



Università degli studi di Padova
FACOLTA' DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Prova Finale – Tesina

Sensori distribuiti in fibra ottica

Distributed Optical Fiber Sensing

Candidato:
Roberto Limina
Matricola 493851

Relatore:
Prof. Luca Palmieri

Anno Accademico 2009-2010

Alla mia famiglia

Indice

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduzione | 1 |
| 2 | Cenni storici ed evoluzione dei DOFS | 5 |
| 3 | Principi di base | 13 |
| 3.1 | Principi di ottica e fibre ottiche | 13 |
| 3.1.1 | Interazioni tra luce e materia | 19 |
| 3.2 | Principi dei DOFS | 21 |
| 3.2.1 | Parametri di valutazione dei DOFS | 23 |
| 4 | Sistemi quasi distribuiti | 27 |
| 4.1 | DOFS basati su reticoli di Bragg | 27 |
| 5 | Sistemi totalmente distribuiti | 33 |
| 5.1 | Sistemi basati sulla retro-diffusione lineare | 36 |
| 5.2 | Sistemi basati sulla retro-diffusione non lineare | 38 |
| 5.2.1 | DOFS di temperatura basati sull'effetto Raman | 38 |
| 5.2.2 | DOFS basati sulla diffusione Brillouin spontanea | 41 |
| 5.3 | Sistemi non lineari basati sulla diffusione co-direzionale | 45 |
| 5.3.1 | DOFS basati sulla diffusione Brillouin stimolata | 47 |
| 6 | Conclusioni | 50 |
| | Bibliografia | 53 |

Capitolo 1

Introduzione

La capacità di analisi e di monitoraggio del comportamento di strutture, anche molto estese, che presentano elementi di criticità importanti è ritenuta, dagli stessi progettisti, una problematica di sempre maggiore importanza. Normalmente, nelle applicazioni civili, le caratteristiche strutturali sono un parametro di progetto ed eventuali incertezze sono tenute sotto controllo per mezzo di fattori di sicurezza. La valutazione quantitativa dei parametri di progetto viene comunemente eseguita effettuando, al momento del collaudo, delle prove di carico; in seguito la struttura viene controllata, durante l'esercizio, mediante ispezioni periodiche.

Lo sviluppo e l'utilizzo di sistemi di monitoraggio strutturale offre l'opportunità di valutare con continuità ed in tempo reale le caratteristiche strutturali e la loro degradazione durante il tempo di vita della struttura stessa. Alcuni importanti risultati che si possono ottenere implementando dei sistemi di monitoraggio strutturale sono l'aumento del livello di sicurezza, dovuto essenzialmente ad un monitoraggio continuo nel tempo al posto di una semplice stima dell'evoluzione dei danni, e la riduzione dei costi di manutenzione, dovuta all'ottimizzazione degli interventi. Si possono avere anche dei miglioramenti a livello di progettazione e modellizzazione, sfruttando la maggiore conoscenza del comportamento delle strutture in opera.

Molte applicazioni, attualmente, si occupano del controllo del comporta-

mento delle strutture, al fine di valutare la degradazione delle prestazioni: in questa direzione, la nuova frontiera è rappresentata dai sensori in fibra ottica. Infatti, oltre che nel campo delle telecomunicazioni, le fibre ottiche sono usate da tempo anche nella realizzazione di sensori per le loro proprietà di minima invasività, elevata sensibilità, sostanziale immunità alle interferenze elettromagnetiche, elevato grado di integrabilità con le strutture da controllare, resistenza alla corrosione e facilità di *multiplexing*. L'utilizzo di sensori in fibra ottica, permanentemente connessi alle strutture da monitorare, consente la realizzazione delle cosiddette 'strutture intelligenti', strutture capaci in pratica di fornire informazioni sul loro stato e sulla loro integrità. Le fibre ottiche consentono, pertanto, di verificare l'affidabilità di una struttura durante la sua vita operativa, rappresentando un sistema di monitoraggio permanente, in grado anche di generare allarmi nel caso si verificano condizioni critiche.

Negli ultimi anni è stata rivolta particolare attenzione a sensori in fibra ottica di tipo innovativo come, ad esempio, i reticoli di Bragg integrati nelle fibre stesse, che consentono di eseguire misure puntuali. Essi sono semplici dal punto di vista costruttivo e, essendo incisi sulla fibra ottica, si prestano ad una facile integrazione con le strutture da controllare, contrariamente ad altri tipi di sensori in fibra che richiedono l'aggiunta di specchi o strutture interferometriche esterne. Tuttavia, i sensori di Bragg non si prestano a misure spazialmente distribuite su grandi distanze. Oltre ai sensori che effettuano misure puntuali, è molto forte l'interesse verso sensori a carattere distribuito in grado di lavorare anche su grandi distanze.

Le potenzialità di un sensore costituito da una semplice fibra ottica, in grado di fornire un profilo di deformazione o di temperatura per una lunghezza di diversi chilometri ed una risoluzione spaziale inferiore al metro, sono enormi quando bisogna controllare grandi strutture come dighe, ponti, grandi edifici, etc. In questi casi, infatti, l'utilizzo di sensori puntuali richiederebbe la sistemazione di un elevato numero di sensori in un numero discreto di punti ritenuti strategici, con evidenti problemi di gestione dei dati e, in ogni

caso, non garantirebbe il monitoraggio dell'intera struttura. Inoltre, se un guasto o un cedimento avvenisse in una zona non coperta dai sensori, sarebbe impossibile segnalarlo. La capacità di consentire misure distribuite anche su lunghe distanze è, una volta ancora, un punto di forza della tecnologia delle fibre ottiche. Esse consentono, difatti, di determinare i valori delle grandezze di interesse, in funzione della loro posizione, lungo l'intera lunghezza della fibra ottica.

I sensori distribuiti risultano particolarmente utili quando è necessario eseguire misure in un gran numero di punti o con continuità lungo la fibra ottica. Tipiche aree in cui trovano applicazione sono:

- il monitoraggio di deformazioni in grandi strutture come ponti, dighe, gallerie, edifici, serbatoi, pozzi petroliferi, navi, ecc.;
- le misure di profili di temperatura in trasformatori elettrici di potenza, generatori, reattori nucleari, gasdotti, oleodotti, sistemi per il controllo di processi e sistemi per la rivelazione di incendi;
- l'identificazione di perdite in condutture, la diagnostica dei guasti e la rivelazione di anomalie elettriche o magnetiche nei sistemi di distribuzione dell'energia elettrica;
- la valutazione, in tempo reale, delle deformazioni, delle vibrazioni e della temperatura nei materiali compositi mediante sensori inglobati negli stessi, in settori come l'industria aerospaziale.

Le tecniche impiegate per ottenere misure realmente distribuite sono comunemente basate su una qualche forma di meccanismo di diffusione della luce che avviene all'interno della fibra. La risoluzione spaziale è tipicamente ottenuta mediante la tecnica della riflettometria ottica nel dominio del tempo (OTDR), nella quale vengono lanciati impulsi di luce nella fibra ottica e vengono misurate le variazioni dell'intensità retro-diffusa, causate dalla grandezza presa in considerazione, in funzione del tempo. Attualmente, vengono implementate anche tecniche alternative, basate su misure nel dominio della frequenza.

Le fibre ottiche offrono, quindi, dei vantaggi unici per operare delle misurazioni distribuite nello spazio. In questa tesina verrà presentata una panoramica di alcuni sensori distribuiti in fibra ottica (*distributed optical fiber sensors* – DOFS) [1]; in particolare, dopo aver trattato le loro origini, la loro evoluzione e aver discusso della situazione attuale e delle prospettive future di sviluppo, verranno passate in rassegna alcune tipologie di DOFS, focalizzando l'attenzione sui sensori in grado di effettuare misure di deformazione e/o di temperatura.

Capitolo 2

Cenni storici ed evoluzione dei DOFS

I DOFS si sviluppano all'interno del campo più generale dei dispositivi optoelettronici, un settore nato di fatto con l'invenzione del laser nel 1960. Il laser fornisce una sorgente di luce quasi-monocromatica, fortemente collimata, intensa e coerente, rappresentando, perciò, una sorgente ottica sulla quale l'informazione può essere facilmente impressa e dalla quale può essere facilmente estratta.

La consapevolezza di poter sfruttare le nuove possibilità offerte dal laser stimolò molte attività di ricerca nel campo delle comunicazioni ottiche, soprattutto grazie all'altissima frequenza portante della luce ($\approx 10^{14}$ Hz) che ha implicato un aumento della larghezza di banda nelle comunicazioni di molti ordini di grandezza. Si realizzò rapidamente, comunque, che la radiazione della luce che si propaga liberamente attraverso l'atmosfera, all'atto pratico, non può sostenere sistemi di comunicazione su distanze più lunghe di un chilometro; ciò è dovuto all'attenuazione atmosferica, specialmente in presenza di pioggia, nebbia o neve. L'attenzione, quindi, fu rivolta verso percorsi guidati e protetti per la trasmissione della luce.

