

CD3-OFDM: una soluzione avanzata per i servizi DVB-T su rete isofrequenza

ing. Vittoria **Mignone**,
ing. Alberto **Morello**,
ing. Bruno **Sacco**,
ing. Michele **Visintin**

Rai - Centro Ricerche e
Innovazione Tecnologica
Torino

Sommario

L'articolo descrive l'algoritmo CD3-OFDM (Coded Decision Directed Demodulation - Orthogonal Frequency Division Multiplexing), sviluppato da Rai-CRIT per migliorare la copertura delle reti digitali televisive terrestri (DVB-T) a singola frequenza (SFN, Single Frequency Network), attraverso l'equalizzazione in ampiezza e fase del segnale OFDM ricevuto via etere. Le relative prestazioni, valutate con simulazioni al computer, prove di laboratorio ed in area di servizio, utilizzando un prototipo di ricevitore CD3-OFDM sviluppato da Rai-CRIT, ne evidenziano le potenzialità ed i vantaggi rispetto ai ricevitori convenzionali. Ciò consente di estendere l'area di copertura e la disponibilità del servizio sulle reti SFN, in modo particolare in condizioni critiche di ricezione, come risulta nei seguenti casi: impiego di antenne omnidirezionali nei ricevitori portatili, configurazioni di trasmissione DVB-T a capacità elevata (ad esempio 64QAM 2/3) e distanze elevate tra i trasmettitori della rete.

1. Introduzione

Nella fase di definizione dei requisiti commerciali del sistema per la diffusione digitale televisiva terrestre DVB-T [1], grande importanza è stata data alla possibilità di operare su reti a singola frequenza (SFN, *Single Frequency Network*); ciò consente un grande risparmio di risorse di banda per i servizi a larga copertura (regionale e nazionale). Per un programma televisivo analogico a copertura nazionale sono infatti normalmente richiesti dai 5 ai 10 canali a radiofrequenza [2]. La possibilità del DVB-T di trasmettere sulla stessa frequenza su grandi aree geografiche, acquista quindi un notevole valore strategico in quanto consente di liberare molti canali da destinare ad altri servizi, permettendo il riordino delle frequenze dedicate ai servizi di radiodiffusione terrestre nelle bande VHF e UHF [3].

Nella scelta dello schema di modulazione da adottare, tra le classiche modulazioni a singola portante, adottate ad esempio nella diffusione digitale terrestre statunitense ATSC [4], e le più recenti modulazioni multiportante OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [5], [6], [7], già utilizzate nel sistema per la radiofonia digitale DAB [8], la

scelta è caduta proprio sull'OFDM, in quanto più adatto ad un funzionamento in presenza di echi con ritardi elevati, quali sono quelli introdotti dai vari trasmettitori di una rete SFN.

I parametri definiti dallo standard DVB-T sono tali per cui il ricevitore convenzionale riesce ad equalizzare tutti gli echi che giungono al ricevitore in una finestra temporale (intervallo di guardia) al massimo di 224 ms [2]; ciò corrisponde ad una differenza di cammino fra le varie componenti del segnale ricevuto di circa 67,2 km. Questo permette di fronteggiare sufficientemente bene gli echi provenienti dai trasmettitori adiacenti al trasmettitore principale, ma non da quelli più lontani (di seconda fascia), come verificato in [2]. Tali echi si comportano quindi come segnali interferenti che degradano sensibilmente la qualità di ricezione e determinano una notevole riduzione della copertura dell'area di servizio, ben al di sotto dei livelli definiti dai criteri di pianificazione.

Per poter garantire il servizio in SFN anche nelle aree più sfavorevoli, il Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai ha proposto e sviluppato un sistema di equalizzazione avanzato, da integrarsi nel ricevitore DVB-T, in grado di garantire la corretta ricezione anche in presenza di echi significativi al di fuori dell'intervallo di guardia. Il sistema si basa sull'algoritmo CD3-OFDM ^{Nota 1} (Coded Decision Directed Demodulation - OFDM), per

Nota 1.

Brevetto del Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica della Rai.

l'equalizzazione in ampiezza e fase di sistemi OFDM [9] [10] [11]. Grazie ad un anello retroazionato in cui i segnali ricevuti (componente principale ed echi) vengono demodulati e corretti dal codice correttore FEC (*Forward Error Correction*) presente nella catena, l'algoritmo stima la funzione di trasferimento del canale di trasmissione per ogni portante dello spettro del segnale OFDM (2K o 8K previsti dallo standard DVB-T); l'algoritmo non necessita di filtri interpolatori di frequenza né della trasmissione di portanti di riferimento all'interno dello spettro. Inoltre, è totalmente trasparente allo standard di trasmissione DVB-T.

L'algoritmo CD3-OFDM, proposto dal Centro Ricerche Rai durante la fase di elaborazione della specifica DVB-T, avrebbe consentito inoltre un aumento della capacità trasmissiva (di circa l'8%) grazie alla possibilità di eliminare le portanti pilota di riferimento sparse nel segnale DVB-T trasmesso [2], che sono invece indispensabili per consentire l'equalizzazione del segnale nei ricevitori convenzionali. L'impiego delle portanti pilota è stato mantenuto nello standard DVB-T definitivo. Tuttavia le peculiarità della soluzione CD3-OFDM si sono rivelate significative essenzialmente in due condizioni:

- per aumentare la copertura del territorio nel caso di grandi reti a singola frequenza caratterizzate da echi con ritardi molto lunghi (direttamente legate alla distanza tra i trasmettitori) oppure, in alternativa,
- per ridurre il numero degli impianti trasmettenti su una determinata area di copertura.

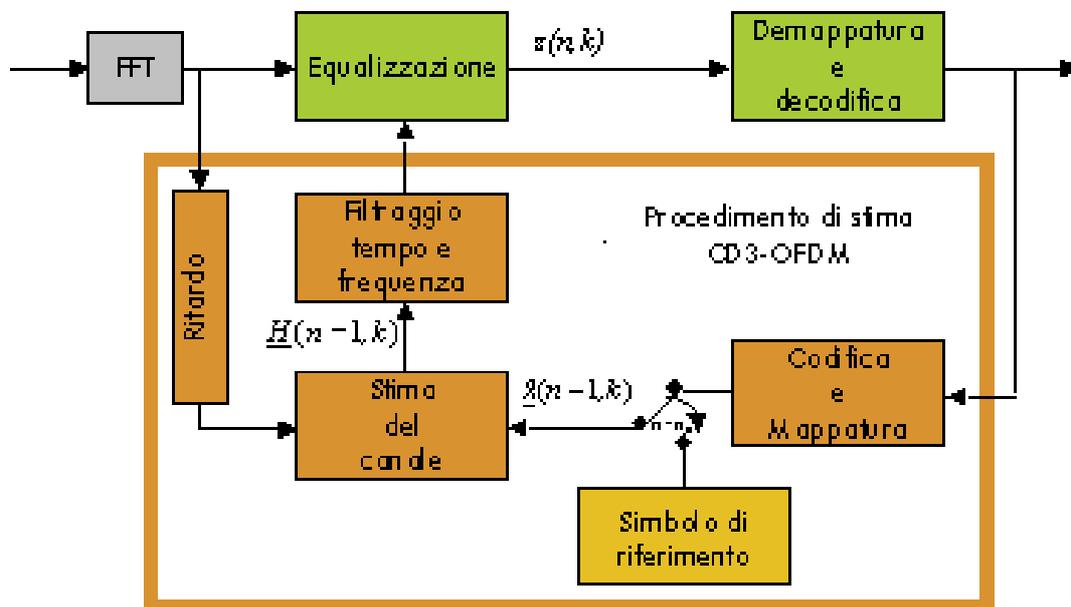
Il ricevitore CD3-OFDM è caratterizzato infatti da prestazioni elevate anche in presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia il cui effetto è di determinare un degradamento graduale delle prestazioni con l'aumentare del ritardo dell'eco [11] [12]; ciò porta ad aumentare la reiezione del ricevitore all'auto-interferenza di rete dovuta ai trasmettitori più distanti, consentendo di operare con rapporto di protezione cocanale C/I significativamente inferiore di quello richiesto dai ricevitori convenzionali. I ricevitori convenzionali subiscono invece un degradamento rapido delle prestazioni in

presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia, che può essere contenuto solo a prezzo di ridurre significativamente la distanza tra i trasmettitori della rete, la cui diretta conseguenza è di aumentare il numero dei trasmettitori a parità di area servita.

