POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

LinkO: un’infrastruttura in fibra ottica per confronti remoti di tempo e frequenza ad alta accuratezza

Original
LinkO: un’infrastruttura in fibra ottica per confronti remoti di tempo e frequenza ad alta accuratezza / Clivati, Cecilia; Calonico, D.; Levi, F.; Mura, A.; Costanzo, Giovanni Antonio; Godone, A.. - STAMPA. - (2011), pp. 20-25. (Intervento presentato al convegno Welcome to the Future Internet tenutosi a Torino nel 26-28 ottobre 2010).

Availability:
This version is available at: 11583/2420945 since:

Publisher:
Associazione Consortium GARR

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

12 October 2024

Consortium GARR

Conferenza GARR_10
Selected papers

Welcome to the Future Internet!

La rete della ricerca e la sua comunità oggi: servizi, applicazioni, idee di domani

Torino, 26-28 ottobre 2010

LinkO: un'infrastruttura in fibra ottica per confronti remoti di tempo e frequenza ad alta accuratezza

C.Clivati[2], D.Calonico[1], F.Levi[1], A.Mura[1], G.A.Costanzo[2], A.Godone[1]

[1]Divisione di Ottica, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica-INRiM, [2]Politecnico di Torino

Abstract. L'articolo descrive l'esperimento LinkO dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica INRiM di Torino, volto alla realizzazione di una struttura in fibra ottica per il trasferimento su lunga distanza di segnali ultrastabili di frequenza. Si tratta di una tecnologia innovativa e di largo impatto per i sistemi di disseminazione dei riferimenti di tempo e frequenza. LinkO necessita di un'infrastruttura in fibra ottica con un'architettura di rete come la futura GARR-X; allo stesso tempo costituisce per GARR-X un'applicazione innovativa, con notevoli ricadute a livello scientifico, tecnologico ed industriale.

In questo lavoro si descrive in particolare la realizzazione della sorgente laser a 1542 nm con stabilità relativa di alcune parti in 10^{-14} a 1 s e del sistema di compensazione del rumore di fase, aspetti fondamentali per il raggiungimento delle prestazioni desiderate. LinkO ha dimostrato finora una stabilità relativa di 10^{-15} a 1 s sul trasferimento di una frequenza ottica lungo 50 km di fibra in laboratorio.

1. Introduzione

Nella maggior parte dei processi tecnologici sono necessari accurati riferimenti di tempo e frequenza, pertanto ogni miglioramento nella realizzazione e nella disseminazione di questi ha un impatto a largo spettro sull'innovazione scientifica e tecnologica, in particolare in aree come le telecomunicazioni (velocità/capacità di trasmissione dati) o la navigazione satellitare (GPS, Galileo).

Gli Istituti Metrologici Nazionali, tra cui l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica INRiM di Torino, possiedono approfondite conoscenze nella realizzazione di orologi atomici, nella generazione della scala di tempo e nella disseminazione dei riferimenti di tempo/frequenza.

Gli orologi ottici di nuova generazione mostrano la capacità di scendere nettamente sotto la soglia di accuratezza relativa dei tradizionali campioni primari a microonde, basati su orologi a fontana di cesio, che è pari ad alcune parti in 10^{-16}. Invece, le possibilità di sincronizzazione remota di segnali di tempo/frequenza hanno il loro stato dell'arte nei metodi satellitari a due vie (in particolare il *Two Way Satellite Time and Frequency Transfer* - TWSTFT), che al massimo consentono confronti a livello di parti in 10^{-16} dopo più di 20 giorni di misure continue e che quindi sono totalmente inadatti a sfruttare le potenzialità dei nuovi orologi atomici.

La necessità di sviluppo di nuovi metodi di sincronizzazione e confronto remoto che raggiunga adeguati risultati in termini di incertezza è stato riconosciuto quale obiettivo primario ai più alti livelli metrologici internazionali ed il solo metodo finora in grado di raggiungere gli obiettivi prefissati è il link ottico di frequenza su fibra ottica.