Nei primi anni '60 l'interesse venne focalizzato sulle fibre ottiche. Questi sottili fili di vetro furono usati un po' per curiosità durante gli anni '50

per applicazioni molto specializzate a corto raggio nelle quali la luce veniva trasportata lungo dei circuiti, ad esempio, in microscopi o strumentazioni mediche; l'attenuazione nel vetro a base di silicio, allora, era troppo grande ($\approx 250 \text{ dB km}^{-1}$) per poter essere presa in considerazione per percorsi lunghi qualche metro o più. Tuttavia, molte più opportunità si presentarono nel 1966 quando Kao e Hockam nel Regno Unito e Werts in Francia dimostrarono, in maniera convincente, che le alte perdite nelle fibre erano fortemente legate a delle impurità rimovibili, come ioni di metalli pesanti. Dalla scoperta scaturì il tentativo di riduzione delle impurità che portò, nel 1970, ad un altro grande traguardo quando nei laboratori le perdite diminuirono fino a 20 dB km^{-1} ; le fibre, così, divennero finalmente competitive con i sistemi basati su cavi coassiali. Il risultato raggiunto scatenò un'esplosione delle attività nel campo delle comunicazioni attraverso fibra ottica. Si pensi soltanto che attualmente sono disponibili fibre ottiche con attenuazioni di soli $0,15 \text{ dB km}^{-1}$, vicine al limite teorico imposto dalla diffusione Rayleigh.

La conveniente disponibilità di fibre ottiche con basse perdite iniziò a stimolare l'idea che potessero essere usate anche per altri scopi. Uno dei più interessanti fu quello delle misure nel campo del monitoraggio strutturale. Fu subito chiaro che la propagazione della luce nella fibra ottica viene influenzata in molti modi da agenti esterni, permettendo, quindi, la possibilità di effettuare delle misure utilizzando un mezzo passivo, isolante, flessibile e facilmente installabile su strutture già esistenti.

La tecnologia dei sensori basati su fibra ottica mosse i suoi primi passi con dispositivi molto semplici come il sensore di temperatura *'break-point'*, nel quale il livello di luce presente al ricevitore dipende dall'allineamento delle estremità di due fibre, che sono a loro volta controllate dalla temperatura esterna, attraverso la flessione di due strisce bimetalliche; un dispositivo siffatto può fornire un economico e semplice allarme antincendio. La tecnologia progredì attraverso sensori 'singolo-punto' più sofisticati come il giroscopio in fibra ottica (FOG), che fa uso dell'interferenza ottica per rilevare delle rotazioni meccaniche, e il dispositivo misura-corrente, che utilizza le propri-

età di polarizzazione della luce. L'idea che una gran varietà di effetti ottici potesse essere utilizzata nei metodi di misurazione, grazie alle facilitazioni offerte dalla luce laser associata alle fibre ottiche, venne quindi sviluppata costantemente.

Le comunicazioni in fibra ottica evolverono rapidamente, parallelamente ai progressi fatti nel campo dei sensori, e, a partire dalla metà degli anni '70, furono messi a punto dei sistemi operazionali. Essi portarono all'esigenza di una gran varietà di attrezzature diagnostiche; tra queste c'era la necessità di avere uno strumento che potesse localizzare i guasti nelle fibre, regioni di grosse perdite anomale e cattive giunzioni: nacque il 'riflettometro ottico nel dominio del tempo' (OTDR) [2]. L'OTDR consiste in quello che si può considerare come un radar ottico unidimensionale (lidar). Un impulso ottico proveniente da un laser viene lanciato nella fibra e la luce, a causa della diffusione Rayleigh che si ha dalle piccole ($\ll \lambda$) disomogeneità e impurità nel silicio amorfo di cui è composta la fibra, viene continuamente riflessa all'indietro durante la propagazione. La potenza ottica retro-diffusa emerge dal terminale di lancio e viene analizzata in funzione del tempo per fornire una mappa differenziale della distribuzione spaziale dell'attenuazione ottica lungo la fibra. L'OTDR fu quindi, di fatto, il primo sistema di monitoraggio strutturale distribuito in fibra ottica, poiché permetteva misure spaziali di qualsiasi grandezza esterna che fosse capace di influenzare l'attenuazione nella fibra, come quelle causate da una torsione o una rottura, per esempio.

Le misure distribuite spazialmente non furono lo scopo principale per cui nacque l'OTDR, ma stimolarono comunque le idee anche in questa direzione. Chiaramente, se la misura distribuita voleva essere il target principale di un sensore progettato lungo le linee dell'OTDR, doveva essere preso in considerazione l'utilizzo di un parametro sensibile alla grandezza oggetto di misura (temperatura, pressione, campo elettrico, campo magnetico, livello di radiazione nucleare, etc). L'attenuazione in una fibra ha soltanto una limitata sensibilità a tali grandezze, sicché dovettero essere ricercate altre proprietà. Dei parametri che caratterizzano un'onda luminosa, i più sensibili a pertur-

bazioni esterne sono quelli che dipendono dalla fase, e che per questo sono sensibili a variazioni del percorso ottico dell'ordine anche solo di una lunghezza d'onda. L'attenzione venne rivolta, di conseguenza, verso parametri come lo stato di polarizzazione (che dipende dalla differenza di fase), la coerenza e la fase stessa (attraverso fenomeni di interferenza ottica). Il primo metodo che fu preso seriamente in considerazione per i DOFS era legato alla polarizzazione. Il dispositivo era analogo all'OTDR, ma stavolta analizzava lo stato di polarizzazione della luce retro-diffusa in funzione del tempo, piuttosto che il suo livello di potenza. Venne progettato, allora, il 'riflettometro di polarizzazione ottica nel dominio del tempo' (POTDR), che mappa la distribuzione spaziale delle proprietà di polarizzazione della fibra e quindi, corrispondentemente, la distribuzione di qualsiasi grandezza che la modifichi: le proprietà di polarizzazione della fibra sono sensibili a molti agenti esterni di interesse (per esempio, pressione, deformazione, temperatura, campo elettrico e campo magnetico).

Diventò presto evidente che i DOFS offrivano una dimensione extra al monitoraggio e alla diagnosi di grandi strutture. L'utilizzo di un mezzo di misurazione unidimensionale, passivo e dielettrico, flessibile abbastanza per essere installato, con la minima intrusione, in maniera conveniente e senza grosse modifiche, su strutture come ponti, dighe, aerei, astronavi, oleodotti, gasdotti, impianti petroliferi, caldaie e tubature industriali a pressione, generatori di potenza e impianti chimici, attrezzature per l'estrazione, etc., fu attraente soprattutto per la capacità di poter offrire, nell'effettuare distribuzioni di deformazione e temperatura per esempio, un monitoraggio continuo sia per il rilevamento di condizioni anomale (anche potenzialmente catastrofiche), sia per aumentare la comprensione del comportamento (specialmente sotto condizioni estreme) delle strutture e migliorare i nuovi progetti.

Non appena ci fu la consapevolezza delle possibilità che venivano offerte, la tecnologia si sviluppò, e vennero stabilite diverse metodologie di sviluppo. In primo luogo, ci fu una diversificazione tra i sistemi DOFS comple-

tamente distribuiti, cioè con la capacità di fare una misura del campo in ogni punto della fibra, e i sistemi quasi-distribuiti, capaci di fare misure solo in particolari e predeterminate posizioni lungo la fibra, oggetto di alcuni speciali trattamenti o arrangiamenti. Chiaramente il sistema completamente distribuito è più versatile; il sistema quasi-distribuito, però, è spesso più semplice e economico ed è abbastanza adeguato per alcune applicazioni (il sistema quasi-distribuito è qualche volta citato come ‘sistema multiplexato’, anche se questa definizione è preferibilmente da non usare poiché questo termine andrebbe propriamente utilizzato per i sistemi che non necessariamente contengono un array lineare di punti sensibili.) In secondo luogo, ci fu una diversificazione tra i sistemi che per effettuare la mappatura si servono di effetti ottici lineari e quelli che utilizzano effetti non lineari, che a loro volta possono essere completamente distribuiti o quasi-distribuiti. Gli effetti lineari sono semplici da implementare in riferimento ai requisiti di sorgente e del ricevitore, tuttavia, però, gli effetti non lineari offrono gradi di libertà extra grazie alla loro diversità e alle loro specifiche risposte a determinate grandezze.

La possibilità di eseguire misure distribuite di temperatura fu dimostrata per la prima volta da Hartog e Payne [3], i quali si servirono delle variazioni indotte dalla temperatura al coefficiente di diffusione di Rayleigh lungo fibre a nucleo liquido o in silice. Le fibre a nucleo liquido presentano coefficienti di diffusione maggiori delle fibre in silice, tuttavia la loro scarsa affidabilità ne limita l’uso. Dakin et al. [4] dimostrarono, invece, la possibilità di effettuare misure di profili di temperatura mediante il monitoraggio delle variazioni dei coefficienti di retro-diffusione Raman della luce di Stokes e anti-Stokes. L’utilizzo dell’effetto Raman è conveniente poiché permette l’impiego di fibre in silice come sensori e, anche se l’intensità è circa 30 dB più debole della diffusione Rayleigh, la sensibilità alla temperatura è molto elevata; diversi produttori hanno commercializzato strumenti basati su questo principio. La diffusione Raman, tuttavia, non consente misure di deformazione.

