamento è dato dall'espressione:

$$\gamma_{CE} = 10 \text{L} \log \left(1 + \frac{Wk}{\alpha D} \right) = \begin{cases} 1,8 \text{ dB per la stima 1-D} \\ 1,3 \text{ dB per la stima 2-D} \end{cases}$$

dove:

- W (assunto pari a 0,3 per un intervallo di guardia Δ pari a 1/4) è la banda equivalente di rumore del filtro di interpolazione in frequenza (normalizzato rispetto a T_u)
- α rappresenta il livello di elevazione delle portanti pilota (16/9)
- D è la densità delle portanti pilota dopo l'interpolazione nel tempo ($D = Df/Dt = 1/3$)
- k è il guadagno del corrispondente filtro interpolatore (vale 1 per la stima di canale 1-D e 11/16 per la stima di canale 2-D).

Come risulta dalla formula, si può prevedere un degradamento del rapporto C/N di 1,8 dB o 1,3 dB, a seconda dell'algoritmo di stima del canale adottato. L'algoritmo 1-D, caratterizzato da maggiore semplicità realizzazione e minore requisito di memoria nel ricevitore, introduce il degradamento maggiore.

Un ulteriore degradamento del rapporto C/N è imputabile alle portanti pilota, che sono trasmesse ad un livello di potenza superiore rispetto alle portanti utili. La perdita di potenza che ne risulta è data da:

$$\gamma_P = 10 \text{Log} [\gamma_P (1 - \alpha) + \alpha] = 0,33 \text{ dB}$$

dove η_p rappresenta il rapporto tra portanti utili e TPS (non amplificate) e portanti totali (efficienza delle portanti pilota) che risulta pari a 6116/6817 nella modalità 8k.

3. Valutazione della Copertura

La copertura di un servizio televisivo terrestre si misura attraverso la percentuale di tempo e di località per la quale il servizio è garantito.

La televisione analogica è caratterizzata da un degradamento graduale della qualità del segnale in funzione dell'intensità del campo elettromagnetico ricevuto (e.m.); pertanto gli attuali servizi televisivi analogici sono stati pianificati al 50% del tempo e delle località, secondo le indicazioni della Raccomandazione 370 ITU. Al contrario, nel caso dei sistemi televisivi digitali, al ridursi del campo e.m. si verifica una rapida transizione dalla ricezione quasi perfetta alla perdita del servizio (soglia di ricezione).

La definizione dell'obiettivo e dell'area di copertura è pertanto un punto estremamente critico. In pratica, garantire una disponibilità del servizio per il 99% delle località e del tempo risulta un obiettivo di copertura troppo oneroso a causa dei costi della rete di diffusione: infatti, al fine di coprire anche la percentuale residua delle piccole aree peggio servite, è necessario o incrementare drasticamente la potenza trasmessa o impiegare un numero maggiore di trasmettitori.

Per questa ragione negli studi di pianificazione dei servizi DVB-T è stata adottata dalla CEPT la definizione di copertura "buona" che individua il caso in cui all'interno di una piccola area viene coperto il 95% delle località. Parimenti, con "accettabile" si definisce il caso in cui viene coperto solo il 70% delle località all'interno della stessa piccola area [14]. Queste scelte derivano dalla considerazione che, per una data situazione, la ricezione può essere migliorata anche trovando una posizione più adeguata per l'antenna, usando un'antenna più direzionale o, nel caso di ricezione fissa, impiegando un amplificatore d'antenna a basso rumore con un guadagno più alto.

Una volta definito il valore minimo del rapporto C/N che caratterizza la configurazione del sistema si prendono in esame gli elementi di propagazione, nella gamma di frequenze RF di interesse, derivando dapprima il valore minimo del campo e.m. mediano equivalente, al limite dell'area di copertura, che garantisce la voluta percentuale di località servite. Da questo sono quindi calcolati gli altri parametri di trasmissione, quali potenza del trasmettitore, diagramma d'antenna e configurazione ottimale della rete, usando gli stessi metodi adottati per il servizio analogico.

Condizioni di Ricezione

La tipica condizione di ricezione fissa è individuata dall'impiego di un'antenna direttiva installata sul tetto di un edificio. Per il calcolo del campo e.m. mediano equivalente desiderato, in [Tabella 3](#) sono riportati in funzione della frequenza valori realistici di guadagno d'antenna (relativi ad un dipolo a mezza onda) e di perdita sul cavo coassiale di discesa relativi ad un'altezza di 10 m rispetto al terreno.