Progetti pionieri hanno dimostrato eccellenti risultati in Francia, Stati Uniti, Germania [1,2]. Lo sviluppo di network in fibra per il confronto di frequenza tra Istituti di Metrologia e Laboratori di Spettroscopia atomica sarà una priorità per gli Istituti Metrologici nel prossimo futuro, come già riconosciuto dall'Asso-

ciazione Europea degli Istituti Metrologici Nazionali (EURAMET) e già sono presenti concrete proposte per la costituzione di network transnazionali basati su fibre commerciali [3].

L'INRiM, che realizza e mantiene in Italia le unità campione del Sistema Internazionale della Convenzione del Metro, di cui l'Italia è firmataria, ha avviato l'esperimento LinkO, finalizzato a realizzare la disseminazione di frequenza basata sull'uso di infrastrutture in fibra ottica.

In considerazione di questi aspetti, GARR-X si configura come un'infrastruttura fondamentale per LinkO, che necessita di una rete completamente ottica per ottenere il trasferimento dei segnali. Infatti, la rete attuale GARR-G contiene nodi di trasduzione ottico-elettrico-ottico che distruggerebbero la coerenza di fase del segnale, impedendo il trasferimento di segnali di frequenza accurati. LinkO rappresenta dunque uno dei servizi innovativi che saranno offerti dalla nuova rete. Le applicazioni di un sistema fibrato di confronto e sincronizzazione vanno infatti ben oltre la metrologia e si estendono all'ambito fisico ed informatico, con un largo impatto anche sulle attività industriali ad alta tecnologia.

Il sistema di link ottico è composto da una stazione laser trasmittente, dall'infrastruttura in fibra ottica e dalla stazione di ricezione. Nella stazione trasmittente, si genera una radiazione laser ultrastabile, la cui frequenza è misurata rispetto a quella di un orologio atomico campione, nel dominio delle microonde, per mezzo di un pettine ottico di frequenza [4].

Una volta misurata la frequenza del laser ultrastabile, essa è inviata al laboratorio remoto mediante collegamento in fibra. Qui è ricevuta e convertita, ancora tramite un pettine ottico, in un segnale a radiofrequenza di uso comune nell'industria o nei laboratori, ad es. 10 MHz. La conversione eseguita dal pettine ottico non degrada le proprietà di accuratezza e stabilità del laser in arrivo, consentendo di trasferire al segnale a radiofrequenza generato le prestazioni di un primario come se fosse effettivamente presente in laboratorio.

La procedura è illustrata nella figura sottostante.

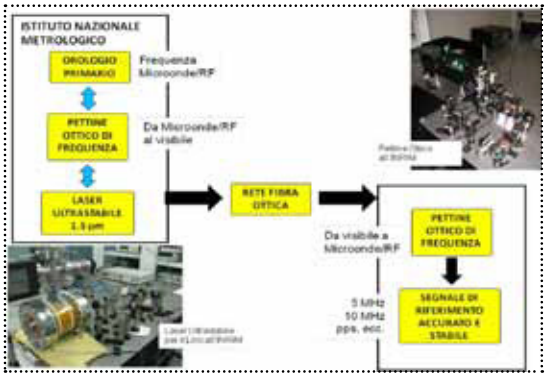

Fig. 1 Schema concettuale della disseminazione di segnali ultrastabili di frequenza con link in fibra ottica: la radiazione è misurata attraverso un pettine ottico rispetto ad un orologio primario e quindi trasferita al laboratorio remoto. Qui, sempre attraverso un pettine ottico, può essere riconvertita al dominio delle microonde ed utilizzata.