2. I principi della demodulazione CD3-OFDM

Come per un ricevitore convenzionale, un ricevitore basato sull'algoritmo CD3-OFDM, necessita di equalizzare le distorsioni introdotte dal canale per poter demodulare correttamente le costellazioni su ciascuna portante dati del simbolo OFDM ricevuto. Aniché effettuare la stima mediante le portanti pilota inserite nel simbolo OFDM, il ricevitore CD3-OFDM sfrutta il segnale OFDM ricevuto al simbolo precedente, demodulato e corretto dai potenti codici correttori inseriti nella catena di trasmissione. Il principio di funzionamento del ricevitore CD3-OFDM è rappresentato in figura 1, e si basa su di un anello retroazionato di elaborazione dei simboli ricevuti. Data la periodica inserzione di un simbolo noto nella trama OFDM, il ricevitore CD3-OFDM effettua la stima della funzione di trasferimento del canale, come rapporto, portante per portante, tra il segnale ricevuto dopo trasformata FFT ed il valore noto del segnale trasmesso. Supponendo che il canale di trasmissione evolva lentamente nel tempo, la funzione di trasferimento del canale stimata viene poi utilizzata dal ricevitore CD3-OFDM per equalizzare il simbolo OFDM successivo. Da questo punto in poi è il segnale ricevuto che, dopo equalizzazione, demodulazione e correzione d'errore, viene rimodulato e codificato e svolge la funzione di segnale di riferimento, per la stima della funzione di trasferimento del canale relativa al simbolo successivo. Tale segnale non è privo di rumore e di errori (il tasso d'errore sul bit nel punto operativo del dispositivo è normalmente dell'ordine di 10^{-2} sul canale, e viene riportato a circa 10^{-4} dopo correzione da parte del decodificatore di Viterbi), ma il processo di filtraggio nel dominio del tempo e della frequenza, effettuato sulla funzione

Fig. 1 - Schema base del ricevitore CD3-OFDM



di trasferimento del canale stimata, permette di mitigare sia il livello di rumore che i picchi dovuti ad errori non corretti. Ovviamente, tanto più saranno strette le bande dei filtri, tanto più lento sarà il processo di inseguimento delle variazioni del canale nel tempo (effetto di una riduzione della larghezza di banda del filtro nel dominio del tempo) e tanto minore sarà l'intervallo di corretta equalizzazione T_f (effetto di una riduzione della larghezza di banda del filtro nel dominio della frequenza), che in assenza di filtraggio sarebbe pari a tutto il simbolo utile OFDM T_u . Accettando di equalizzare echi con ritardo fino a metà della durata del simbolo utile $T_u/2$ (ciò raddoppia comunque il massimo ritardo d'eco equalizzabile rispetto al ricevitore convenzionale), si riduce la componente di rumore sulla funzione di trasferimento del canale di 3 dB. Un ulteriore filtraggio nel dominio del tempo, che media su due campioni temporalmente consecutivi potrà ulteriormente ridurre il contributo di rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale, facendo tendere le prestazioni C/N del sistema al caso della demodulazione coerente ideale. Corrispondentemente il tempo di coerenza richiesto alle variazioni del canale di trasmissione passa da un simbolo OFDM, come nel caso della demodulazione differenziale, a due, rallentando

la velocità di inseguimento di un eventuale effetto Doppler. In Appendice A è illustrato in modo dettagliato l'algoritmo CD3-OFDM.

Per adattare l'algoritmo al sistema DVB-T, che non prevede la trasmissione periodica di un simbolo di riferimento, è stato sviluppato un algoritmo di aggancio iniziale^{Nota 1} in base alle portanti di riferimento inserite nel simbolo DVB-T. L'algoritmo, descritto in dettaglio in Appendice B, effettua una prima stima della funzione di trasferimento del canale utilizzando tali portanti di riferimento; nel caso siano presenti echi al di fuori dell'intervallo di guardia e quindi tale stima non risulti corretta, viene attivata una seconda fase di inizializzazione più lenta, che attraverso un'operazione di media temporale sulle portanti dati, effettuata su un numero elevato (40,50) di simboli OFDM, permette di stimare la funzione di trasferimento per tutte le portanti dello spettro OFDM (come schematicamente illustrato in figura 2).

Simulazioni al computer hanno dimostrato che, per il sistema 64QAM 2/3 con FFT su 8K punti, l'aggancio è possibile con scostamenti Doppler fino a 0,5 Hz per un eco da 0 dB e ritardo T_g . Raggiunto l'aggancio la velocità d'inseguimento del canale del ricevitore ritorna ad essere quella tipica del CD3-OFDM.

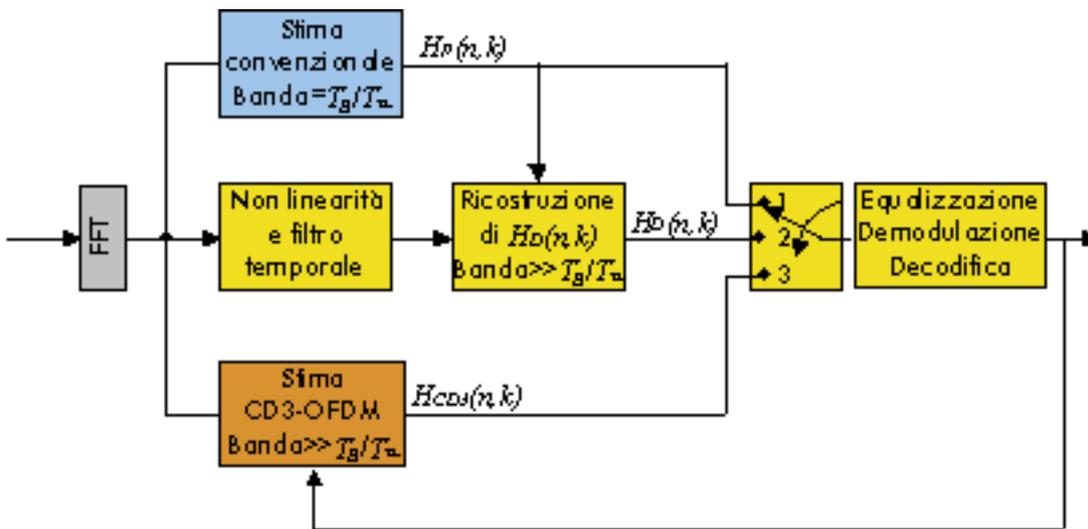


Fig. 2 - Procedimento d'aggancio CD3-OFDM applicato al sistema DVB-T.

Nota 2. Tale valore corrisponde a meno di un errore per ora di trasmissione all'uscita del demultiplicatore MPEG-2, definito come qualità dell'immagine quasi immune da errori (QEF, Quasi Error Free).

