MINISTERO DELL'ISTRUZIONE, DELL'UNIVERSITA' E DELLA RICERCA

Programmi di ricerca cofinanziati - Modello E
Relazione scientifica conclusiva sui risultati di ricerca ottenuti - ANNO 2007
prot. 20073MRXMT

1. Area Scientifico Disciplinare principale	*02: Scienze fisiche*
2. Coordinatore Scientifico del programma di ricerca	*DE MARCHI Andrea*
- Università	*Politecnico di TORINO*
- Facoltà	*Facoltà di INGEGNERIA II*
- Dipartimento/Istituto	*Dip. ELETTRONICA*
3. Titolo del programma di ricerca	*Telemetria assoluta a Tempo Di Volo con laser mode locked a picosecondi*
4. Settore principale del Programma di Ricerca:	*FIS/01*
5. Costo originale del Programma:	*164.500 €*
6. Quota Cofinanziamento MIUR:	*80.000 €*
7. Quota Cofinanziamento Ateneo:	*34.644 €*
8. Finanziamento totale:	*114.644 €*
9. Durata:	*24 mesi*

10. Obiettivo della ricerca eseguita

L'obiettivo originario della ricerca era quello di realizzare un prototipo di sistema di telemetria ottica a tempo di volo basato sull'uso di un laser mode locked a picosecondi e sulla misura di ritardo con un sistema dual mixer, anche con lo scopo di indagare sui limiti di risoluzione e accuratezza eventualmente causati da rumore ed effetti sistematici.

Più specificamente, l'obiettivo era quello di ottenere già con il prototipo risoluzioni micrometriche in misure di grandi distanze (anche più di 10 m), con accuratezze dello stesso ordine e una velocità di misura che di fatto permettesse di considerare fermi anche oggetti che si muovono a velocità dell'ordine di qualche metro al secondo. In altre parole si voleva una risoluzione di una decina di micron in dieci microsecondi.

Obiettivi secondari erano inoltre da una parte, in ordine alla ingegnerizzazione, lo studio delle criticità del sistema, e dall'altra, in ordine all'applicazione, lo sviluppo di un sistema che consentisse adattabilità di risoluzione e velocità di misura in modo semplice, con facili manovre sul sintetizzatore.

A causa della importante riduzione del finanziamento rispetto a quanto richiesto si è dovuto purtroppo ridurre il livello di ambizione della ricerca limitando l'obiettivo allo studio di fattibilità, dove assume più importanza la comprensione degli effetti sistematici e di tutte le particolarità del sistema rispetto alla realizzazione di un vero prototipoo funzionante preliminare all'ingegnerizzazione.

In particolare, per il Politecnico di Milano, l'obiettivo specifico è stato rendere operativa in modo ottimamente adattato allo scopo una sorgente laser impulsata di potenza media (qualche decina di mW), controllandone le caratteristiche di stabilità di frequenza e forma degli impulsi, come rivelati da fotorivelatori veloci. L'unità di Milano ha inoltre progettato e assemblato, a questo scopo, un primo sistema adatto a valutare la fattibilità del telemetro con mixer e dispositivi commerciali disponibili a prestito dall'unità di PoliTo. Per il Politecnico di Torino l'obiettivo è stato quello di realizzare un sistema a doppio mixer in grado di funzionare con adeguata accuratezza di fase ad un certo numero di frequenze di ingresso, armoniche di 250 MHz (la frequenza del treno di impulsi del laser che si è riusciti ad acquisire), e due dispositivi di aggancio PLL, ottimizzati già sul sistema assemblato a Milano e quindi in collaborazione con quell'unità, utili a superare i problemi derivanti a distanze medio-lunghe dalla scarsa potenza del laser. Per l'INRIM l'obiettivo è rimasto quello di valutare le prestazioni del prototipo di ricerca del telemetro. Tale sperimentazione è ancora in corso presso l'INRiM, ma dati preliminari sono già presentati qui.

11. Descrizione della Ricerca eseguita e dei risultati ottenuti

La ricerca eseguita ha seguito abbastanza fedelmente il programma previsto nonostante il consistente taglio di disponibilità finanziaria rispetto alla richiesta che era stata avanzata, ma si è dovuto ridurre al minimo l'apporto di nuova strumentazione e si soprattutto ci si è dovuti accontentare di un laser a potenza marginalmente sufficiente e di fotorivelatori a banda marginalmente adeguata.

