

Ricevitori GPS per reti SFN

Analisi della stabilità a lungo termine e funzionamento in condizioni di hold over, con verifica del recupero della fase del 10 MHz

Andrea Bertella, Bruno Sacco, Mirto Tabone
Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

Carlo Confalonieri e Aldo Scotti
RaiWay - Innovazione Sperimentazione Certificazione Radioelettrica

Sommario

L'obiettivo dell'indagine illustrata in questo articolo è quello di definire un metodo per la verifica del comportamento dei ricevitori GPS utilizzati nelle reti SFN, sia nelle condizioni di funzionamento nominali che in caso di eventi, singoli o ripetuti, che portino a condizioni di Hold Over con particolare attenzione al recupero della fase del riferimento di frequenza a 10 MHz. Per ottenere questo risultato sono state necessarie parecchie settimane di prove su numerosi apparati GPS e lo sviluppo di un opportuno hardware per verificare eventuali anomalie che intercorrono durante il funzionamento in di differenti condizioni operative.

1. INTRODUZIONE

Come noto, una rete di trasmettitori DVB-T [1] operante in modalità a singola frequenza (SFN), richiede la disponibilità di un riferimento comune di tempo e frequenza sia nel punto di generazione del segnale (Head-End) che in ogni punto di emissione (trasmettitori) [2], [3], [4].

Questo in ragione del fatto che ciascun trasmettitore deve emettere il medesimo segnale, generato dalla modulazione digitale del medesimo bit, sulla stessa frequenza nel medesimo istante di tempo¹. Pur essendo possibile utilizzare qualunque riferimento di tempo e frequenza, uno comunemente disponibile in qualunque punto della rete è quello fornito dal sistema GPS o da sistemi similari. I ricevitori professionali specializzati, chiamati "GPS Timing Receivers" o "GPS-Disciplined Oscillator (GPSDO)", forniscono il segnale di tempo, un impulso al secondo (1 pps), ed il riferimento di frequenza a 10 MHz ottenuto da un oscil-

¹ Alcune tolleranze in tempo e frequenza sono consentite dalla tecnica stessa dell'OFDM: per esempio la diversa distanza geografica dei trasmettitori dal punto di ricezione, che darebbe come risultato un differente tempo di arrivo dei segnali al ricevitore, è assorbita dalla presenza dell'intervallo di guardia nel segnale OFDM.

latore interno al quarzo² controllato attraverso un algoritmo di riferimento al tempo del sistema GPS. I ricevitori GPS di questo tipo sono utilizzati in ogni sito trasmittente di una rete DVB-T operante in SFN.

Il flusso Transport Stream contenente i servizi audio, video e dati generato all'Head-End, viene "ricadenzato" dall SFN Adapter al bit-rate definito dal tipo di modulazione OFDM scelta per la trasmissione. Il segnale di clock che determina tale bit-rate è derivato dal 10 MHz locale (ad esempio, il ricevitore GPS locale).

Lo stream così generato è distribuito a ciascun sito trasmittente dove è presente un 10 MHz di riferimento locale, ricavato da un ricevitore GPS analogo a quello dell'Head-End. Di conseguenza il clock della sorgente ed il clock dei trasmettitori sono nominalmente gli stessi: sul medio/lungo termine hanno lo stesso valore in quanto riferiti alla medesima sorgente. Nel breve termine, invece, le fluttuazioni del 10 MHz all'Head-End ai vari siti trasmittenti possono non essere trascurabili: tali differenze, come ora vedremo, possono avere un impatto sul funzionamento dei trasmettitori.

In ciascun trasmettitore di una rete SFN è presente un buffer. La principale funzione di tale buffer è quella di implementare un ritardo programmabile tale da permettere al trasmettitore di emettere il segnale all'istante richiesto. Nel dimensionamento del buffer si deve tenere in considerazione il ritardo massimo introdotto dalla rete di distribuzione. Tale ritardo, nel caso DVB-T, non può comunque essere superiore al secondo in modo tale da evitare, senza l'introduzione di ulteriori complicazioni nel meccanismo di sincronizzazione come ad esempio è stato fatto per lo standard DVB-T2 [5], [6] ove il ritardo può anche essere superiore, ambiguità legate al riferimento 1 pps. Un secondo, ma importantissimo scopo di tale buffer è quello di assorbire le fluttuazioni a breve termine del clock di sincronismo tra Head-End e siti trasmittenti.

Dovendo il buffer realizzare fino ad un secondo di ritardo, la memoria richiesta è alquanto grande.

² Sono anche disponibili ricevitori GPS commerciali al rubidio

L'effettiva modalità di realizzazione di tale buffer dipende dalle strategie progettuali dei costruttori. Una possibilità è quella di avere due registri FIFO in cascata: il primo, asincrono, è usato per assorbire le fluttuazioni del clock tra sorgente e punto di emissione, mentre il secondo serve per realizzare il ritardo complementare a quello di rete, e deve dunque essere sufficientemente grande (nel caso DVB-T, 1 secondo). Nel caso in cui il primo buffer FIFO sia troppo piccolo per assorbire le fluttuazioni presenti, si può andare incontro a condizioni di eccessivo riempimento nel caso in cui la scrittura avvenga troppo rapidamente rispetto alla lettura (overflow) o, viceversa, allo svuotamento della memoria (under flow). In tali casi, si ha una perdita di dati ed una risincronizzazione del trasmettitore **con conseguente interruzione del servizio di alcuni secondi.**

2. L'INDAGINE SULLE FLUTTUAZIONI NEI RICEVITORI GPS

In numerose campagne di misura effettuate nei periodi successivi allo switch-off in diverse regioni italiane si è evidenziato che le risincronizzazioni, con conseguente perdita del servizio, si verificano piuttosto frequentemente³. Sospettando che l'entità delle fluttuazioni del riferimento ottenuto dal GPS possa procurare problemi al buffer, si è effettuata un'accurata indagine, con l'obiettivo di verificare l'entità reale delle fluttuazioni dovute ai ricevitori GPS presenti sul mercato e se possibile di trovare opportune contromisure. Per indagare sul comportamento dei buffer sarebbe stato necessario avere a disposizione in laboratorio una serie di modulatori riportanti l'indicazione della percentuale di occupazione del buffer stesso. Purtroppo tale indicazione di solito non è disponibile nei modulatori: si è quindi deciso di realizzare uno speciale analizzatore, che abbiamo chiamato *Timing Test Analyzer* (TTA) basato su FPGA (si veda il paragrafo successivo), in grado di valutare le fluttuazioni di segnali a 10 MHz rispetto ad un riferimento campione.

