

SFN-Scope:

sistema evoluto di identificazione dei segnali SFN DVB-T



Bruno Sacco
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

1. INTRODUZIONE

Il sistema per la televisione digitale terrestre adottato in Europa e in molti altri paesi del mondo è denominato DVB-T (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial*) [1], e si basa sulla modulazione multi portante OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*). Con l'introduzione della modulazione OFDM è possibile operare anche con reti "a singola frequenza", note come SFN (acronimo di *Single Frequency Network*), in cui tutti i trasmettitori della rete trasmettono su un'unica frequenza segnali che devono essere perfettamente uguali e sincroni. In questo modo il segnale in antenna ad ogni ricevitore è virtualmente costituito da serie di "echi" dello stesso segnale (al più di potenza diversa e con ritardi di propagazione diversi). Ciò comporta l'utilizzo di un opportuno meccanismo di generazione del flusso di bit, di distribuzione ai vari trasmettitori della rete, e di sincronizzazione dei medesimi, come descritto nella specifica tecnica ETSI [2].

2. IL PROBLEMA DEL MONITORAGGIO

In molti paesi del mondo, compresa l'Italia, si sta effettuando il passaggio dal sistema televisivo analogico a quello digitale. Ciò comporta una serie di problematiche in parte già note dai sistemi analogici, in parte specifiche del mondo digitale.

Viene qui descritto un sistema innovativo per l'identificazione dei segnali ricevuti da un insieme di trasmettitori, appartenenti ad una rete SFN DVB-T.

Ciascun trasmettitore trasmette un proprio identificativo codificato nelle portanti di servizio TPS, campo Cell-id. Il segnale che ne risulta è conforme alla norma, per quanto riguarda la ricezione del servizio TV, ed opera effettivamente in SFN. Per le sole celle TPS, invece, il segnale diventa simile a quello di un sistema MISO.

È stato sviluppato un algoritmo che permette di risolvere le N risposte in frequenza dei canali associate agli N trasmettitori. Con una tecnica Compressive Sensing è possibile disaggregare la risposta all'impulso globale in N risposte all'impulso individuali, per l'identificazione dei singoli trasmettitori.

In particolare, in fase di allestimento della rete, di messa a punto, di monitoraggio e di individuazione dei problemi, risulta di grande utilità il poter identificare i segnali in arrivo al ricevitore, in un qualsiasi punto dell'area coperta. Ad oggi, gli strumenti di misura utilizzati allo scopo (ad es.: Rohde&Swartz ETL, AdCoCom 4T2, oppure Analizzatori di Segnali Vettoriali con opzioni di misura DVB-T) non sono in grado di identificare la provenienza dei vari segnali; tuttavia forniscono una indicazione della distribuzione livello – ritardo differenziale del segnale ricevuto. Dal momento che in una rete SFN vengono trasmessi nel medesimo istante segnali identici da trasmettitori differenti, l'effetto che ne risulta al ricevitore è analogo alla ricezione di un unico segnale a cui si sovrappongono echi generati dalla riflessione del segnale da parte di ostacoli (edifici, montagne e così via).

Il ricevitore OFDM contiene al suo interno un sottosistema di equalizzazione degli echi che si basa sulla stima della risposta in frequenza del canale, ottenuta tramite le portanti pilota.

Come è noto, la trasformata di Fourier inversa della risposta in frequenza del canale è la *risposta all'impulso*: questa proprietà viene sfruttata negli strumenti di misura DVB-T (figura 1) per fornire indicazioni relative agli echi ricevuti (ritardo rispetto al segnale diretto e livello relativo).

Tali strumenti, tuttavia, non permettono l'individuazione selettiva dei trasmettitori da cui provengono i vari contributi al segnale ricevuto corrispondenti ai vari picchi evidenziati dalla risposta all'impulso, cosa che sarebbe estremamente utile in fase di implementazione, monitoraggio e manutenzione di una rete SFN. In Italia la situazione è particolarmente complicata dal fatto che alle reti nazionali DVB-T è stata assegnata una frequenza SFN unica sull'intero territorio nazionale, cosa che penalizza l'utente: in molte situazioni, specialmente sulle coste o nelle pianure, anche per propagazione anomala, al ricevitore arrivano segnali trasmessi dalla *seconda cerchia* di trasmettitori, il cui ritardo si colloca di solito fuori dall'intervallo di guardia, quindi oltre le possibilità di equalizzazione del sistema. Il monitoraggio della rete risulta quindi particolarmente complicato.

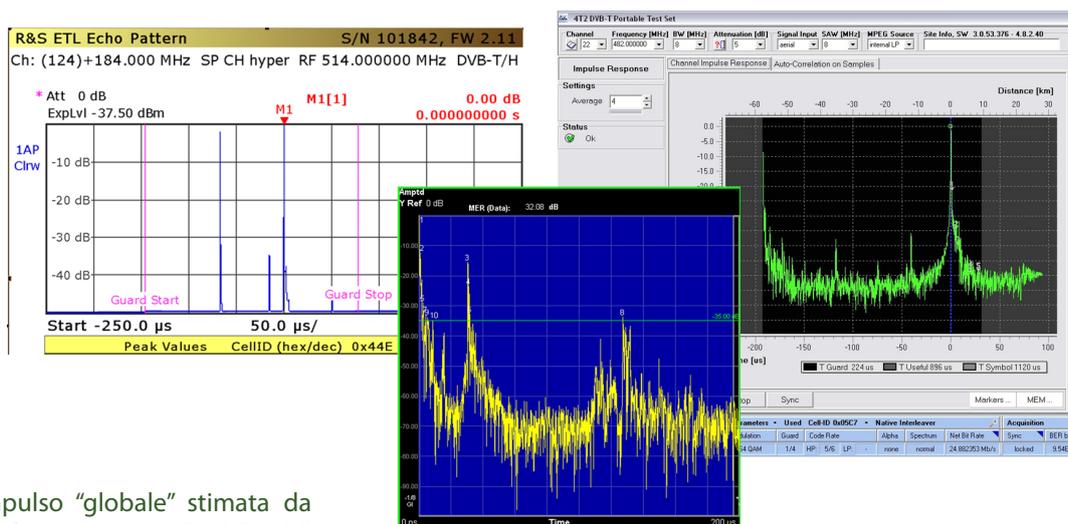


Fig. 1 - Risposta all'impulso "globale" stimata da strumenti specifici per misura DVB-T (R&S ETL, AdCoCom 4T2) e Analizzatori Vettoriali (Agilent MXA)

3. LE PORTANTI TPS

In figura 2 viene rappresentata una mappa tempo/frequenza di una trama di un segnale OFDM, in cui ogni riga rappresenta un simbolo OFDM ed ogni posizione al suo interno rappresenta una sottoportante.

La struttura di trama del segnale OFDM è costituita da una sequenza di simboli OFDM all'interno dei quali sono posizionate le portanti modulate dai dati, secondo lo schema scelto (QPSK, 16QAM o 64QAM), e alcune portanti di servizio.

Le portanti di servizio si dividono in due categorie:

- a) portanti pilota: sono trasmesse a potenza maggiore (+2,5 dB) e vengono utilizzate in ricezione per la stima della risposta del canale. Esse si dividono ulteriormente in:
 - Portanti pilota continue (Continual Pilots): occupano posizioni fisse, cioè si ripetono alle stesse frequenze in ogni simbolo;
 - Portanti pilota distribuite (Scattered Pilots): occupano posizioni di frequenza variabili da simbolo a simbolo.
- b) portanti TPS (Transmission Parameters Signalling): sono portanti di servizio modulate con informazioni riguardanti i parametri di trasmissione; utilizzano una modulazione

molto robusta (codifica/modulazione differenziale 2PSK, con codice di correzione di errore BCH), in modo da essere ricevute anche in condizioni estreme.

Più nel dettaglio, le portanti TPS sono utilizzate per veicolare i parametri relativi al sistema di trasmissione, vale a dire di codifica di canale e modulazione. Sono trasmesse 17 portanti TPS per il modo 2k e 68 portanti per il modo 8k. In un dato simbolo OFDM tutte le portanti TPS trasmettono il medesimo bit, con codifica differenziale. La posizione delle portanti TPS all'interno del simbolo è statica ed è stata scelta con una regola pseudo casuale in modo da evitare periodicità in frequenza. Di conseguenza, l'esatta posizione delle portanti TPS viene specificata con una tabella che è definita nella norma ETS 300744.