Lo schema del sistema di misura è illustrato in Fig.1 qui sotto. Per i dettagli si rinvia alla proposta.

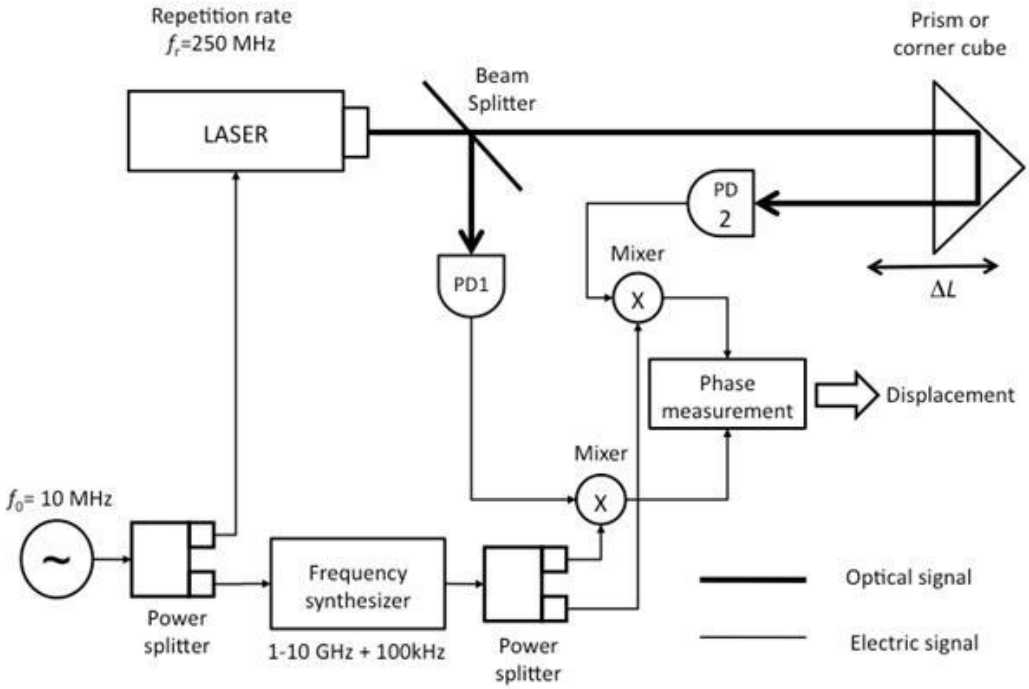

Figura 1 - Schema del sistema ottico per la misura di distanza a tempo di volo.

Per ottenere risoluzioni spaziali micrometriche è necessario riuscire a misurare il tempo di ritardo con un'incertezza inferiore ai 100 femtosecondi, e questo è un obiettivo molto ambizioso. Tuttavia l'obiettivo appare raggiungibile se si considera che nell'ambito della Metrologia di Tempo e Frequenza è stato sviluppato e si usa correntemente un sistema di misura delle instabilità di fase degli oscillatori che è in grado di risolvere anche pochi fs. Tale sistema è basato sull'espansione dell'intervallo di tempo da misurare per mezzo di un metodo eterodina, che viene applicato simmetricamente ai due canali. Si ritiene possibile in questo modo ottenere accuratezze assolute micrometriche e ripetibilità dello stesso ordine.

Allo scopo di estendere utilmente l'uso di questo metodo alla valutazione assoluta del ritardo, cosa necessaria se si vuole che il telemetro sia assoluto, occorre approfondire lo studio degli errori sistematici che si producono nella fisica e nell'elettronica di tutto il sistema. In particolare nell'unità di Polito-delen si è approfondito lo studio dei potenziali errori annidati nell'elettronica, e si è realizzato un primo prototipo di ricerca di sistema con simmetria ottimizzata di conseguenza per mettere il più possibile a modo comune tali errori.

Nell'Unità di Polimi invece ci si occuperà in collaborazione con l'Unità INRIM dell'individuazione della sorgente laser adatta allo scopo e dello studio degli eventuali limiti fisici che possano nascere da errori sistematici annidati nella fisica dell'impulso laser e dell'ottica del fascio, ivi compresi quelli indotti dalle instabilità della frequenza di ripetizione degli impulsi. La sorgente individuata non è ottimale per motivi di budget, soprattutto per quanto riguarda la potenza del laser. Essa è un laser a femtosecondi in fibra con durata dell'impulso di circa 100 femtosecondi e frequenza di ripetizione di 250 MHz. Tale frequenza è stata stabilizzata su quella di un oscillatore a Rubidio, senza peraltro sensibili miglioramenti nell'incertezza di misura.