3. Valutazione al calcolatore delle prestazioni del sistema CD3-OFDM

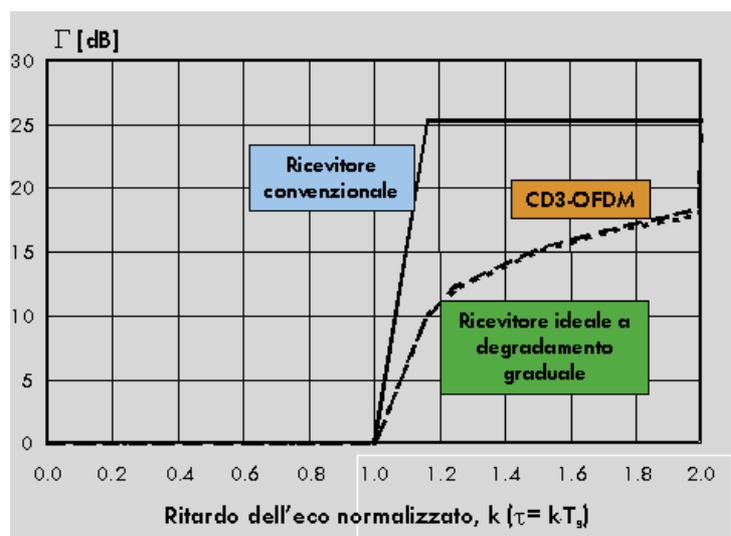
Le prestazioni del CD3-OFDM applicato al sistema DVB-T sono state analizzate al calcolatore in presenza di varie combinazioni di echi fuori e dentro l'intervallo di guardia, con la seguente configurazione di trasmissione: FFT su 8K punti, intervallo di guardia $T_g = T_u/4 = 224$ ms, schemi di modulazione e codifica 64QAM 2/3, 16QAM 1/2 e QPSK 1/2. Si sono paragonati due tipi di ricevitore:

- convenzionale, basato per la stima della funzione di trasferimento del canale sulle portanti pilota, con banda passante del filtro in frequenza $T_f/T_u = T_g/T_u$;
- CD3-OFDM filtrato nel dominio del tempo e della frequenza, con banda passante del filtro in frequenza $T_f/T_u = 2T_g/T_u$ e filtro temporale che media su due campioni successivi.

Le prestazioni del ricevitore CD3-OFDM in presenza di soli echi interni all'intervallo di guardia si sono rivelate leggermente migliori rispetto a quelle di un ricevitore convenzionale (0,5 dB rispetto al metodo di stima 2-D, 1 dB rispetto al metodo 1-D [2]), grazie alla maggiore capacità di filtrare il rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale.

I risultati riportati in figura 3 si riferiscono alla configurazione 64QAM 2/3 e ad un canale con un eco a 0 dB e ritardo T_g ed un secondo con ritardo variabile k . Le curve riportano il valore del massimo livello di interferenza (G [dB], rapporto tra la potenza del segnale utile e l'interferenza) al variare del ritardo normalizzato dell'eco k/T_g , tale da garantire un tasso d'errore sul bit (BER, Bit Error Rate) di 2×10^{-4} dopo la decodifica di Viterbi ^{Nota 2} in assenza di rumore. Come riferimento è anche riportata la curva relativa al "ricevitore ideale a degradamento progressivo delle prestazioni" ^{Nota 3},

Fig. 3 - Massimo livello d'eco per avere un BER di 2×10^{-4} dopo decodifica di Viterbi in assenza di rumore per la configurazione 64QAM 2/3



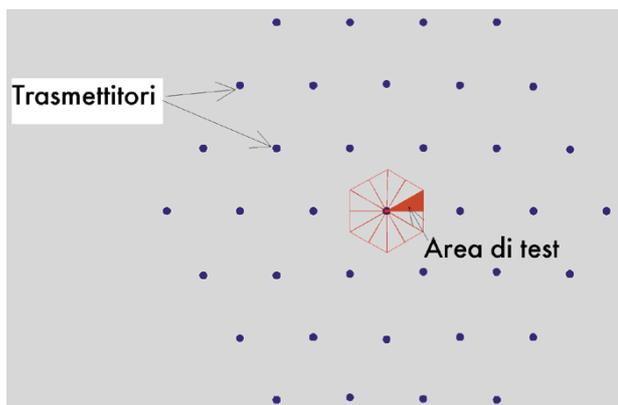


Fig. 4 -
Configurazione
di trasmettitori in
SFN regolare

in grado di equalizzare correttamente tutti gli echi con ritardo minori della durata del simbolo OFDM (definito secondo il modello matematico descritto in [2], con $T_f = T_u + T_g$).

Il tempo di convergenza dell'algoritmo di aggancio è normalmente dell'ordine di 10,20 simboli OFDM, 40 nei casi più critici.

Ulteriori simulazioni con i sistemi 16QAM 1/2 e QPSK 1/2 hanno dimostrato come il CD3-OFDM approssimi bene il "ricevitore ideale a degradamento graduale" se ϵ è maggiore di 3,4 dB, valore che rappresenta il massimo livello d'eco al di fuori dell'intervallo di guardia in grado di permettere l'aggancio (in particolare il recupero dell'ambiguità di fase di $\pi/2$, come illustrato in appendice). Da notare comunque come nel caso della configurazione QPSK 1/2, l'aggancio viene sempre raggiunto nella Fase 1 del procedimento, grazie alla sua maggiore robustezza a rumore o disturbi sulla costellazione.

Nota 3.

Per il ricevitore ideale "a degradamento graduale" la potenza di tutti gli echi ricevuti entro una finestra di durata T_g è utile, e contribuisce positivamente alla potenza di segnale globale disponibile al ricevitore. Al di fuori dell'intervallo di guardia, una parte della potenza dell'eco, decrescente con aumentare del ritardo 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, crescente con aumentare del ritardo 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.

Nota 4.

Con guadagno di 10 dB fino a 20° , decrescente linearmente fino a -6 dB a $\pm 60^\circ$ e fattore fronte-retro di 16 dB.

Nota 5.

Si è posto il fattore di conversione d'altezza da 10 m a 1,5 m a 12 dB.

4. Miglioramento della copertura in reti a singola frequenza

Per valutarne i vantaggi offerti dai ricevitori CD3-OFDM rispetto a quelli convenzionali ottenibili con equalizzazione basata sulle sole portanti pilota in termini di coperture di servizio, sono stati effettuati alcuni esercizi di pianificazione. La struttura di rete considerata è la griglia esagonale con 37 trasmettitori a distanza D dagli adiacenti, dotati di antenne omnidirezionali poste a 300 metri di altezza. Si è applicato il modello probabilistico della Raccomandazione ITU-R 370 per la propagazione terrestre nella banda UHF relativo al 50% del tempo per i contributi di segnali interni all'intervallo di guardia e 1% per gli altri, entrambi con distribuzione log-normale del campo nelle locazioni dell'area di servizio e deviazione standard di 5,5 dB. Data l'elevata simmetria della struttura si è valutata la probabilità minima di copertura solo su una piccola porzione (colorata in rosso in figura 4) dell'area totale.

Le coperture sono state calcolate sia nel caso di ricezione fissa, con antenna direzionale posta a 10 m d'altezza^{Nota 4}, e ricezione portatile in ambiente esterno con antenna omnidirezionale posta a 1,5 m di altezza^{Nota 5}.

I ricevitori DVB-T disponibili in commercio operano strategie di sincronizzazione e posizionamento della finestra temporale del ricevitore diverse [13]: nello studio qui presentato

si è considerato il caso più favorevole, in cui la finestra viene posizionata in modo da massimizzare la potenza utile totale rispetto alla potenza interferente.

Nelle valutazioni si sono analizzate diverse configurazioni di trasmissione, tutte basate su FFT su 8K punti e intervallo di guardia $T_g = 224$ ms, tipici per trasmissione su rete a singola frequenza. Si sono paragonati le coperture ottenute per i due tipi di ricevitore descritti nella sezione 3.

Per tutte le 15 configurazioni di modulazione e codifica non gerarchiche della norma DVB-T, si è valutata l'autointerferenza della rete SFN in assenza di rumore, in termini della probabilità di copertura minima ottenibile dell'area di servizio. Come illustrato in figura 5, dove la distanza tra i trasmettitori è di 60 Km, il ricevitore CD3-OFDM, grazie ad un intervallo di corretta equalizzazione T_f doppio rispetto al ricevitore convenzionale, consente di raggiungere coperture sensibilmente maggiori.