Nel 1989 fu dimostrato che lo spostamento in frequenza della luce di

Stokes retro-diffusa dal fenomeno noto come diffusione Brillouin (il cosiddetto ‘*shift*’ di Brillouin) dipende fortemente dalla deformazione e dalla temperatura a cui è sottoposta una fibra ottica [5, 6]. Da allora una notevole attenzione è stata rivolta alla possibilità di utilizzare la diffusione Brillouin per misure distribuite, principalmente per le seguenti ragioni: prima di tutto la possibilità di eseguire misure di deformazione in grandi strutture; inoltre, a differenza delle tecniche Raman, la misura dello ‘*shift*’ di Brillouin non richiede alcuna calibrazione delle perdite della fibra ottica ed è utilizzabile su lunghe distanze. Ciò è dovuto al fatto che lo ‘*shift*’ di Brillouin è piccolo (circa 10 GHz) ed è quindi possibile lavorare nella regione di minime perdite delle fibre ottiche, cioè intorno alla lunghezza d’onda di 1550 nm. Nel caso delle tecniche Raman, la radiazione di pompa e le onde di Stokes ed anti-Stokes non possono rientrare simultaneamente nella finestra di minima attenuazione. Un’altra caratteristica molto attraente dei sensori basati sulla diffusione Brillouin deriva dalla possibilità di poter utilizzare le fibre ottiche standard usate nelle telecomunicazioni, consentendo, quindi, misure su distanze anche di parecchi chilometri, a costi contenuti.

Un’applicazione relativamente recente per i sensori in fibra ottica è rappresentata dai sistemi distribuiti per la rilevazione di sostanze chimiche. La tecnica si basa su una trasformazione ‘chimico-meccanica’ nella quale è possibile, mediante un adeguato rivestimento con polimeri speciali, trasferire alla fibra degli sforzi misurabili quando ci si trova in presenza di particolari sostanze chimiche.

Molti sforzi sono stati, recentemente, devoluti alla soluzione del problema della discriminazione tra temperatura e deformazione nei sensori basati sullo ‘*shift*’ di Brillouin. Infatti, se contemporaneamente avvengono cambiamenti di temperatura e deformazione nella stessa sezione della fibra, non è possibile discernere i due singoli effetti a meno di non prendere particolari precauzioni. La via più semplice per ovviare a questo problema consiste nel dispiegare la fibra in modo che metà di essa sia soggetta solo alle variazioni di temperatura, mentre l’altra metà sia meccanicamente vincolata alla struttura e risenta,

quindi, sia delle variazioni di temperatura che di quelle di deformazione; le due metà, ovviamente, devono essere disposte una affianco all'altra. Ciò consente di sottrarre facilmente gli effetti delle variazioni di temperatura dalle misure eseguite sulla metà vincolata. Una possibilità diversa consiste nello sfruttare la debole dipendenza del guadagno di picco di Brillouin dalla temperatura. In tal modo, una misura combinata dello *'shift'* e di potenza del segnale di Brillouin consente la discriminazione tra temperatura e deformazione. Infine, un altro approccio interessante implica l'utilizzo di fibre cosiddette *'dispersion-shifted'* che, attraverso un'opportuna calibrazione, consentono la misura simultanea di deformazione e temperatura.

Le considerazioni precedenti ci hanno condotto a focalizzare l'attenzione, per l'esecuzione di misure distribuite, sul fenomeno della diffusione Brillouin in fibre ottiche monomodali; essa può essere sia spontanea che stimolata. La diffusione stimolata presenta precisi vantaggi in termini di livelli di potenza del segnale ed applicabilità per misure su grandi distanze, sembra perciò rappresentare la candidata ideale per il monitoraggio di grandi strutture civili. Diversi lavori hanno, tuttavia, evidenziato le difficoltà, sia teoriche che sperimentali, connesse con questo tipo di misura: in particolare, è importante valutare la risposta meccanica delle fibre ottiche, la dispersione della deformazione nel passaggio dalla struttura al sensore in fibra ottica, l'effettiva risoluzione spaziale della lettura, la sensibilità e la distanza su cui va eseguita la misura. Sono presenti, inoltre, altre problematiche legate alla non linearità derivante dalla fragilità del nucleo in vetro della fibra, dalla risposta plastica del rivestimento polimerico, da possibili instabilità locali in corrispondenza delle regioni della fibra vincolate alla struttura di supporto e dalla sensibilità delle letture alla forma della deformazione. Le difficoltà appena citate indicano che è necessario ancora un notevole sforzo di ricerca per consentire l'effettivo impiego dei sensori distribuiti in fibra ottica per l'impiego massiccio nel monitoraggio delle grandi strutture.

Il settore dei DOFS, al momento, si sta comunque espandendo in tutti i suoi filoni con una gran varietà di applicazioni valide per molti ambiti,

sia industriali che commerciali. Alcune di esse stanno aprendo nuove opportunità nel monitoraggio e nel controllo automatico, come le applicazioni per le cosiddette strutture *'smart'*, dove l'informazione acquisita viene retroazionata per consentire il continuo adattamento alle variazioni delle condizioni dell'ambiente circostante; ciò condurrà probabilmente ad una nuova generazione di strutture, anche molto estese, *'intelligenti'*. I vantaggi principali dati da un'intensa raccolta di informazioni rimangono comunque la forte riduzione dei costi, conseguenza delle operazioni di manutenzione effettuate in condizioni ottimali su grandi strutture, anche in situazioni critiche, e una più profonda comprensione dei loro comportamenti che permette di poter approntare delle migliorie anche in fase progettuale [1].

Capitolo 3

Principi di base

3.1 Principi di ottica e fibre ottiche

Come ci si potrebbe aspettare, i principi di base dei DOFS dipendono fortemente dai principi fondamentali che descrivono la propagazione della luce nelle fibre ottiche; quest'ultimi saranno, quindi, brevemente riassunti ora, ponendo particolare enfasi sugli aspetti che riguardano più da vicino i DOFS.

Una fibra ottica è un sottile filo di vetro; il suo spessore complessivo è di circa $100\ \mu\text{m}$, più o meno lo stesso del capello di un uomo. Quando la luce colpisce una delle estremità della fibra, essa viaggia fino all'altra estremità per mezzo di una serie di riflessioni sulle sue pareti interne. L'azione di guida della fibra viene mantenuta anche se viene piegata molto bruscamente, essa quindi può essere utilizzata in quasi tutti le situazioni in cui viene impiegato un filo di rame. Per capire quali siano i vari metodi che permettono di utilizzarla come un sensore, è necessario osservare un po' più da vicino il modo in cui la luce si propaga attraverso di essa.

La struttura della sezione trasversale di una fibra ottica appare come un nucleo centrale, normalmente di vetro o di un indice di rifrazione leggermente più basso, avvolto da un mantello. La conseguenza di tutto ciò è che esiste un angolo θ_c interno al nucleo centrale, per il quale un raggio di luce che colpisce

l'interfaccia nucleo/mantello viene totalmente riflesso internamente. Tale raggio e tutti i raggi ad angoli maggiori di θ_c sono perciò guidati attraverso la fibra.

Attualmente le dimensioni di una fibra sono comparabili con la lunghezza d'onda della luce; di conseguenza, se viene usata una sorgente di luce ragionevolmente monocromatica, ci si può aspettare che si formino all'interno del nucleo della fibra degli schemi di interferenza riconoscibili, non appena qualcuna delle onde riflesse interagisce con le altre. Alcuni modelli di interferenza sono infatti specifici e ci si riferisce a loro parlando di 'modi' di propagazione.

I modi consentiti, evidentemente, dipendono dalla geometria della fibra e dalla lunghezza d'onda della luce utilizzata; la distribuzione della potenza ottica tra di essi dipende dalle condizioni iniziali che si hanno al momento dell'invio della luce nella fibra e da qualsiasi perturbazione geometrica, o di altra natura, che sia capace di trasferire potenza da un modo ad un altro. E' già chiaro, dunque, che la distribuzione della potenza tra i modi è sensibile ad ogni cambiamento della geometria della fibra imposto da influenze esterne. Tuttavia l'elevata sensibilità della fibra comporta un'ulteriore caratteristica. Per quanto ne sappiamo dall'ottica elementare (leggi di Fresnel), quando un raggio luminoso subisce una riflessione sulla superficie che delimita due materiali, anche lo stato di polarizzazione viene alterato. Ciò accade perché la componente del campo elettrico nel piano di incidenza sente una variazione della differenza di fase rispetto alla componente a lei perpendicolare. Di conseguenza, ogni modo di propagazione consentito ha associata una caratteristica di polarizzazione ben definita. Bisogna però dire che il comportamento della polarizzazione della luce in una fibra con un gran numero di modi consentiti è complesso e difficile da utilizzare per un sistema di misurazione. E' tuttavia possibile adattare la geometria della fibra in relazione alla lunghezza d'onda della luce usata, in modo che solo un modo di propagazione sia consentito. Questo importante caso, conosciuto come propagazione monomodale (o singolo-modo), assicura che la luce si trovi in

un singolo, definibile, stato di polarizzazione in ogni punto della fibra.