Le portanti TPS contengono informazioni di servizio, tra cui:

- tipo di modulazione (QPSK, 16QAM e 64QAM);
- informazioni sulla gerarchia;
- intervallo di guardia;
- codice FEC delle portanti dati;
- modalità di trasmissione (2k o 8k).

Le TPS sono trasmesse su 68 simboli OFDM consecutivi definendo così la cosiddetta "trama OFDM". Quattro trame OFDM consecutive corrispondono a una "super trama". La sequenza di riferimento corrispondente alla portante TPS del primo simbolo di ogni trama OFDM è utilizzata per inizializzare la modulazione differenziale.

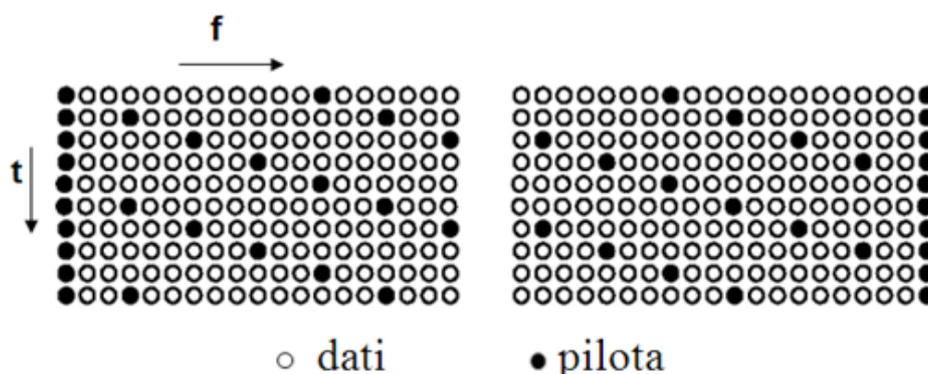


Fig. 2 - Mappa tempo/frequenza di una trama OFDM

Ogni simbolo OFDM trasmette un bit TPS. L'insieme dei 68 bit TPS contenuti in una trama OFDM, sono definiti come segue:

- 1 bit di inizializzazione;
- 16 bit di sincronizzazione;
- 37 bit di informazione;
- 14 bit di ridondanza per la protezione di errore.

Dei 37 bit di informazione, al momento dell'emanazione della norma ETSI, 23 bit di informazione erano utilizzati effettivamente mentre i 14 bit rimanenti erano stati riservati per utilizzi futuri e dovevano essere settati a 0.

Con l'emanazione dello standard DVB-H (*Digital Video Broadcasting – Handheld*, ossia il sistema per portare la TV sui dispositivi portatili) [3], alcuni dei suddetti 14 bit rimanenti sono stati assegnati, in particolare 8 sono stati allocati per l'identificazione della cella.

Le informazioni sui parametri di trasmissione sono inviate come illustrato in tabella 1. I bit S40-S47 trasportano le informazioni relative all'identificatore di cella (*Cell-Id*) utilizzato per identificare da quale cella viene trasmesso il segnale.

Tab. 1 - Allocazione dei bit di segnalazione delle portanti TPS

Bit #	Contenuto
S0	Inizializzazione
S1-S16	Parola di sincronizzazione
S17-S22	Indicatore di Lunghezza
S23, S24	Numero di trama
S25, S26	Costellazione
S27, S28, S29	Informazione Gerarchia
S30, S31, S32	Code Rate, flusso alta priorità
S33, S34, S35	Code Rate, flusso bassa priorità
S36, S37	Intervallo di guardia
S38, S39	Modalità di trasmissione
S40-S47	Identificatore di cella (<i>Cell-Id</i>)
S48-S53	Non usati (zero)
S54-S67	Codice di protezione di errore, BCH

Il byte più significativo del *Cell-Id* viene trasmesso nelle trame dispari della super-trama, mentre il byte meno significativo del *Cell-Id* viene trasmesso nelle trame pari (tabella 2).

Bit delle TPS	Trama 1 o 3	Trama 2 o 4
s40	cell_id b15	cell_id b7
s41	cell_id b14	cell_id b6
s42	cell_id b13	cell_id b5
s43	cell_id b12	cell_id b4
s44	cell_id b11	cell_id b3
s45	cell_id b10	cell_id b2
s46	cell_id b9	cell_id b1
s47	cell_id b8	cell_id b0

Tab. 2 - Utilizzo dei bit S40-47

In questo modo, utilizzando 8 bit, si riescono a mappare fino a 65535 *Cell-Id* differenti, equivalenti a 16 bit. Se il *Cell-Id* non è abilitato, gli otto bit devono essere impostati a zero.

4. UTILIZZO (CONVENZIONALE E NON) DEL CAMPO CELL-ID

Mentre nella norma DVB-H l'utilizzo del *Cell-Id* (che in tale standard identifica un gruppo di trasmettitori del segnale telefonico) è obbligatorio, nel caso dello standard DVB-T il *Cell-Id* è un parametro facoltativo. In ogni caso, anche se non espressamente specificato nella norma DVB-T, è inteso che in una rete SFN tutti i trasmettitori abbiano medesimo valore di *Cell-Id*.

Ma cosa succede se, su alcune TPS, i trasmettitori emettono bit diversi?

Le portanti TPS i cui bit relativi al *Cell-Id* risultino differenti, generano un conflitto^{Nota 1} che può portare al fallimento della demodulazione, ma *limitatamente alle sole portanti TPS*. Tuttavia, essendo la modulazione adottata per le TPS molto robusta, un errore di demodulazione sulle TPS si verifica solo in condizioni particolarmente sfavorevoli e cioè quando i segnali ricevuti sono isolivello o quasi. Nella realtà tale situazione è estremamente rara e si è inoltre verificato che anche in tali casi estremi in cui le portanti TPS non sono correttamente demodulate, la maggior parte dei ricevitori utente possono ricevere correttamente.

L'esperienza ha invece dimostrato che alcuni apparati semi-professionali, di vecchia generazione impiegati generalmente da installatori d'antenna, che fanno uso delle portanti TPS per ottenere una stima della qualità del segnale ricevuto, basandosi su criteri geometrici dei punti della costellazione (MER, Modulation Error Ratio), risentono negativamente dell'eventuale conflitto di identificatori di cella. Inoltre anche alcuni ricevitori consumer possono risentire negativamente del *Cell-Id* diverso, seppur in condizioni particolarmente sfavorevoli (isolivello o quasi).

Tra gli operatori italiani, Rai Way ha per primo introdotto l'utilizzo del parametro di trasmissione *Cell-id* per identificare il sito trasmittente. In ogni trasmettitore DVB-T questo parametro viene configurato ad un valore pari al codice geografico del sito trasmit-

tente di appartenenza. Gli strumenti di misura del segnale DVB-T permettono di decodificare e visualizzare il parametro *Cell-id* del segnale ricevuto; di conseguenza con questa pratica è possibile risalire alla località da cui il segnale è stato trasmesso. Dato che, come si è detto, in una rete SFN in cui ciascun trasmettitore inserisce il proprio *Cell-id*, le risultanti TPS vengono ricevute in "conflitto", non è possibile con la semplice tecnica di decodifica presente negli strumenti di misura risalire a tutti gli identificativi presenti, ma solo a quello del segnale principale. La pratica quotidiana di monitorare i segnali isofrequenza provenienti da diversi trasmettitori risulta quindi comunque complicata, e richiede successivi puntamenti dell'antenna di misura, per tentativi, al fine di fare prevalere (sempreché possibile) la ricezione da ciascun trasmettitore individualmente. Purtroppo, così facendo la sequenza dei ritardi reciproci viene alterata con grave complicazione aggiuntiva.

5. L'ALGORITMO DI ANALISI

È stato ideato e messo a punto un nuovo metodo che permette di identificare individualmente e simultaneamente i vari trasmettitori DVB-T SFN ricevuti. Il presupposto è, come sopra esposto, quello di inserire nel campo *Cell-id* delle portanti TPS di ogni trasmettitore un identificativo univoco.

Nota 1 - Si consideri che le portanti TPS sono modulate in modo differenziale: quindi il valore modulato dipende anche dai bit precedenti. Di conseguenza, portanti TPS successive ad un conflitto possono risultare in conflitto. Nel caso S48-53 ciò non costituisce comunque un problema in quanto tali celle non sono usate. Le rimanenti, S54-67, relative al BCH sarebbero già, comunque, in conflitto.