Ad esempio, in ricezione portatile un ricevitore convenzionale garantisce il 95% di copertura (livello definito in sede internazionale [14] come "buono") solo per le configurazioni QPSK-1/2 (5 Mbit/s) e QPSK-2/3 (6,6 Mbit/s), mentre con il ricevitore CD3-OFDM è possibile aumentare la capacità trasmissiva, a parità di copertura del servizio, anche fino a 15 Mbit/s circa, mediante le configurazioni di trasmissione utilizzando 16QAM-3/4 (15 Mbit/s) e 64QAM-1/2 (15 Mbit/s); in pratica la ricezione tramite un ricevitore CD3-OFDM nelle aree più critiche consente di aumentare la capacità trasmissiva del canale di più del doppio. Inoltre la copertura portatile si mantiene "accettabile" (probabilità di copertura minima del 70%, [14]) anche fino alla configurazione 64QAM-3/4, che trasporta più di 22 Mbit/s. Per quanto riguarda la ricezione fissa il ricevitore convenzionale è limitato a 17 Mbit/s (16QAM-5/6) per una "buona" copertura, mentre il ricevitore CD3-OFDM consente di operare con tutte le configurazioni dello standard DVB-T anche in condizioni critiche di ricezione.

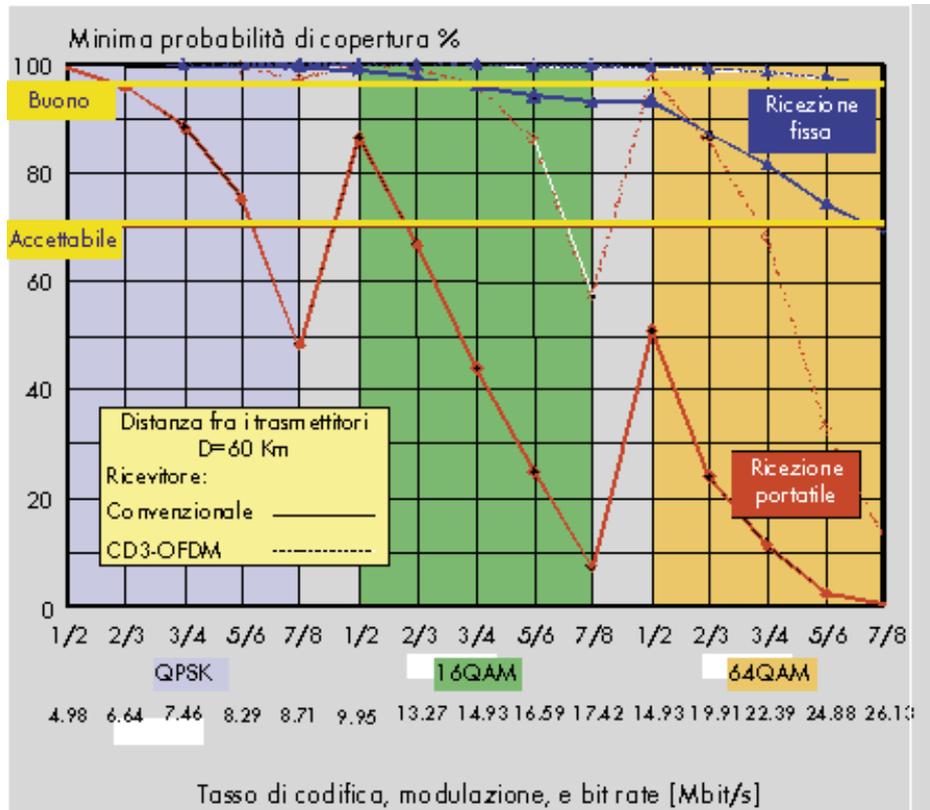


Fig. 5 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore CD3-OFDM paragonata a quella ottenibile con un ricevitore convenzionale.

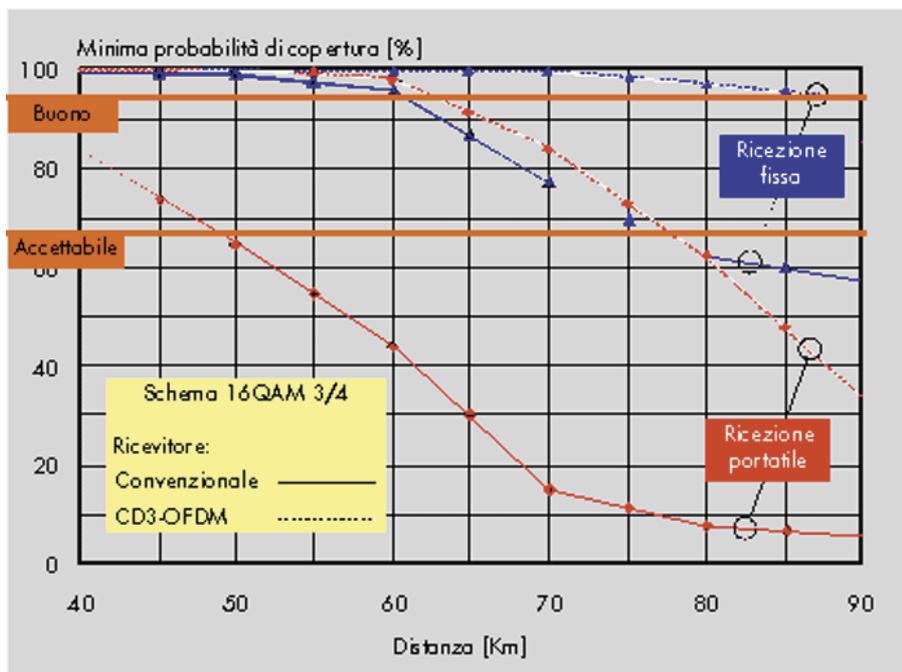
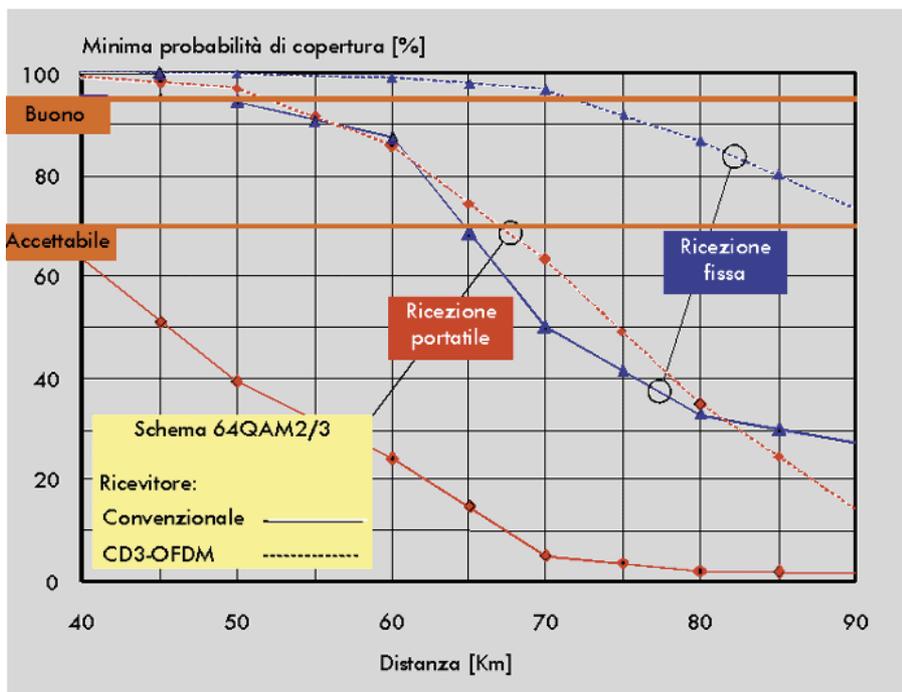


