



Proposta di installazione orologio
UTC, Laboratori del Gran Sasso - 1987

V. Bisi e O.Saavedra

Torino, 14 sett. 1987
Valdo BISI, Oscar SAAVEDRA

Proposta di installazione orologio UTC
(Coordinated Universal Time)

Laboratori nazionali del Gran Sasso

Introduzione.

La proposta di installazione nei laboratori del Gran Sasso di un orologio, sincronizzato con la scala di tempo UTC dell'Istituto Elettrotecnico Naz. Galileo Ferraris (IEN), e' basata sulle esigenze scientifiche delle varie esperienze in preparazione.

La piu' stringente richiesta viene dalla necessita' di una correlazione temporale di eventi astrofisici, tipo collassi gravitazionali delle stelle, che coinvolgerebbe non solo gli esperimenti del Gran Sasso ma anche i vari osservatori di neutrini e di onde gravitazionali funzionanti nei vari continenti.

Le vicende, ad esempio, dell'ultimo evento della SN-1987a, rivelata in neutrini in 4 laboratori sotterranei (Italia, USA, URSS e Giappone), hanno chiaramente indicato che un'accurata misura temporale assoluta degli eventi e' essenziale per ridurre al minimo le incertezze sull'identita' dell'evento rivelato.

Partendo dal fatto che un simile evento nella nostra galassia darebbe luogo, in un apparato delle dimensioni di LVD, a 500-1000 interazioni di neutrini, distribuite in un intervallo di tempo di collasso di circa 20 sec, sembrerebbe sufficiente una precisione entro il millisecondo.

Così pure per i processi di neutrinizzazione delle stelle che, secondo i modelli standard, hanno una durata di alcune decine di millisecondi.

In eventuali coincidenze con laboratori a distanze intercontinentali, misure di tempo assoluto al millisecondo permettono di localizzare la direzione della sorgente entro alcuni gradi.

Se si considerano, tuttavia, coincidenze con il laboratorio del Monte Bianco e con l'esperimento di onde gravitazionali a Ginevra, distanti circa $2 \text{ millisecc} * c$, si deve scendere ad una accuratezza migliore del millisecondo.

Il sistema qui proposto garantisce la misura del tempo assoluto con un'accuratezza dell'ordine dei 100 microsecondi rispetto ad UTC (IEN) e dà la possibilità di correzioni off-line fino ad un'accuratezza dell'ordine del microsec.

Altre misure di tipo astrofisico, quali la periodicità delle pulsar sono coperte dai 100 microsec di accuratezza.

Le misure temporali relative locali, tra i vari esperimenti al Gran Sasso, quali le eventuali correlazioni tra gli EAS rivelati dall'apparato EAS-TOP ed i muoni sottoterra verranno effettuate con un'accuratezza dell'ordine del decimo di microsecondo.

Descrizione del sistema.

(le lettere minuscole si riferiscono alla figura 1)

Lo schema proposto (fig. 1) comprende un orologio MASTER, che risiede nel laboratorio esterno del Gran Sasso, controllato con il metodo televisivo e con il segnale del sistema di navigazione LORAN-C, e, nelle aree sperimentali, orologi locali (SLAVE). Questi, sincronizzati via cavo con il MASTER, forniscono la data e l'ora ai singoli esperimenti.

Come accennato nell'introduzione, il massimo scarto rispetto al tempo universale UTC(IEN) previsto agli orologi SLAVE è circa 100 microsecondi; l'analisi off line dei segnali di sincronismo TV permette di datare ogni trigger con una approssimazione di circa 1 microsecondo rispetto all'UTC(IEN); il sistema LORAN-C fornisce un'ulteriore possibilità di confronto con l'UTC ed è caratterizzato da un'incertezza di alcuni microsecondi.

MASTER (a), (b).

Un oscillatore al Rubidio, il cui funzionamento e' basato sull'assorbimento di microonde di frequenza 6.834.682.614 Hz (corrispondente alla transizione tra i livelli iperfini $F=2$ ed $F=1$ nello stato fondamentale dell'atomo di Rb 87), fornisce una base tempi di notevole stabilita': secondo tests dell'Istituto Elettrotecnico Naz. Galileo Ferraris di Torino (IEN), la deriva di frequenza tipica e' dell'ordine di $10 \exp(-11)$ per mese.

Il RAD100, orologio datario sincronizzato via radio, commercializzato dalla ditta Esat di Torino, esplica essenzialmente due funzioni:

1) riceve i segnali orari codificati generati dall'IEN di Torino e irradiati tramite stazioni radiofoniche della RAI e puo' correggere automaticamente (optional) l'eventuale deriva dell'oscillatore al Rb, aggiustandone la frequenza. Il calcolo della correzione viene effettuato su base statistica, mediando sugli scarti dei singoli segnali orari, che sono dell'ordine del millisec, in un intervallo di tempo di osservazione di 28 giorni: in questo modo l'entita' della correzione risulta dello stesso ordine di grandezza della deriva del MASTER (minore di circa 30 microsec al mese).