³ A seconda della zona e dei trasmettitori interessati il numero di interruzioni poteva variare da alcune al giorno ad una ogni 2-3 giorni.

Il TTA consente di misurare fino a 7 segnali tempo/frequenza (ad esempio GPS) in contemporanea, rispetto ad un segnale di riferimento. In tale modo risulta semplice confrontare contemporaneamente il comportamento di più apparati in presenza di eventi perturbanti che si possono verificare in un sito trasmittente come, ad esempio, alti livelli di radiofrequenza, interferenze, emissioni spurie, parziale oscuramento della costellazione satellitare, ecc. Come ulteriore risultato di questo lavoro si è deciso di sviluppare una procedura per validare i ricevitori GPS prima del loro acquisto o della loro messa in servizio.

3. IL SISTEMA DI ANALISI

Il sistema TTA nasce dall'esigenza di emulare il comportamento di un buffer FIFO per ottenere un'indicazione in tempo reale della percentuale di riempimento⁴.

Un registro FIFO può essere visto come una memoria dual-port, dove la porta 1 è scritta con il clock del dato in ingresso e la porta 2 è letta con il clock del dato in uscita. Un contatore binario, che incrementa ad ogni operazione di scrittura (clock di scrittura) costituisce il generatore di indirizzi di scrittura per la porta 1; un analogo contatore binario, incrementato ad ogni operazione di lettura, sul relativo clock, costituisce il generatore di indirizzi di lettura per la porta 2. Se i due clock hanno una frequenza uguale, la differenza tra contatore di scrittura e quello di lettura è costante. Se ci sono fluttuazioni reciproche rapide, ma, almeno a medio termine, le due frequenze sono mediamente uguali, la differenza di cui sopra è (mediamente) costante. Diversamente uno dei due contatori accumula un vantaggio (o svantaggio) con conseguente progressivo riempimento o svuotamento del buffer che può determinare condizioni di overflow o underflow, e perdita di dati.

Per emulare il comportamento di un tale buffer, al solo fine di monitorare il livello di riempimento,

⁴ A tutti gli effetti, comunque, il TTA evidenzia l'andamento temporale della fase di ciascun segnale, accumulata da un dato inizio dei tempi.

non è necessaria la memoria, ma solamente i due contatori, e un blocco sottrattore che calcoli in tempo reale la differenza dei due valori. Si è in realtà adottata una ulteriore semplificazione: è stato utilizzato un singolo contatore del tipo up/down, pilotato da una logica di controllo che gestisce il verso del conteggio ed eventi concomitanti⁵.

Il contatore up/down viene resettato all'inizio del test ed il valore accumulato assume il significato di *buffer margin loss*. Infatti, se in una normale utilizzazione del buffer questo viene caricato al 50% per avere uguale margine iniziale nei due sensi, il margine assume valori positivi o negativi a seconda che il clock del dispositivo in test sia più veloce o più lento del clock di riferimento. Utilizzando un segnale a 10 MHz la variabile margine sarà espressa in cicli a tale frequenza, ovvero in passi da 100 ns. Un altro significato fisico del valore del conteggio è la differenza di fase tra segnale e riferimento, accumulata dall'inizio del conteggio (reset del contatore).

Operativamente, nella FPGA ciascuno dei 7 ingressi dei segnali analogici a 10MHz provenienti dai dispositivi in test viene digitalizzato tramite sovra campionamento e filtrato digitalmente tramite filtro FIR per rimuovere l'eventuale rumore presente. Quindi viene inviato ad un rivelatore a soglia il cui impulso alimenta l'ingresso 1 di ciascun contatore up/down prima menzionato. Analogamente l'ingresso comune viene utilizzato per il clock di riferimento, che subisce il medesimo trattamento di filtraggio di cui sopra, ed alimenta l'ingresso 2 di tutti i contatori di up/down dei 7 ingressi di prova.

Un sistema di verifica di violazione della temporizzazione⁶ (perdita di colpi di clock per simultaneità di arrivo dei segnali di lettura e scrittura) è stato implementato per ciascun canale.

Il valore di ciascun contatore, rappresentante il

⁵ In caso di simultaneità del Clock#1 (incremento del contatore) e del Clock#2 (decremento) il valore del contatore non viene modificato. Il contatore è stato definito come *signed fixed-point variable* in modo tale da poter assumere anche valori negativi.

⁶ Durante i test effettuati non sono state rilevate violazioni di timing

buffer margin loss istantaneo, viene letto ad una cadenza desiderata, ad esempio una volta al secondo, ed il dato viene memorizzato in un file di log su di un computer esterno, assieme al riferimento temporale (data e ora) di tale lettura.

Come sistema di riferimento è bene utilizzare una macchina di elevata stabilità e precisione, come ad esempio un oscillatore al Rubidio o al Cesio, in funzionamento libero (*free run*), che sia riferita ad un campione primario e sulla quale sia stata valutata la deriva, sul breve e sul lungo periodo, espressa in parti al secondo. Tale valore di deriva viene utilizzato per compensare i risultati e renderli più facilmente leggibili.