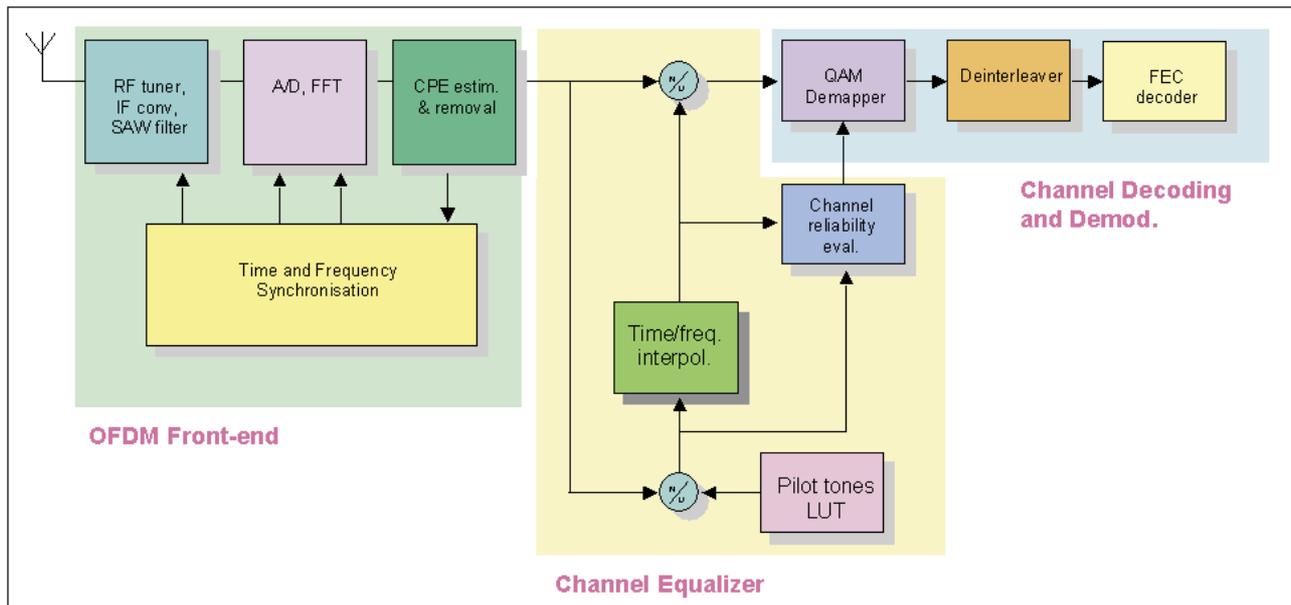
Fig. 6 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore convenzionale e CD3-OFDM in funzione della distanza tra i trasmettitori per la configurazione 16QAM 3/4 (Bit rate $R_u = 15$ Mbit/s)

Fig. 7 - Probabilità di copertura minima per il ricevitore convenzionale e CD3-OFDM in funzione della distanza tra i trasmettitori per la configurazione 64QAM 2/3 (Bit rate $R_u = 20$ Mbit/s).



Nelle figura 6 e 7 è invece analizzato, rispettivamente, il comportamento del ricevitore convenzionale e CD3-OFDM per gli schemi 16QAM-3/4 (15 Mbit/s) e 64QAM-2/3 (20 Mbit/s), al variare della distanza tra i trasmettitori della rete. I risultati indicano che il sistema CD3-OFDM permette di aumentare del 20,50 % la distanza tra i trasmettitori della rete, a parità di copertura percentuale. Per esempio in figura 6 si può vedere come il ricevitore CD3-OFDM garantisca una buona copertura a 15 Mbit/s (16QAM 3/4) con una distanza tra i trasmettitori adiacenti di circa 60 Km, mentre con ricevitori convenzionali al massimo si può arrivare a 35 km. Analogamente in figura 7, relativa al 64 QAM-2/3 (20 Mbit/s) si passa da 72 km per una buona copertura con il CD3-OFDM a 50 km per i ricevitori convenzionali. Dato che il quadrato della distanza è inversamente proporzionale al numero di trasmettitori nella rete (per reti regolari molto grandi), si può dedurre come ricevitori di tipo CD3-OFDM potenzialmente permettano, tenendo conto delle sole auto-interferenze di rete, di ridurre alla metà o addirittura ad un terzo il numero di trasmettitori nella rete SFN rispetto ai ricevitori DVB-T convenzionali, a parità di area di copertura.

Sono state effettuate ulteriori simulazioni in presenza di rumore, verificando che il guadagno dato dal CD3-OFDM si mantiene fintanto che la potenza non diventa il limite alla copertura del servizio.



5. Implementazione hardware del ricevitore CD3-OFDM

L'algoritmo di stima di canale CD3-OFDM è stato realizzato in hardware come prototipo sperimentale, mediante componenti FPGA e DSP; la scheda CD3-OFDM è stata interfacciata al dimostratore europeo dTTb [13] (il primo ricevitore a standard DVB-T), sostituendo l'equalizzatore esistente. La configurazione implementata ha un filtro nel dominio della frequenza con una "banda" $T_f/T_u = 2T_g/T_u$ ed un filtro nel dominio del tempo, mediato su due simboli successivi.

Le prove di laboratorio sul ricevitore CD3-OFDM prototipale hanno verificato la validità dei risultati delle simulazioni riguardanti il degradamento graduale con echi aventi ritardo superiore alla durata dell'intervallo di guardia ed in presenza di effetto Doppler.

5.1 Architettura del ricevitore CD3-OFDM

Il ricevitore DVB-T convenzionale è schematizzato in figura 8. La prima sezione, indicata come "OFDM front-end", comprende tutte le funzioni di conversione del segnale ricevuto dall'antenna al simbolo OFDM (dopo FFT).

La sezione seguente, "Channel Equaliser", stima la risposta del canale tramite una divisione complessa fra le portanti pilota in arrivo e quelle memorizzate in una tabella ("Look up table", LUT) ed esegue un'interpolazione tempo-frequenza del risultato. Il divisore complesso in alto nella figura è l'equalizzatore che ha il compito di ripristinare ampiezze e fasi di tutte le costellazioni OFDM. Un ulteriore blocco effettua la stima dell'affidabilità del canale, utilizzata per ottimizzare le prestazioni della decodifica di Viterbi, stimando il rapporto segnale rumore C/N su ciascuna portante. C è sostanzialmente il modulo al quadrato della risposta del canale; la stima di N richiede, frequenza per frequenza, una media a lungo termine di rumore e interferenze. Siccome la componente N può essere estratta solo se noto il segnale trasmesso, questa operazione è fatta solo sulle portanti pilota e il risultato è interpolato nel dominio della frequenza per ricostruire i campioni mancanti.

L'ultimo blocco è il demodulatore con relativo decodificatore di canale, alimentato dai vettori equalizzati e dai coefficienti della stima dell'affidabilità del canale. Tali segnali sono utilizzati per calcolare le metriche all'interno dell'algoritmo di Viterbi.