Per ottenere il trasferimento di frequenze ottiche in fibra a distanza di centinaia di km con il livello di stabilità richiesto, è necessario compensare anche il rumore di fase aggiunto dalla fibra stessa sulla portante ottica, in seguito a vibrazioni meccaniche e variazioni di temperatura e pressione ambientali. Il sistema di compensazione è basato sulla riflessione di parte del segnale che ha raggiunto il laboratorio di destinazione; nel doppio passaggio in fibra la radiazione accumula un rumore di fase che è corretto intervenendo sulla frequenza della radiazione inviata. Con questo sistema, la radiazione al laboratorio remoto risulta stabilizzata al livello del femtosecondo.

È necessario che anche la radiazione inviata in fibra abbia una stabilità relativa di frequenza al livello di 10^{-15}, per evitare che il rumore del laser si aggiunga a quello della fibra ottica, compromettendo l'efficacia della compensazione.

Le richieste di stabilità sulla frequenza della sorgente diventano tanto più stringenti quanto maggiore è la distanza a cui si intende

trasferire il segnale. Pertanto, un passo fondamentale del progetto LinkO è la realizzazione della sorgente laser.

2. La sorgente ultrastabile

La sorgente è costituita da un laser in fibra a 1542 nm, la cui frequenza è stabilizzata su uno dei modi di risonanza di una cavità ottica Fabry-Pérot, mediante la tecnica di Pound-Drever-Hall [5]. Essa consiste nella modulazione in fase del segnale incidente sulla cavità, tramite un modulatore elettro-ottico (EOM). Il segnale riflesso, incidente su un fotodiodo (PD) è proporzionale allo scostamento della frequenza della sorgente dal modo risonante e quindi, alla correzione da apportare alla frequenza del laser per renderla uguale al valore di riferimento. Opportunamente filtrato ed integrato, il segnale è utilizzato per correggere la frequenza laser attraverso un modulatore acusto-ottico (AOM) pilotato da un oscillatore controllato in tensione (VCO) e da un attuatore piezoelettrico. Lo schema del sistema è riportato in figura 2.

Dal momento che la frequenza del modo di cavità è inversamente proporzionale alla lunghezza L=10 cm della stessa [6], per raggiungere la stabilità relativa di 10^{-15} è necessario che le variazioni di L si mantengano al di sotto di 10^{-16} m. Per questo, la cavità deve essere isolata termicamente e meccanicamente dall'ambiente esterno. Essa è costituita in vetro a bassissimo coefficiente di espansione termica ed è posta all'interno di una camera da vuoto (pressione residua: 10^{-6} Pa). Uno schermo in rame favorisce un migliore isolamento termico (*fig. 3*) ed un sistema di controllo elettronico mantiene le variazioni di temperatura al di sotto di 1 μK agendo su due riscaldatori posti sulle pareti esterne della camera da vuoto.

L'isolamento dal rumore sismico è molto più critico da ottenere: poiché non è possibile isolare completamente la cavità dalle vibrazioni, si cerca di renderla insensibile ad esse agendo sul sistema di sospensione. La forma della cavità (*fig. 3*) è tale da minimizzare l'influenza del rumore sismico in direzione verticale; inoltre, essa è poggiata su particolari punti, detti di Airy, ovvero i punti di sospensione in grado di ridurre al minimo l'influenza delle vibrazioni sismiche sulla lunghezza dell'asse ottico [7]. Dimensione e posizione ottimali sono state determinate effettuando delle simulazioni software agli elementi finiti. Sistemando i piedini nella posizione ottimale si può ricavare una sensibilità alle vibrazioni verticali sufficientemente bassa da consentire la stabilizzazione al livello relativo di 4 x 10^{-16} a 1 s, ampiamente sufficiente a raggiungere gli obiettivi richiesti.