I risultati delle sessioni di test vengono infine elaborati tramite un programma scritto in LabView, per filtrare i dati se richiesto, per compensare, quando necessario, la deriva lineare e per visualizzare la fluttuazione del margine nel tempo.

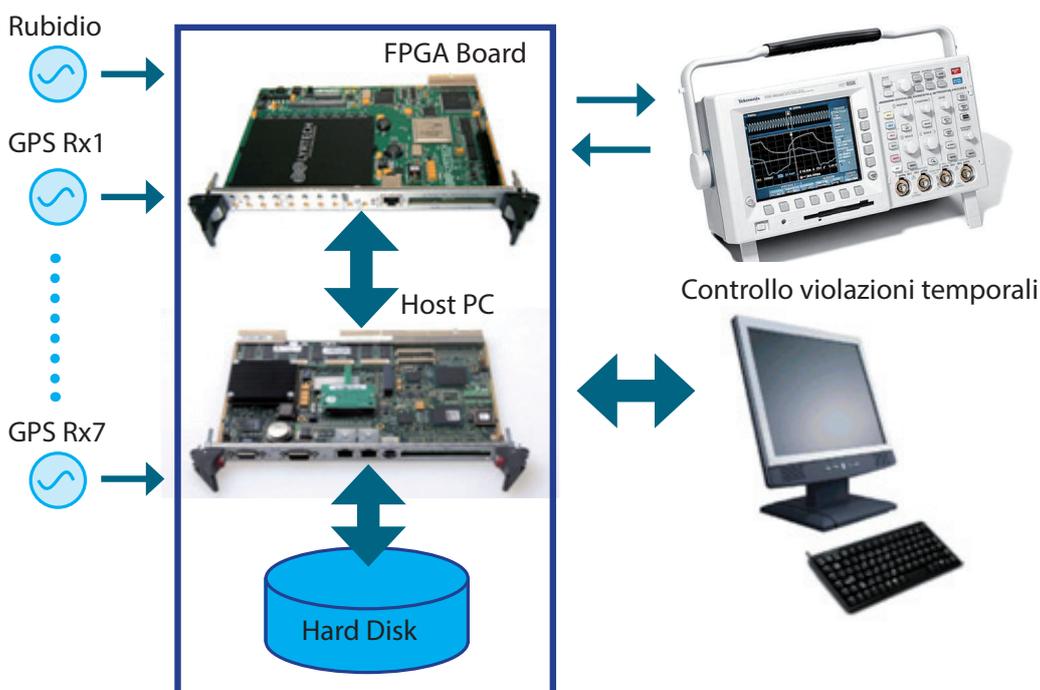
4. I TEST DI LUNGO PERIODO

4.1 TEST PRELIMINARI

E' stato predisposto un test preliminare di lungo periodo per ottenere informazioni sui possibili problemi connessi alla procedura di misura. Per fare ciò sono stati considerati solo due ricevitori GPS, utilizzando dapprima l'uno come riferimento dell'altro. Ovviamente, così facendo, in caso di fluttuazioni risulta impossibile individuare quale dei due ha evidenziato i problemi, ma ciò non era di interesse in questa fase preliminare. Inoltre al fine di rendere più critico il test sono state collocate le antenne riceventi dei due ricevitori GPS in modo da avere una limitata visibilità del cielo. Il test preliminare è iniziato il 14 settembre 2011 e si è concluso al 4 ottobre 2011.

Il file di log ha permesso di evidenziare diversi aspetti. Il *buffer margin loss* atteso dovrebbe essere mediamente nullo con fluttuazioni di breve periodo; si notano invece alcuni salti permanenti che evidenzia-

Fig. 1 - Diagramma a blocchi del sistema di analisi.



no un accumulo di fase in una direzione che non viene mai recuperata. Questo fatto è un campanello di allarme per applicazioni come quelle del DVB-T in SFN, dove, come accennato, il buffer può andare in overflow o in underflow.

In figura 2 sono visibili alcuni eventi rilevati durante il test.

Questi salti sono certamente l'effetto di altrettanti hold-over mantenuti per un certo periodo di tempo da uno o entrambi i ricevitori GPS a causa della mancanza di informazioni dai satelliti della costellazione. La ragione di questo hold-over non è stata investigata a fondo in quanto l'obiettivo della verifica preliminare era quello di mettere a punto il sistema di rilevazione, anche se è presumibile un problema di visibilità oppure di interferenza sulla frequenza di ricezione del GPS. In ogni caso tale situazione si è rivelata di grande utilità per proseguire nella sperimentazione, in quanto ha confermato il sospetto che – almeno in alcuni apparati - la fase del riferimento non venga recuperata.

4.2 TEST DI LUNGO PERIODO

Il test di lungo periodo vero e proprio ha avuto inizio il 9 novembre ed è terminato il 5 dicembre 2011 per una durata complessiva di 25 giorni.

Le condizioni di test erano le seguenti:

- 5 ricevitori GPS monitorati contemporaneamente;
- Adozione come riferimento di un oscillatore al rubidio operante in modo *free run*;
- Antenne GPS collocate sul terrazzo dell'edificio con un'ampia visibilità di cielo (figura 3);
- *Warm up* dei ricevitori GPS: 4 giorni.

