Centro Regionale di Competenza Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale

**IREA-CNR** 

# FODiSS

#### Sensore distribuito di deformazioni in fibra ottica



Manuale tecnico a cura di: Romeo Bernini











#### Centro Regionale di Competenza Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale

**IREA-CNR** 

## FODiSS

Sensore distribuito di deformazioni in fibra ottica

Manuale tecnico a cura di: Romeo Bernini Centro Regionale di Competenza Analisi e Monitoraggio del Rischio Ambientale Polo delle Scienze e delle Tecnologie Dipartimento di Scienze Fisiche C/o Facoltà di Ingegneria - Via Nuova Agnano, 11 - III Piano 80125 - Napoli - Italy www.amra.unina.it ambiente@na.infn.it Telefono +39 081 76-85125/124/115 Fax. +39 081 76-85144

Autore Romeo Bernini IREA-CNR

Coordinamento editoriale doppiavoce www.doppiavoce.it

Copyright © 2006 Università degli Studi di Napoli Federico II - CRdC-AMRA

Tutti i diritti riservati È vietata ogni riproduzione

## Indice

Introduzione	5
Descrizione tecnica e principio di funzionamento	7
Campi di applicazioni	13
Bibliografia	14

#### Introduzione

L'impiego di tecniche di diagnostica basate sull'utilizzo di sensori in fibra ottica riveste già da tempo una particolare importanza nell'ambito del monitoraggio non invasivo. Tali sensori hanno infatti piccole dimensioni e basso costo, sono immuni alle interferenze elettromagnetiche, sono ideali per costruire reti di monitoraggio molto estese e sono meccanicamente e chimicamente compatibili con molti materiali.

Tuttavia, i sensori in fibra comunemente usati consentono una misura puntuale dei parametri di interesse, ciò rappresenta una difficoltà allorché si voglia monitorare una grandezza con elevata risoluzione su lunghe distanze. In questo caso, possono essere infatti necessari anche migliaia di sensori che devono essere interrogati con complesse reti di multiplexing, con un conseguente aumento del costo e della complessità del sistema di monitoraggio.

Queste limitazioni possono essere superate sviluppando un diverso tipo di sensori, chiamati "sensori distribuiti", che consentono di effettuare misure con continuità spaziale su tutta la lunghezza della struttura di interesse.

Il principio di funzionamento di questi sensori si basa su fenomeni di scattering quali quello di Raman o di Brillouin che sono intrinsecamente presenti anche nelle fibre ottiche commerciali e consentono il monitoraggio di alcune grandezze quali la temperatura e/o le deformazioni della struttura investigata su distanze che possono arrivare a decine di chilometri.

Le tecniche basate sullo scattering di Raman consentono solo la misura della distribuzione di temperatura su estensioni comunque limitate con una risoluzione spaziale di decine di centimetri. Per superare tali limitazioni, recentemente sono stati sviluppati sensori optoelettronici distribuiti basati sullo scattering di Brillouin che consentono di misurare oltre alla temperatura anche le deformazioni della struttura investigata, risultando quindi di immediato interesse per il monitoraggio strutturale [1-3].

Le tecniche di analisi comunemente impiegate operano nel dominio del tempo, dove la risoluzione ottenibile risulta legata alla possibilità di misurare segnali transitori molto veloci (a larga banda), il che pone limitazioni sul rapporto segnale/rumore e richiede l'utilizzo di complessi sistemi di acquisizione dati. Inoltre, le tecniche di elaborazione del segnale consentono solo una descrizione qualitativa delle grandezze di interesse dal momento che sono basate su un'interpretazione dei dati grezzi e non tengono in alcun conto gli effetti non lineari, con la consequenza che alcuni errori sistematici sono di difficile compensazione [4]. Il miglioramento della tecnica di indagine si può ottenere da un lato considerando nuove configurazioni di misura nel dominio della frequenza e dall'altro mettendo a punto di algoritmi di ricostruzione che tengano in conto le relazioni matematiche che descrivono il fenomeno di scattering. Nei laboratori dell'IREA, nell'ambito delle attività del Centro regionale di Competenza per L'analisi e il Monitoraggio del Rischio Ambientale (AMRA), vengono sviluppati e sperimentati sensori in fibra ottica basati sullo scattering di Brillouin nel dominio della frequenza. In particolare è stato sviluppato un prototipo di rivelatore di deformazioni a fibre ottiche basato sullo scattering di Brillouin FODiSS (Fiber Optic Distributed Strain Sensor) che permette il monitoraggio di deformazioni su lunghe distanze (chilometri) con un elevata risoluzione (inferio-

re al metro) [5-7].