Fig. 8 - Struttura di un ricevitore DVB-T convenzionale

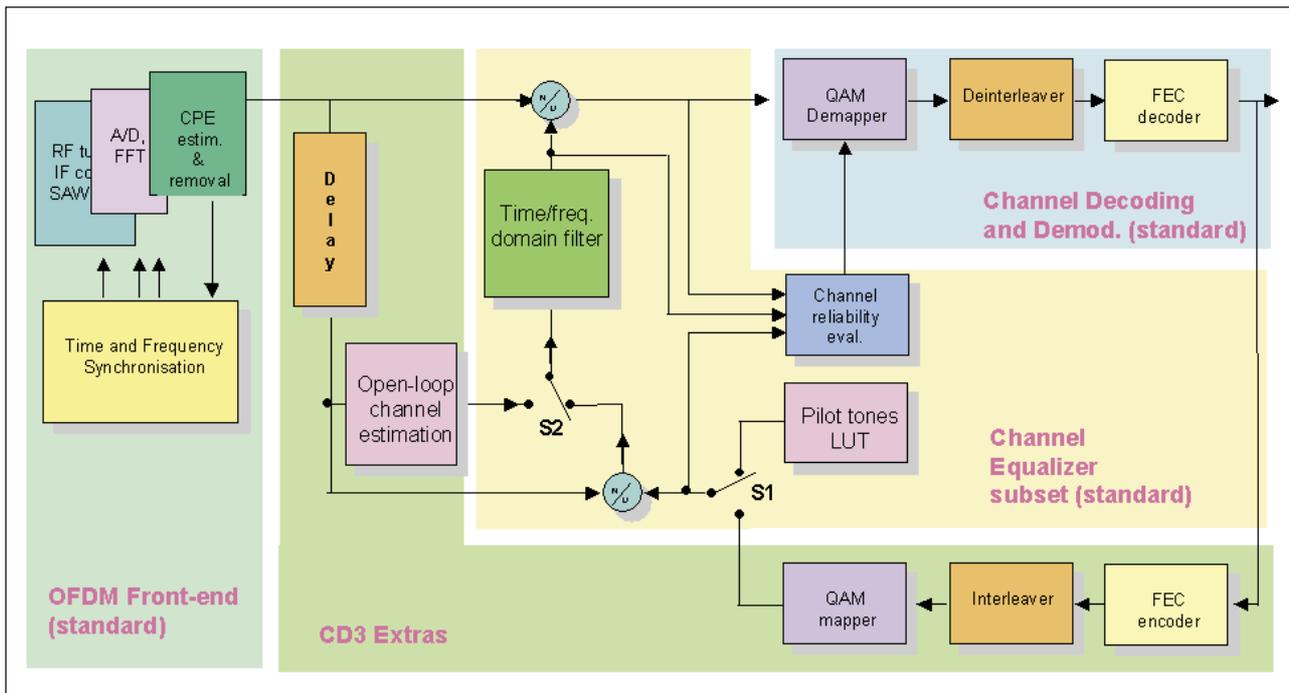


Fig. 9 -
Struttura del
ricevitore CD3-
DVB-T

L'architettura del ricevitore CD3 può essere vista come l'estensione del ricevitore convenzionale come si può facilmente verificare in figura 9. La prima sezione ("OFDM front end") e l'ultima ("Channel Decoding and Demodulation") sono identiche a quelle del ricevitore convenzionale.

L'equalizzatore di canale è costituito dai medesimi blocchi funzionali, benché essi siano usati in modo leggermente diverso.

L'introduzione del CD3-OFDM richiede l'inserimento d'alcuni nuovi blocchi hardware. Nel ramo di reazione, il "FEC encoder" e il "QAM mapper" sono costituiti da semplice logica combinatoria e sequenziale. L'"Interleaver" richiede una memoria di simbolo oltre ad una logica di generazione degli indirizzi. Questo blocco è simile al Deinterleaver che precede il FEC Decoder ma più semplice poiché ogni posizione di memoria è costituita da soli tre bit anziché nove (parallelismo 3). Il blocco "Delay" è una memoria di simbolo di tipo FIFO a 24 bit. Il blocco "Open-loop Channel estimation" [15] richiede una memoria di simbolo di tipo FIFO per calcolare la media. Il parallelismo adottato è di 22 bit per asse. Sono inoltre ne-

cessari blocchi in grado di svolgere operazioni aritmetiche (accumulatori, tabelle, ecc.).

La velocità di calcolo necessaria è analoga a quella del ricevitore convenzionale. L'equalizzazione del simbolo n è basata sulla stima della risposta del canale effettuata sul simbolo $n-1$. Tutte le operazioni sono eseguite ad una frequenza di clock di 18 MHz eccetto quelle riguardanti il Viterbi decoder seriale operante a 36 MHz. Benché questa velocità sia facilmente ottenibile dall'attuale tecnologia, il funzionamento a frequenze inferiori (ad esempio la metà) è anche possibile ma a costo di una minor velocità d'adattamento al canale temporale. Nel prototipo, è stata adottata la massima velocità d'anello, per rendere massime le prestazioni in presenza di Doppler shift.

In linea di principio sarebbe anche possibile scegliere l'approccio inverso, aumentando la velocità del clock e diminuendo le risorse hardware; di fatto tale soluzione non è conveniente essendo il costo dell'hardware aggiuntivo irrisorio.

5.2 Test di laboratorio sul ricevitore CD3-OFDM

Misure in presenza di echi fuori dall'intervallo di guardia

Le prestazioni del ricevitore CD3-OFDM prototipale sono state valutate nei laboratori Rai-CRIT utilizzando il simulatore di canale (Multipath Channel Simulator), con e senza l'aggiunta di rumore gaussiano additivo (AWGN, Additive White Gaussian Noise). Il simulatore di canale utilizzato permette di inserire echi con ritardo fino a $2 \times 190 \mu\text{s}$ (circa $1,7T_g$). Non è stato possibile quindi estendere la prova fino al limite teorico di $2T_g$. Durante i test sono stati monitorati lo spettro, la costellazione e la risposta in frequenza del canale.

Le prestazioni del ricevitore CD3 sono state confrontate con un ricevitore convenzionale di classe professionale ottenendo i seguenti risultati:

- Su canale AWGN, per raggiungere un BER dopo decodifica di Viterbi pari a $2 \cdot 10^{-4}$, il prototipo CD3-OFDM richiede 18,8 dB di C/N contro i 19,4 dB richiesti dal ricevitore convenzionale. Questo leggero miglioramento (0,6 dB) è dovuto al miglior filtraggio della stima di canale nel dominio del tempo consentito dall'algoritmo CD3;
- Sommando un singolo eco con ritardo eccedente l'intervallo di guardia ($\square [T_g, 2T_g]$), il CD3-OFDM ha dimostrato un degradamento graduale secondo quanto previsto dalla teoria. La figura 10 confronta le prestazioni del prototipo CD3-OFDM con quelle del ricevitore convenzionale in termini di C/I dell'eco per ottenere un BER pari a $2 \cdot 10^{-4}$ dopo decodifica di Viterbi senza rumore. Nella regione da $1,2T_g$ (270 μs) a $1,5T_g$ (340 μs), il guadagno del CD3-OFDM, in termini di rapporti di protezione, è dell'ordine di 9-10 dB, e a $1,7T_g$ (380 μs) è di circa 7 dB.

Misure in presenza di scostamenti Doppler

Dal momento che il CD3-OFDM è stato principalmente ideato per migliorare la probabilità di corretta ricezione portatile e fissa in SFN, solo

il modo 8k, 64QAM 2/3 con intervallo di guardia $T_g=1/4T_u$ è stato implementato nel prototipo. Ovviamente questo modo non è adatto per la ricezione mobile [2], [15], tuttavia sono state fatte delle prove comparative con il ricevitore convenzionale per estrapolare delle indicazioni inerenti al comportamento del CD3-OFDM in ricezione mobile.

Il sistema è stato testato con i seguenti profili di canale con echi:

Eco singolo:

- Ritardo $\tau=0$ per il segnale principale, $0,9T_g$ per l'eco;
- Scostamento Doppler: 0 per il segnale principale, $2f_d$ per l'eco;
- Attenuazione dell'eco rispetto al segnale principale: 0, 3, 5 and 10 dB;

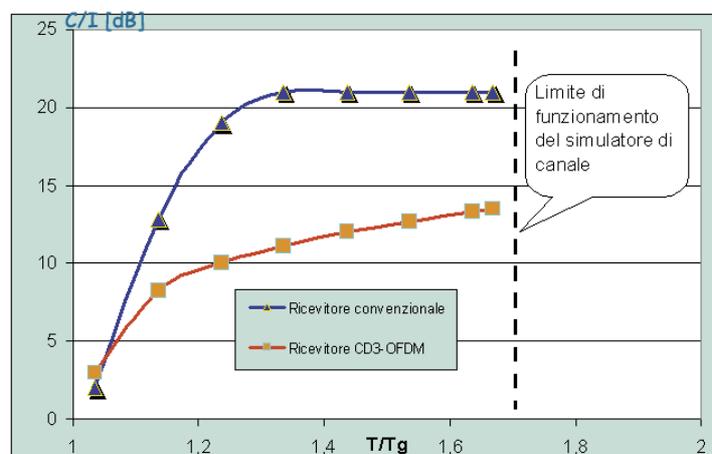
Echi multipli:

- Ritardi: $\tau=0$ per il segnale principale, $T_g/4$, $T_g/3$, $2T_g/3$, per gli echi;
- Scostamento Doppler: $+f_d$ per il segnale principale, $-f_d$, $+f_d$, $-f_d$ per gli echi;
- Attenuazione degli echi rispetto al segnale principale pari a 4,77, 8,77 dB (corrispondente ad un C/I totale di 4 dB) and 14,77 dB (corrispondente ad un C/I totale di 10 dB).