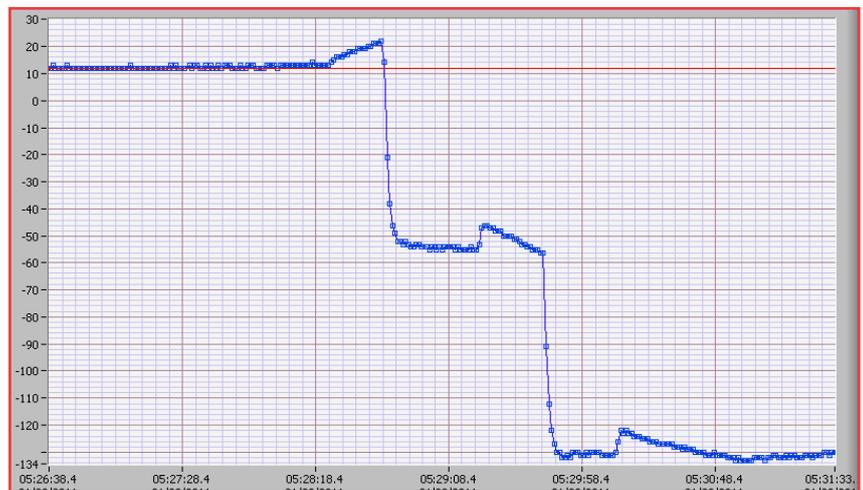


Fig. 2 - Test preliminare. Eventi registrati il 21-09-2011.

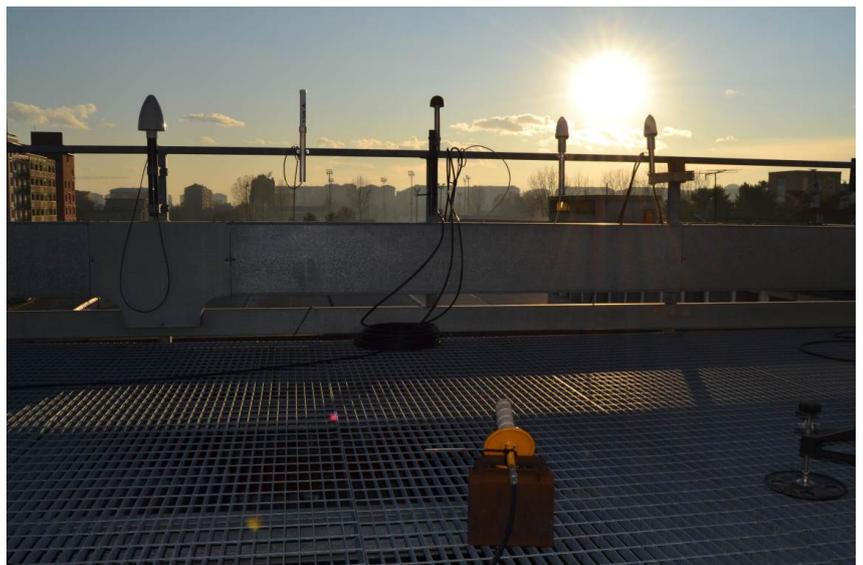
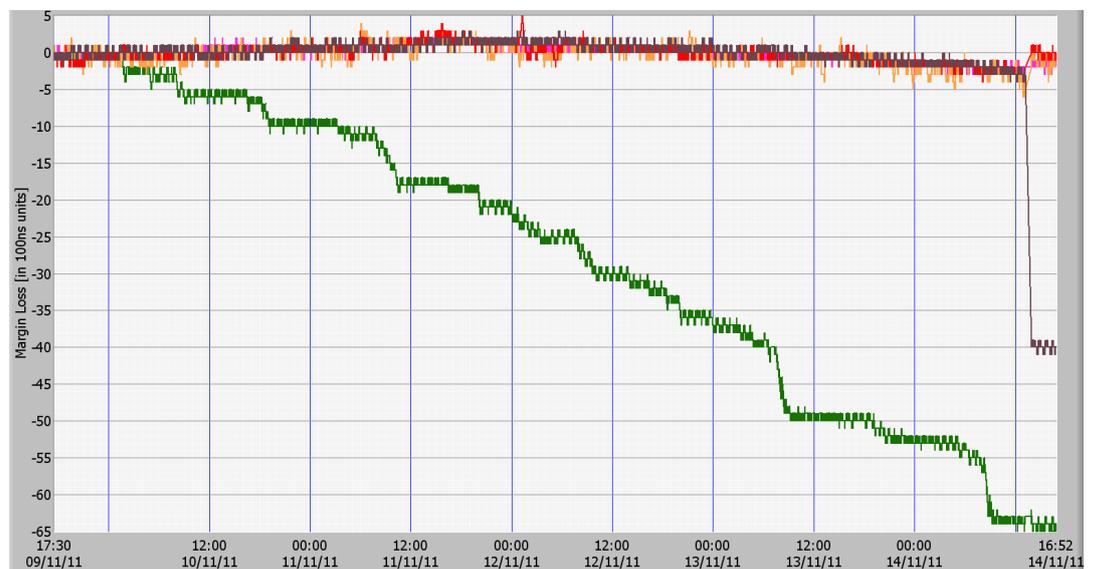


Fig. 3 - Le cinque antenne dei ricevitori GPS in prova. L'antenna passiva ad elica usata per l'interferenza locale è visibile in basso.

4.3 RISULTATI DEL TEST DI LUNGO PERIODO

I file di log del test di lungo periodo sono stati elaborati tramite un programma scritto in LabView, che permette il filtraggio (se richiesto), e la rimozione della componente lineare della deriva del riferimento. Infatti, dato che il generatore al rubidio era operante in modo *free run*, una leggera deriva rispetto al *timing* del sistema globale

Fig. 4 - Il segmento iniziale, della durata di 5 giorni, del test a lungo termine. Si osserva che l'apparato relativo alla curva verde accumula sistematicamente piccoli salti di fase. L'apparato relativo alla curva marrone ha evidenziato un salto di fase non recuperato il 14/11/2012 alle ore 13 circa. Gli altri apparati hanno avuto un comportamento migliore.



GPS era prevedibile, ed è infatti stata riscontrata. La componente di primo ordine di tale deriva è stata compensata da software: il valore empirico che ne è risultato è pari a $-3.412 \cdot 10^{-11}$ [sec/sec]. Una volta compensata tale deriva, le cinque curve dei ricevitori sono risultate avere mediamente il trend orizzontale atteso; una leggera curvatura è ascrivibile alla componente di secondo ordine della deriva, che non è stata compensata (figura 4).