Impiegando fotodiodi veloci (banda >10 GHz) si sono rivelati gli impulsi ottici, sia quello lanciato che quello riflesso o retrodiffuso dal bersaglio, con la necessaria risoluzione temporale e stabilità, limitando le distorsioni di ampiezza prodotte nel rivelatore, e in ultima analisi contenendo il jitter temporale. In particolare, sono state studiate con attenzione le stabilità di ampiezza e di durata degli impulsi per mantenerle al di sotto dei limiti imposti dalla risoluzione del telemetro.
In figura 2 è mostrato un confronto tra i due treni di impulsi all'uscita dei rivelatori.

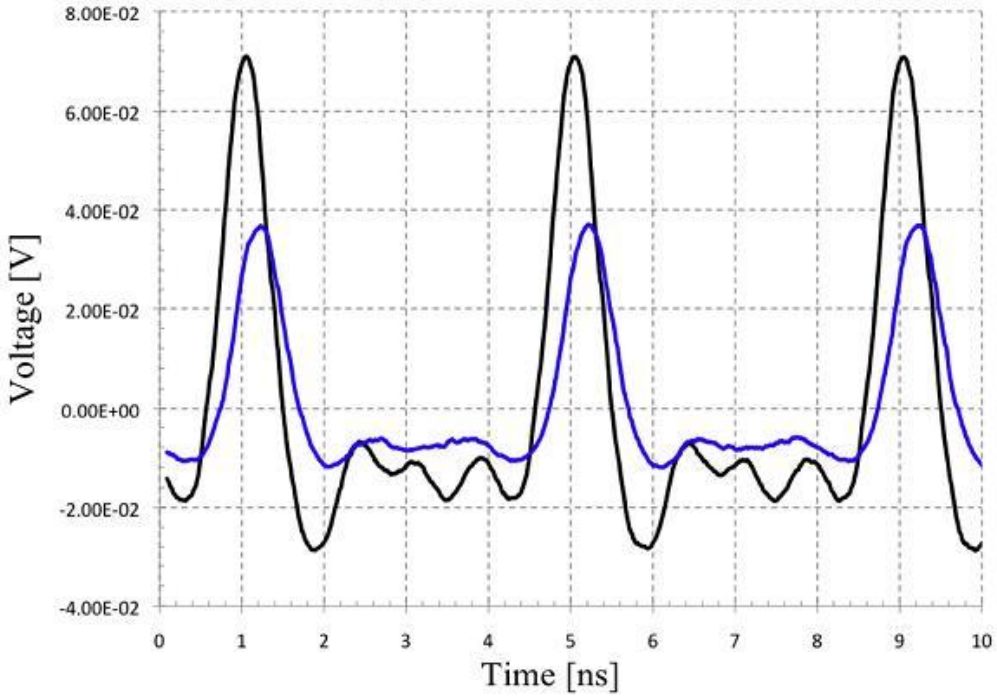

Figura 2 - Impulsi ottici rivelati dai fotorivelatori veloci.

Nella Fig 3 sono invece riportati i segnali in uscita dai mixer con una frequenza di sintetizzatore di 4 GHz. Per frequenze più elevate, che permettono una corrispondente migliore risoluzione secondo la teoria, la ridotta banda efficace dei rivelatori acquisiti impone una riduzione dell'ampiezza di questi segnali, oltre a uno sfasamento non perfettamente controllabile a causa della possibile diversità di banda dei due rivelatori.

