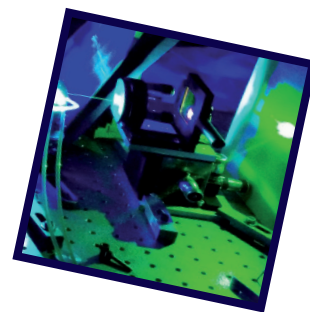


L'orologio atomico distribuito su fibra ottica

Davide Calonico

INRIM, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica



Abstract. La fibra ottica per disseminare sul territorio gli orologi campioni dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, portando in laboratori remoti un'accuratezza senza precedenti.

Cosa succederebbe se la precisione degli orologi primari nazionali dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), potesse essere trasferita in fibra a un laboratorio distante centinaia di chilometri in pochi istanti? Quali benefici se ne trarrebbero nell'immediato, e cosa accadrà in futuro?

A Torino si trova l'orologio campione nazionale che realizza la definizione del secondo nel Sistema Internazionale delle misure, dapprima presso l'Istituto Elettrotecnico Nazionale "Galileo Ferraris", e dal 2006 all'INRIM, nato dall'unione del "G. Ferraris" con l'Istituto di Metrologia "G. Colonnetti". Il segnale degli orologi è diffuso con diverse tecniche, evolute nel tempo. Certamente è noto il segnale radiotelevisivo attraverso la RAI, così come la trasmissione attraverso sia la rete dati (Network Time Protocol, NTP) che con l'uso dei segnali satellitari, in particolare il GPS.

La sincronizzazione di un orologio remoto con il GPS è uno dei metodi più diffusi, tuttavia, per trasferire l'accuratezza di un orologio atomico di un istituto primario, sono necessari più di venti giorni di misura. Oggi la migliore realizzazione del secondo è data dagli orologi a fontana di Cesio, di cui esistono una decina di esemplari nel mondo (due all'INRIM). L'accuratezza di una fontana di Cs è di $\sim 2 \times 10^{-16}$ (frequenza relativa): le più sofisticate tecniche satellitari raggiungono questo livello in 20-40 giorni. Nel 2012, il premio Nobel della Fisica è stato attribuito a David Wineland per le sue ricerche sugli "orologi ottici", una nuova generazione di orologi atomici basati non più su una microonda, come nel caso del Cesio, bensì su radiazione visibile dello spettro elettromagnetico. Dal 2014, gli orologi ottici hanno consolidato un'accuratezza inferiore a 10^{-17} , fino a 2×10^{-18} , e sono basati su diversi atomi, come Yb, Sr, Hg, sia neutri che ioni. In Italia, per

esempio, l'INRIM ha sviluppato un orologio ottico ad atomi neutri di Ytterbio.

Questi risultati aprono la strada a una ridefinizione del secondo rispetto all'attuale basata sulla transizione del Cesio a 9,19263177 GHz. Ancora molti passi si devono compiere prima di una ridefinizione, ma il processo è cominciato, esistendone il fondamento scientifico e tecnologico. Uno dei limiti attuali è il metodo di confronto remoto: per gli orologi ottici, i confronti satellitari richiedono fino a 1000 giorni di misura, chiaramente una situazione non adeguata. Per risolvere il problema, dal 2005 è stata intrapresa la ricerca sul trasferimento in fibra ottica di segnali di laser ultrastabili in frequenza.

La tecnica si è consolidata in questi dieci anni dimostrando di essere adeguata alle prestazioni dei nuovi orologi. In particolare, a oggi sia in Germania che in Italia, su più di 1000 km di fibra è stato trasferito un segnale con incertezza aggiunta di $\sim 1 \times 10^{-19}$ in soli 1000 s di misura: valori adeguati a confrontare e distribuire anche gli orologi ottici. Del resto, questo sviluppo rivoluzionario ha un impatto generale nella metrologia di tempo, perché ora si può trasferire anche l'accuratezza degli orologi al Cs in tempi molto più brevi, non limitati dal sistema di sincronizzazione, ma dalla capacità degli orologi.