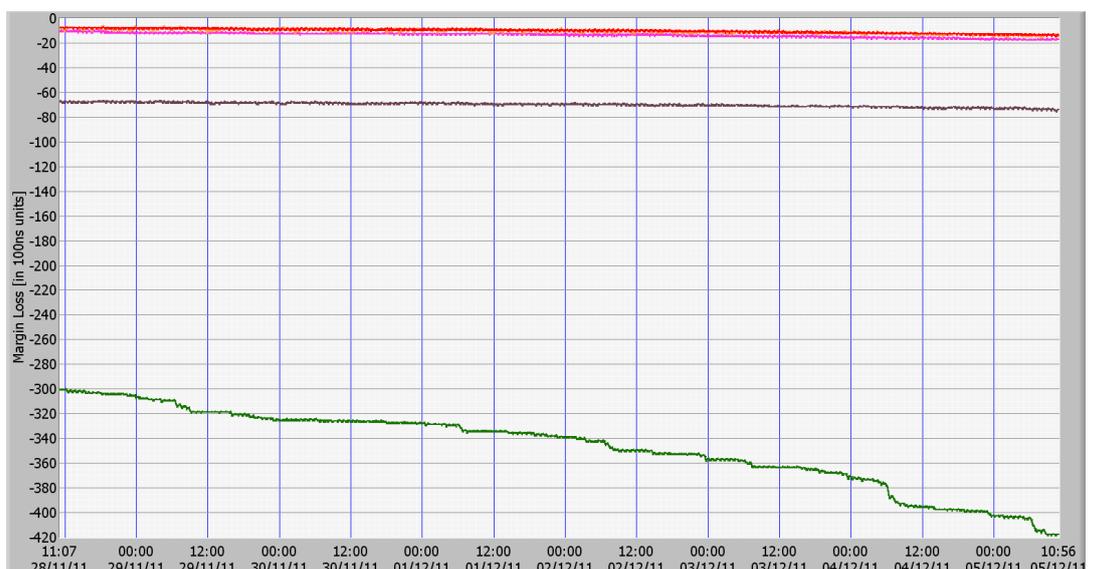
I risultati in sintesi sono stati i seguenti:

- 3 apparati hanno mostrato un funzionamento regolare nei 25 giorni di osservazione;

- Un apparato ha evidenziato un paio di salti di fase, non recuperati;
- Un apparato ha mostrato un continuo spostamento a piccoli step, accumulando un errore di fase di circa -420 cicli di clock a 10 MHz, corrispondenti a $-42\mu\text{s}$, nei 25 giorni di osservazione (figura 5).

I risultati indicano che in condizioni di buona visibilità dei satelliti ed in assenza di interferenze, situazione ben rappresentata nel test, un "buon" ricevitore GPS è in grado di fornire un 10 MHz senza accumulare scostamenti di fase.

Fig. 5 - Ultima parte del test a lungo termine. Lo scarto di fase accumulato dall'apparato relativo alla curva verde è di circa -420 cicli di clock a 10 MHz, corrispondenti a $-42\mu\text{s}$, nei 25 giorni di osservazione. Quello relativo alla curva marrone -60 cicli ($-6\mu\text{s}$).



5. TEST CON INTERFERENZA A RADIOFREQUENZA

L'ambiente elettromagnetico tipico di un sito trasmittente è spesso molto avverso, a causa della presenza di numerosi segnali forti a radiofrequenza. In un tale contesto la ricezione di segnali deboli come quelli ricevibili dai satelliti GPS non sempre può essere garantita nel tempo. Infatti l'antenna di un sistema ricevente GPS può essere interessata dall'interferenza di componenti spettrali armoniche dovute ai trasmettitori locali. Per esempio la terza armonica del canale televisivo 27 in UHF, pur rispettando la maschera prevista dalla normativa ETSI per quanto riguarda le emissioni non essenziali, può compromettere la ricezione della frequenza 1575.42 MHz di un'antenna GPS non opportunamente collocata. Lo stesso dicasi per la seconda armonica del canale 60 UHF. Inoltre, teoricamente, anche le componenti di intermodulazione derivanti da elementi non lineari⁷ che si generano localmente, potrebbero dar luogo a problemi non facilmente valutabili a priori (onde di combinazione).

Di conseguenza è possibile che in un sito trasmittente le interferenze possano disturbare il normale funzionamento di un ricevitore GPS. Una contromisura potrebbe essere la collocazione dell'antenna GPS in una posizione maggiormente schermata rispetto alle interferenze elettromagnetiche, ma talvolta ciò comporta una peggior visibilità della costellazione dei satelliti GPS.

Per valutare il comportamento di un ricevitore GPS in presenza di interferenze è stata aggiunta un'ulteriore antenna (passiva) in banda L collocata in prossimità di quelle dei ricevitori GPS sul medesimo terrazzo (si veda figura 3).

Il segnale utilizzato per la generazione delle interferenze è una portante a 1575,42 MHz modulata digitalmente con un segnale digitale avente lar-

gezza di banda di 2 MHz, ed è stato ottenuto da un generatore di segnali vettoriale (Anritsu MG3700A).

Il livello di potenza in RF del segnale disturbante è stato mantenuto al valore minimo necessario per oscurare la ricezione dei ricevitori sotto test ma tale da non disturbare altri ricevitori GPS eventualmente presenti nella zona.

I test di interferenza in RF sono stati effettuati generando il segnale interferente per un dato intervallo di tempo e quindi valutando il "margine" durante quell'intervallo e nel periodo immediatamente successivo. In un totale di diciannove test, con durate che variano da un'ora ad un'intera settimana, si sono osservati i comportamenti durante il periodo di hold-over e nel periodo successivo al riaggancio.