5.1 SEPARAZIONE DEI CONTRIBUTI CON TECNICA MISO

Il fatto che, in determinate posizioni tempo-frequenza si trasmettano segnali differenti da parte di trasmettitori distinti, ha due aspetti interessanti: se da un lato può essere considerato una collisione, fenomeno con connotazione negativa, dall'altro questo è analogo a ciò che avviene nei sistemi ad antenna multipla MIMO/MISO (Multiple Input Multiple Output/ Multiple Input Single Output) [4], in cui si ottiene il riuso della banda tramite la trasmissione da antenne multiple di segnali diversi sulla stessa frequenza. Grazie alla *diversità spaziale* è dunque tecnicamente possibile risalire alle *singole* risposte in frequenza dei canali di trasmissione relativi alle tratte definite tra ciascuno dei trasmettitori ed il ricevitore.

Vediamo nel dettaglio il metodo che è stato sviluppato.

A titolo esemplificativo, in figura 3 è raffigurata un'area geografica coperta da un insieme di trasmettitori DVB-T SFN.

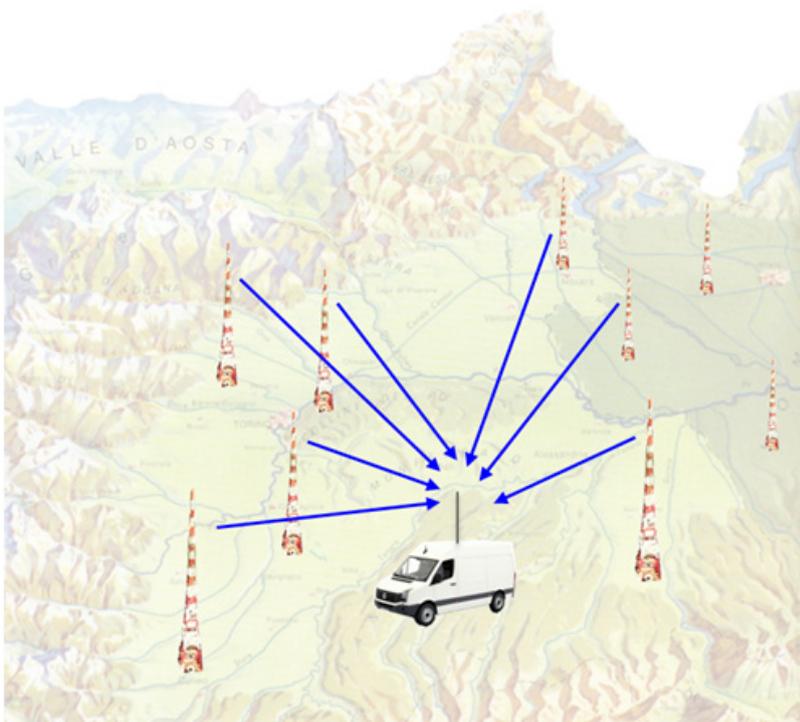


Fig. 3 - Misura in area di copertura

In un dato punto geografico desideriamo identificare ciascuna componente del segnale ricevuto, il quale è costituito dalla sovrapposizione dei segnali trasmessi da una molteplicità di trasmettitori. Ciascun trasmettitore inserisce il proprio codice identificativo nel campo *Cell-Id*, nei simboli S40-S47 delle portanti TPS. Come sopra accennato, in tali condizioni convivono due situazioni differenti:

- nelle celle che trasportano dati all'utente (video, audio, ecc), il segnale OFDM ricevuto è perfettamente coerente: non vi sono collisioni, garantendo così una perfetta ricezione; inoltre ciò è vero anche per le portanti TPS nei simboli in cui i bit sono identici, (in particolare S0-S39). La situazione è virtualmente indistinguibile da quella in cui vi sia *un solo trasmettitore* in servizio, e si sia in presenza di echi naturali (riflessioni del segnale da ostacoli di varia natura);
- nei simboli S40-S47^{Nota 2}, in cui vengono trasmessi bit diversi relativi ai codici identificativi di trasmettitori diversi, al contrario, il segnale OFDM ricevuto contiene collisioni: nelle posizioni delle portanti TPS di tali simboli si configura una nuova opportunità: utilizzare le tecniche MISO per disaggregare le varie componenti.

Nota 2 - E, in virtù della codifica differenziale, anche dei bit che seguono

Consideriamo il ricevitore di misura, posizionato nel punto geografico richiesto, che riceve i segnali dai trasmettitori in servizio su quell'area.

Il segnale, espresso nel dominio del tempo, $x_i(t)$ trasmesso dal generico (i -esimo) trasmettitore e il relativo segnale $y_i(t)$ ricevuto dal ricevitore di misura, possono essere rappresentati nel dominio della frequenza, applicando la trasformata di Fourier, rispettivamente come $X_i(\omega)$ ed $Y_i(\omega)$. Considerando che il canale di trasmissione su cui si propagano (dall' i -esimo trasmettitore al ricevitore di misura) i segnali $x_i(t)$ è affetto da propagazione per cammini multipli (*multipath fading*), esso può essere caratterizzato dalla *risposta all'impulso* $h_i(t)$ oppure dalla trasformata di Fourier $H_i(\omega)$ di quest'ultimo, detta anche *risposta in frequenza del canale*. Medesimo discorso vale per ciascuno degli N trasmettitori: in questo modo si definiscono N differenti "canali di trasmissione": quello tra trasmettitore 1 e ricevitore, quello tra trasmettitore 2 e ricevitore, e così via, ciascun canale essendo affetto da parametri suoi propri dovuti all'individuale propagazione per cammini multipli. Ogni "canale di trasmissione" avrà, in definitiva, ritardo, sfasamento e attenuazione differente^{Nota 3}.

Per l' i -esimo canale di trasmissione vale la relazione

$$Y_i(\omega) = X_i(\omega) \cdot H_i(\omega)$$

in cui le variabili X_i , Y_i e H_i sono grandezze complesse, e l'operatore "." denota il prodotto complesso.

Inoltre, dato che nel caso di modulazione OFDM si utilizza un'elaborazione a dati campionati, con una trasformata di Fourier discreta (FFT) nel demodulatore, e la sua inversa (IFFT) nel modulatore, le variabili sopra menzionate sono espresse utilizzando un primo indice n per la posizione del simbolo all'interno della trama, e un secondo indice k per la posizione in frequenza.

Quindi, per un segnale OFDM, la relazione precedente può essere riscritta come:

$$Y_i(n, k) = X_i(n, k) \cdot H_i(n, k)$$

Vale poi la sovrapposizione degli effetti, quindi il segnale totale $Y(n, k)$ ricevuto è la somma di tutti gli N segnali parziali $Y_i(n, k)$, con i compreso tra 1 e N .

In sintesi, e nello specifico, i segnali "totali" $Y(40, k)$... $Y(47, k)$, ricevuti dal ricevitore sulle celle TPS di indice k durante i simboli S40-S47 della trama del segnale OFDM, sono dovuti alla sovrapposizione di tutti i segnali relativi agli N trasmettitori della rete a singola frequenza che insistono sulla zona di ricezione del punto geografico. Ciascun contributo risulta moltiplicato per la propria risposta in frequenza del canale. In termini matematici risulta quindi:

$$\begin{cases} Y(40, k) = \sum_{i=1}^8 X_i(40, k) \cdot H_i(40, k) \\ Y(41, k) = \sum_{i=1}^8 X_i(41, k) \cdot H_i(41, k) \\ \dots\dots\dots \\ Y(48, k) = \sum_{i=1}^8 X_i(48, k) \cdot H_i(48, k) \end{cases}$$

Per ciascun valore di k le precedenti equazioni definiscono un sistema lineare, la cui forma compatta matriciale è

$$\underline{Y} = \underline{X} \cdot \underline{H}$$

in cui:

- \underline{Y} è un vettore di 8 elementi in cui un elemento Y_j rappresenta un segnale acquisito tramite il ricevitore e relativo al j -esimo simbolo (con $j=40..47$) della trama del segnale DVB-T;
- \underline{X} è una matrice di dimensioni 8×8 in cui un elemento $X_{j,i}$ rappresenta un contributo di segnale che il ricevitore riceverebbe se l' i -esimo

Nota 3 - In realtà ogni canale di trasmissione è in generale costituito da una molteplicità di "cammini", ciascuno caratterizzato dal suo proprio ritardo, sfasamento e attenuazione, come discusso nella sezione seguente.

trasmettitore fosse l'unico a trasmettere su un canale di trasmissione ideale il segnale relativo al j-esimo simbolo;

- \underline{H} , che è l'incognita, è un vettore di 8 elementi in cui l'elemento H_i rappresenta la risposta in frequenza del canale di trasmissione relativo all'i-esimo trasmettitore.