La struttura del modo è sensibile non solo ai cambiamenti imposti alla geometria della fibra, ma anche ad ogni grandezza esterna capace di alterare la fase (e quindi il comportamento della polarizzazione) della luce propagante. Una variazione di temperatura può far espandere la fibra e alterare l'indice di rifrazione del nucleo e del mantello; una particolare pressione può alterare la forma della sezione trasversale, facendola diventare da circolare a ellittica; uno spostamento fisico può piegare o attorcigliare la fibra. Osservando, quindi, le variazioni delle strutture dei modi così prodotte si capisce già che si possono effettuare delle misure di temperatura, pressione (includere le onde sonore), spostamento e deformazione; ma come può venir alterata la polarizzazione della luce? Quando la luce attraversa un materiale solido come il vetro, un semiconduttore o un materiale cristallino, lo fa interagendo con gli atomi e le molecole che lo costituiscono. Le proprietà degli atomi e delle molecole si possono influenzare applicando dei campi elettrici e/o magnetici esterni che limitano i movimenti direzionali degli elettroni. Ne consegue, dunque, che tali campi influiscono anche su una qualsiasi luce che si propaga attraverso il materiale e, in particolare, influiscono sul suo stato di polarizzazione. Si capisce, dunque, che si possono misurare anche dei campi elettrici e magnetici, e che, quindi, si possono misurare le tensioni e le correnti che li fanno aumentare (da quello che è stato detto precedentemente è chiaro, comunque, che di solito vengono usate delle fibre monomodali per effettuare tali misure).

Esistono anche altre naturali conseguenze di queste interazioni. La prima è che l'energia della luce viene assorbita dalle molecole sulle quali incide, le molecole guadagnano energia durante il processo che, a sua volta, viene rilasciata in forma di calore o re-irradiata alla stessa frequenza della luce incidente. In quest'ultimo effetto, conosciuto come diffusione Rayleigh, la luce può essere riemessa in ogni direzione, alcune delle quali opposte alla direzione di propagazione originale: effetto conosciuto come retro-diffusione Rayleigh. Chiaramente, ogni effetto di interazione riduce l'energia della luce

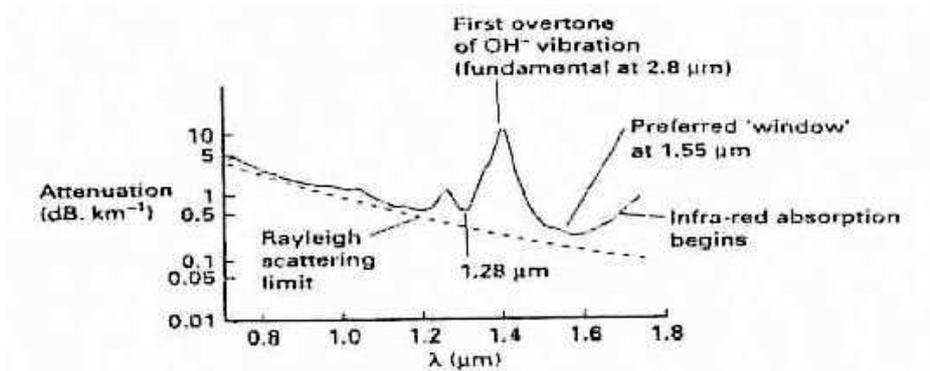


Figura 3.1: Spettro di assorbimento di una fibra in silicio

propagante, costituendo perciò una sorgente di attenuazione. La quantità totale di energia trasportata, dunque, dipende dalla frequenza ottica, dato che il processo di assorbimento dipende dalla naturale risonanza delle molecole, mentre l'efficienza della diffusione dipende dalla relazione tra la lunghezza d'onda della luce e la sezione trasversale di diffusione (infatti, l'efficienza della diffusione diminuisce con $1/\lambda^4$). La fibra, quindi, è caratterizzata da un'attenuazione spettrale che, per una tipica fibra per le telecomunicazioni, ha l'andamento mostrato in Fig. 3.1.

La dipendenza della lunghezza d'onda dall'interazione luce-materia ha un ulteriore effetto. La luce è impedita nel suo passaggio attraverso la fibra di una quantità che dipende dalla lunghezza d'onda. Il risultato è che la velocità di fase della luce dipende dalla lunghezza d'onda; l'indice di rifrazione, perciò, è una funzione della lunghezza d'onda. Questo effetto è conosciuto come dispersione cromatica ed è estremamente importante nei sistemi di comunicazione perché la dilazione delle lunghezze d'onda, che è una proprietà presente in tutte le sorgenti ottiche reali, porta ad un offuscamento della modulazione dell'informazione in presenza di tale dispersione (per esempio, un allargamento degli impulsi in un sistema *pulse-code*) e, perciò, ad una perdita di larghezza di banda dell'informazione trasportata. Per combattere tali perdite vengono, comunque, introdotti dei metodi di compensazione.

I problemi di attenuazione e dispersione sono meno gravi nei sistemi di

sensori che nel caso di applicazioni nel campo delle telecomunicazioni dato che le distanze coinvolte sono due o tre ordini di magnitudo più piccole. Ciò nonostante, devono essere considerati quando, ottimizzando un sistema di sensori, la lunghezza d'onda operante e l'estensione spettrale delle sorgenti devono essere scelte con attenzione in relazione alla fibra utilizzata.

Parlando di sistemi di comunicazione, ovviamente, ci sono diversi problemi che devono essere tenuti in considerazione durante il progetto di un sistema di monitoraggio strutturale. Un problema evidente si presenta fin da subito; visto che le fibre sono sensibili a molte influenze esterne, come ci si assicura che una data fibra risenta della variazione di una sola grandezza alla volta? C'è un'ulteriore domanda collegata: la sensibilità ad un ampio numero di grandezze è compatibile con la tanto decantata immunità alle interferenze di un sistema di telecomunicazioni in fibra ottica? La prima domanda è cruciale per la progettazione di un sistema di sensori in fibra ottica. Rispondere a questi interrogativi per qualsiasi tipo di misura da effettuare significa che il progettista deve possedere considerevoli abilità e ingegno nel campo dell'ingegneria optoelettronica. Deve anche contare su una completa comprensione di base dei comportamenti di tali sistemi e sull'abilità dei laboratori di ricerca di fornire fibre con proprietà sempre più attentamente controllate e predefinite. La risposta alla seconda domanda è più semplice. Per evitare qualsiasi condizionamento da grandezze estranee bisogna assicurare che il sistema ottico di ricezione non sia sensibile alla struttura dei modi di propagazione, ma solo alla potenza totale della luce ricevuta. Tutto ciò può essere fatto prestando molta attenzione.

L'abilità e l'ingegno di un progettista di sistemi di sensori può essere considerevolmente affiancata dall'utilizzo di fibre specializzate. Oltre alle proprietà di base delle fibre appena descritte, proprietà speciali, di uso sia nelle telecomunicazioni, sia nelle tecnologie sensoriali, possono essere aggiunte alle fibre. Uno dei processi con cui ciò viene fatto è il drogaggio della fibra con, per esempio, elementi come il neodimio, l'erbio, il praseodimio, l'ittrio e il germanio. Questi elementi possono fornire, di volta in volta, un assorbimento

che dipende dalla temperatura, uno spettro fluorescente o coefficienti di scattering Raman migliorati (le proprietà di fluorescenza della terra rara dopante erbio sono utilissime nei laser e negli amplificatori in fibra).

Un'altra importante fibra speciale è la cosiddetta fibra ad alta birifrangenza, o *'hi-bi'*. Nella fibra *'hi-bi'* viene introdotta deliberatamente un'asimmetria nella sezione trasversale, all'interno del nucleo. Ciò può essere fatto sia rendendo ellittico il nucleo, sia forzando la fibra preferenzialmente in una direzione (trasversale). La conseguenza è che la luce polarizzata linearmente lungo uno degli assi preferiti (l'asse di forzatura o l'asse dell'ellissi) viaggia ad una velocità differente rispetto alla luce polarizzata nella direzione ortogonale. La fibra, dunque, manifesta birifrangenza, in questo caso birifrangenza lineare. Un importante parametro caratteristico di una fibra *'hi-bi'* è la lunghezza della fibra dopo la quale le due componenti di polarizzazione risultano sfasate di 2π . Tale parametro è conosciuto come la lunghezza di battimento e, per una tipica fibra *'hi-bi'* brevettata, è nell'ordine di alcuni millimetri. Chiaramente, più forte è la birifrangenza, più piccola è la lunghezza di battimento. I due stati di polarizzazione si propagano inalterati lungo gli assi preferiti come stati lineari, nonostante tutti gli altri stati di polarizzazione (inclusi gli stati lineari non allineati con gli assi) varino continuamente durante la propagazione. Nel caso appena descritto si parla di stati lineari ma, in generale, essi sono polarizzati ellitticamente. Ciò avviene, per esempio, quando una fibra linearmente birifrangente viene attorcigliata: la torsione aggiunge birifrangenza circolare alla birifrangenza lineare già presente dando come risultato una birifrangenza ellittica.