5.1 RISULTATI DEI TEST

CON INTERFERENZA A RADIOFREQUENZA

Per ciascuno dei sei test di interferenza è stato generato un grafico multitraccia. In figura 6 è riportato a titolo di esempio il test interferenziale numero 3. L'andamento del grafico non presenta particolari sorprese: quando il ricevitore perde le informazioni di sincronizzazione proveniente dai satelliti GPS, l'oscillatore interno viene lasciato libero (*free run*). In questa situazione la frequenza può derivare in qualsivoglia direzione in dipendenza di diversi fattori: caratteristiche proprie del quarzo utilizzato, temperatura, stato della correzione al momento dell'hold-over, software di gestione dell'hold-over specifico dell'apparato, ecc.

Dalla figura 6 si può inoltre osservare come il "margine" accumulato durante l'hold-over non venga recuperato: le curve infatti non tornano nella posizione originaria, quella cioè in cui si trovavano prima della condizione di hold-over, ma ritornano semplicemente ad essere piatte, ad indicare che il ricevitore GPS ha recuperato la corretta frequenza di funzionamento.

L'hold-over visualizzato in figura 6 ha una durata di 17 ore. Si tratta dunque di un evento di durata estremamente elevata, che di norma non dovrebbe accadere. Il fatto che nessun apparato non recuperi

⁷ E' noto dall'esperienza pregressa che bulloni ossidati o altri componenti strutturali dei tralicci possono comportarsi da componente elettrico non-lineare e generare prodotti di intermodulazione, specialmente in siti dove vengono usate strutture radianti (onde medie).

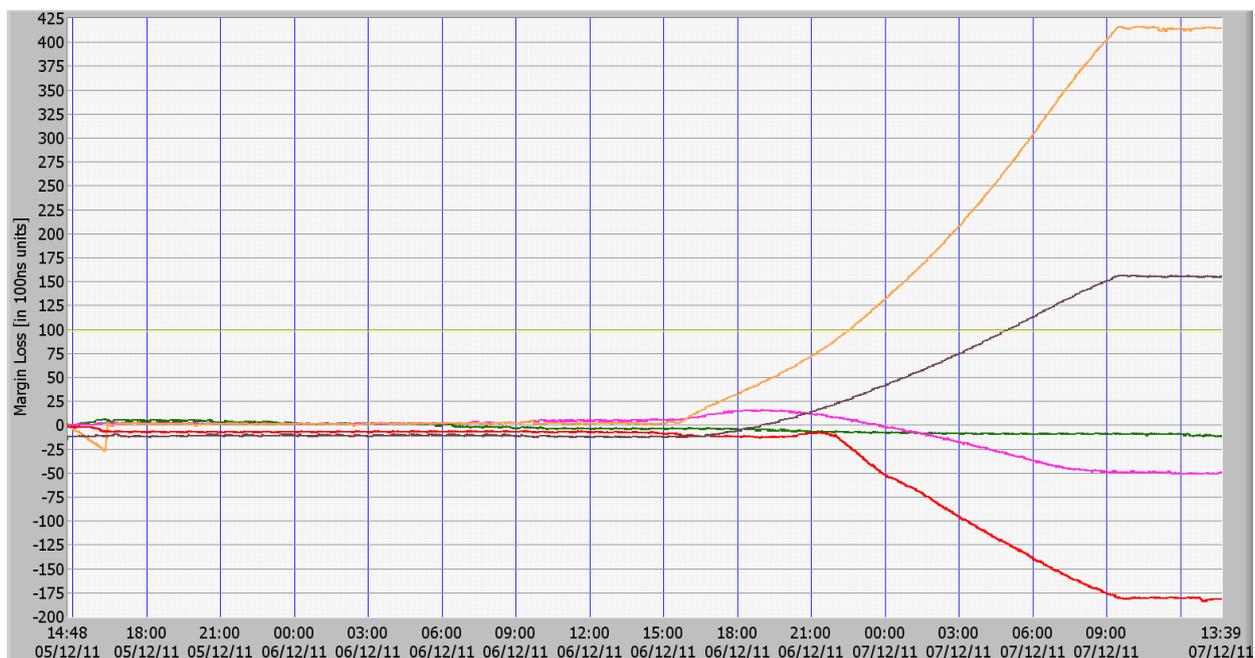


Fig. 6 - Hold Over della durata di 17 ore. Si nota che nessun apparato recupera la fase.

la fase è giustificato in questi casi: a seguito di un prolungato periodo di *free-run*, sarebbe incauto presumere che l'oscillatore interno non abbia deviato così tanto da portare il trasmettitore DVB-T fuori dalle condizioni di sincronizzazione. E' dunque una misura di cautela quella di mandare in *mute* il trasmettitore fino al ripristino del riferimento GPS. A questo punto, sarebbe inutile recuperare la fase del 10 MHz: l'oscillatore viene messo semplicemente in passo così come il contatore che genera il segnale 1PPS che viene resettato. In generale quindi il recupero della fase non viene attuato quando, superate determinati tempi di hold-over, solitamente impostabili dall'operatore, viene inibito il segnale dell'1pps (*1 pps muting*).

La questione è diversa se gli hold-over sono brevi, anche se ripetuti. In questo caso la deriva dell'oscillatore è limitata, e deve essere considerata "gestibile".

Test di interferenza brevi e ripetuti permettono dunque di valutare il comportamento dei ricevitori GPS sotto differenti aspetti:

- a. l'efficacia del recupero della fase;

- b. la velocità di recupero della fase;
- c. il comportamento in Hold Over.