La ricezione portatile è individuata tipicamente da un ricevitore equipaggiato con un'antenna omni-direzionale collegata o integrata posta a 1,5 m rispetto al terreno (in ambiente esterno) o rispetto al pavimento (in ambiente interno). Le condizioni di ricezione differiscono pertanto da quelle di ricezione fissa per l'assenza di guadagno e direttività dell'antenna, per le trascurabili perdite sul cavo di connessione dell'antenna, per la minore altezza di ricezione rispetto al terreno e per la notevole attenuazione del campo e.m. nel caso di ricezione all'interno di edifici. La [Tabella 4](#) riassume valori tipici dei vari parametri: guadagno d'antenna, perdita di discesa, perdita di altezza e

perdita da penetrazione di edifici (valore mediano) per le bande di frequenza VHF (Banda III, 174÷230 MHz) e UHF (Bande IV and V, 470÷862 MHz).

Definizione dell'Area di Copertura

Nel definire l'area di copertura per ogni condizione di ricezione, è stato adottato un approccio a tre livelli [14].

L'unità più piccola è la località di ricezione, nella quale il livello del segnale voluto è sufficiente a sovrastare il rumore e l'interferenza per una data percentuale di tempo (tipicamente 99%).

Il secondo livello è la piccola area di copertura, tipicamente 100 m per 100 m. Al suo interno, a causa delle irregolarità del terreno, il livello del campo e.m. ricevuto è soggetto a variazione casuale con la località, che è caratterizzata da una distribuzione log-normale con deviazione standard di circa 5,5 dB. In funzione della percentuale di località coperte, la copertura per una piccola area è classificata come buona se almeno il 95% delle località al suo interno sono coperte, e accettabile se almeno il 70% delle località sono coperte.

Infine il terzo livello è rappresentato dall'area di copertura di un trasmettitore, o di un gruppo di trasmettitori, formata dalla somma delle piccole aree individuali in cui si raggiunge la prestabilita percentuale di copertura: accettabile (70%) o buona (95%).

3.1 Copertura per un singolo trasmettitore

Le considerazioni riportate nel seguito sono relative alla copertura data da un singolo trasmettitore DVB-T. Le [tabelle 5, 6 e 7](#) danno i valori del campo e.m. minimo E_{min} [dB μ V/m] richiesto dal sistema – a seconda della configurazione di trasmissione adottata – per cinque tipici valori del rapporto C/N alla soglia di ricezione QEF: 2, 8, 14, 20 e 26dB. Riportano inoltre, per la ricezione con antenna direttiva, portatile esterna e portatile interna con antenna omnidirezionale, il livello minimo del campo e.m. mediano E_{med} [dB μ V/m] necessario a garantire una ricezione buona e una ricezione accettabile a 10 m di altezza rispetto al terreno, per il 50% del tempo e nel 50% delle località. Tale valore è calcolato a partire dal valore di E_{min} [dB μ V/m] nel punto di ricezione assumendo una cifra di rumore del ricevitore pari a 7dB. I valori riportati nelle tabelle si riferiscono alla Banda IV (500 MHz), con canalizzazione da 8 MHz [14].

La Raccomandazione CCIR 417-3 per la pianificazione del servizio televisivo analogico attribuisce un valore minimo di campo e.m. mediano di 62 [dB μ V/m], in Banda IV, per ottenere con antenna ricevente direttiva una qualità d'immagine soddisfacente.

A titolo di esempio, nel caso di un segnale digitale in 64-QAM 2/3 (intervallo di guardia 1/32), si richiede un valore di C/N di circa 20 dB all'ingresso del ricevitore, a cui corrisponde un valore minimo di campo e.m. mediano di 53 [dB μ V/m] ([Tabella 5](#)). Dal confronto tra i valori di campo e.m. richiesti per il servizio televisivo analogico e quello digitale, si deduce che una buona ricezione del segnale digitale nella configurazione 64QAM 2/3 con antenna direttiva può essere ottenuta con un livello di potenza irradiata dal trasmettitore sensibilmente inferiore (9 dB) a quello richiesto dal sistema analogico, con il vantaggio di poter trasmettere, nel flusso di 24 Mbit/s disponibile, almeno quattro programmi SDTV invece di un programma analogico. Nel caso di ricezione portatile esterna agli edifici ([Tabella 6](#)), sarebbe possibile ottenere una copertura accettabile a spese di un incremento di circa 13 dB della potenza minima trasmessa rispetto al caso della ricezione con antenna direttiva. Per una copertura accettabile all'interno degli edifici ([Tabella 7](#)) sarebbe necessario aumentare ulteriormente la potenza

irradiata di 8 dB.