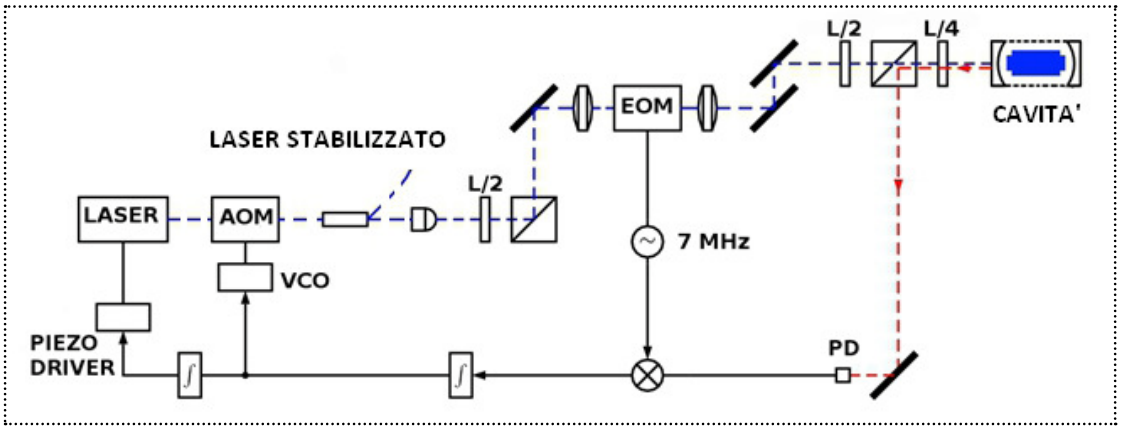

Fig. 2 Schema del circuito di controllo Pound-Drever-Hall. Il tratteggio indica i tratti di cammino ottico, la linea continua quelli di cammino elettronico. La radiazione è modulata in fase attraverso un EOM e fatta incidere sulla cavità. Il segnale riflesso incide su un fotodiodo, è demodulato, integrato ed inviato come correzione alla frequenza laser attraverso un AOM pilotato da un VCO. L/2 e L/4 identificano le lamine polarizzatrici utilizzate per modificare la polarizzazione della radiazione incidente e riflessa dalla cavità.

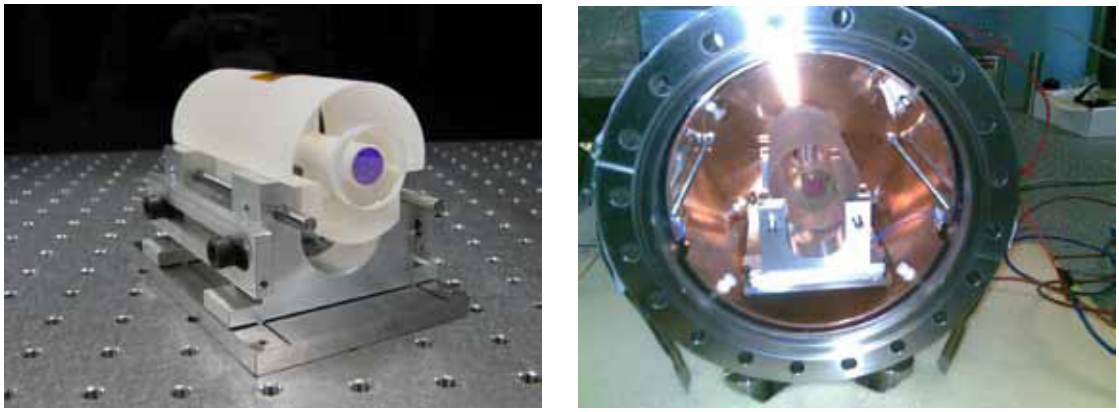

Fig. 3 La cavità posizionata sul sistema di supporto (*a sinistra*). La cavità all'interno della struttura di isolamento (*a destra*).