La successiva figura 7 riporta una serie di tre hold-over brevi, ed è significativa riguardo questi aspetti. Dall'osservazione delle curve si evidenzia che l'apparato relativo alla curva marrone recupera sempre e correttamente la fase; quello relativo alla curva arancione recupera la fase, ma non al terzo evento (la deviazione era probabilmente eccessiva); l'apparato relativo alla curva rossa non recupera la fase, (anche se durante il secondo evento il verso della deriva del suo oscillatore è tale da compensare parzialmente lo scarto accumulato durante il primo evento).

Il tratto di una determinata curva che descrive il recupero della fase è importante, perché quantifica il valore di deviazione di frequenza utilizzato sul quarzo per attuare il recupero. La pendenza del tratto infatti ci rivela in quanto tempo vengono recuperati i cicli di clock relativi alla deriva. Il rapporto tra numero di tali cicli e tempo impiegato a recuperarli è la deviazione di frequenza cercata.

Ad esempio, in figura 7, alle ore 16:53 del 31/1/2012, la curva marrone recupera 46 cicli di clock da 10MHz,

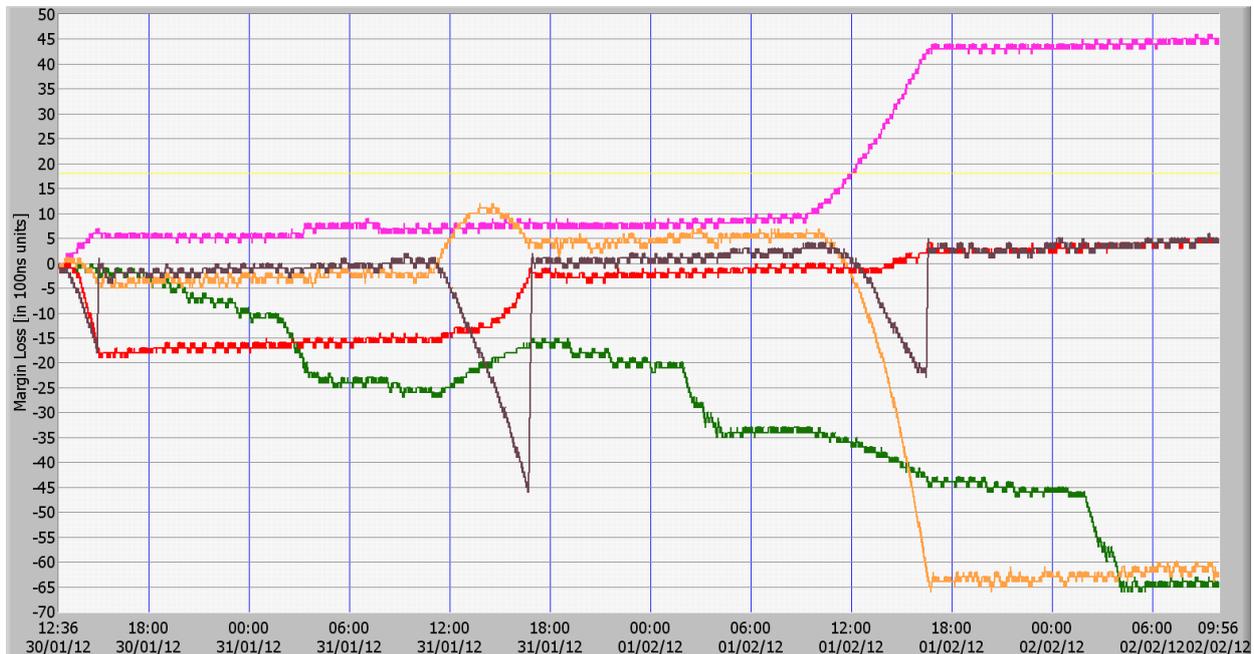


Fig. 7 - Sequenza di tre hold-over brevi. Si nota il diverso comportamento degli apparati.

in 13 minuti. La deviazione di frequenza risulta dunque:

$$f = \frac{46}{13 \cdot 60} = 0.06 \text{ Hz}$$

Questo valore deve essere moderato, in quanto la portante RF del modulatore viene ottenuta per sintesi di frequenza a partire dallo stesso riferimento a 10 MHz. Quindi una data deviazione a 10 MHz produce una deviazione del valore della frequenza portante secondo il rapporto frequenza RF / 10 MHz.

Il caso peggiore è quello del canale UHF più alto (canale 60, considerando il Dividend dell'LTE [7]) in cui la portante RF è 786 MHz. In questo caso la deviazione che si avrebbe è:

$$0.06 \text{ Hz} \cdot 786 / 10 = 4.7 \text{ Hz.}$$

La tolleranza su questa frequenza è indicata nella norma ETSI TR 101 190 (paragrafo 8.3.1) [8]: si parla di un errore di frequenza massimo di un millesimo della spaziatura delle sottoportanti OFDM, quindi, nel caso FFT = 8k, circa 1 kHz/1000 = 1 Hz. Il valore rilevato dalla curva marrone, dunque, sarebbe già

eccessivo: occorrerebbe che il ricevitore GPS attuasse la procedura di recupero della fase in un tempo quintuplo.

6. SOMMARIO DELLE FUNZIONALITÀ DI UN TIMING-RECEIVER GPS: QUELLE GENERICHE, E QUELLE SPECIFICHE PER APPLICAZIONI BROADCASTING

A questo punto è opportuno tirare le somme, e chiarire cosa fa e cosa dovrebbe fare un *timing receiver GPS*.

Per prima cosa: come funziona un *timing receiver GPS*? La risposta non è semplice, forse nemmeno univoca. Ogni produttore può decidere di implementarlo secondo propri criteri. Cerchiamo comunque di riassumere per punti come opera un *timing receiver GPS* per applicazioni generiche:

- L'apparato contiene un modulo radio che riceve dalla costellazione di satelliti i segnali GPS, li demodula, estrae le informazioni di *timing*, risolve le relative equazioni, e ottiene le informazioni di posizione geografica e tempo. Per l'applicazione

specifica di *timing receiver*, la posizione geografica è fissa, quindi viene rilevato solo il tempo (è necessario un minor numero di satelliti in vista, in linea di principio, uno solo).