Limitandoci a considerare il caso della ricezione fissa con antenna direttiva, in un ambiente ideale privo di interferenze da trasmettitori analogici, l'introduzione della televisione digitale potrebbe avvenire riducendo sensibilmente la potenza irradiata dagli attuali trasmettitori analogici. In pratica però l'introduzione dei nuovi servizi DVB-T mira anche a coprire per quanto possibile la ricezione con apparati portatili, essendo questo uno dei valori aggiunti del nuovo sistema rispetto alla soluzione analogica. Ciò richiederebbe un aumento considerevole della potenza irradiata dai trasmettitori, in particolare nel caso di ricezione interna agli edifici a causa dell'attenuazione del campo e.m. Un buon compromesso individuato in ambito CEPT [14] è di adottare per il 64-QAM 2/3 in Banda IV un valore minimo del campo e.m. di pianificazione, nella situazione ibrida analogico-digitale che caratterizza la fase iniziale, pari a 65 [dB μ V/m], dell'ordine quindi di quello adottato per il servizio televisivo analogico. Si deve osservare però che tale valore è comprensivo di 8 dB imputabili a possibile interferenza cocanale da parte di segnali analogici. A regime, quando tutti i trasmettitori opereranno in digitale, l'interferenza dei trasmettitori analogici sarà rimossa, rendendo così possibile recuperare tutta o in parte questa potenza per migliorare la copertura, in particolare per quanto riguarda la ricezione portatile.

Poiché generalmente i servizi televisivi analogici nelle aree densamente popolate (aree urbane) sono pianificati a potenze largamente superiori al valore minimo richiesto per garantire il servizio ai limiti dell'area di copertura, si può concludere che gli attuali impianti di diffusione analogici – risolti ovviamente i possibili problemi di compatibilità interferenziale nella fase di avvio – potranno essere utilizzati, dopo gli opportuni adeguamenti richiesti dal nuovo standard, per introdurre il servizio digitale aperto alla grande utenza servita attraverso le attuali installazioni condominiali, e con buone possibilità di ricezione portatile.

3.2 Copertura di una Rete a Singola Frequenza

La configurazione DVB-T idonea per l'impiego sulle reti SFN impiega 8K portanti e intervallo di guardia $T_g = T_u/4$, che consente di operare in presenza di echi molto lunghi e provenienti dai trasmettitori più lontani della rete. In questa situazione, il filtro per la stima del canale di un ricevitore convenzionale deve soddisfare alla disequaglianza $1/4 < T_f/T_u < 1/3$. Se tali condizioni sono soddisfatte, la potenza di tutti gli echi ricevuti entro una finestra di durata T_g , cioè all'interno dell'intervallo di guardia, può essere considerata utile, e contribuisce positivamente alla potenza di segnale globale disponibile al ricevitore. Al di fuori dell'intervallo di guardia, ma all'interno dell'intervallo di corretta equalizzazione T_f , una parte della potenza dell'eco è associata allo stesso simbolo OFDM del segnale a ritardo nullo, e pertanto contribuisce positivamente alla potenza globale del segnale utile; un'altra parte di potenza dell'eco è associata al simbolo OFDM precedente e produce interferenza d'intersimbolo (ISI), che ha un effetto simile a rumore Gaussiano scorrelato. In aggiunta all'ISI, vi è una perdita di ortogonalità nelle portanti OFDM, indotta dagli echi al di fuori di T_g , che producono ICI (Inter-Carrier Interference). Pertanto, aumentando progressivamente il ritardo dell'eco al di fuori di T_g , il contributo utile C decresce e l'interferenza ISI-ICI I aumenta con legge quadratica. Gli echi con ritardo t maggiore dell'intervallo di corretta equalizzazione T_f sono quindi da considerarsi come pura interferenza (Figura 7).

In formule:

$$C = \sum_i w_i C_i$$

$$I = \sum_i (1 - w_i) C_i$$

$$w_i = \begin{cases} 0 & \text{se } t < 0 \\ 1 & \text{se } 0 \leq t \leq T_g \\ \left(\frac{T_u - t + T_g}{T_u} \right)^2 & \text{se } T_g < t \leq T_f \\ 0 & \text{se } t > T_f \end{cases}$$

dove C_i è il contributo di potenza dall' i -esimo trasmettitore e w_i è il coefficiente di peso per la i -esima componente.

Il sistema DVB-T, con demodulazione convenzionale, è pertanto caratterizzato da un degradamento rapido delle prestazioni in presenza di echi con ritardo superiore all'intervallo di guardia.