Infine, ci sono fibre con speciali rivestimenti. Le fibre per le telecomunicazioni hanno bisogno di rivestimenti che le rendano robuste. Un primo leggero rivestimento viene posizionato non appena la fibra viene filata dalla preforma, per proteggerla dagli attacchi atmosferici (specialmente dall'umidità) visto che la sua superficie è nuda e vulnerabile. Un secondo rivestimento, più rigido, viene aggiunto in seguito per fornire solidità nella gestione e nell'installazione dei cavi. Un sensore in fibra ha bisogno di essere costruito

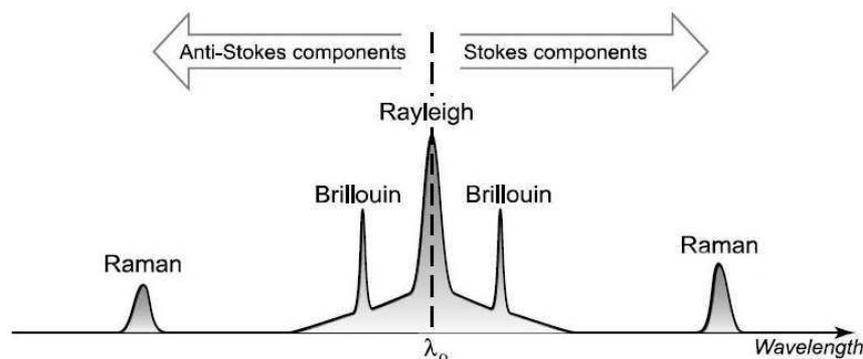


Figura 3.2: Spettro della luce diffusa in una fibra ottica

in maniera robusta e, in più, ha bisogno di un rivestimento che gli permetta di resistere nell'ambiente dove viene effettuata la misura e di interagire nel miglior modo e con la miglior consistenza possibile con la grandezza da misurare. Alcuni speciali rivestimenti per sensori sono già disponibili: rivestimenti metallici, rivestimenti in poliammide e superfici impregnate di carbonio, per esempio. Ciò nonostante, molte altre esigenze vanno ancora soddisfatte in questa campo se si vuole adattare correttamente i sistemi di sensori in fibra agli ambienti in cui vanno installati.

3.1.1 Interazioni tra luce e materia

C'è un intero range di fenomeni ottici che rendono la propagazione nel mezzo ottico diversa da tutte le altre; una categoria di essi è collegata all'interazione campo-materia. A causa della corta lunghezza d'onda della radiazione ottica, la sua interazione con la materia non è trascurabile. La diffusione elastica della luce da molecole e disomogeneità nel dielettrico, chiamata diffusione Rayleigh, è un fenomeno osservato comunemente nel mezzo ottico. Altri fenomeni legati alle vibrazioni intrinseche delle molecole, degli atomi e degli elettroni sono le diffusioni inelastiche, le diffusioni Raman e Brillouin, che comportano uno scambio di energia tra la materia e il campo (Fig. 3.2).

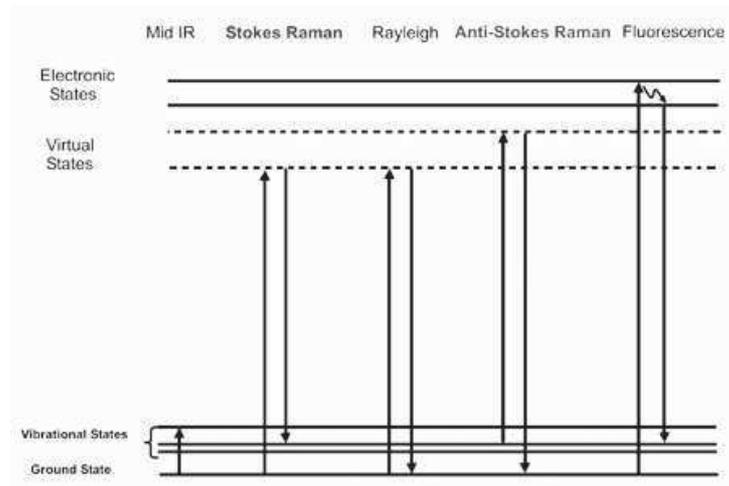


Figura 3.3: Diagramma di Jablonski

Esistono due teorie per descrivere l'interazione tra luce e materia: la semi-classica e la classica. Nella teoria semi-classica l'interazione viene considerata come un'onda elettromagnetica e la materia viene descritta per mezzo della meccanica quantistica. Molte interazioni tra la luce, polarizzata e non, e la materia (per esempio, la fluorescenza, la diffusione Rayleigh, l'effetto Raman, la diffusione Brillouin) sono rappresentabili con il diagramma di Jablonski (Fig. 3.3).

Nella teoria classica, invece, l'origine fisica dell'indice di rifrazione, della dispersione e dell'assorbimento possono essere trovate facilmente. Quando un campo elettrico viene applicato ad un materiale, la polarizzazione elettrica indotta del materiale, o semplicemente la polarizzazione, può essere descritta da un vettore \mathbf{P} , che dipende sia dalle proprietà del materiale, sia dal campo applicato.

In generale, gli indici di rifrazione nel mezzo ottico sono complessi e dipendenti dalla lunghezza d'onda. Essa dà origine alla dispersione cromatica nelle fibre ottiche per i sistemi di comunicazione ottica, e la sua natura complessa è legata alle perdite [7].

3.2 Principi dei DOFS

Alcuni principi fondamentali dei DOFS sono stati affrontati nelle precedenti considerazioni, ma, per convenienza, verranno riassunti qui di seguito.

I DOFS offrono un potenziale, nel compiere misure, unico; essi compiono una misura distribuita nello spazio di una determinata grandezza con una risoluzione spaziale di 0,1-1 m e un'accuratezza nella misura di circa l'1 % su distanze che variano profondamente, in base al metodo di misurazione e alle applicazioni, da circa 10 m fino a circa 100 km.

La capacità di determinazione delle caratteristiche spaziali e temporali di una grandezza con un mezzo che risulta non intrusivo, dielettrico, passivo, flessibile e facile da installare in un momento anche successivo alla messa in opera, offre una nuova dimensione nel monitoraggio, nella diagnosi e nel controllo automatico di strutture grandi ed estese, qualunque sia la tipologia. Non esistono tecniche di misurazione convenzionali che possano competere efficacemente.

Il problema singolare da risolvere, dunque, per i sistemi basati sui DOFS, rispetto a quasi tutti gli altri tipi di sistemi di misurazione, è quello del bisogno di determinare il valore di una particolare grandezza, continuamente, in funzione della posizione lungo la lunghezza di una fibra ottica, con delle risoluzioni spaziali e delle sensibilità definibili in partenza. Ciò implica che ogni misura eseguita in funzione dello spazio deve essere identificata, in qualche modo, con una particolare sezione della fibra di cui sia nota la posizione. Chiaramente, per far questo, non è possibile identificare la posizione con alcun tipo di trasmettitore attivo e codificato, se si vogliono conservare gli importanti vantaggi della fibra di essere un mezzo passivo e dielettrico. L'identificazione, quindi, dev'essere fatta attraverso uno o l'altro terminale della fibra; in alcuni casi vengono usate entrambe le estremità. Ci sono parecchi modi in cui ciò può essere fatto.

Come è stato già menzionato, lo sviluppo dei DOFS fu stimolato dalla tecnica OTDR, che sfrutta la risoluzione temporale della luce continuamente riflessa per effetto Rayleigh di un impulso ottico che si propaga in una fibra.

Ovviamente, se il ritardo tra il lancio dell'impulso e il tempo in cui la luce riflessa viene ricevuta è τ , allora la sezione di fibra nella quale avviene la retro-diffusione viene identificata come quella che sta ad una distanza s dal terminale di lancio della fibra, dove

$$s = \frac{\nu\tau}{2}$$

e ν è la velocità della luce nella fibra. Una risoluzione temporale di questo tipo può essere utilizzata sia nelle soluzioni quasi-distribuite che in quelle completamente distribuite.