2. Come si può trasferire l'unità di tempo con un laser?

Un laser è una radiazione elettromagnetica di

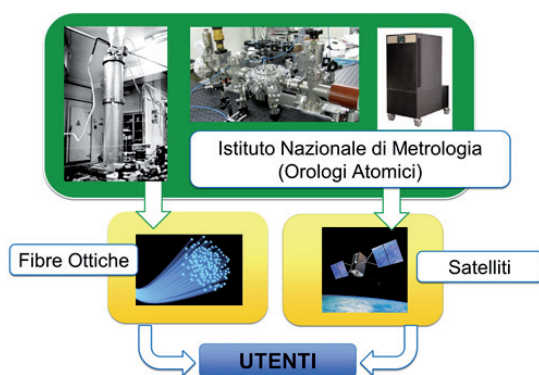


Fig 1 - I segnali degli orologi dell'INRIM - in alto, da sinistra: fontana criogenica al Cesio (Foto F. Bucciarelli), orologio a Ytterbio, Maser all'Idrogeno - possono essere distribuiti agli utenti tramite satellite e tramite fibra ottica.

frequenza definita: possiamo immaginare di mandarla in fibra affinché sia un oscillatore di trasferimento. La sua frequenza, misurata rispetto agli orologi dell'Istituto metrologico, arriva al laboratorio remoto e diventa un riferimento con il quale sincronizzarsi. Usando le fibre, la lunghezza d'onda del laser è scelta intorno ai 1550 nm. Per trasferire l'accuratezza, occorre un laser ultrastabile, ovvero con frequenza che non muoti nel tempo, almeno di parti in 10-15 nel breve termine (1 s – 10 s). Pertanto, si usano tecniche di aggancio di fase del laser a cavità Fabry-Perot la cui lunghezza non cambia a quei livelli.

Un ostacolo è la fibra stessa, o meglio le variazioni della sua lunghezza per fattori ambientali di natura meccanica, termica o vibrazionale. La variazione di lunghezza della fibra si traduce sul laser in un rumore di fase, che deteriora le sue caratteristiche di stabilità, impedendo per esempio che l'incertezza si possa ridurre continuando a misurare. Per ovviare al problema, si applica una cancellazione attiva del rumore della fibra: una parte della radiazione a destinazione è retroriflessa verso il laboratorio di partenza. Qui ritornato, il segnale laser è confrontato con l'originale, da cui si ricava un'informazione sul rumore introdotto dalla fibra. Un attuatore optoelettronico compensa il rumore applicando una correzione uguale e contraria. E' solo con la cancellazione che si ottengono i risultati attesi, garantendo su più di 1000 km un contributo d'incertezza dalla fibra inferiore a 10-19 in 1000 s di misura. Affinché però la correzione sia efficace, la radiazione riflessa deve ripercorrere la stes-

sa fibra, ovvero il cammino deve essere completamente bidirezionale, ponendo richieste di tipo infrastrutturale e strumentale. Infatti, occorre sia una fibra bidirezionale, e non il solito doppietto in fibra, che sistemi di amplificazione bidirezionali che non innescino oscillazioni laser problematiche causate dalle riflessioni della fibra (in genere questo limita il gain degli amplificatori). Il link ottico è stato dimostrato sia in sistemi a fibra dedicata, o dark fiber, che in architettura WDM (Dense e Coarse), con un singolo canale dedicato in copresenza di altri utenti (i.e. traffico dati).

3. Il tempo in fibra in Italia e in Europa

In Italia, l'INRIM ha realizzato finora tre link ottici che collegano Torino al Tunnel del Frejus, a Medicina (Bologna) e a Sesto Fiorentino (Firenze). Questi 800 km di fibra costituiscono il primo segmento di una rete che si estenderà più a Sud, a Roma, Napoli e Matera tra il 2015 e il 2016, e si allaccerà a Nord alla rete europea di link fibra per il tempo a cui l'INRIM sta attivamente lavorando con i partner di Francia, Germania, UK e con gli organi della Metrologia Internazionale.

Sul tratto Torino-Firenze è stato realizzato anche un doppio link, che ha permesso di caratterizzare l'equivalente di 1300 km di fibra. Inoltre, dopo la sperimentazione iniziale, le tecnologie sviluppate sono mature per l'applicazione anche in ambito industriale.

La realizzazione dei collegamenti è avvenuta in collaborazione con il Consortium GARR, e per la parte verso il tunnel, ci si è avvalsi anche del Consorzio TOP-IX. Il link principale, tra Torino e il Polo Scientifico di Sesto Fiorentino (Università di Firenze, LENS, CNR), consente oggi di studiare proprietà della materia allo stato ultra freddo indagando le proprietà spettroscopiche più fini; tra gli esperimenti in corso ci sono diverse misure di fisica atomica e molecolare: fornendo il riferimento degli orologi attraverso la fibra si vuole misurare con sempre maggiore precisione i livelli energetici dei sistemi quantistici per indagare, per esempio, la stabilità temporale di alcune costanti fisiche fondamentali, messa in causa dalle teorie oltre il "Modello Standard".