Il sistema DAB per la diffusione radiofonica digitale [11] ha invece un intervallo di corretta equalizzazione T_f pari alla durata totale del simbolo $T_g + T_u$, in quanto impiega la demodulazione differenziale e non richiede stima di canale ed equalizzazione nel ricevitore. E' pertanto un "sistema a degradamento progressivo delle prestazioni".

Valutazione dei requisiti di C/N

Il sistema DVB-T può operare soddisfacentemente (flusso binario quasi senza errori QEF) su un canale affetto da rumore (N) e da interferenze (I) quando il rapporto totale $C/(N+I)$ disponibile è maggiore o uguale all'Equivalent Protection Target (EPT) del sistema. Il parametro EPT ha una interpretazione fisica simile a quella del rapporto C/N richiesto dal sistema di modulazione/codifica, ma include anche il degradamento dovuto agli echi entro l'intervallo di equalizzazione T_f , che determina la criticità (selettività in frequenza) del canale. La seguente espressione empirica, in cui tutti i termini sono espressi in dB, è stata proposta da Rai-CRIT sulla base di simulazioni al computer per stimare EPT:

$$EPT = \frac{C}{N}|_F + \left(\frac{C}{N}|_P - \frac{C}{N}|_F \right) \left(\frac{0.5}{\left(\frac{C}{N}|_P - \frac{C}{N}|_F \right)} \right)^{\frac{K_A}{10}} + \delta$$

dove:

- EPT è l'Equivalent Protection Ratio richiesto dal sistema in una particolare configurazione interferenziale,
- $C/N|_F$ è il rapporto segnale su rumore richiesto sul canale di Rice (Tabella 2)
- $C/N|_P$ è il rapporto segnale su rumore richiesto sul canale di Rayleigh (Tabella 2),
- K_A rappresenta la "criticità del canale dovuta ad echi artificiali", espressa come rapporto (in dB) tra la potenza ricevuta dal segnale principale e la potenza totale degli echi entro l'intervallo di corretta equalizzazione T_f (se $K_A < 0$ dB, K_A è posto a 0 dB, il caso più critico),

- δ è il margine di implementazione (posto rispettivamente a 2,5 e 3 dB per stima del canale CD3-OFDM e convenzionale).

Nei valori relativi al modello ideale, le espressioni 1 e 2 sono risolte numericamente per ottenere il rapporto g tra la potenza degli echi entro l'intervallo di guardia e degli echi al di fuori corrispondente alla condizione di ricezione QEF ($BER = 2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi).

4. Conclusioni

Il sistema DVB-T per la diffusione televisiva digitale terrestre nelle bande VHF/UHF rappresenta un importante risultato nel processo di digitalizzazione condotto dal DVB sui vari media. Basato sulla modulazione multiportante COFDM, il sistema consente una notevole flessibilità operativa grazie ad una varietà di configurazioni di trasmissione mirate a ottimizzare le prestazioni a seconda dei requisiti di servizio (ricezione stazionaria con antenna direttiva e con terminali portatili e ricezione mobile) e delle caratteristiche del canale di diffusione terrestre, caratterizzato dalla presenza di riflessioni multiple.

Le prospettive del DVB-T, nell'attuale scenario dei servizi televisivi analogici, trovano un punto di forza nella possibilità di ottimizzare lo sfruttamento delle risorse in frequenza, attraverso l'introduzione di reti isofrequenziali (SFN), e di diversificare ed aumentare drasticamente l'offerta di programmi (tipicamente almeno 4 programmi TV arricchiti da applicazioni multimediali per canale a radiofrequenza).

Rai-CRIT ha direttamente contribuito alla definizione delle specifiche DVB-T, alla validazione del sistema in laboratorio e sul campo e al miglioramento delle sue prestazioni in situazioni critiche di ricezione. Il sistema è ora maturo per l'introduzione dei primi servizi operativi nel nostro Paese.