Il primo indice n del vettore $H_i(n,k)$ può essere eliminato sotto l'ipotesi che il canale non vari nel tempo (ricezione fissa).

Il sistema lineare $\underline{Y} = \underline{X} \cdot \underline{H}$ ammette univocamente soluzione, a patto che il determinante della matrice \underline{X} sia diverso da zero.

Una volta risolto il suddetto sistema lineare, si ottengono le risposte in frequenza di ciascuno degli N canali di trasmissione relativi a ciascun trasmettitore; il *modulo* di ciascuna risposta in frequenza rappresenta il livello, normalizzato rispetto al segnale più forte, a cui è ricevuto quel trasmettitore. Il risultato parziale di questo algoritmo è quindi una lista che riporta i livelli individuali di segnale ricevuto (con valori normalizzati a 1, o, meglio, in dB rispetto al segnale principale), ciascun livello individuale essendo associato al proprio trasmettitore per mezzo del rispettivo identificativo.

Il sistema lineare così come riportato sopra è di otto equazioni in otto incognite. Quindi risolvendo tale sistema si possono identificare, tramite il rispettivo identificativo, fino ad un massimo di otto trasmettitori che insistono sul punto geografico scelto.

Questo valore può essere esteso facendo partecipare al sistema di equazioni altri segnali ricevuti, in primis i simboli delle trame che veicolano gli altri otto bit dei sedici di cui è composto il codice identificativo di ogni trasmettitore; inoltre, o in alternativa, i simboli S48-S67 delle relative trame. In questo modo è possibile estendere il numero di equazioni e quindi di incognite.

Le operazioni descritte vengono eseguite sulle

sole portanti TPS, quindi sui soli valori dell'indice k che appartengono all'insieme di dette portanti. In linea di principio, dato che in un simbolo OFDM DVB-T tutte le portanti TPS sono modulate con il medesimo bit, sarebbe possibile utilizzare anche una sola portante, quindi un solo valore dell'indice k , per applicare il metodo. Tuttavia, come spiegato nella sezione seguente, è possibile ed utile ripetere il procedimento per più di un valore dell'indice k (in pratica: per tutte e 68 le posizioni in frequenza^{Nota 4}).

5.2 RICOSTRUZIONE DELLE RISPOSTE IMPULSIVE INDIVIDUALI: UNA MISSION IMPOSSIBLE?

Nella sezione precedente è stato affermato, semplificando, che *ogni canale di trasmissione ha un suo proprio ritardo, sfasamento e attenuazione*. In realtà ogni canale di trasmissione è in generale costituito da una *molteplicità* di "cammini", ciascuno dei quali caratterizzato dal suo proprio ritardo, sfasamento e attenuazione. In termini analitici:

$$h_i(t) = \sum_p a_p \cdot e^{j\varphi_p} \cdot \delta(t - \tau_p)$$

dove: a_p è l'attenuazione del cammino p -esimo, φ_p è il suo sfasamento, τ_p è il suo ritardo, e $\delta(t)$ è la funzione delta di Dirac.

Una prima importante implicazione è che, per ciascun canale di trasmissione (tratta da trasmettitore i -esimo a ricevitore) la risposta in frequenza H_i del canale non è costante nella frequenza (indice k). Di conseguenza, sebbene il segnale trasmesso $X_i(n,k)$ in un certo simbolo n da un certo trasmettitore i sia stato trasmesso (così come previsto dallo standard ETS300744) identico in tutte le posizioni in frequenza k , il relativo segnale ricevuto $Y_i(n,k)$ risulta diverso nelle varie posizioni in frequenza k , a causa della moltiplicazione per $H_i(k)$, non costante su k . E' questo il motivo per cui non è una scelta oculata quella di stimare i livelli dei trasmettitori basandosi su una sola TPS. Si è quindi deciso di calcolare la

Nota 4 - 68 nel caso 8k-FFT; 17 nel caso 2k-FFT

media su k dei risultati ottenuti su tutte le TPS: in questo modo si riesce ad avere la stima di livello al netto dell'effetto del *multipath* selettivo, cancellandone l'effetto. Inoltre aumenta la già alta robustezza della stima in presenza di rumore. Ovviamente il prezzo di ciò è il dover risolvere 68 sistemi lineari anziché uno solo.

I risultati ottenuti dai 68 sistemi lineari hanno poi un ulteriore prezioso contenuto informativo: essi sono le N risposte in frequenza $H_i(k)$. Purtroppo ciascuna di queste risposte in frequenza è incompleta: infatti non è nota su tutti i valori di frequenza k , ma solo su quelli appartenenti alle TPS. Si tratta dunque di un sottocampionamento in frequenza, non periodico. Cionondimeno, ciascuna di queste $H_i(k)$ contiene, sebbene sottocampionate, le informazioni del canale propagativo i -esimo, con i suoi peculiari cammini multipli.

Sarebbe quindi interessante e utile, al fine di approfondire l'analisi del segnale ricevuto, riuscire a ricostruire le risposte impulsive individuali, a partire dalle risposte in frequenza $H_i(k)$. Il passaggio dalla risposta in frequenza del canale, $H()$, alla risposta all'impulso, $h(t)$, è notoriamente ottenibile tramite antitrasformata di Fourier. Tuttavia nel nostro caso il numero delle portanti TPS, e dunque delle posizioni in frequenza k su cui è accessibile l'informazione della risposta in frequenza, è piuttosto esiguo: solo 68 portanti per il modo 8k, cioè circa l'1% delle 6817 portanti attive totali. Stimare le risposte in frequenza complete $H_i(k)$ per tutti i valori di k usando, ad esempio, un filtro interpolatore sarebbe possibile, ma arduo, dato il basso numero di campioni a disposizione. A prima vista potrebbe poi sembrare che il risultato sia pesantemente affetto da aliasing, rendendo la stima così ottenuta praticamente inutilizzabile. *Mission impossibile*, dunque?

A ben vedere, il carattere "pseudo casuale" della distribuzione delle portanti TPS rende la situazione molto diversa da quella dei classici problemi di elaborazione numerica dei segnali, in cui il campionamento è periodico (e il sottocampionamento produce aliasing). Non essendoci alcuna periodicità nella griglia "di campionamento" delle TPS, l'aliasing

è praticamente assente. E' possibile quindi effettuare una ricostruzione dei segnali a partire da un tale insieme di campioni (benché, comunque, molto limitato): questa proprietà è utilizzata nelle applicazioni cosiddette "*Compressive Sensing*": un tipico campo applicativo è quello del medical imaging (TAC, NMR, ecc) in cui è desiderabile ottenere immagini tomografiche a partire dal minor numero possibile di acquisizioni^{Nota 5}.

Per ricostruire le risposte impulsive individuali è stato sviluppato un metodo iterativo in cui partendo da ciascuna risposta in frequenza $H_i(k)$ ne vengono progressivamente estratte e ricostruite, tramite anti-trasformata di Fourier, le componenti temporali principali. Ogni componente temporale viene mimata da una "funzione base", che può essere la Delta di Dirac, la funzione Sinc, una funzione porta di dimensione a piacere, e così via. A seguito dell'estrazione progressiva delle componenti temporali principali, si viene a delineare la risposta all'impulso individuale cercata. Agendo su alcuni parametri, come il numero di iterazioni, il tipo di funzione base, e la dimensione della funzione base, è possibile operare un compromesso tra il riuscire ad estrarre componenti di basso livello, e la comparsa di artefatti. Questi ultimi sono facilmente individuabili per confronto diretto con la risposta all'impulso globale, la quale, essendo calcolata a partire da un consistente set di campioni, non risente di questo problema.

Nota 5 - Lo scopo è ridurre l'esposizione del paziente, e ridurre il tempo in cui è richiesto che il paziente stia immobile.