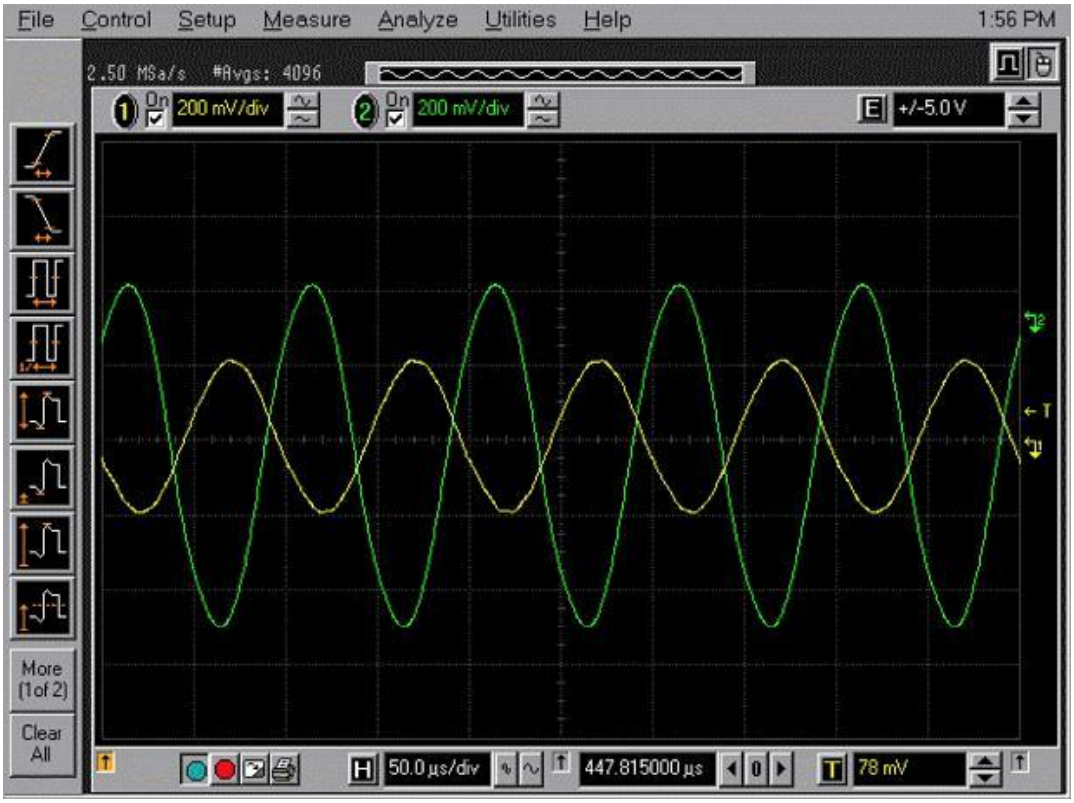

Figura 3 - Vista all'oscilloscopio delle due sinusoidi a 100 kHz in uscita dai due mixer.

Il telemetro a fs è stato validato presso l'UDR di INRIM-LENGTH che dispone di un interferometro relativo incrementale con braccio di misura avente lunghezza 28 m, basato su interferometro a eterodina con laser a 633 nm. L'interferometro INRIM è stato validato per confronto con un interferometro commerciale HP con un livello di incertezza relativa di 5 x 10-7. Il laboratorio ha una stazione di misura dei parametri ambientali per misurare la temperatura, l'umidità relativa e la pressione atmosferica. Tramite la formula di Edlen è possibile stimare l'indice di rifrazione dell'aria necessario per confrontare le differenze di cammino ottico tra l'interferometro di riferimento a 633nm e il telemetro a fs a 1.5 µm. La correzione è di circa 3 x 10-6 di con un'incertezza relativa di 1 x 10-7 dovuta all'incertezza nella conoscenza dei parametri ambientali.

La validazione è avvenuta confrontando la misura incrementale ottenuta con l'interferometro Inrim con la misura assoluta dal telemetro assoluto per varie posizioni del carrello che porta il retroriflettore dl braccio di misura.

Nella figura 4 viene rappresentata la differenza tra la misura ottenuta con l'interferometro relativo incrementale di riferimento e il telemetro assoluto per diverse posizioni del retroriflettore del braccio di misura. Le differenze sono espresse in micrometri. Ogni punto nel grafico è la media di una serie di misure della distanza. Ogni misura viene acquisita con intervallo 1 secondo e la serie si compone di circa 50 - 200 dati. Il contributo all'incertezza dovuto alla componente statistica di tipo A è di qualche decina di nanometri, come illustrato più sotto.