Il secondo link ottico collega l'INRIM a Me-

dicina presso i radiotelescopi dell'INAF-IRA. I radiotelescopi sono dotati di orologi atomici commerciali sofisticati, i maser all'idrogeno, fondamentali per le osservazioni e per le tecniche di VLBI. L'uso del link ottico ha permesso di caratterizzare metrologicamente l'orologio posto a Medicina, e ora permetterà di studiare come il miglioramento del riferimento di frequenza possa beneficiare la risoluzione delle osservazioni radioastronomiche.

Il terzo link verso il tunnel del Frejus permetterà di confrontare, a un livello finora mai sperimentato, due orologi posti a una quota molto diversa (la differenza è di 1000 m), osservando così a quel livello d'incertezza gli effetti della relatività generale, che creano una differenza di frequenza tra orologi posti a potenziali di gravità diversa. Si parla per questi esperimenti di "geodesia relativistica", un campo ancora da esplorare, soprattutto considerando gli effetti dinamici del potenziale gravitazionale.

Per concludere, l'estensione verso Matera è motivata dalla convergenza di interessi di geodesia e di radioastronomia, essendoci in Matera il Centro di Geodesia Spaziale dell'ASI, che si avvale di antenne radioastronomiche pilotate da orologi al maser di idrogeno. In questo caso, migliorare l'accuratezza del riferimento tramite l'estensione del link ottico Torino-Matera vuole migliorare il livello di precisione della geodesia per avere un monitoraggio più fine degli effetti geofisici che riguardano il pianeta.

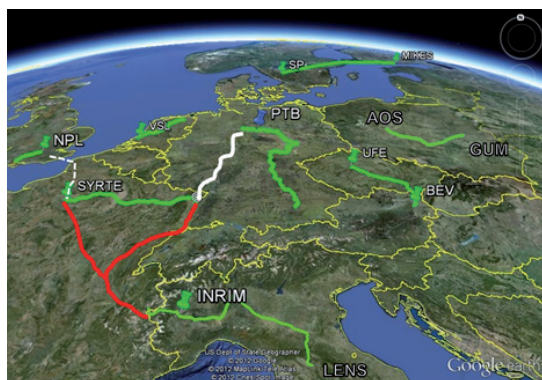


Fig 2 - Una rete europea di link ottici grazie alla collaborazione tra le reti della ricerca.

A questa attività italiana si accompagna un intenso sforzo per realizzare una rete europea di link ottici, a cominciare dai collegamenti dei

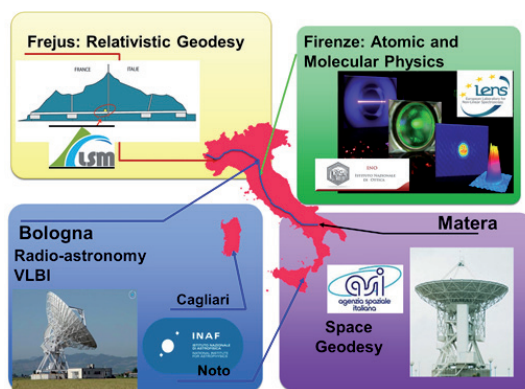


Fig 3 - La trasmissione del secondo in ambito multidisciplinare

primi quattro istituti metrologici, che si trovano in Francia, Germania, Italia e UK. Questi link consentiranno un confronto diretto degli orologi ottici di questi istituti, un passo importante verso la ridefinizione del secondo. Da questi collegamenti fondamentali, poi, si potrà ampliare verso i centri scientifici di eccellenza, le comunità scientifiche più coinvolte (es. la geodesia spaziale) e infine l'industria continentale.

La rete in fibra, oltre a trasportare dati, si avvia sempre più a portare un riferimento di tempo ultra-preciso, su cui si potrà costruire una parte del futuro scientifico e tecnologico europeo.

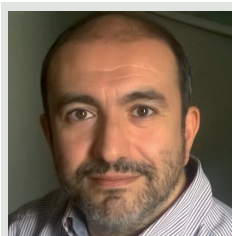
Collaborano al progetto del link ottico

E. Bertacco, C. Calosso, C. Clivati, M. Frittelli, F. Levi, G. A. Costanzo.

Il Link Ottico dell'INRIM è stato realizzato con il sostegno della Compagnia di San Paolo e del MIUR (programma "Progetti premiali").

Riferimenti bibliografici

D. Calonico, R. Oldani, Il tempo è atomico. Breve storia della misura del tempo, Hoepli Editore, p. 250, 2013.



Davide Calonico

d.calonico@inrim.it

Ricercatore all'INRIM, divisione di Metrologia Fisica, dove lavora alla realizzazione di orologi atomici a fontana di Cesio (che realizzano l'unità di tempo), e a Ytterbio in reticolo. Da alcuni anni contribuisce allo sviluppo della distribuzione in fibra dei segnali campione.