Il tempo di propagazione dal trasmettitore RAI e ritardi locali lungo i cavi vengono misurati e compensati con un allineamento iniziale ad un orologio campione trasportato sul posto dall'IEN. Sono consigliabili verifiche successive con cadenza circa annuale.

Tenendo conto della stabilita' intrinseca dell'oscillatore al Rb e della precisione delle correzioni, il massimo scarto da UTC(IEN) si prevede sara' di circa 100 microsecondi (4).

2) sincronizza gli orologi SLAVE ripetitori, che datano i triggers dei singoli esperimenti, inviando, attraverso un cavo a fibre ottiche, la data, l'orario e segnali di sincronismo.

SINCRONISMO TV (c).

Un sistema indipendente per il controllo del funzionamento dell'orologio MASTER e per la registrazione degli scarti da

UTC(IEN), e' quello contrassegnato TV SYNCR in fig.1. Esso utilizza i segnali di sincronismo di quadro televisivi della RAI (50 Hz) misurando giornalmente, ad un'ora prefissata, lo scarto di tempo tra l'orologio locale e l'orologio campione dello IEN, con risoluzione di 20 nanosecondi.

I dati registrati vengono inviati all'IEN per un confronto con la scala di tempo nazionale UTC(IEN). Questo permette di determinare con grande accuratezza l'andamento dell'oscillatore locale rispetto al campione di riferimento. Indagini sperimentali della durata di un anno (2), (3) mostrano che e' possibile determinare lo scarto di frequenza dell'oscillatore con un'incertezza di una parte su 10×10^{13} in 30 giorni. E' quindi possibile ottenere con questo metodo una correzione a posteriori che riduce lo scarto rispetto al riferimento IEN a valori dell'ordine del microsecondo. Questo valore tiene conto anche della stabilita' a breve termine (errore standard delle fluttuazioni di frequenza dovute al "random noise": qualche unita' $\times 10 \exp(-12)$ /giorno) dell'oscillatore al Rubidio.

L'IEN e', a sua volta, sincronizzato con UTC normalmente entro ± 2 microsecondi. Queste deviazioni vengono periodicamente registrate dall'IEN per effettuare correzioni a posteriori che lasciano uno scarto residuo, imputabile per lo piu' all'instabilita' degli oscillatori, entro i 100 nanosecondi.

I singoli triggers degli esperimenti possono, in conclusione, essere datati con una precisione dell'ordine del microsecondo.

LORAN-C (g).

Come detto sopra, il ricevitore RAI RAD100 e' capace di mantenere l'allineamento con UTC(IEN) entro circa 100 microsecondi mediando sui dati di sincronizzazione raccolti in un periodo di 28 giorni. Il sistema di sincronismo televisivo migliora drasticamente, fino al microsec, l'allineamento con UTC(IEN) con una misura giornaliera e con correzioni da apportare a posteriori alla datazione degli eventi.

Se si vuole un controllo piu' frequente dell'orologio MASTER nel corso della giornata e la possibilita' di intervenire a tempi

brevi (mezz'ora) per il restart dell'orologio in caso di interruzioni occasionali, e' necessario ricorrere a sistemi un po' piu' sofisticati.

Tra questi, quello che attualmente appare piu' accessibile, sia a livello di costi che di semplicita' di gestione, e' il LORAN-C (Long Range Navigation), gestito dall'U.S. Naval Observatory. Si tratta di una catena di stazioni fornite di oscillatori al Cesio (vedi piu' avanti) che trasmettono con cadenza opportuna gruppi di impulsi di 100 KHz, che vengono per lo piu' utilizzati per ottenere la posizione geografica dai mezzi di navigazione e dagli aerei.

Esistono in commercio ricevitori LORAN-C largamente automatizzati per quanto riguarda la ricezione ed il calcolo dei parametri per il controllo della frequenza e la sincronizzazione in tempo dell'orologio locale. Lo scarto di tempo tra orologio locale ed UTC e', con questo metodo, mantenuto entro una decina di microsecondi.

La trasmissione LORAN-C non contiene l'informazione completa della data: per evitare ambiguita', e' indispensabile ricorrere ad un orologio, nel nostro caso il RAD100, in grado di fornire data e ora con una accuratezza migliore di 10 millisecondi. Lo stesso discorso si applica anche al sistema di sincronismo televisivo.

E' chiaro che, con l'aggiunta del ricevitore LORAN-C, il sistema di controllo del tempo diviene ridondante. Si tenga pero' conto del fatto che in ogni caso sarebbero necessari duplicati di riserva delle varie apparecchiature e che una diversificazione permette di non dipendere da un'unica sorgente di informazione, con possibilita' di controlli incrociati.

OSCILLATORE DI RISERVA (d).

Completa il sistema residente nel laboratorio esterno un insieme oscillatore (quarzo o Rb) e RAD 100, che sostituisce l'orologio principale in caso di guasti.

SLAVE CLOCKS (e), (f).

Un'interfaccia di distribuzione a 16 canali smista agli orologi ripetitori ogni millisecon i segnali di sincronizzazione (frequenza 10 MHz, modulati per trasportare anche l'informazione della data) provenienti dal MASTER attraverso il cavo a fibre ottiche.