Bibliografia

1. M.Cominetti, A.Morello: "Digital video broadcasting over satellite (DVB-S): a system for broadcasting and contribution applications". International Journal on Satellite Communications; 2000; 18, p.393-410
2. M.Cominetti, A.Morello: "Il sistema europeo (DVB-S) per la diffusione televisiva da satellite". Elettronica e Telecomunicazioni, n° 3, 1994
3. ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for 11/12 GHz satellite service"; EN 300 421, 1993
4. ETSI: "Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for cable systems"; EN 300 429, 1994
5. ETSI: "Digital broadcasting systems for television, sound and data services; framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television"; EN 300 744, 1997
6. A.Bertella, B.Sacco, M.Tabone: "Valutazione in laboratorio delle prestazioni del sistema DVB-T"; Elettronica e Telecomunicazioni, n° 1, 2002
7. P.B.Forni, S.Ripamonti, V.Sardella: "Sperimentazione pre-operativa DVB-T in area di servizio"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
8. M.Cominetti: "La televisione digitale terrestre in Italia"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°1, 2002
9. Cimini: "Analysis and simulation of a digital mobile channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing", IEEE Transaction on Communications, COM-33, p.665-675, July 1985
10. M.Alard, R.Lassalle: "Principles of modulation and channel coding

- for digital broadcasting for mobile receivers", EBU Technical Review, n° 224, August 1987
11. ETSI: "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers"; EN 300 401, 1996
 12. V.Mignone, A.Morello, "CD3-OFDM: a novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers", IEEE Transactions on Communications, COM-44(9), pp. 1144 - 1151, September 1996
 13. V.Mignone, A.Morello, B.Sacco, M.Visintin, "CD3-OFDM: una soluzione avanzata per i servizi DVB-T su reti a singola frequenza (SFN)"; Elettronica e Telecomunicazioni, n°2, 2002
 14. 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)"; Chester, July 1997

Tabella 1. Parametri del sistema DVB-T (canalizzazione a 8MHz)

Parametro	Modalità 8K				Modalità 2K			
Portanti attive	6817				1705			
Portanti dati	6048				1512			
Durata utile del simbolo T_u	896 μs				224 μs			
Spaziatura fra le portanti $1/T_u$	1116 Hz				4464 Hz			
Larghezza di banda	7,61 MHz							
$\Delta=T_g/T_u$	1/4	1/8	1/16	1/32	1/4	1/8	1/16	1/32
Intervallo di guardia T_g	224 μs	112 μs	56 μs	28 μs	56 μs	28 μs	14 μs	7 μs

Tabella 2. C/N (dB) richiesto per un ricezione QEF e flusso binario utile (Mbit/s) per tutte le combinazioni di intervallo di guardia, costellazione e tasso di codifica, relativo a sistemi non gerarchici

		C/N richiesto per BER = 2×10^{-4} dopo Viterbi QEF dopo Reed-Solomon			Flusso binario utile (Mbit/s)			
		Canale			$\Delta = T_g/T_u$			
Modu- lazione	Codice	Gaussiano	Rice (F)	Rayleigh (P)	1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3,1	3,6	5,4	4,98	5,53	5,85	6,03
QPSK	2/3	4,9	5,7	8,4	6,64	7,37	7,81	8,04
QPSK	3/4	5,9	6,8	10,7	7,46	8,29	8,78	9,05
QPSK	5/6	6,9	8,0	13,1	8,29	9,22	9,76	10,05
QPSK	7/8	7,7	8,7	16,3	8,71	9,68	10,25	10,56
16QAM	1/2	8,8	9,6	11,2	9,95	11,06	11,71	12,06
16QAM	2/3	11,1	11,6	14,2	13,27	14,75	15,61	16,09
16QAM	3/4	12,5	13,0	16,7	14,93	16,59	17,56	18,10
16QAM	5/6	13,5	14,4	19,3	16,59	18,43	19,52	20,11
16QAM	7/8	13,9	15,0	22,8	17,42	19,35	20,49	21,11
64QAM	1/2	14,4	14,7	16,0	14,93	16,59	17,56	18,10
64QAM	2/3	16,5	17,1	19,3	19,91	22,12	23,42	24,13
64QAM	3/4	18,0	18,6	21,7	22,39	24,88	26,35	27,14
64QAM	5/6	19,3	20,0	25,3	24,88	27,65	29,27	30,16
64QAM	7/8	20,1	21,0	27,9	26,13	29,03	30,74	31,67

Tabella 3. Parametri d'antenna per la ricezione fissa

	Frequenza [MHz]		
	200	500	800
Guadagno d'antenna [dB]	7	10	12
Perdita di discesa [dB]	2	3	5

Tabella 4. Parametri d'antenna per la ricezione portatile

	Banda di Frequenza	
	VHF	UHF
Guadagno d'antenna [dB]	-2.2	0
Perdita di discesa [dB]	0	0
Perdita d'altezza [dB]	10	12
Perdita di edificio [dB]	8	7

Tabella 5. Minimo campo e.m.mediano equivalente per ricezione con antenna direttiva