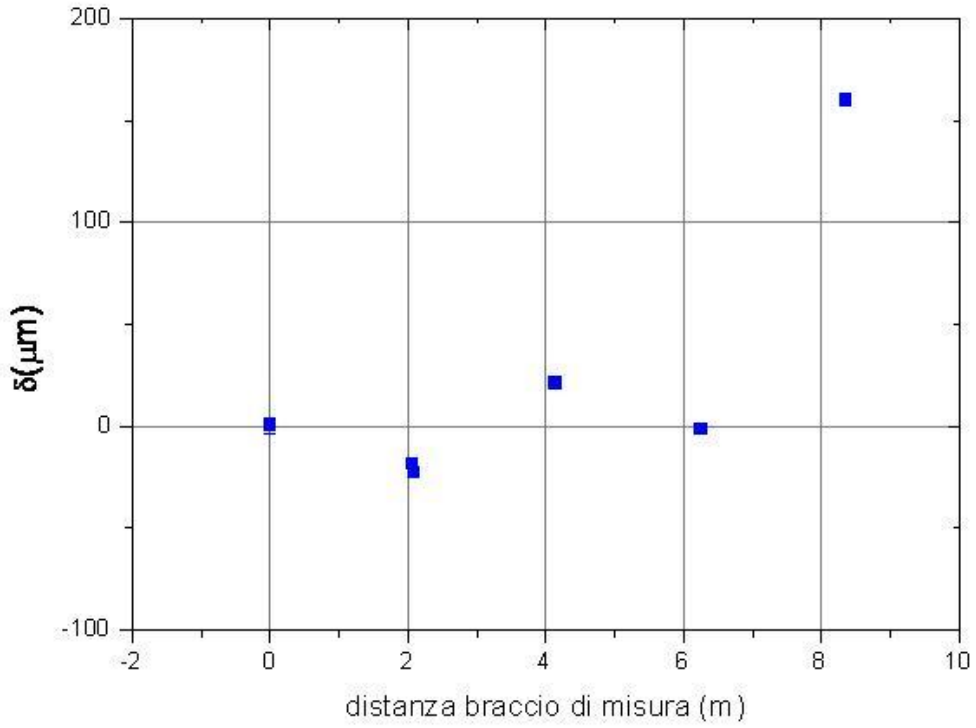

Figura 4. Differenze tra le misure espresse in micrometri tra l'interferometro INRIM e il telemetro alle diverse posizioni del retroriflettore del braccio di misura.

Dai risultati rappresentati in figura 4 si può concludere che l'accuratezza di misura è in effetti dell'ordine dei 10 micrometri in media, o un po' meglio, per distanze inferiori agli 8 metri, e questo risultato è molto confortante. Appare invece a distanze superiori un errore sistematico, che per la distanza di 8.3 metri è risltato essere di circa 160 micrometri e peggiora per distanze più grandi. La deviazione sui 12 m è addirittura maggiore di 500 micrometri. Si pensa che possano esserci ancora nel sistema ottico dei problemi di allineamento che causano questi errori per le distanze maggiori.

Per quanto riguarda invece la risoluzione di misura, cioè l'incertezza di tipo A, determinata dal contributo di incertezza statistico e comprendente sia la risoluzione degli strumenti utilizzati sia il rumore sovrapposto ai segnali di misura, le risultanze sperimentali sono già molto promettenti in questa fase di prototipo di ricerca. Si nota infatti dall'elaborazione statistica dei dati di misura che, a fronte di una stima di progetto che prevedeva un'incertezza di 15 micrometri in 10 microsecondi, la deviazione di Allan calcolata sulle misure ottenute per una distanza di 8.3 m si attesta sui 60 nanometri al tempo di media di 10 s, equivalente a 60 micrometri a 10 microsecondi di media. Infatti i risultati per tempi di media compresi tra 1 e 100 secondi sono riportati qui sotto in Fig.5 e attestano che l'andamento della deviazione è del tipo 1/sqrt(tau), cioè che il rumore dominante è bianco. Tale livello di risoluzione è peggiore di quanto preventivato di un solo fattore 4, che non si esclude di poter ridurre in ulteriori miglioramenti del sistema. In particolare si pensa che avendo a disposizione un laser più potente e/o dei fotorivelatori migliori si potrebbe facilmente raggiungere la risoluzione prevista.