# Descrizione tecnica e principio di funzionamento

Il sensore sviluppato si basa sul fenomeno dello Scattering Stimolato di Brillouin (SBS). Nella configurazione classica. denominata pump-probe. l'interazione in fibra tra due onde luminose contropropaganti a differente freguenza, e un'onda acustica generata dalle due onde luminose per effetto elettrostrittivo, causa uno scambio di potenza tra l'onda di pump (quella a frequenza maggiore) e l'onda di probe (a frequenza minore). L'ammontare di tale trasferimento è massimo quando la differenza in frequenza tra i due fasci è pari a una frequenza caratteristica della fibra, denominata frequenza di Brillouin. Tale frequenza è dipendente dalle condizioni locali della fibra (deformazione e temperatura). È evidente, dunque, che il monitoraggio dell'interazione pump-probe, al variare dello shift in frequenza tra questi due fasci, consente di effettuare una misura della grandezza che agisce sulla freguenza di Brillouin. Dall'analisi delle caratteristiche del trasferimento di potenza tra l'onda di pump e quella di probe è possibile risalire alla distribuzione di temperatura e di deformazione presenti lungo la fibra. Tipicamente, la distribuzione spaziale della grandezza di interesse è ottenuta inviando lungo la fibra un breve impulso e misurando la luce riflessa o trasmessa con elevata risoluzione temporale. Per ottenere elevate risoluzioni spaziali è necessario l'impiego di impulsi di durata molto breve (decine di nanosecondi); questo comporta l'utilizzo di ricevitori a larga banda con consequente degrado del rapporto segnale/rumore e necessità di utilizzare complessi sistemi di acquisizione dati. Per ovviare a questi inconvenienti sono state sviluppate tecniche di Analisi di Brillouin in Fibra Ottica nel dominio della frequenza (Brillouin Optical-fiber Frequency Domain Analysis) che determinano la funzione di trasferimento del tratto di fibra in contatto con la struttura sotto indagine. In guesto caso le due onde che interagiscono per effetto dello scattering di Brillouin sono una continua e l'altra modulata sinusoidalmente. In questa configurazione, dovendo acquisire segnali a banda stretta, è possibile usare tecniche di rivelazione sincrona che consentono un notevole incremento del rapporto segnale rumore seppur con un lieve incremento del tempo di acquisizione.

A differenza delle tipiche configurazioni presenti in letteratura che utilizzano ingombranti e costose sorgenti laser a stato solido Nd:Yag, nell'apparato sperimentale che si è allestito la sorgente laser è costituita da un laser a semiconduttore a feedback distribuito (DFB-LD), a banda stretta, che opera in onda continua a una lunghezza d'onda di 1,55  $\mu$ m. Questa scelta della lunghezza d'onda di lavoro consente di utilizzare i componenti standard delle attuali telecomunicazioni ottiche con notevoli vantaggi sia in termini di prestazioni che di affidabilità e inoltre consente di utilizzare come fibre di sensing le comuni fibre per telecomunicazioni. Lo schema del prototipo di misura allestito è riportato in Figura 1.



Fig. 1. Schema dell'apparato sperimentale allestito.

La luce del diodo laser è divisa per mezzo di un accoppiatore direzionale il quale dirige l'1% della potenza ottica nominale al modulatore elettro-ottico (EOM1), per la generazione della componente AC sinusoidalmente modulata di probe, mentre il restante 99% di potenza è inviata a un altro modulatore elettro-ottico (EOM2). Quest'ultimo è, invece, adoperato per la generazione della componente di luce continua di pompa (CW) mediate la tecnica della creazione delle bande laterali mediante modulazione di ampiezza. L'onda luminosa, ai THz, prove-

niente dalla sorgente laser viene modulata in intensità alla frequenza dei GHz, tale modulazione darà luogo a nuove righe nello spettro ottico, le cosiddette bande laterali. Lo spettro ottenuto dalla modulazione d'ampiezza risulta ovviamente simmetrico intorno alla frequenza della portante (sorgente laser THz). Le bande laterali sono equalmente spaziate in frequenza di una quantità, pari alla frequenza del segnale modulante, che è dei GHz. Una delle due bande laterali verrà utilizzata per la misura, a seconda che si lavori nella configurazione di guadagno o di perdita, mentre l'altra verrà filtrata dal filtro ottico (OF) onde evitare disturbi sulla misura. La luce passa successivamente per uno scrambler di polarizzazione che ha il compito di rendere la polarizzazione casuale al fine di evitare gli effetti della polarizzazione sulle misure. A valle è infine posto un isolatore (OI) necessario per bloccare la luce proveniente dalla direzione opposta.

I segnali ottici provenienti dalla fibra vengono inviati a opportuni fotorivelatori e acquisiti mediante un analizzatore di rete vettoriale collegato a un personal computer. In Figura 2 è riportata un'immagine del prototipo realizzato.



Fig. 2. Immagine del prototipo allestito.

La validazione del prototipo è stata eseguita in due fasi. In una prima fase sono state effettuate misure su fibre omogenee per caratterizzare e calibrare il sistema. Nella seconda fase invece sono state eseguite misure per differenti condizioni note di deformazione o temperatura della fibra ottica sotto test.