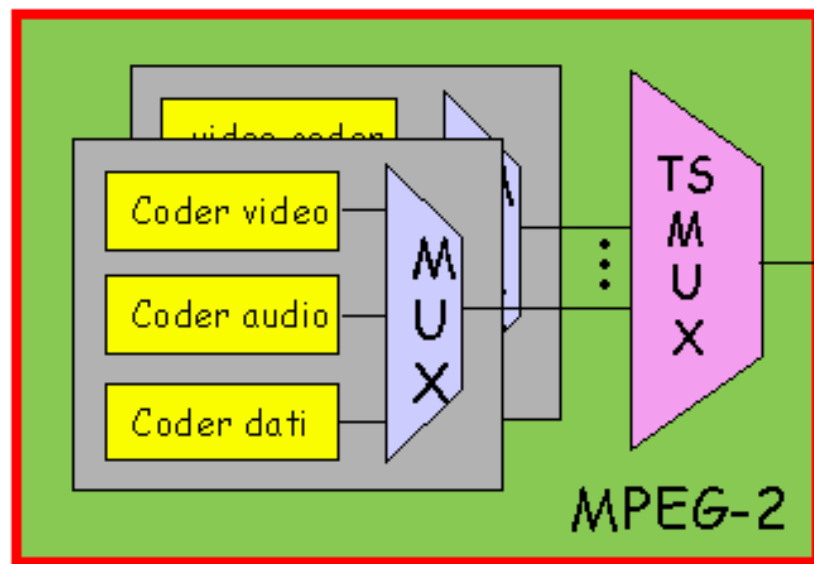
C/N_{\min} [dB]	2	8	14	20	26
E_{\min} [dB μ V/m]	26	32	38	44	50
E_{med} [dB μ V/m] per ricezione accettabile	29	35	41	47	53
E_{med} [dB μ V/m] per buona ricezione	35	41	47	53	59

Tabella 6. Minimo campo e.m.mediano equivalente
per ricezione portatile esterna

C/N_{min} [dB]	2	8	14	20	26
E _{min} [dBμV/m]	33	39	45	51	57
E _{med} [dBμV/m] per ricezione accettabile	48	54	60	66	72
E _{med} [dBμV/m] per ricezione buona	54	60	66	72	78

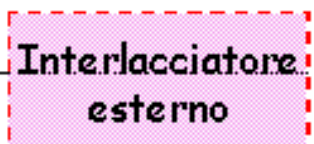
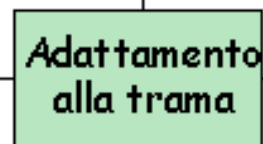
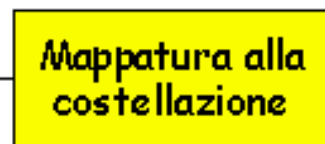
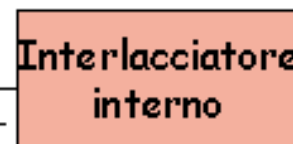
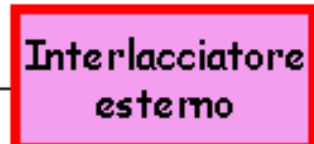
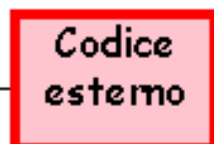
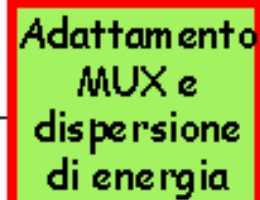
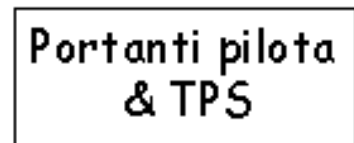
Tabella 7. Minimo campo e.m. mediano equivalente per ricezione portatile interna

C/N_{min} [dB]	2	8	14	20	26
E_{\min} [dB μ V/m]	33	39	45	51	57
E_{med} [dB μ V/m] per ricezione accettabile	56	62	68	74	80
E_{med} [dB μ V/m] per ricezione buona	66	72	78	84	90