Lo scopo di questi profili è la valutazione del degradamento delle prestazioni dovute esclusivamente all'effetto Doppler, senza il contributo del fading piatto.

Definendo come C/I il rapporto fra la potenza del raggio principale e la somma della potenza di tutti gli altri echi, i risultati sui profili utilizzati

Fig. 10 - Eco singolo fuori dall'intervallo di guardia: $2 \cdot 10^{-4}$: degradamento graduale delle prestazioni del prototipo CD3-OFDM rispetto al rapido degradamento del ricevitore convenzionale



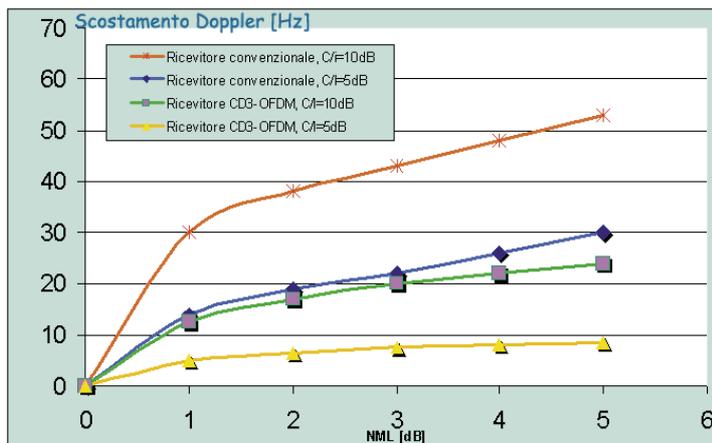


Fig. 11 - Scostamento Doppler che causa un dato NML (profilo con eco singolo)

hanno fornito il massimo scostamento Doppler accettabile per un dato degradamento delle prestazioni (NML, *Noise Margin Loss*). La soglia utilizzata è un BER dopo decodifica di Viterbi di 2×10^{-4} , corrispondente al livello QEF all'uscita del demultiplicatore MPEG-2.

In figura 11 sono riportati i risultati per il caso di canale con eco singolo affetto da scostamento Doppler. Si è considerato il comportamento a regime del ricevitore CD3-OFDM, dopo la fase di aggancio. Come si può vedere dalla figura, il ricevitore CD3-OFDM sopporta approssimativamente uno scostamento Doppler dimezzato rispetto a quello permesso dal ricevitore convenzionale, dovuto alla presenza del filtro temporale, che media su due campioni consecutivi. A titolo di esempio, si considerano il canale 66 (834 MHz) ed il canale 28 (530 MHz), utilizzati attualmente da Rai-CRIT per la sperimentazione DVB-T a Torino. Accettando un degradamento di 1 dB, in presenza di un rapporto C/I di 10 dB il ricevitore convenzionale può funzionare fino a quasi 40 Km/h sul canale 66 e 61 sul canale 28, mentre il ricevitore CD3-OFDM può arrivare a soli 16 Km/h e 25 rispettivamente. Se il rapporto C/I scende a 5 dB, la massima velocità accettata scende a circa 17 Km/h sul canale 66 e 27 sul canale 28 per il ricevitore convenzionale e a 7 e 10 rispettivamente per il ricevitore CD3-OFDM.

In tutti gli altri casi (echi multipli affetti da scostamento Doppler), si è verificato un comportamento analogo [15].

6. Conclusioni

Attraverso l'invenzione del sistema di equalizzazione CD3-OFDM e la sua applicazione ai ricevitori DVB-T, Rai-CRIT ha dato un importante contributo alla definizione dello standard per la televisione digitale terrestre, offrendo la possibilità di garantire la copertura del servizio in SFN anche in aree critiche, in presenza di echi a potenza elevata che cadono fuori dall'intervallo di guardia.

Il procedimento CD3-OFDM per la stima della funzione di trasferimento del canale, valutato sia attraverso simulazioni al computer che in laboratorio mediante il prototipo di ricevitore sviluppato dal Centro Ricerche della Rai, offre prestazioni analoghe ai ricevitori convenzionali DVB-T in presenza di soli echi che cadono all'interno dell'intervallo di guardia; per contro, offre benefici in termini di qualità del servizio in presenza di echi esterni all'intervallo di guardia. Diventa pertanto possibile la realizzazione di reti SFN a larga copertura (ad es. regionale o nazionale) senza dover incrementare significativamente il numero dei trasmettitori rispetto alla situazione dell'attuale servizio televisivo analogico, garantendo allo stesso tempo una elevata qualità del servizio.

Il prototipo hardware del ricevitore CD3-OFDM ha inoltre permesso una verifica comparativa della complessità dell'algoritmo di equalizzazione CD3-OFDM rispetto alle tecniche comunemente impiegate nei ricevitori convenzionali, ritenendola paragonabile, sia in termini delle velocità richieste, che in termini di memoria, senza aggravare il costo del ricevitore d'utente.

I vantaggi della soluzione CD3-OFDM sono ottenibili con lo sviluppo di ricevitori commerciali DVB-T che includono tale algoritmo, senza tuttavia che si richiedano modifiche allo standard di trasmissione. L'opportunità offerta all'industria del settore e agli operatori di rete potrebbe costituire un importante incentivo nello sviluppo della televisione digitale terrestre, con particolare attenzione alle reti isofrequenziali a larga copertura.

Bibliografia

1. ETSI EN 300 744, " Digital Video Broadcasting (DVB); framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television", <http://www.etsi.org>
2. V.Mignone, A.Morello, M.Visintin, "Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre", *Elettronica e Telecomunicazioni*, n. 1, 2002
3. M. Cominetti: "La televisione digitale terrestre: un'opportunità per il nostro paese", *Elettronica e Telecomunicazioni*, n. 1, 2002
4. ATSC Standard A/53 (1995), "ATSC Digital Television Standard", http://www.atsc.org/standards/a_53b.pdf
5. S.B.Weinstein, and P.M. Ebert: "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform", *IEEE Transaction on Communications*, COM-19(5), p.628-634, October 1971
6. 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
7. M. Alard, R. Lassalle: "Principles of modulation and channel coding for digital broadcasting for mobile receivers", *EBU Technical Review*, n.224, p.168-190, August 1987
8. ETSI EN 300 401, "Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers", <http://www.etsi.org>
9. V. Mignone, A. Morello, "CD3-OFDM: a novel demodulation scheme for fixed and mobile receivers", *IEEE Transactions on Communications*,

Glossario	
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BER	Bit Error Rate
CD3-OFDM	Coded Decision Directed Demodulation-OFDM
DAB	Digital Audio Broadcasting
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-T	DVB-Terrestrial
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FIFO	First In First Out
ISI	InterSymbol Interference
LUT	Look Up Table
NML	Noise Margin Loss
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QEF	Quasi Error Free
QPSK	Quaternary Phase Shift Keying
SFN	Single Frequency Network

COM-44(9), pp. 1144 - 1151, September 1996

10. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "CD3-OFDM: A new channel estimation method to improve the spectrum efficiency in digital terrestrial television systems", *IBC'95, Amsterdam*, 14-18 September, 1995
11. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "Advanced algorithm for improving DVB-T coverage in SFN", *IBC'97, Amsterdam*
12. A. Morello, G. Blanchietti, C. Benzi, B. Sacco, M. Tabone "Performance assessment of a DVB-T television system", *Montreux Symposium*, 1997.
13. A.Bertella, B.Sacco, M.Tabone, "Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T per la televisione digitale terrestre", *Elettronica e Telecomunicazioni*, n. 1, 2002

- 14. European Broadcasting Union – “Terrestrial Digital Television planning and implementation considerations”, BNP 005 Second Issue, 1997.
- 15. A. Morello, B. Sacco, “Hardware architecture and laboratory test on an advanced CD3 DVB-T receiver”, IBC’99, Amsterdam.