In figura 4 è riassunto il procedimento. Nei simboli che veicolano le TPS contenenti il *Cell-id*, i vettori complessi vengono acquisiti, in ciascuna delle 68 posizioni in frequenza relative alle TPS. Per ciascuna di tali posizioni in frequenza si raccolgono così 8 o 16 variabili complesse di ingresso, e si risolve il relativo sistema lineare. Le soluzioni dei sistemi lineari costituiscono le risposte in frequenza individuali per ogni "canale", ma sotto campionate. Da queste, per ulteriore processamento:

- 1) mediando il modulo dei campioni in frequenza, otteniamo i *livelli individuali dei segnali provenienti da ciascun trasmettitore*;
- 2) tramite un procedimento iterativo di IFFT ed estrazione di componenti, otteniamo una *stima della risposta impulsiva individuale dei segnali provenienti da ciascun trasmettitore*

Il sistema di identificazione che utilizza il metodo sopra descritto è costituito da un *front-end* in grado di ricevere il segnale dall'antenna, e una sezione di elaborazione e presentazione dei risultati. Il *front-end* può essere un qualunque ricevitore DVB-T che sia in grado di ricevere, con adeguate prestazioni, il segnale alla frequenza desiderata, acquisire in tempo reale un brano del segnale (super trama DVB-T), elaborare, anche in differita, il segnale OFDM e fornire i vettori complessi di banda base relativi alle TPS dei simboli della super-trama. E' anche opportuno che il front-end fornisca la risposta all'impulso globale. Tutti i ricevitori di misura DVB-T eseguono questo tipo di stima. In alternativa, può essere utilizzata la risposta in frequenza del canale.

La sezione di elaborazione/presentazione non ha particolari requisiti di velocità, e può opportunamente essere implementata in software.

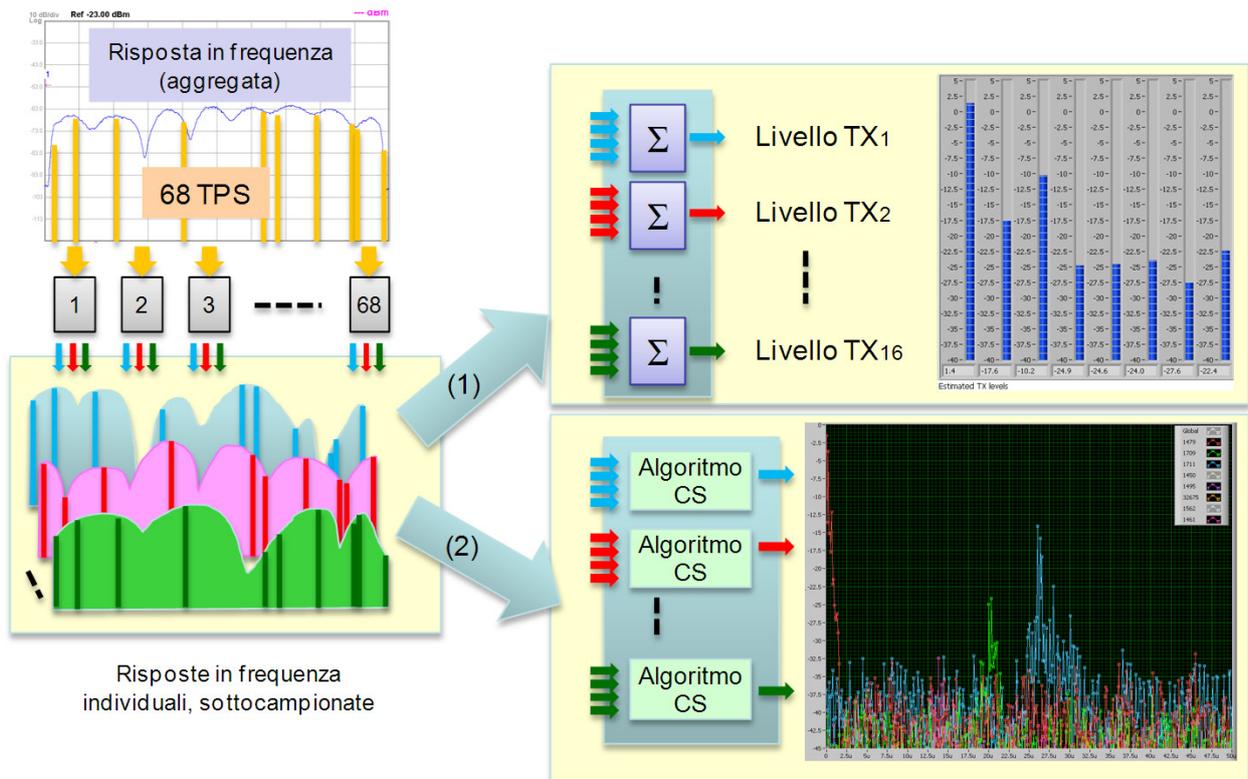


Fig. 4 - (Sinistra) Utilizzando la tecnica MISO (68 sistemi di equazioni lineari) viene disaggregata la Risposta in Frequenza globale in un set di Risposte in Frequenza individuali (8 oppure 16). (Destra, 1) mediando in frequenza ogni Risposta in Frequenza individuale si ottengono i livelli normalizzati di ciascun trasmettitore. (Destra, 2) separazione e ricostruzione delle risposte impulsive individuali

6. IL DIMOSTRATORE SFN-SCOPE

Presso Rai-CRIT è stato implementato in un dimostratore (figura 5) che utilizza come *front-end* un analizzatore di segnali vettoriali Agilent MXA N9020A con opzione DVB-T. I vettori e la risposta all'impulso globale vengono trasferiti tramite interfaccia LAN ad un personal computer su cui è stata realizzata in software la sezione di elaborazione e presentazione dei risultati.

Il software *SFN-scope* è stato sviluppato in ambiente LabView e permette di:

- Acquisire i vettori complessi e la risposta all'impulso globale dal front-end
- Salvare/caricare da disco vettori complessi e risposta all'impulso globale
- Editare la matrice dei trasmettitori in servizio sull'area, attingendo da un database di codici dei siti (fornita da RaiWay)



- Calcolare livelli e risposte all'impulso individuali, presentando i risultati in forma grafica. E' possibile scegliere il numero di iterazioni per l'algoritmo.
- Inoltre è presente una funzione di ricerca automatica del nominativo del trasmettitore, che, entro certi limiti, permette di individuare un trasmettitore non inserito nella matrice.

6.1 TEST DI LABORATORIO

Il dimostratore *SFN-scope* è stato inizialmente collaudato utilizzando un segnale DVB-T SFN sintetico, ottenuto sommando otto diversi segnali DVB-T in banda base, ciascuno con ritardo, modulo e fase arbitrari, e relativi cammini multipli. Verificato il corretto funzionamento con segnale "simulato", il sistema è stato provato in laboratorio, con un segnale a radiofrequenza ottenuto su banco combinando due modulatori DVB-T ciascuno con il proprio *Cell-id*.

Variando il livello relativo, il ritardo e l'offset di frequenza del secondo modulatore è stato possibile riprodurre in modo controllato semplici configurazioni di rete SFN a due trasmettitori.

Fig. 5 - Struttura del dimostratore

A titolo di esempio, in figura 6 è riportato il risultato della configurazione in cui il primo trasmettente è configurato con *Cell-id*=1479 (Torino Eremo), e il secondo con *Cell-id*=1458 (Moncalieri). Il secondo segnale è regolato per un livello di -23dB, ritardo 10µs, e offset di frequenza 1Hz rispetto al primo.

Come si può vedere, la risposta all'impulso globale ("Global", curva bianca) ottenuta direttamente dall'analizzatore Agilent MXA indica la presenza di un picco principale (0µs, 0dB), e un secondo picco a 10µs, livello -23dB relativo al primo segnale. La matrice dei trasmettitori è stata compilata con una lista di *Cell-id* tra cui i due che sappiamo essere presenti: Torino Eremo e Moncalieri.

Il sistema *SFN-scope* evidenzia correttamente la presenza di Torino Eremo (curva rossa) a 0µs, 0dB e Moncalieri (curva verde) a 10µs, -23dB.

La stima ottenuta in questo test è praticamente ottimale, coincide in modo perfetto con la misura ottenuta dall'analizzatore MXA, che è uno strumento di elevate prestazioni. Analoghe prove hanno

permesso di constatare che il sistema è in grado di evidenziare e distinguere segnali con ritardi fino a due volte l'intervallo di guardia, a prezzo di una certa riduzione del margine sul rumore.