Gli orologi SLAVE sono così allineati al MASTER e tra di loro entro 100 nanosecondi.

Al ricevimento del segnale di trigger dall'esperimento e' disponibile in uscita, a livelli compatibili TTL, su porta seriale o parallela, l'informazione completa della data e dell'ora UTC.

Per ragioni di costo, sarebbe opportuno standardizzare l'interfaccia di uscita verso tutti gli esperimenti.

STIME DI COSTO (in MLire)

2 oscillatori al Rubidio	42.
2 RAD100 MASTER	21.
TV SYNCR (Tele 100)	10.
Ricevitore LORAN-C	25.
PC con unita' floppy	5.250
stampante per RAD100	.800
interfaccia distribuzione	4.
5 RAD100 SLAVE	30.
5 interfacce seriali risoluz. 100 nsec	7.500
software	.250
sintonizzatore FM	.500
antenna e varie	.700

147.

consulenza IEN per messa a punto e
taratura iniziale 20.

installazione:

ambiente termostato lab est.	5.	(?)
cablaggio lab sotterraneo (escluse fibre ottiche)	5.	(?)

30.

costi di esercizio:

canone annuo IEN elaboraz. dati
sistema televisivo 2.

controllo annuale con orologio pri-
mario portatile IEN 10.

Possibili alternative.

Nel corso di colloqui e consultazioni avute con esperti (IEN, Istituto di Astronomia di Bologna, Politecnico di Torino, industrie) sono state considerate altre possibili soluzioni per il sistema UTC al Gran Sasso.

Le alternative si basano essenzialmente sulla ricezione diretta di treni di impulsi inviati da trasmettitori, sincronizzati con oscillatori al Cesio, installati sulla catena di satelliti GPS (Global Positioning System).

Le seguenti ragioni hanno indotto i proponenti a scartare, almeno per il momento, questo sistema, nonostante sia in grado di garantire un'accuratezza dell'ordine addirittura del decimo di microsec:

- il sistema non offre, almeno per ora, una copertura globale: il tempo giornaliero di ricezione non va oltre le 12 ore. L'inconveniente potrà essere superato in futuro con il lancio di nuovi satelliti, alla ripresa del programma SHUTTLE;
- i ricevitori, di alta qualità ed alto costo, richiedono tecnici specializzati per la gestione.

E' probabile che, tra qualche anno, questa divenga la soluzione di gran lunga migliore.

Un'altra variante al sistema qui proposto può prevedere l'uso, come MASTER, in luogo dell'oscillatore al Rubidio, di un oscillatore al Cesio, che è l'apparecchiatura con cui viene realizzata l'unità di intervallo di tempo ("secondo" SI) nei vari laboratori nazionali.

L'oscillatore al Cesio utilizza una transizione tra due livelli iperfini nell'atomo di Cesio 133; il "secondo" SI standard internazionale è definito come la durata di 9.192.631.770 periodi della radiazione corrispondente a tale transizione. Si tratta, tra quelli commerciali, del sistema più accurato e più stabile (circa 10 volte migliore del Rubidio), ma, rispetto all'oscillatore al Rb, ha un costo notevolmente più elevato (circa 70 milioni), una durata media dell'ordine di 3 anni (1 anno per la versione dotata del risonatore high performance tipo 004), contro almeno 10 anni per il Rb, ed infine richiede la presenza di tecnici specializzati per la gestione.

Note.

- (1) UTC (Universal Coordinated Time), scala tempi internazionale:
 - assume come unita' il "secondo" internazionale, definito dalla XIII General Conference of Weights and Measures nel 1967, come la durata di 9 192 631 770.0000 oscillazioni della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini $F=4$ ed $F=3$ dello stato fondamentale dell'atomo di Cesio 133;
 - viene corretto, a passi di un secondo, in modo da rimanere allineato entro 0.7 secondi al tempo astronomico UT1 (altra scala di tempi, non uniforme, basata sulla rotazione terrestre, corretta per gli effetti del moto dell'asse della terra);
 - assume come origine le ore zero, nel sistema di tempo astronomico, del 1° gennaio 1958.
 - l'UTC(IEN) e' sincronizzato entro +/- 2 microsecondi con la scala di tempo UTC costruita dal Bureau International de l'Heure del BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), elaborando le informazioni raccolte in circa 200 laboratori, forniti di oscillatori al Cesio, sparsi in tutto il mondo.
- (2) F. Cordara, P.G. Galliano, V. Pettiti: Controllo a distanza di campioni di frequenza.
85° Riunione Annuale AEI - Vol. I - ottobre 1984.
- (3) F. Cordara, V. Pettiti: Time keeping and frequency dissemination at the IEN.
Proceedings of the Precise Time and Time Interval Meeting
Washington, dec 1986.
- (4) F. Cordara, V. Pettiti, P. De Giorgi: Remote oscillators frequency control by means of coded time signals.
Proceedings of the I European Frequency and Time Forum
Besancon, March 1987.
- (5) R. E. Beehler, R. C. Mockler, J. M. Richardson: Cesium Beam Atomic Time and Frequency Standards.
Metrologia vol I No. 3 (114), July 1965.

4. 55
D. Sauerbrey