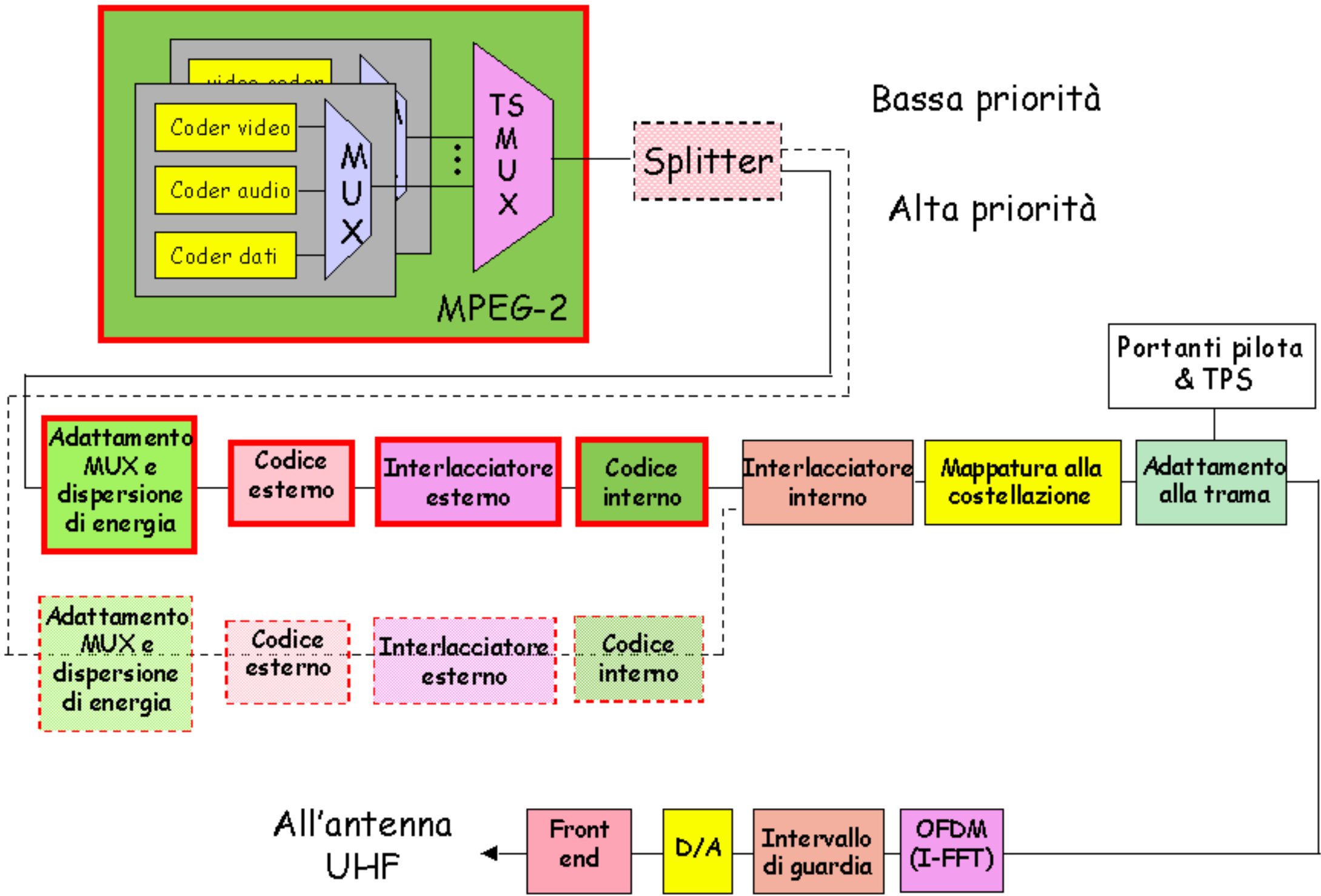
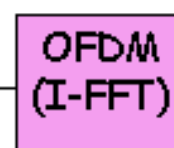
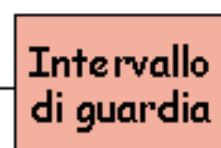
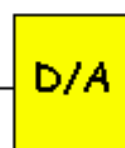
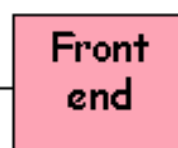