Per contro, si è constatato che in presenza di fluttuazioni di frequenza reciproche tra i trasmettitori, il responso del sistema può degradare. Questo è facilmente spiegabile per il fatto che i "canali di trasmissione" non sono più stazionari: l'ipotesi che il canale non vari nel tempo (ricezione fissa), per cui il primo indice n del vettore $H_i(n,k)$ possa essere eliminato non è più vera. Il risultato è una sorta di interferenza tra le varie risposte all'impulso (cross-talk). Il criterio di stazionarietà, ai nostri fini, è che l'offset di frequenza del i -esimo trasmettitore sia limitato in modo tale da accumulare uno sfasamento trascurabile nel lasso di tempo in cui vengono raccolti i simboli OFDM relativi alle TPS da utilizzare (es. S40-S47, per il sistema lineare 8x8). L'ordine di grandezza che ne risulta è di qualche Hz, compatibile con i valori tipici di una rete SFN.

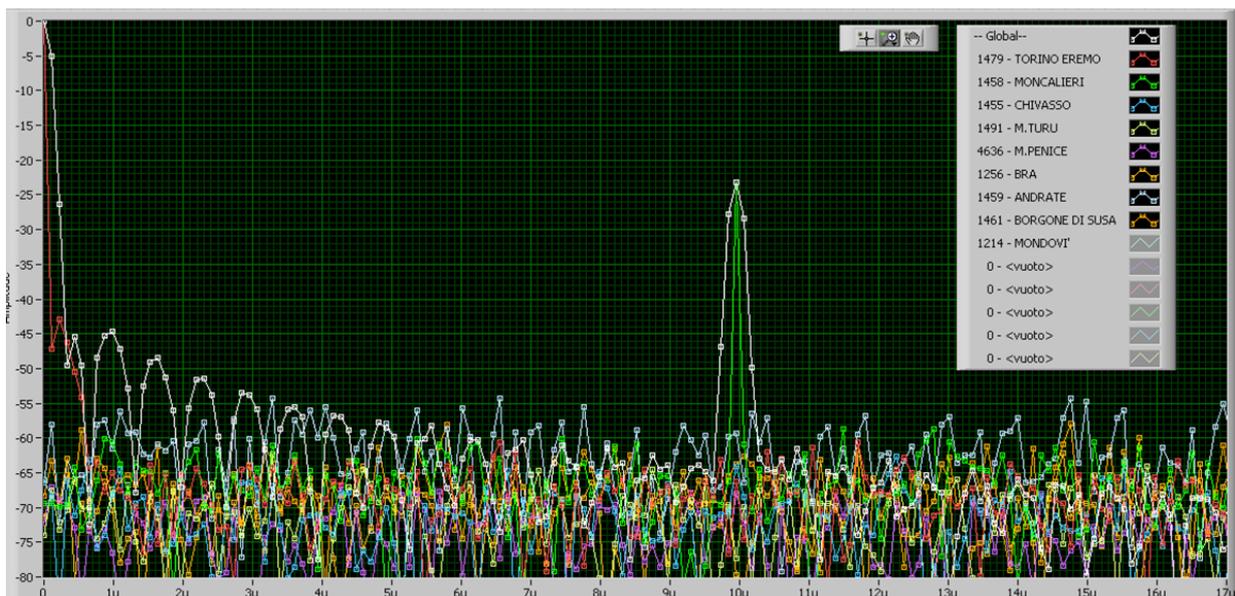
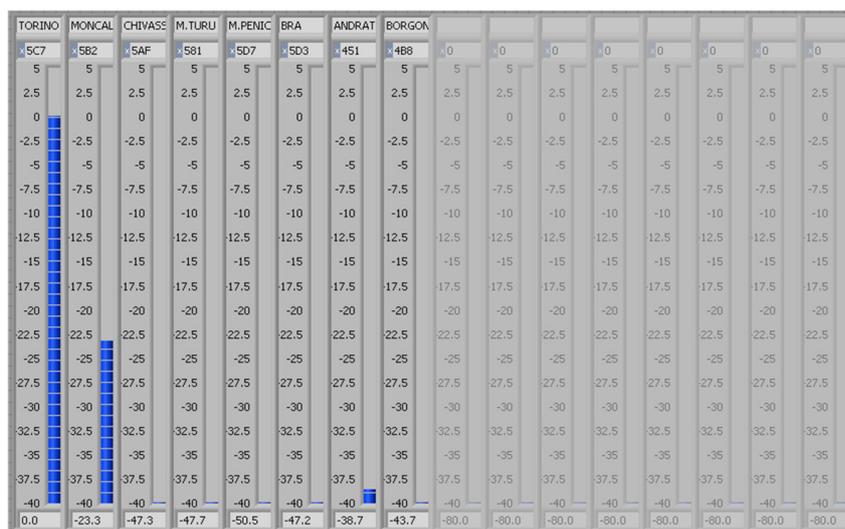


Fig. 6 - Primo test di misura

Fig. 7 - Livelli stimati relativi al primo test di misura



Nella prova di cui sopra, i livelli stimati sono quelli riportati in figura 7, in ottimo accordo con i risultati precedenti.

In un secondo test i due modulatori sono stati configurati con identificativi *non* appartenenti alla lista della matrice: *Cell-id=0*, e il secondo con *Cell-id=4179*. Il secondo segnale è regolato per un livello di -5dB, ritardo 230µs, offset di frequenza 0Hz. Il risultato è visibile in figura 8.

Come si può constatare, nella posizione del picco principale (0µs, 0dB) è presente un fortissimo cross-talk da parte di tutti i segnali presenti: tutti i *Cell-id* risulterebbero presenti.

Questo test è la riprova che è *essenziale* che nella matrice compaiano *tutti* i *Cell-id* dei segnali ricevuti. Per contro, la presenza nella matrice di *Cell-id* estranei non altera il responso, fatta salva la condizione di indipendenza lineare dei vettori modulati.

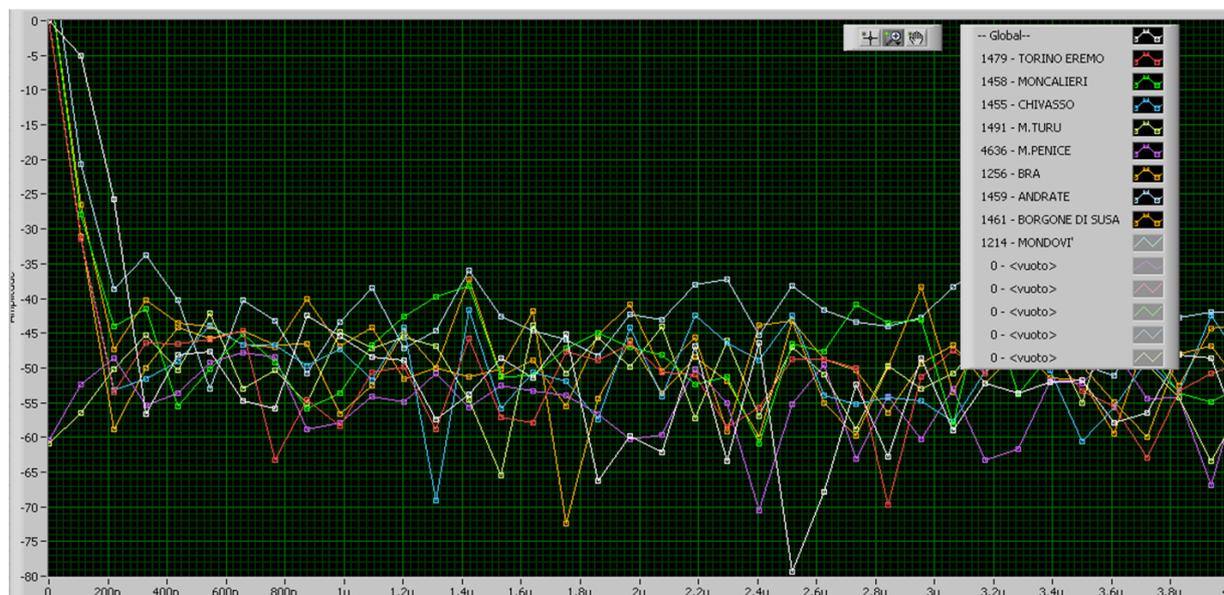


Fig. 8 - Secondo test di misura

6.2 TEST CON SEGNALE RICEVUTO VIA ETERE

Il dimostratore *SFN-scope* è stato quindi collaudato ricevendo il segnale DVB-T SFN presente in area, proveniente da un'antenna poco direttiva posizionata sul terrazzo del Centro Ricerche (zona Torino sud), con puntamento NE. Il canale sintonizzato è il ch.30 UHF (Rai, Mux2). La matrice è stata compilata con una lista di trasmettitori potenzialmente ricevibili in zona. In figura 9 è visibile il risultato fornito da *SFN-scope*, nell'intervallo di ritardi 0-50 μ s.