L'elaborazione dei segnali misurati è stata effettuata grazie a opportuni algoritmi sviluppati per l'analisi nel dominio della frequenza che permettono di compensare gli errori di non località comunemente presenti nei sensori basati sullo scattering di Brillouin.

In Figura 3 è riportata una delle ricostruzioni ottenute nel caso di tre perturbazioni di 5m distanti 5m indotte in fibra lunga 90m immergendo parti della fibra in acqua a 0°C. L'errore medio di ricostruzione è inferiore a 1,5°C.

In Figura 4 è riportato un esempio di misura di deformazione effettuato su di una trave di alluminio a forma di L di 2,5m. La trave è stata appoggiata ai due estremi e caricata con un peso



**Fig. 3.** Ricostruzione di tre perturbazioni di 5m distanti 5m indotte in fibra lunga 90m immergendo parti della fibra in acqua a 0°C.

di 2000g al centro come riportato in Figura 5. La fibra di sensing è stata incollata alla trave lungo una linea assiale. Supponendo che ci sia una perfetta aderenza della fibra alla trave, il profilo di deformazione misurato lungo la fibra fornisce il profilo di deformazione lungo l'asse dove è incollata la fibra. Al fine di un controllo *a posterori* sui risultati ottenuti dall'esperimento, le deformazioni subite dalla trave sono state anche modellate numericamente mediante simulazioni agli elementi finiti (FEM). Il profilo di deformazione misurato con il sensore a fibre ottiche e quello ottenuto con le simulazioni FEM sono riportati in Figura 4.

In Figura 6 è riportato un esempio di misura su lunghe distanze. In questo caso una perturbazione di 30m è stata indotta alla fine di una fibra lunga circa 8000m immergendo la fibra in acqua a 0°C. Come si può osservare dalla figura anche in questo caso il sensore riesce a identificare correttamente la perturbazione.



Fig. 4. Deformazione di trave di alluminio di 2,5m appoggiata agli estremi e caricata con un peso di 2000g al centro. Linea continua = misura sperimentale, punti = simulazioni FEM.



Fig. 5. Condizioni di carico della struttura sotto analisi e sezione della trave di alluminio usata per l'esperimento.



Fig. 6. Ricostruzione una perturbazione di 30m indotta in fibra lunga circa 8000m immergendo la fibra in acqua a 0°C.

## Campi di applicazione

I campi di applicazione del sensore sviluppato sono tutti quelli dove è richiesto un monitoraggio delle deformazioni e/o della temperatura su distanze che vanno dalle decine di metri sino ai chilometri con risoluzioni spaziali del metro o inferiore come ad esempio:

- controllo delle deformazioni di grandi infrastrutture civili (ponti, dighe, viadotti, ecc.);
- controllo delle deformazioni di tubazioni (acquedotti, oleodotti, gasdotti, ecc.);
- monitoraggio della temperatura in gallerie per il controllo degli incendi;
- monitoraggio della temperatura in aree vulcaniche;
- monitoraggio della temperatura in mari e laghi per applicazioni ambientali.

#### Ringraziamenti

L'autore del manuale desidera ringraziare per la collaborazione l'Ing. Aldo Minardo e il Prof. Luigi Zeni della Seconda Università degli Studi di Napoli.

### Bibliografia

- Bao X, Webb DJ, Jackson DA. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in optical fiber. Opt. Lett. 1994;19(2):141-3.
- DeMerchant M, Brown A, Bao X, Bremner T. Structural monitoring by use of a Brillouin distributed sensor. Appl. Optics. 1999;38(13): 2755-9.
- Bao X, Dhliwayo J, Heron N, Webb DJ, Jackson DA. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering. Ligthwave J, Tech. 1995;13(7):1340-8.
- Geinitz E, Jetschke S, Ropke U, Schroter S, Willisch R, Bartelt H. The influence of pulse amplification on distributed fibre-optic Brillouin sensing and a method to compensate for systematic errors. Meas J. Sci. Technol. 1999;10:112-6.
- 5. Bernini R, Minardo A, Zeni L. Distributed fiber-optic frequencydomain Brillouin sensing. Sensors and Actuators A. 2005;123-124C:337-42.
- Bernini R, Minardo A, Zeni L. High-resolution distributed fiber-optic frequency-domain Brillouin sensing. International conference on Optical Fibre Sensors, OFS 17, Bruges 2005.
- Bernini R, Minardo A, Zeni L. Distributed strain measurements by fiber-optic Brillouin sensing for structural monitoring, Eurosensors XIX, Barcellona, 2005.

Finito di stampare nel mese di luglio 2006 presso Officine Grafiche Francesco Giannini & Figli S.p.A. – Napoli I manuali del CRdC-AMRA 14