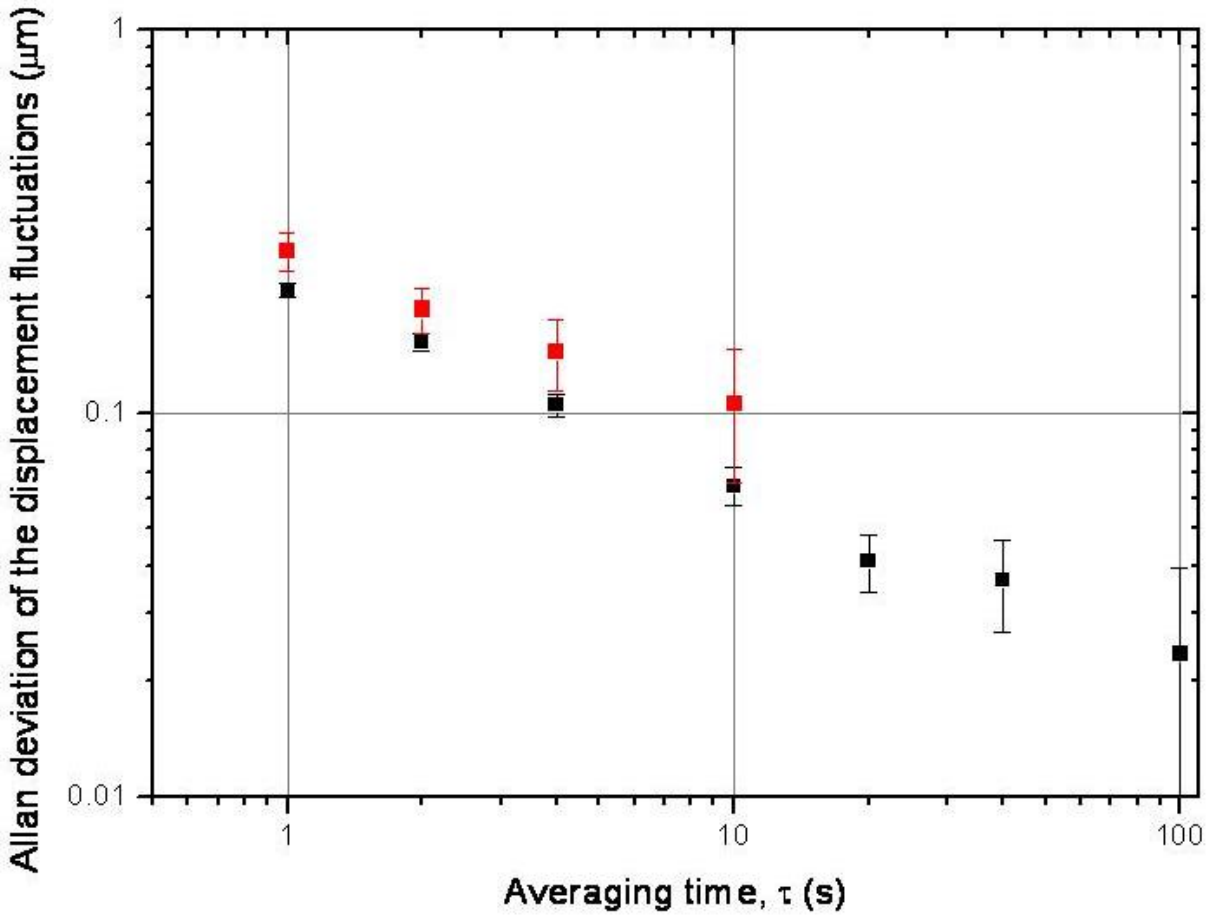

Figura 5 - Deviatione di Allan della misura di distanza con il retro-riflettore posto a circa 8.3 m (in nero) e a circa 24.6 m (in rosso) dalla postazione di misura.

L'incertezza di tipo A della misura peggiora di circa un fattore 2 quando invece si considera una distanza di 24 m, la massima a cui per ora si è lavorato, ma non si può escludere che la responsabilità di questo fatto sia da attribuire allo stesso motivo per cui risulta peggiorata l'accuratezza di misura a queste grandi distanze. Se infatti venisse confermato che quest'ultima è dovuta a un difetto di allineamento del sistema sembrerebbe naturale concludere che la risoluzione soffre in quelle situazioni dell'osservabile ridotta intensità del segnale.

12. Problemi riscontrati nel corso della ricerca

Oltre ai problemi derivanti dalla riduzione di budget, dei quali si è già discusso e che hanno comportato in definitiva più che altro un declassamento della ricerca dal livello di prototipo funzionante a quello di studio di fattibilità con prototipo di ricerca, si sono riscontrati alcuni altri problemi che hanno introdotto ritardi o parziali modifiche di visuale rispetto alle possibilità di applicare il metodo di misura studiato.