Il tracciato globale, ottenuto direttamente dall'analizzatore MXA (curva bianca) evidenzia:

- segnale principale a 0 μ s,
- picco a 1 μ s, -16dB
- altri picchi a 3-9 μ s, -35 ... -45dB
- picco a 30 μ s, -16dB
- altri picchi a 30.5-40 μ s, -17 ... -45dB

Viene stimato bene il segnale dal trasmettitore principale, che è infatti quello di Torino Eremo (curva rossa) e il suo eco naturale a 1 μ s.

Vengono riconosciuti il trasmettitore di Moncalieri e i suoi echi naturali (30 μ s e seguenti, traccia verde).

MXA evidenzia un ulteriore segnale (due picchi) a 113.5 μ s, -35dB (in figura 10 uno zoom tra 105 μ s e 125 μ s con la traccia di Eremo spenta). Questo segnale viene riconosciuto correttamente come quello di Chivasso (traccia blu).

MXA evidenzia altri segnali a 128 μ s circa, -23dB (in figura 11 uno zoom tra 120 μ s e 150 μ s con la traccia di Moncalieri anch'essa spenta). Si rileva che tale gruppo di picchi sono attribuibili alla traccia gialla (Monte Turu) con i suoi echi naturali.

Effettuando uno zoom tra 210 μ s e 240 μ s (figura 12) si osserva che MXA evidenzia altri segnali a 214 μ s, -51dB e 223 μ s circa, -43dB. Il segnale a 214 μ s (teoricamente Penice) è a un livello estremamente basso, -51dB, e non viene riconosciuto; la traccia Borgone è stata spenta perché qui ne risultava un crosstalk. Si individua che il gruppo di picchi a 223 μ s è (correttamente) attribuito a Bra (traccia arancione)