Tutta la tecnologia che si occupa di effettuare delle misure distribuite, tuttavia, abbraccia l'arte del compromesso e della compensazione. In particolari circostanze, una tale tecnica di risoluzione temporale sembra non essere ottimale; per esempio, potrebbe non fornire la sensibilità richiesta poiché i livelli di potenza riflessa sono molto bassi (circa 10^{-6} della potenza dell'impulso per metro di fibra). Vengono, perciò, utilizzati anche altri metodi. Il singolo sensore, per esempio, in un sistema quasi distribuito può essere a selezione di lunghezza d'onda e può, perciò, essere interrogato con una sorgente CW (ad onda continua) a banda larga. L'identificazione, in questo caso, è fatta nel dominio della frequenza per mezzo di un reticolo, di un prisma di rilevamento o con un filtro accordabile. Un metodo un po' più sottile per la codifica posizionale consiste in due percorsi ottici con, di fatto, differenti velocità della luce. Essi potrebbero, per esempio, essere costituiti dai due modi di polarizzazione di una fibra ad alta birifrangenza. L'effetto della grandezza esterna è di far accoppiare la luce da un percorso all'altro. Una luce di bassa coerenza viene lanciata lungo uno dei percorsi. Quando la variazione del parametro comporta l'accoppiamento con l'altro percorso in un particolare punto, le due componenti allora viaggiano verso il terminale d'uscita, fornendo così un ritardo relativo che le rende mutuamente incoerenti. L'interferenza ottica si verifica al terminale finale solo se tra di loro viene inserito un ritardo pari al ritardo dovuto alla loro differenza di percorso, ciò permette di identificare la posizione in cui avviene l'accoppiamento. Un ritardo variabile in uscita

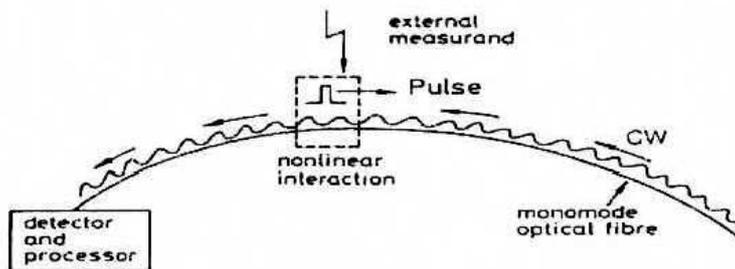


Figura 3.4: Principio dei DOFS basati sulla diffusione co-direzionale

permette, dunque, gli accoppiamenti nella fibra, cosicché l'ambiente dove si effettua la misura viene analizzato lungo tutta la lunghezza della fibra.

Finora, abbiamo considerato solo le possibilità offerte dai sistemi ottici lineari ma c'è anche una classe di sensori distribuiti che utilizza effetti non lineari; essi forniscono anche un'altra opzione. L'opzione è quella relativa alla diffusione co-direzionale dovuta ad un'interazione impulso-onda o impulso-impulso. In questo caso un impulso di luce con un alta potenza di picco viene lanciato nella fibra generando un effetto locale non lineare durante la propagazione (Fig. 3.4). Un'onda continua (CW) contropropagante fa emergere la non linearità non appena l'impulso l'attraversa; essa viene modulata in modo tale che dipenda dalla natura della non linearità. La variazione temporale dell'onda continua mappa il passaggio dell'impulso che la attraversa, così che, se l'interazione non lineare viene influenzata da un campo esterno, questo campo viene corrispondentemente mappato lungo la fibra. Tali sistemi possiedono il considerevole vantaggio di una risoluzione temporale senza la bassa sensibilità inerente ai metodi che sfruttano la retro-diffusione. Il loro svantaggio è che richiedono una sorgente laser pulsante ad alta potenza in modo da poter entrare nel regime non lineare.

3.2.1 Parametri di valutazione dei DOFS

I parametri di valutazione che caratterizzano un sistema basato sui DOFS, molti dei quali sono comuni a tutti i sistemi di misurazione, possono essere

illustrati nel modo seguente (Fig. 3.5):

- La risoluzione spaziale (δl) è il più piccolo tratto di fibra nel quale un sensibile cambiamento della grandezza misurata può essere rilevato. L'informazione misurata è presentata, di fatto, come una serie di valori, ciascun valore in rappresentanza della magnitudo del valore misurato mediato su un tratto di fibra di lunghezza δl . In un certo senso, dunque, il sistema rappresenta il *multiplexing* di $L/\delta l$ sensori in un array lineare, dove L è la lunghezza totale della fibra sotto esame (in metri).
- La sensibilità (S) è definita come la variazione di potenza ottica, al ricevitore, prodotta da una variazione unitaria della grandezza misurata per unità di lunghezza della fibra (in $W \text{ field}^{-1} \text{ m}^{-1}$).
- La larghezza di banda della misura (B) è la larghezza di banda per la quale le variazioni della grandezza in esame si possono misurare lungo tutta la lunghezza della fibra, L (Hz).
- La larghezza di banda del sistema (W) è la larghezza di banda che il ricevitore deve avere per analizzare il sistema. Ovviamente, dev'essere tale da permettergli di rispondere al passaggio dell'impulso ottico su un tratto di fibra di lunghezza pari alla risoluzione spaziale, δl (Hz).
- Il range dinamico (D) è il rapporto tra il valore massimo e quello minimo della grandezza che permette di essere misurato con l'accuratezza richiesta (dB).
- L'accuratezza della misura è l'accuratezza con cui la potenza in uscita al ricevitore può essere misurata a dispetto dei livelli di rumore del sistema (%).
- Le proprietà della fibra: le specifiche del sistema devono includere una dichiarazione della fibra in utilizzo, in modo tale da permettere modifiche, se necessario, e facilitare la comprensione delle indicazioni di anomalie e guasti. Le proprietà includono:

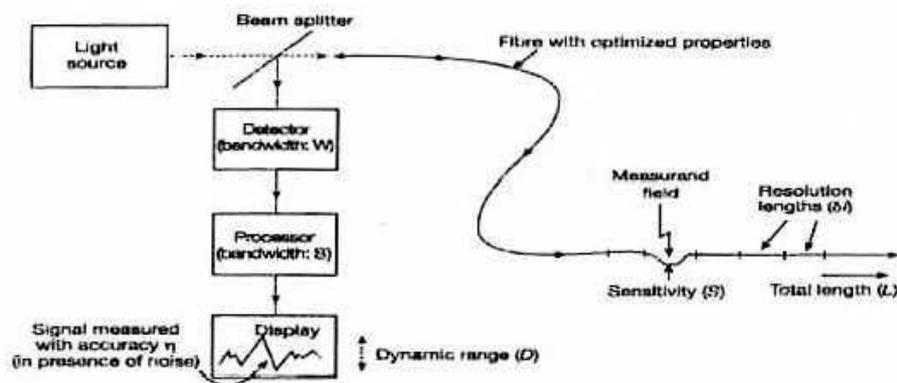


Figura 3.5: Parametri di valutazione dei DOFS

- lo spettro dell'attenuazione (l'attenuazione in funzione della lunghezza d'onda nel punto di lavoro),
- lo spettro della dispersione (l'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda nel punto di lavoro),
- il tipo di propagazione modale (monomodale o multimodale (in questo caso, il numero di modi)),
- le proprietà geometriche (il diametro del nucleo, il diametro del mantello, il profilo dell'indice di rifrazione, la lunghezza d'onda di taglio per essere in regime monomodale e se si tratta di una fibra normale o *'hi-bi'*)
- proprietà del mantello (tipo di mantello primario, tipo di mantello secondario, resistenza alla rottura, massima temperatura d'esercizio, etc).

Come in tutti i sistemi di misurazione c'è sempre un forte compromesso tra i precedenti parametri in modo da ottimizzarli per ogni tipo di applicazione. Un semplice esempio è quello che occorre tra la sensibilità e la risoluzione spaziale: chiaramente, come definito in precedenza, la sensibilità (S) è tanto più grande quanto più grande è la risoluzione spaziale del tratto di fibra sulla quale si effettua la misura; tuttavia, perché la risoluzione spaziale sia buona, la lunghezza (δl) deve essere corta. Bisogna effettuare, quindi,

un compromesso tra sensibilità e risoluzione, un concetto comune a tutti i sistemi di misura [1].

Capitolo 4

Sistemi quasi distribuiti

Un sensore in fibra ottica quasi-distribuito (QDOFS) è un sistema nel quale solo alcuni tratti della fibra sono sensibili alla grandezza presa in esame. Esso ha appunto il principale vantaggio che solo alcune sezioni devono risultare sensibili e che le loro posizioni sono note, cosicché basta solamente identificarle, in qualche modo, per distinguerle; lo svantaggio è che i punti in cui effettuare le misure richieste devono essere conosciuti in anticipo.

4.1 DOFS basati su reticoli di Bragg

Nel 1978 si scoprì che le fibre ottiche hanno la proprietà di essere fotosensibili [8]. Si tratta di un fenomeno in base al quale l'indice di rifrazione del materiale che compone la fibra (per esempio, il silicio drogato) può essere modificato (permanentemente o semi-permanentemente) dall'esposizione ad una luce ultravioletta (UV) (Fig. 4.1). I meccanismi dell'effetto sono vari, complessi e, ancora, solo in parte compresi; ciò nonostante è noto che essi coinvolgono delle specie di 'trappole' per elettroni create dalle impurità nella struttura del materiale (reticoli di tipo I, detti semi-permanenti) o danni fisici veri e propri all'interfaccia nucleo-mantello (reticoli di tipo II, permanenti). I metodi, comunque, con i quali attualmente la fotosensibilità viene indotta nelle fibre sono affidabili e ben testati.