- Un oscillatore a quarzo interno viene utilizzato per fornire in uscita un segnale a 10 MHz (riferimento di frequenza) e tale segnale viene diviso per 10^7 per ottenere un segnale in uscita da 1 Hz (riferimento di tempo, "1pps"). Il divisore viene all'inizio resettato per allineare il segnale 1pps allo "scoccare del secondo" del tempo GPS.
- L'oscillatore a quarzo viene disciplinato (ovvero asservito alla cadenza alla quale sono disponibili le informazioni di timing) in modo che il risultante segnale ottenuto dalla divisione, 1pps, continui a risultare allineato al "secondo" del GPS. Ciò garantisce, ovviamente, che a sua volta il 10 MHz sia agganciato al riferimento 10 MHz del "sistema globale" GPS.
- Ne risulta un 10 MHz locale che è agganciato, a medio-lungo termine, ma può avere fluttuazioni a breve-medio termine.
- In caso di mancanza o insufficiente qualità del segnale satellite, il *timing receiver* sospende il disciplinamento del quarzo (condizione di hold-over); la frequenza del 10 MHz locale, e di conseguenza del segnale 1pps, potrà quindi evidenziare una deriva, di entità poco prevedibile, tanto maggiore quanto più lungo è l'hold-over. La deriva dipenderà da fattori esterni (es.: temperatura) e interni (qualità del quarzo, tensione di controllo iniziale).

Oltre ai punti sopra elencati, un *timing receiver* GPS per applicazioni *broadcasting* deve implementare anche alcune importanti funzioni aggiuntive:

- Durante un hold-over, se una certa durata limite, predefinita, è stata raggiunta, il *timing receiver* decide che la deriva della frequenza del quarzo locale (stimabile, ma non misurabile durante l'hold-over!) potrebbe aver raggiunto un valore tale per cui il segnale 1pps abbia

derivato di un valore limite prestabilito⁸. In questo caso il sistema deve notificare⁹ l'evento al trasmettitore che provvederà a spegnere la portante per evitare una situazione interferenziale grave.

- A seguito di un hold-over, l'errore di fase accumulato dal quarzo deve essere ricondotto a zero, con una procedura di rifasamento che prevede che il quarzo subisca una deviazione nel verso opposto, fino al raggiungimento della fase zero. Tale deviazione deve essere limitata per evitare che la frequenza della portante del trasmettitore vada fuori specifica. In pratica la velocità di recupero dall'hold-over dovrà essere limitata e tipicamente pari a 1×10^{-9} sec/s (si veda ETSI TR 101 190, paragrafo 8.3.1).

7. CONCLUSIONI

I risultati del presente lavoro si sono dimostrati di grande utilità, da un lato per confermare che in condizioni di funzionamento nominali (disponibilità del segnale satellitare GPS di buona qualità) la fase del 10 MHz e di conseguenza la fase del segnale 1pps rispettano ampiamente le indicazioni della normativa sul DBV-T, dall'altro per verificare che, come si sospettava, in condizioni di mancanza del segnale GPS, anche per brevi periodi di tempo, il comportamento dei vari apparati è estremamente dipendente all'implementazione del costruttore senza mai dare i riscontri attesi.

Ciò ha permesso di predisporre una procedura, idonea a qualificare un ricevitore GPS adatto per una rete SFN DVB-T per quanto concerne il comportamento del 10 MHz in mancanza del segnale di sincronizzazione GPS, il cosiddetto funzionamento in hold-over. Un apparato rispondente ai contenuti della procedura dovrebbe permettere l'eliminazione delle microinterruzioni dovute a tali cause.

Tali requisiti si aggiungono a quelli standard già previsti nei capitolati.

⁸ per un DVB-T modalità 8k, tg ¼ usata normalmente per reti SFN di grandi dimensioni, il margine è stabilito in $\pm 5 \mu\text{s}$ (si veda ETSI TR 101 190, paragrafo 5.2.4).

⁹ Muting segnale 1pps

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", www.etsi.org/deliver/etsi_en/300700_300799/300744/01.06.01_60/en_300744v010601p.pdf
2. V. Mignone, A. Morello, M. Visintin, "Lo standard DVB-T per la televisione digitale terrestre", *Elettronica e Telecomunicazioni* n.1 Aprile 2002
3. A. Bertella, B. Sacco, M. Tabone, "Valutazione in laboratorio del sistema DVB-T", *Elettronica e Telecomunicazioni* n.1 Aprile 2002
4. A. Bertella, B. Sacco, M. Tabone "Reti SFN DVB-T: Q&A (tutto quello che avresti voluto sapere sui trasmettitori SFN e non hai mai osato chiedere...)" – *Elettronica e Telecomunicazioni* n.2 Agosto 2008
5. ETSI EN 302 755 V1.1.1 (2009-09), "Digital Video Broadcasting (DVB); Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)", www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01.01.01_60/en_302755v010101p.pdf
6. A. Bertella, V. Mignone, B. Sacco, M. Tabone, "Il digitale terrestre di seconda generazione", *Elettronica e Telecomunicazioni* n.2 Agosto 2009
7. D. Milanesio, B. Sacco, V. Sardella, "LTE e DTT: Effetti dei segnali per la telefonia mobile di 4a generazione sugli attuali impianti d'antenna televisivi", *Elettronica e Telecomunicazioni* n.3 Dicembre 2011
8. ETSI TR 101 190 V1.3.1 (2008-10), "Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects", www.etsi.org/deliver/etsi_tr/101100_101199/101190/01.03.01_60/tr_101190v010301p.pdf