Per quanto riguarda il primo gruppo, che si riferisce sostanzialmente a problemi tecnici, sono nate difficoltà in relazione al laser e ai rivelatori. Sia l'uno che gli altri hanno dovuto essere rispediti alla casa per revisioni e nel caso del laser è stata addirittura necessaria una riparazione per la cura di un guasto grave (scollamento di una parte ottica critica) dovuto a un difetto di fabbricazione. Questi episodi hanno rallentato il lavoro riducendo al minimo il tempo rimasto disponibile per la validazione, che di conseguenza non si può al momento considerare terminata, pur avendo già prodotto misure preliminari soddisfacenti.

Per quanto invece riguarda il secondo gruppo di problemi, occorre a questo punto prudentemente concludere che per lunghe distanze il sistema è più sensibile all'allineamento di quanto si fosse anticipato e quindi, salva la possibilità di migliorare questo giudizio nel prossimo futuro con ulteriori affinamenti, appare un po' ambiziosa la speranza di applicare il sistema in ambiente industriale con la prospettiva di accuratezze al livello del micrometro, come invece si pensava in partenza. Si pensa però che gli errori assoluti riscontrati a lunghe distanze, quand'anche non si riescano a ridurre fino al micrometro con opportune migliorie al sistema, possano essere stabili e quindi eliminabili per l'applicazione industriale mediante calibrazione. Rimane invece confermato fin da subito l'obiettivo previsto di risoluzione, che dovrebbe essere raggiungibile anche in ambienti dove l'interferometria è sconsigliabile.

13. Risorse umane complessivamente ed effettivamente impegnate (da consuntivo)

	(mesi uomo) TOTALE
da personale universitario	*79*
altro personale	*29*
Personale a contratto a carico del PRIN 2007	*25*

14. Modalità di svolgimento (dati complessivi)

Partecipazioni a convegni:

	Già svolti (numero)	Da svolgere (numero)	Descrizione
in Italia	*2*	*0*	*Workshop on Modern Problems of Laser Metrology* *Lerici, October 19-21, 2009* *GMEE 2010, Congresso nazionale di Misure Elettriche ed Elettroniche, pp. 28-29, Gaeta (LT), 13-15 settembre 2010.*
all'estero	*0*	*1*	*IEEE International Instrumentation and Measurements Technical Conference 2011 (I2MTC 2011), May 10-12 2011, Hangzhou, China*
TOTALE	**2**	**1**	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Articoli pertinenti pubblicati:

	Numero	Descrizione
su riviste italiane con referee	*0*	
su riviste straniere con referee	*0*	
su altre riviste italiane	*0*	
su altre riviste straniere	*0*	
comunicazioni a convegni/congressi internazionali	*2*	*A. De Marchi, C. Svelto, M. Norgia, A. Pesatori, M. Zucco, "Limits of Time-of-Flight telemetry with mode-locked picosecond lasers", Workshop on Modern Problems of Laser Metrology, Lerici, October 19-21, 2009* *M. Norgia, A. Pesatori, "Time of Flight Telemeter with Picosecond Modelocked Laser", sottomesso a Proc. of IEEE International Instrumentation and Measurements Technical Conference 2011 (I2MTC 2011), May 10-12 2011, Hangzhou, China.*
comunicazioni a convegni/congressi nazionali	*1*	*A. De Marchi, M. Norgia, A. Pesatori, C. Svelto, M. Zucco, "Telemetro a Tempo di Volo con Laser Modelocked ai Picosecondi", GMEE 2010, Congresso nazionale di Misure Elettriche ed Elettroniche, pp. 28-29, Gaeta (LT), 13-15 settembre 2010.*
rapporti interni	*0*	
brevetti depositati	*0*	
TOTALE	**3**	

Per ogni campo di testo max 8.000 caratteri spazi inclusi

Data 22/12/2010 16:39 Firma .....

Si autorizza alla elaborazione e diffusione delle informazioni riguardanti i programmi di ricerca presentati ai sensi del D. Lgs. n. 196/2003 del 30.6.2003 sulla "Tutela dei dati personali". La copia debitamente firmata deve essere depositata presso l'Ufficio competente dell'Ateneo.