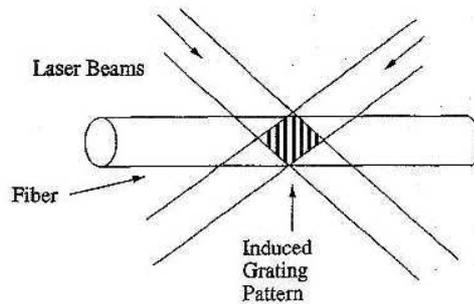


Figura 4.1: Processo di scrittura dei reticoli di Bragg

Una delle caratteristiche più importanti è che le modifiche apportate all'indice di rifrazione della fibra possono essere controllate finemente attraverso un'attenta manipolazione dei raggi ottici incidenti. Una variazione quasi-sinusoidale dell'indice di rifrazione può essere incisa sul nucleo della fibra utilizzando un'interferenza ottica della luce UV. La variazione sinusoidale dell'indice di rifrazione lungo l'asse della fibra costituisce un reticolo di diffrazione di Bragg, un dispositivo ben noto in molti altri contesti; tra le sue proprietà, nel caso di una fibra monomodale, possiede uno spettro di riflessione che è la trasformata di Fourier della variazione lungo l'asse dell'indice di rifrazione del reticolo, cosicché un reticolo sinusoidale di limitata lunghezza raggiunge una riflessione rappresentabile con una funzione standard di tipo 'sinc'. Ovviamente, più grande è il numero di periodi sinusoidali contenuti all'interno della lunghezza di un reticolo, più stretto è il picco della riflessione; in questo modo si possono costruire dei filtri ottici altamente selettivi. La lunghezza d'onda centrale di un filtro del genere, inoltre, può facilmente essere controllata semplicemente aggiustando il livello di esposizione all'interferenza nel processo di 'scrittura'. I reticoli forniscono variazioni dell'indice di rifrazione nell'ordine di $10^{-5} - 10^{-3}$ e sono scritti con luce a circa 245 nm di lunghezza d'onda (essa non è critica all'interno di ± 15 nm). Le potenze ottiche sono nell'ordine dei 10 mW e i tempi di scrittura vanno, di solito, dai 3 ai 30 min.

I reticoli in fibra ottica stanno trovando una gran varietà di applicazioni

come dispositivi nei sistemi ottici di comunicazione (per esempio, filtri a lunghezza d'onda, riflettori selettivi per i laser e compensatori di dispersione), ma sono estremamente utili anche nei sistemi QDOFS. In tal caso (Fig. 4.2), un buon numero di reticoli sinusoidali è disposto lungo una fibra monomodale, ogni reticolo riflette selettivamente una differente lunghezza d'onda a seconda del suo periodo spaziale. La lunghezza d'onda centrale della riflessione è data da

$$\lambda_B = 2n\Lambda$$

dove n è l'indice di rifrazione del materiale della fibra e Λ è il periodo spaziale (il 'passo reticolare'). Se il sistema viene interrogato, allora, con una sorgente *broad-band*, lo spettro della riflessione consiste in una serie di picchi, ognuno corrispondente ad un determinato reticolo che viene, quindi, così identificato. λ_B è dipendente, dunque, da grandezze esterne che possono variare n o Λ ; le più importanti sono la temperatura e la deformazione, ciascuna delle quali modifica simultaneamente sia n che Λ comportando uno spostamento della lunghezza d'onda di Bragg, $\Delta\lambda_B$. La variazione relativa della lunghezza d'onda centrale, $\Delta\lambda_B/\lambda_B$, causata da una deformazione (ϵ) e da un cambiamento di temperatura (ΔT) può essere data approssimativamente da:

$$\left[\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B}\right] = C_S\epsilon + C_T\Delta T = (1 - p_e)\epsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T$$

dove C_S e C_T sono, rispettivamente, un coefficiente di deformazione e un coefficiente di temperatura, p_e è il coefficiente di deformazione ottica, α_n è il coefficiente termo-ottico e α_Λ è il coefficiente di espansione termica del materiale. Con i migliori demodulatori si possono ottenere delle risoluzioni di $1 \mu\epsilon$ e $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Una serie di reticoli di Bragg può agire, quindi, da sistema di misurazione quasi-distribuito di temperatura solo nel caso sia al riparo da deformazioni, oppure può rilevare simultaneamente temperatura e deformazione, purché i due effetti possano poi essere distinti; a tal fine, sempre più attenzione è rivolta alla ricerca di metodi di discriminazione che siano efficaci. Tra di essi si possono includere l'utilizzo di reticoli con differenti suddivisioni sovrapposte

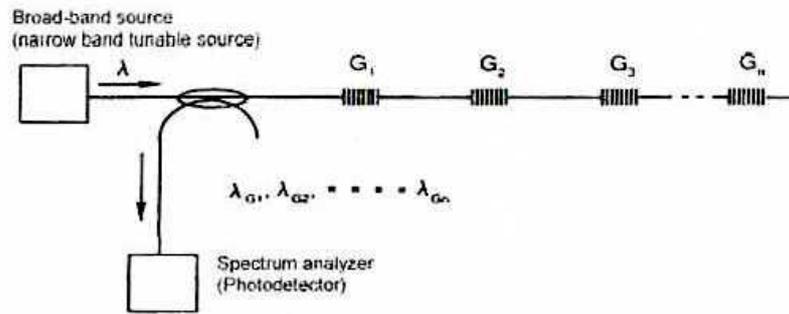


Figura 4.2: Interrogazione di un array di reticoli

nello stesso tratto di fibra, l'utilizzo di due diversi modi di propagazione spaziale e l'utilizzo di due modi di polarizzazione.

Il processo di scrittura dei reticoli fornisce un facile controllo sulla loro lunghezza che è di, più o meno, 1-2 cm. La risoluzione spaziale, dunque, risulta essere di un ordine molto più grande rispetto agli standard dei DOFS. Non appena il numero di reticoli lungo la fibra aumenta, però, diventa sempre più difficile il progetto di un sistema di interrogazione efficace. La larghezza di banda della sorgente non può essere troppo ampia altrimenti potrebbe creare dei problemi con il lancio di potenza nella fibra e con le caratteristiche dello spettro di attenuazione e di dispersione della fibra. Se viene scansionata la lunghezza d'onda di una singola sorgente, l'intervallo di scansione deve essere limitato. Esistono delle difficoltà anche nell'analisi della lunghezza d'onda della luce di ritorno; una considerevole attenzione è stata finora prestata a questo problema e l'attuale limite per una sola fibra è di circa 30 reticoli.

Anche il tempo di vita di un sensore gioca un ruolo cruciale in un sistema di monitoraggio a lungo termine. I reticoli appena vengono fabbricati mostrano una diminuzione della riflettività quando vengono sottoposti ad elevate temperature. Essa decresce nel tempo e si assesta, dopo un po', ad un valore quasi-stabile. Per ottenere sensori stabili viene effettuata una tempra termica prima dell'installazione che permette una stabilità della riflettività dopo 25 anni inferiore allo 0,3 % a una temperatura di 80 °C. Per applicazioni che superano i 500 °C, i reticoli di tipo I non possono essere utilizzati per

tempi molto lunghi a causa della forte diminuzione della riflettività e della durata del mantello della fibra, che tipicamente è di un materiale a base polimerica. In questi casi si usano reticoli di tipo II, più stabili, abbinati a mantelli metallici adatti alle alte temperature [9].

I reticoli di Bragg in fibra, vista la loro lunghezza, possono essere utilizzati per sostituire i convenzionali misuratori di deformazione e installati incollandoli sul metallo e altre superfici lisce. Con un adeguato involucro possono anche essere utilizzati per misurare le deformazioni in concreto sopra una lunghezza tipicamente di 100 mm. Essi sono, attualmente, facilmente reperibili sul mercato. Altri tipi di involucro includono sensori di riferimento per la compensazione della temperatura.

La durata, la flessibilità e la versatilità dei reticoli in fibra ottica assicurano che il loro sviluppo continuerà e che, in futuro, la loro tecnologia giocherà un ruolo significativo nel monitoraggio strutturale e nella diagnosi di deformazioni e variazioni di temperatura in grandi strutture; a tal proposito, sono già stati effettuati molti test con esiti positivi. Un gran numero di progetti di ricerca e sviluppo per questo tipologia di sensori sono in corso nel mondo. Due progetti europei (STABILOS e COSMOS) si sono focalizzati nell'applicazione di questa tecnologia alla misura di movimenti in gallerie, miniere e altre geostrutture. In particolare, un array di reticoli di Bragg è stato installato nella galleria del Mont Terri in Svizzera. Il gruppo LETI in Francia ha utilizzato questa tecnologia per monitorare la chiusura delle chiuse e ha introdotto il sistema nell'industria dell'energia nucleare, mentre EMPA in Svizzera li ha installati sulla diga del Luzzone e su ponti strallati. Anche il progetto ISIS in Canada si è focalizza sullo sviluppo di sistemi di monitoraggio basati su reticoli di Bragg per le strutture civili e ha installato dei sensori su un gran numero di ponti. Negli USA, il Naval Research Laboratory ha dotato ponti e modelli per il collaudo in laboratorio di sensori per il monitoraggio statico e dinamico delle deformazioni.