Per verificare le prestazioni ottenute, sono stati allestiti due sistemi indipendenti e si è analizzata la nota di battimento dei due laser stabilizzati sulle rispettive cavità. La larghezza di riga di questa è di 30 Hz; la stabilità relativa è pari ad alcune parti in 10^{-14} a 1 s in termini di deviazione di Allan, comunemente utilizzata come indicatore statistico in ambito metrologico [8] (*fig. 4*) ed è stata misurata in assenza del controllo attivo di temperatura. È atteso un miglioramento una volta che esso sarà attivato. Ulteriori miglioramenti riguarderanno l'accoppiamento ottico del modo laser a quello del risonatore e l'incremento della banda di aggancio dei laser alle rispettive cavità.

3. Il Link ottico

La radiazione stabilizzata in frequenza sulla cavità è destinata alla trasmissione in fibra al laboratorio remoto. Qui costituisce un riferimento stabile, a condizione che sia compensato il rumore che perturba la stabilità della portante in seguito al passaggio in fibra. Al laboratorio di destinazione, per ottenere la compensazione, una parte della radiazione viene riflessa utilizzando un circolatore e fatta interferire con la radiazione emessa, secondo lo schema riportato in figura 5. Il modulatore acusto-ottico (AOM2) all'uscita della fibra ottica è utilizzato per spostare la frequenza della radiazione riflessa, al fine di distinguerla dalle possibili riflessioni spurie ai vari connettori.

Il segnale di battimento, sul fotodiodo PD1, contiene l'informazione relativa al rumore di fase accumulato durante il passaggio all'interno della fibra ottica in seguito a variazioni di temperatura e pressione e vibrazioni ambientali che ne alterano la lunghezza;

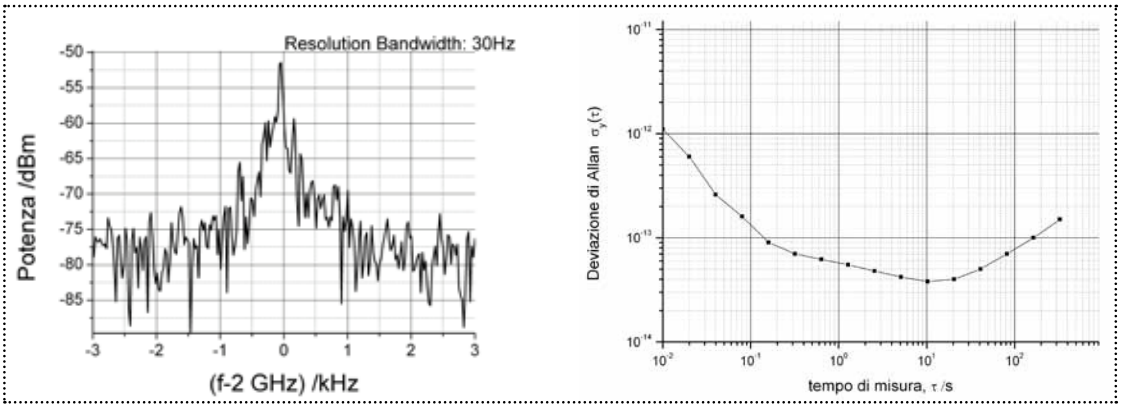

Fig. 4 A sinistra, la nota di battimento delle due cavità: la larghezza di riga è 30 Hz. A destra, la stabilità relativa della nota di battimento dei due laser stabilizzati sulle rispettive cavità.