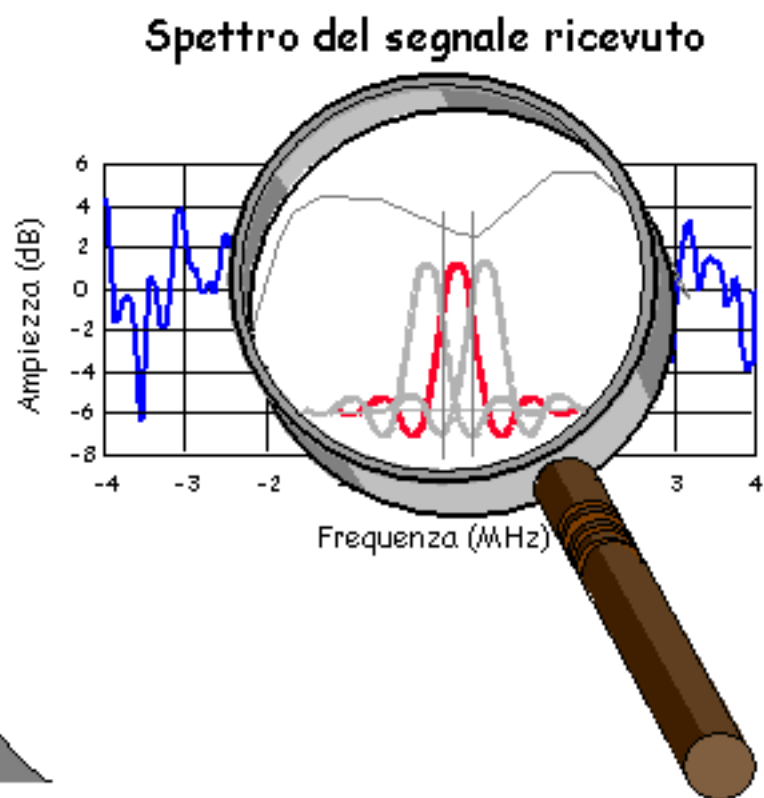
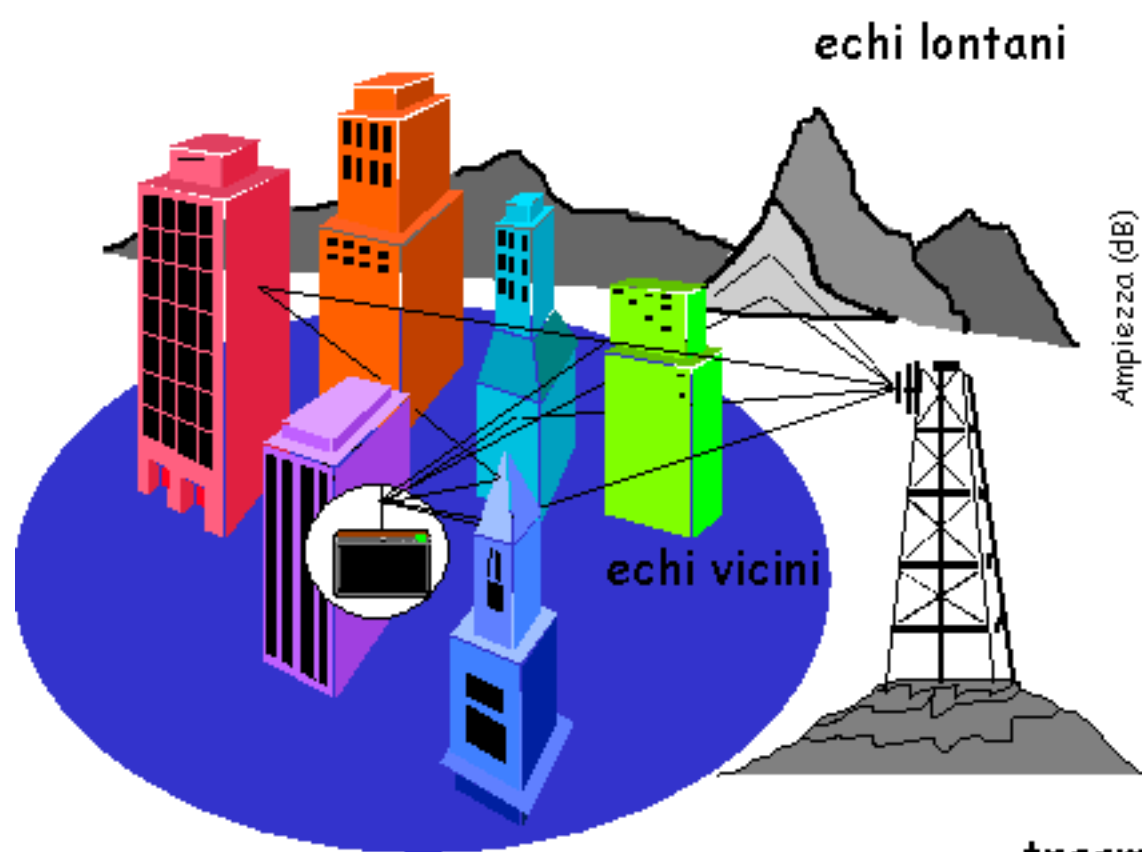
Bassa priorità

Alta priorità



All'antenna UHF





trasmettitore