Appendice A I principi della demodulazione CD3-OFDM

Supponendo che il simbolo OFDM trasmesso al tempo n-1 sia noto, la funzione di trasferimento del canale di trasmissione potrà essere calcolata come rapporto tra il segnale ricevuto y(n-1,k) ed il segnale trasmesso x(n-1,k):

$$\hat{H}(n-1, k) = \frac{y(n-1, k)}{x(n-1, k)} = \underline{H}(n-1, k) + \underline{g}(n-1, k) \quad (1)$$

dove $\underline{g}(n-1, k) = \underline{n}(n-1, k) / \underline{x}(n-1, k)$

rappresenta una componente di rumore gaussiano, che dipende anche dall’ampiezza del segnale trasmesso x(n-1,k).

Nell’ipotesi che la funzione di trasferimento del canale

sia quasi-stazionaria tra i due simboli n-1 e n, il simbolo successivo n potrà essere così equalizzato:

$$\underline{z}(n, k) = \frac{y(n, k)}{\hat{H}(n-1, k)} \approx \underline{x}(n, k) + \underline{y}(n, k) \quad (2)$$

La stima z(n,k) sarà affetta, come nella demodulazione differenziale^{Nota 6}, da un deperimento delle prestazioni di 3 dB rispetto alla demodulazione ideale, con riferimento non affetto da rumore. Ciò in quanto i campioni della stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{H}(n, k)$ sono altrettanto rumorosi del segnale y(n-1,k). Per ridurre il contributo di rumore sulla stima è però possibile introdurre un filtraggio in frequenza sulla stima di

$\hat{H}(n, k)$ accettando una riduzione del cosiddetto intervallo di corretta equalizzazione T_f [2], che, essendo $\hat{H}(n, k)$ campionata con frequenza unitaria (la funzione è disponibile per ogni posizione delle portanti, dati e pilota), si estende per il ricevitore CD3-OFDM in assenza di filtraggio a tutta la durata della porzione utile del simbolo OFDM T_u . Un ulteriore filtraggio nel dominio del tempo (tenendo conto delle limitazioni che ciò impone alla capacità di inseguire le variazioni del canale) potrà ulteriormente ridurre il contributo di rumore sulla stima della funzione di trasferimento del canale.

L’algoritmo CD3-OFDM originariamente proposto in [9] e [10] si basa sulla ritrasmissione periodica di un simbolo OFDM di riferimento per iniziare il processo di equalizzazione, che si riassume nei seguenti passi (figura 1):

1. Ricezione della sequenza di riferimento x(n=1,k);
2. Stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{H}(n=1, k)$ secondo la formula (1);
3. Filtraggio di $\underline{g}(n, k)$ nel dominio della frequenza e del tempo;
4. Equalizzazione del simbolo C-OFDM al passo n mediante la formula (2);
5. Stima della sequenza trasmessa attraverso demodulazione e decodifica della sequenza z(n,k), e successiva ricodifica e rimodulazione per generare $\underline{z}(n, k)$;
6. Ripetizione simbolo per simbolo del procedimento a partire dal passo 2, utilizzando come sequenza di riferimento la sequenza stimata al passo precedente $\underline{z}(n, k)$.

Il procedimento CD3-OFDM rende inutile la trasmissione di portanti note all’interno del

Nota 6.
Da notare che questo metodo non è limitato alle costellazioni con simmetria rotazionale, come la demodulazione differenziale, ma è applicabile ad ogni costellazione.

simbolo OFDM, purché sia periodicamente trasmesso un simbolo noto per iniziare il processo di demodulazione CD3-OFDM. La stima della funzione di trasferimento del canale viene effettuata ad ogni simbolo OFDM, per essere applicata al simbolo successivo, permettendo una velocità di inseguimento del canale equivalente a quella dei sistemi differenziali.

Accorgimenti implementativi

Per le modulazioni ad inviluppo non costante, come il 16QAM ed il 64QAM, il livello del rumore $\xi(n, k)$ associato alla stima del canale cambia significativamente da campione a campione, introducendo un degradamento sulle prestazioni del sistema. Per ridurlo, quando la portante k -esima trasporta uno degli L punti più interni della costellazione, la k -esima posizione di $\hat{H}(n, k)$ viene mantenuta al valore stimato al simbolo precedente.

Il demodulatore CD3-OFDM potrebbe diventare instabile per alte probabilità d'errore sul canale, in quanto gli errori non corretti rientrano nell'anello di stima. Questo effetto è normalmente neutralizzato fino a probabilità d'errore molto elevate, grazie alla presenza di codici correttori potenti e al filtraggio della funzione $\hat{H}(n, k)$, che attenua i picchi dovuti agli errori residui nell'anello di retroazione. La presenza poi di un interallacciatore di frequenza con regola di sparpagliamento delle portanti diversa per simboli consecutivi, permette di spezzare le lunghe sequenze d'errore all'uscita del decodificatore di Viterbi, ulteriormente aumentandone le capacità correttive.

Appendice B: L'algoritmo CD3-OFDM applicato ai ricevitori DVB-T

Il sistema DVB-T non prevede la trasmissione periodica di un simbolo di riferimento. Poiché in tale caso l'algoritmo CD3-OFDM originario non è in grado di iniziare il processo di stima, si è sviluppato un algoritmo di aggancio basato sulle portanti pilota trasmesse nel segnale DVB-T [11] e suddiviso nelle seguenti due fasi consecutive:

Fase 1. Si tenta un aggancio veloce (entro 4 simboli OFDM) dell'anello di stima CD3-OFDM mediante la stima convenzionale $\hat{H}_p(n, k)$ della funzione di trasferimento del canale prevista dal sistema DVB-T, sulla base alle portanti pilota sparse (con banda del filtro interpolatore $T_f/T_u = T_g/T_u$). Nel caso di echi fuori dall'intervallo di guardia poco potenti l'anello raggiunge la stabilità e la demodulazione CD3-OFDM può continuare; in caso contrario si prosegue con la Fase 2.

Fase 2. L'ampiezza e la fase della funzione di trasferimento corrispondente alle portanti dati sono calcolate applicando una non-linearità (ad esempio elevazione alla quarta potenza) ed un filtro nel dominio del tempo (ad esempio la funzione media) su N simboli OFDM consecutivi. L'ambiguità di fase di multipli di $p/2$, dovuta alla simmetria delle costellazioni M-QAM, viene risolta adottando portante per portante la fase più vicina a quella della stima ottenuta nella Fase 1 ^{Nota 7}. Introducendo poi un filtro in frequenza con banda T_f/T_u uguale, ad esempio, a $2T_g/T_u$, si ottiene una stima della funzione di trasferimento del canale $\hat{H}_n(n, k)$ con cui è possibile equalizzare correttamente tutti gli echi fino a ritardo pari a due volte l'intervallo di guardia. Questa fase permette un aggancio lento del procedimento CD3-OFDM (necessita di alcune decine di simboli OFDM), per cui può essere applicata solo nel caso di canale quasi-statico per tutta la durata del periodo di aggancio.

Nota 7.

Si ipotizza che gli echi fuori dall'intervallo di guardia siano limitati in ampiezza (attenuati di almeno 3-4 dB), e producano quindi rotazioni di fase addizionale piccole ($< p/4$) rispetto a quelle introdotte dagli echi minori dell'intervallo di guardia (stimate nella Fase 1).