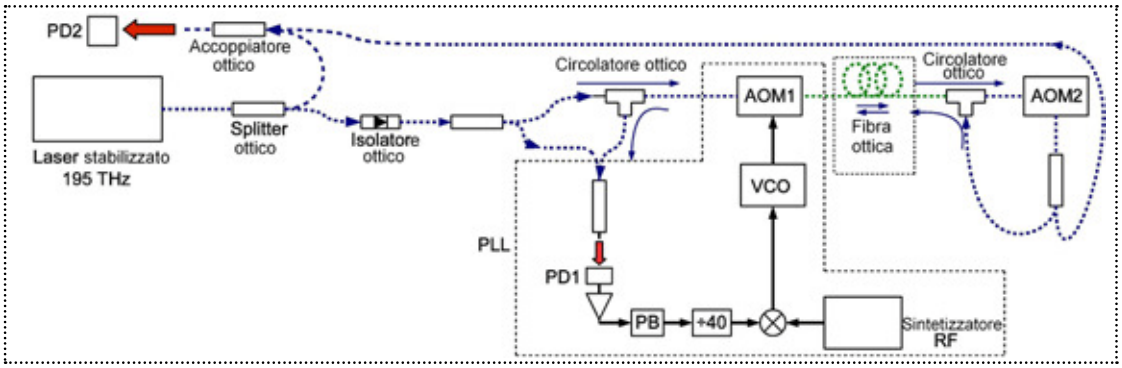

Fig. 5 Schema del link ottico. La radiazione viene inviata al laboratorio remoto; qui parte viene riflessa dopo essere stata spostata in frequenza grazie all'AOM2 e confrontata con la radiazione immessa in fibra. La nota di battimento ottenuta sul fotodiodo PD1 è amplificata, filtrata (PB indica il filtro passa-basso) e divisa. Dopo essere convertita alla tensione continua è inviata come correzione alla frequenza laser attraverso l'AOM1, pilotato da un VCO.

in particolare, utilizzando un divisore di frequenza N, in grado di mantenere il valore efficace del rumore di fase al di sotto di 1 rad, è possibile fare in modo che il segnale sul fotodiodo PD1 sia proporzionale al rumore stesso. Convertito alla tensione continua e opportunamente filtrato ed integrato, esso è utilizzato come correzione alla frequenza inviata in fibra tramite un AOM pilotato da un VCO. Per verificare le prestazioni raggiunte, si è ottenuta sul fotodiodo PD2 la nota di battimento fra la radiazione immessa in fibra e quella trasmessa all'altro capo, simulando in tal modo il laboratorio remoto.

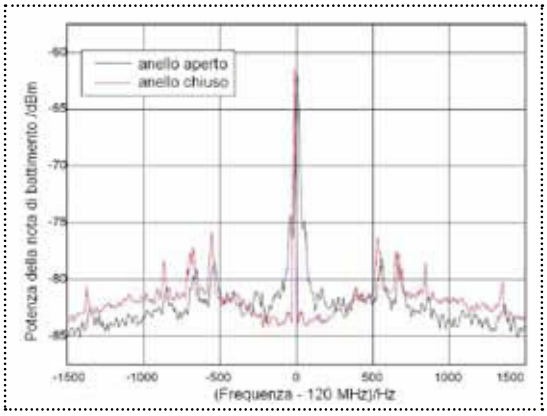

Fig 6 Spettro della nota di battimento ottenuta sul fotodiodo PD2 ad anello aperto, in nero, e chiuso, in rosso, su bobina di fibra di 25 km (Larghezza di banda di risoluzione: 10 Hz). La riduzione del rumore attorno alla portante è evidente.

Per le misure effettuate finora sono state utilizzate bobine di fibra ottica di 25 km e 50 km all'interno del laboratorio, in previsione di estendere il link su lunghezze maggiori ed all'esterno, su fibre stese. Le misure dimostrano una significativa riduzione del rumore. In figura 6 è riportata in nero la nota di battimento ottenuta sul fotodiodo PD2 ad anello aperto utilizzando una bobina di fibra di 25 km: la larghezza di riga è determinata dal rumore di fase aggiunto dalla fibra ottica. In rosso si riporta la nota di battimento quando viene attivato il circuito di controllo: la compensazione del rumore è evidente e la stabilità relativa raggiungibile è pari ad alcune parti in 10^{-17} in termini di deviazione di Allan (*fig. 7*).