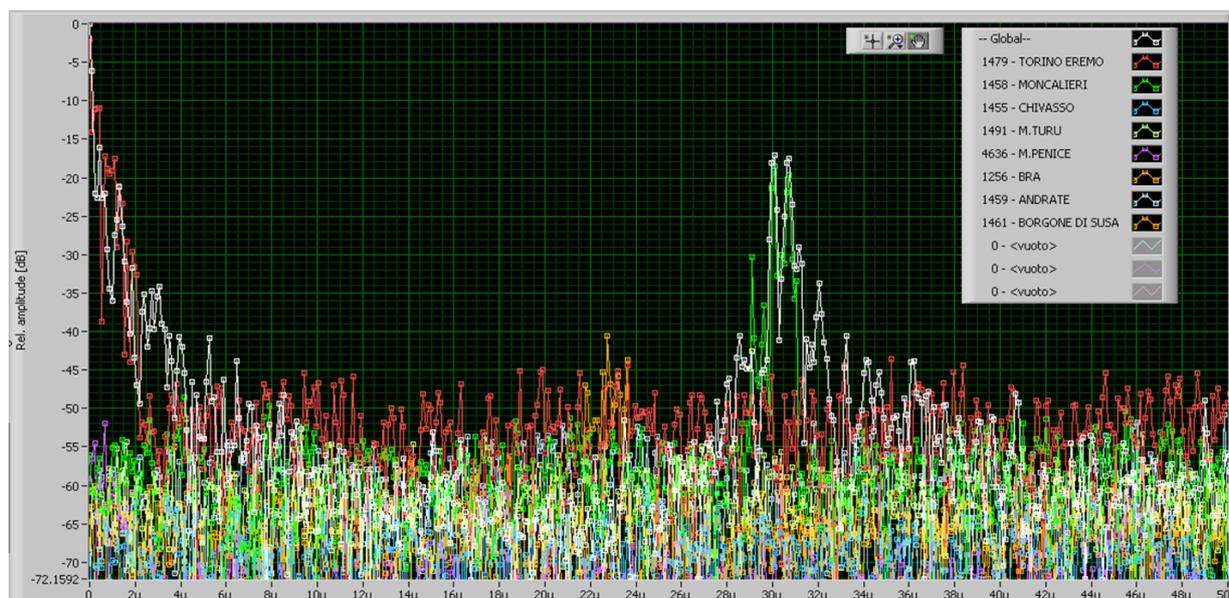


Fig. 9 - Tracciato 0 μ s - 50 μ s

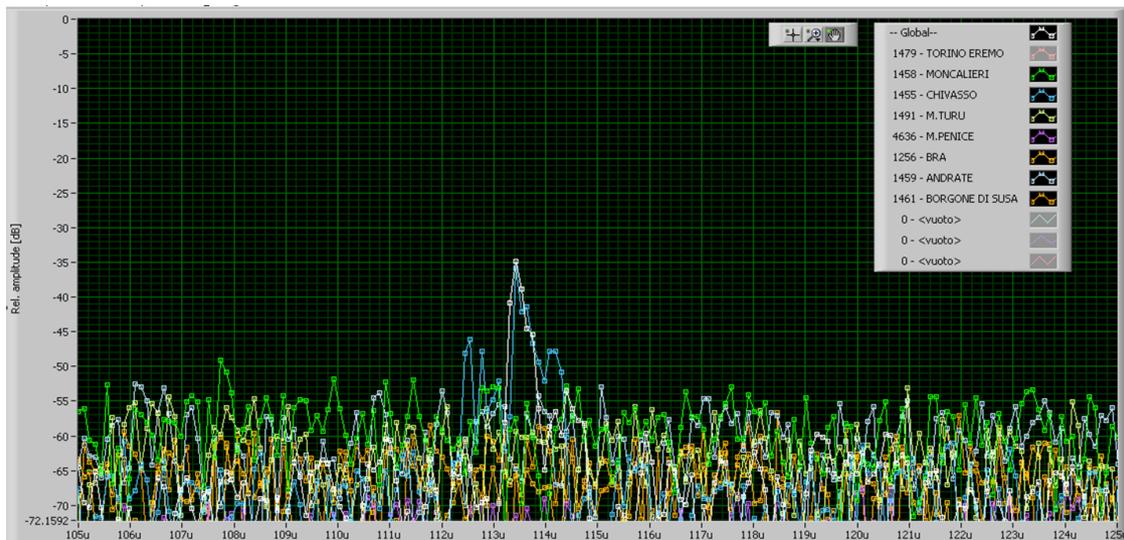


Fig. 10 - Zoom 105 μ s - 125 μ s

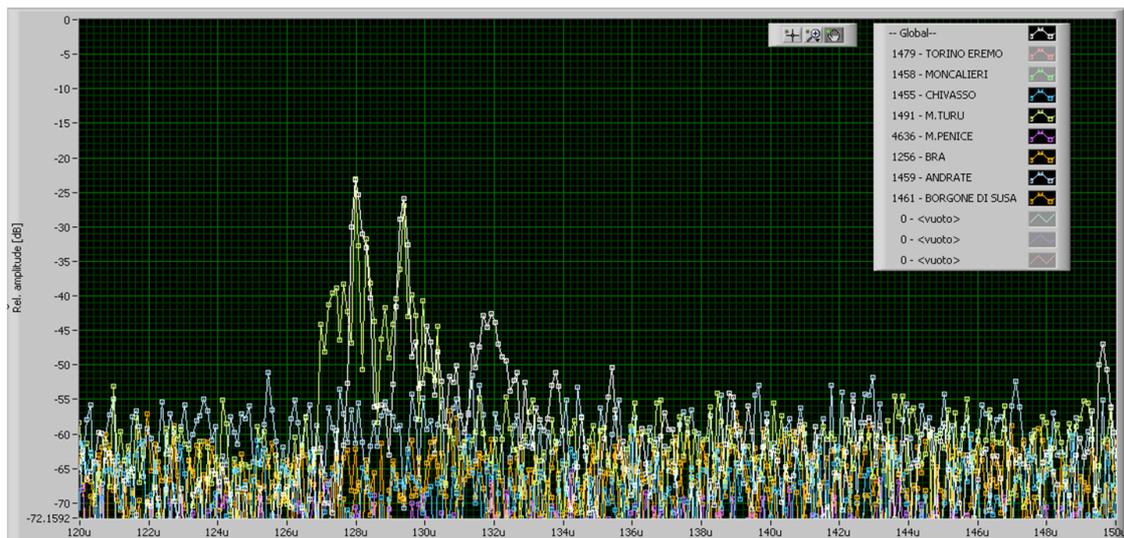


Fig. 11 - Zoom 120 μ s - 150 μ s

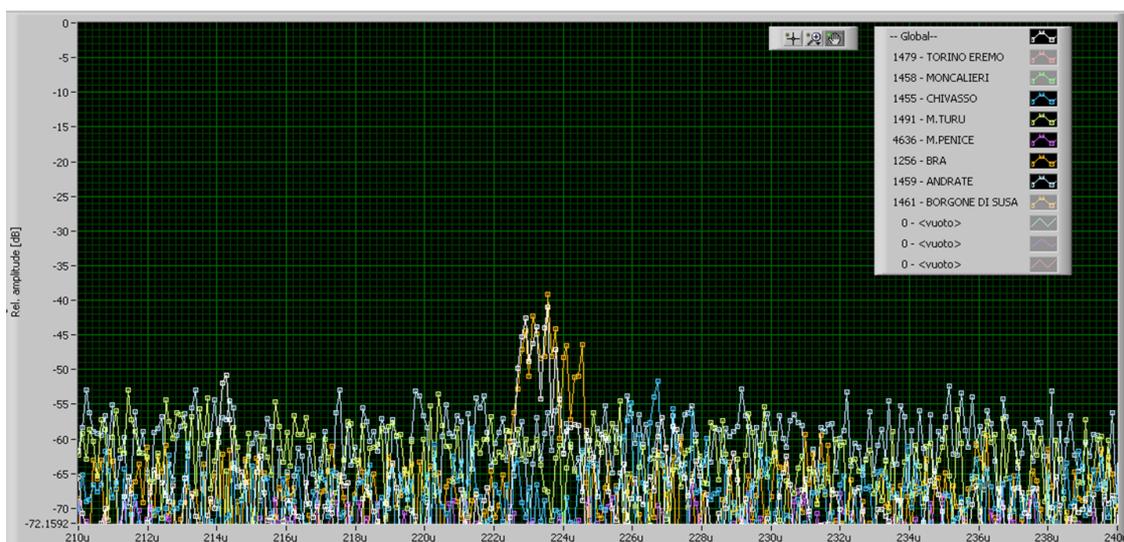


Fig. 12- Zoom 210 μ s - 240 μ s

7. PRESTAZIONI

Il sistema *SFN-Scope* ha dimostrato una sostanziale buona performance, per segnali il cui livello sia al di sopra di una certa soglia il cui livello potrebbe essere individuato tra -40dB e -50dB rispetto al segnale principale. La tabella 3 riassume i risultati; la colonna azzurra riporta la previsione dei segnali e ritardi che potrebbero essere ricevibili nel punto geografico di Rai-CRIT, secondo il software di previsione di copertura di RaiWay.

Per quanto riguarda i tempi di elaborazione, il dimostratore *SFN-Scope* ha dimostrato ottime prestazioni: in esecuzione su un PC con CPU QuadCore a 2GHz, il responso richiede circa un decimo di secondo, quindi è possibile usare PC meno performanti. La velocità del front-end invece può fare la differenza: lo strumento MXA, che esegue la demodulazione OFDM via software, richiede circa 20 secondi per processare una trama DVB-T. Dato che per elaborare un *Cell-id* completo (16bit) servono una trama pari e una dispari, il tempo netto richiesto con l'MXA è

di una quarantina di secondi. Ovviamente l'MXA esegue molte operazioni di demodulazione e equalizzazione che non sarebbero necessarie, quindi questi tempi, benché accettabili, potrebbero essere ridotti. Un front-end hardware potrebbe permettere tempi di pochi decimi di secondo. Ciò è fattibile, ad esempio, integrando l'algoritmo in uno degli strumenti di misura DVB-T attualmente disponibili in commercio.

SFN-scope ha dimostrato nelle prove su banco di poter riconoscere segnali ritardati fino a due volte l'intervallo di guardia, sempreché di livello sufficiente.

Una criticità del sistema è la coerenza interna del segnale SFN: se uno o più trasmettitori della rete sono affetti da eccessivo offset di frequenza (anche a causa di un'avaria della sincronizzazione GPS), il segnale SFN ha un tempo di coerenza ridotto, e può aumentare il cross-talk tra i segnali. In questo caso è opportuno limitare la matrice a soli otto trasmettitori, affinché l'algoritmo lavori su una sola trama DVB-T.

Nome sito	Cell_id	Previsione (RaiWay)	SFN-scope		
		Ritardo [μs]	Ritardo, [μs]	Livello [dB]	Cell_id individuato?
Eremo	1479	0	0	0	si
Moncalieri	1458	32.5	30.0	-17	si
Chivasso	1455	115.5	113.5	-35	si
MonteTuru	1491	128.6	128.0	-23	si
Penice	4636	214.5	214.0	-51	no
Bra	1256	225	223	-41	si
Andrate	1459	151.9	--	--	
Borgone	1461	167.8	--	--	
Mondovi	1214	400	--	--	

Tab. 3 - Tabella riassuntiva

8. CONCLUSIONI

Il metodo proposto, che permette di identificare la provenienza dei segnali generati dai diversi trasmettitori di una rete isofrequenziale DVB-T è di grande utilità specialmente in paesi come l'Italia dove le reti SFN DVB-T sono di estensione nazionale. Il metodo è implementabile all'interno dei ricevitori di misura; i test eseguiti sul dimostratore *SFN-Scope* hanno dimostrato la validità del metodo, ed ottime prestazioni.

La recente circolare del Ministero dello Sviluppo Economico [5] con la richiesta agli operatori di rete DVB-T SFN nazionali di inserire i codici *Cell-id* nei relativi impianti è un passo che, suggerendo la scelta RaiWay dell'adozione dei codici *Cell-id* sui propri impianti, spiana la strada all'utilizzo del sistema *SFN-Scope*.

Il metodo è stato brevettato dal Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica RAI [6, 7], e ha costituito parte del contributo italiano (RaiWay) allo Study Group ITU [8].

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare i colleghi del Centro Ricerche Vittoria Mignone, per il prezioso aiuto sulla teoria dei sistemi MIMO e l'incoraggiamento, Andrea Bertella e Mirto Tabone per l'assistenza alla preparazione dei test, Paola Sunna per le illuminanti spiegazioni sui sistemi *compressive sensing*, e inoltre Giuseppe Savoia, *Signal Analysis and Generation Specialist* della Agilent, per l'assistenza nell'interfacciamento dell'analizzatore MXA.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ETSI EN 300 744 V1.6.1 (2009-01), [*Digital Video Broadcasting \(DVB\); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*](#)
- [2] ETSI TS 101 191 V1.4.1 (2004-06), [*Digital Video Broadcasting \(DVB\); DVB mega-frame for Single Frequency*](#)

[*Network \(SFN\) synchronization*](#)

- [3] ETSI EN 302 304 V1.1.1 (2004-11), [*Digital Video Broadcasting \(DVB\); Transmission System for Handheld Terminals \(DVB-H\)*](#)
- [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/Mimo>
- [5] *Richiesta inserimento Cell-Id*, Circolare MiSE 14/3/2013
- [6] *Metodo e ricevitore per l'identificazione di trasmettitori di segnali radiotelevisivi digitali terrestri*. Brevetto industriale TO2011A000538.
- [7] *Metodo per la stima di una risposta all'impulso di un canale relativo a singoli trasmettitori di segnali radiotelevisivi digitali terrestri in una rete a singola frequenza, e relativo apparato*. Brevetto industriale TO2013A000342.
- [8] *Transmitters identification in a DVB-T SFN: the Italian experience*, Contributo RaiWay all'ITU Radiocommunication Study Group 1C/66-E