In figura 7 si riporta in rosso la stabilità relativa ottenuta con bobine di 25 km, in blu la stabilità con bobine di 50 km. La stabilità relativa massima raggiungibile è superiore a 10^{-16}; essa consente pertanto il confronto di sorgenti

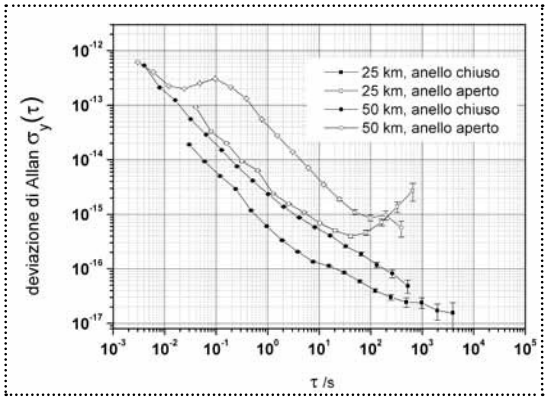

Fig. 7 Stabilità relativa del link ad anello aperto e chiuso su bobine di fibra di 25 km e 50 km. Quando il controllo viene attivato la stabilità ultima raggiungibile è superiore al livello relativo di 10^{-15}.

con questo livello di accuratezza.

4. Conclusioni e prospettive future

Si è descritto l'allestimento dell'esperimento LinkO presso l'INRiM ed i primi risultati ottenuti. Attualmente, la stabilità della sorgente consente di ottenere la compensazione del rumore sul link ottico fino al livello relativo di alcune parti in 10^{-17}.

Per un ulteriore miglioramento occorre in primo luogo stabilizzare la sorgente fino al livello relativo di 10^{-15}. Inoltre, sarà prioritario isolare termicamente e meccanicamente i rami dell'interferometro in fibra, in quanto si è dimostrato [9] che tratti di fibra non percorsi in doppio passaggio dalla radiazione, il cui rumore non è quindi compensato, possono limitare la stabilità del sistema. Inoltre, si prevede di adottare alcuni accorgimenti relativi all'ottica e all'elettronica del sistema, quali la compensazione della birifrangenza della fibra al fine di ridurre il rumore di ampiezza e la riduzione della conversione fra rumore di ampiezza e di fase.

Parallelamente all'ottimizzazione ed alla completa caratterizzazione del sistema realizzato, sarà possibile dedicarsi all'estensione di questa tecnica su fibre commerciali.

Riferimenti bibliografici

[1] Kefelian et al., High-resolution optical frequency dissemination on a telecommunications network with data traffic, Opt. Lett. 34, 10, 2009

[2] Grosche et al., Optical frequency transfer via 146 km fiber link with 10^{-19} relative accuracy, Opt. Lett. 34, 15, 2009

[3] Lopez et al., Cascaded multiplexed optical link on a telecommunication network for frequency dissemination, Optics Express, 18,16, 2010

[4] Cundiff et al., Colloquium: Femtosecond optical frequency combs, Rev. Mod.Phys. 75, 325–342, 2003

[5] Black, An Introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization, Am. J. Phys. 69, 2001

[6] Yariv, Introduction to optical electronics, Holt, Rinehart and Winston, 1971

[7] Chen et al., Vibration induced elastic deformation of Fabry-Pérot cavities, Phys. Rev. A 74, 053801, 2006

[8] Allan et al., Statistics of atomic frequency standards, Proc. Of the IEEE, 54, 2,1966

[9] Williams et al., High stability transfer of an optical frequency over long fiber-optics links, J. Opt. Soc. Am. B 25, 8, 2008

Cecilia Clivati
c.clivati@inrim.it

Laureata in fisica delle tecnologie avanzate nel 2010, sta svolgendo il Dottorato di Ricerca presso la Divisione Ottica dell'INRIM , lavorando alla realizzazione di un link in fibra ottica a basso rumore di fase che permetta il trasporto coerente di una portante a 1550 nm.