In sintesi, dunque, i sistemi QDOFS sono preziosi in quanto, sapendo in anticipo che determinati tratti della fibra sono sensibili alla grandezza presa

in esame, si possono ottenere parecchi vantaggi: in primo luogo, la sensibilizzazione può essere dedicata in maniera efficace ad una sola grandezza, in modo tale da puntare ad un buon SNR al ricevitore e, quindi, ad una buona accuratezza della misura; in secondo luogo, la zona sensibile può essere resa arbitrariamente piccola, puntando ad una buona risoluzione spaziale; in terzo luogo, le regioni sensibili (i trasduttori) possono essere codificate per permettere una facile identificazione al ricevitore (un determinato passo reticolare associato ad una frequenza di riflessione ottica nota è un tipico esempio) in modo che, quindi, si abbia bisogno di semplici dispositivi di ricezione. Esistono, tuttavia, anche degli svantaggi; visto che i punti di trasduzione sono fissi, le regioni cruciali nel campo dove viene effettuata la misura devono essere conosciute in anticipo e devono rimanere fisse: tutto ciò non è affatto sempre conveniente. La sensibilizzazione della fibra in punti fissi, inoltre, conduce solitamente ad una forte attenuazione della luce usata per interrogarla e, quindi, a delle limitazioni sul numero di trasduttori e ad un range dinamico limitato.

In conclusione, la necessità di decodifica in aggiunta ad altri requisiti tende ad aumentare la complessità dei dispositivi. Il monitoraggio strutturale in fibra ottica totalmente distribuito non possiede nessuno dei precedenti svantaggi ed è, generalmente, molto più versatile. Naturalmente, anche esso ha dei problemi che diverranno più chiari non appena verranno descritti dei sistemi che lo realizzano [1, 10].

Capitolo 5

Sistemi totalmente distribuiti

I sensori totalmente distribuiti in fibra ottica (FDOFS) possiedono il singolare vantaggio di permettere una misura della grandezza in esame in qualsiasi punto della fibra, all'interno del limite dell'intervallo di risoluzione spaziale. In questo modo, si può effettuare una misura distribuita su una lunghezza spaziale di più di 1 km, con un intervallo di risoluzione di 1 m, fornendo 1000 punti di misurazione e perciò, di fatto, realizzando un *multiplexing* lineare di 1000 trasduttori. La maggior parte dei sistemi DOFS utilizza tecniche nel dominio del tempo, piuttosto che tecniche (equivalenti) nel dominio della frequenza, permettendo così una considerevole riduzione della complessità e una maggior larghezza di banda del sistema.

I sistemi FDOFS si suddividono in tre sottoclassi principali (Fig. 5.1):

Sistemi basati sulla retro-diffusione lineare: in questa classe la propagazione dell'impulso ottico avviene all'interno del regime lineare e la luce riflessa dall'impulso viene calcolata in funzione del tempo e analizzata per fornire la distribuzione spaziale della grandezza misurata.

Sistemi basati sulla retro-diffusione non lineare: qui la differenza risiede nel fatto che l'impulso ottico ha una potenza di picco sufficiente per entrare nel regime non lineare e la potenza riflessa (lineare) deve essere analizzata in maniera differente. I vantaggi dell'ingresso nel regime non

lineare si possono riassumere nel fatto che in questa situazione si incontrano una serie di effetti ottici non lineari differenti che offrono risposte specifiche alla misura di determinate grandezze e una rapida capacità di discriminazione al ricevitore. Il principale svantaggio, invece, è che la magnitudo dell'effetto è fortemente dipendente dalla potenza ottica e può, quindi, variare significativamente lungo la fibra, a fronte di un'attenuazione crescente.

Sistemi basati sulla diffusione co-direzionale non lineare: un altro vantaggio del regime non lineare è che permette a segnali ottici indipendenti di interagire. E' possibile, quindi, far interagire delle radiazioni contro-propaganti (CP) (per esempio, un impulso e un'onda continua (CW) CP, o due impulsi CP). Quando una grandezza esterna influenza l'interazione tra due radiazioni, le sue variazioni lungo la fibra possono essere mappate dall'azione della propagazione della luce diffusa frontalmente (opposta a quella di retro-diffusa). Anche in questo caso, ovviamente, va però tenuto conto dello svantaggio dato da una forte dipendenza dall'attenuazione della potenza.

I sistemi lineari sono meno complessi; in particolare, sono meno esigenti per quanto riguarda i requisiti sulla sorgente e sulle proprietà della fibra. I sistemi basati sulla retro-diffusione non lineare richiedono sorgenti di impulsi ad alta potenza e fibre appropriate all'effetto non lineare sfruttato per effettuare la misura, ma forniscono un più ampio range di interazioni della grandezza con la fibra e una rapida capacità di discriminazione al ricevitore. I sistemi basati sulla diffusione co-direzionale possiedono gli stessi vantaggi e svantaggi dei sistemi basati sulla retro-diffusione non lineare, ma hanno in più il vantaggio di un livello del segnale molto più alto, e perciò di un rapporto segnale-rumore più grande; d'altra parte, però, hanno lo svantaggio di richiedere due sorgenti ottiche ad alte prestazioni e (nella maggior parte dei casi) accesso ad entrambe le estremità della fibra.

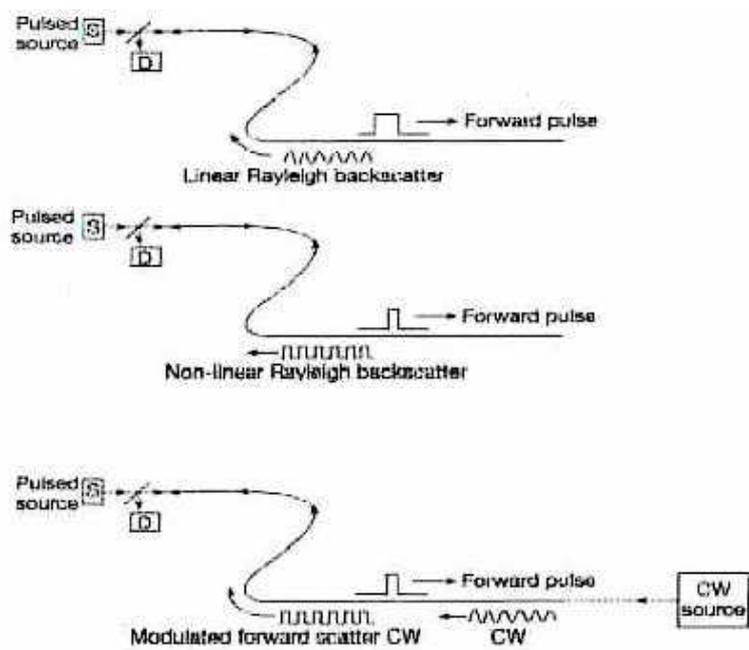


Figura 5.1: Schemi dei sensori totalmente distribuiti basati su retro-diffusione, retro-diffusione non lineare e diffusione co-direzionale non lineare

5.1 Sistemi basati sulla retro-diffusione lineare

Molte tecniche possono essere utilizzate per fornire un sistema di misurazione totalmente distribuito in fibra ottica; il più comune viene considerato l'OTDR. Inizialmente creato per analizzare le perdite nelle linee di telecomunicazione ottica, l'OTDR viene catalogato come una tecnica ottica *'pulse-echo'*, cioè una tecnica in cui degli impulsi vengono trasmessi e ricevuti dallo stesso lato della fibra, dopo essere stati riflessi dalla parte opposta. Essa consiste nel lancio di un impulso ottico all'interno della fibra per poi misurarne l'intensità riflessa in funzione del tempo: un periodo Δ_t corrisponde al tempo che intercorre tra il lancio dell'impulso e il suo ritorno dopo una riflessione avvenuta in un punto distante $c\Delta_t/2n$. La larghezza temporale dell'impulso è proporzionale alla risoluzione spaziale dell'OTDR; una larghezza di 10 ns corrisponde ad una risoluzione di 1 m.

Il riflettometro ottico nel dominio del tempo (OTDR) serve ad ottenere misure di variazione di intensità su distanze nell'ordine delle decine di chilometri, con una risoluzione spaziale nell'ordine del metro. Per ottenere una risoluzione più bassa sono disponibili anche altre tecniche, alcune per esempio basate sulle modulazioni di frequenza, da cui l'acronimo OFDR (riflettometro ottico nel dominio della frequenza). La risoluzione spaziale di un OFDR può raggiungere i 10 μm , sebbene il range di misura diminuisca considerevolmente intorno alle poche decine di metri.

Nella diffusione Rayleigh, l'onda elettromagnetica che si propaga nel nucleo della fibra interagisce con le sorgenti di diffusione, impurità del silicio e altre particelle con dimensioni molto inferiori alla lunghezza d'onda (Fig. 5.2); le interazioni danno luogo ad una riflessione parziale nell'ordine dei $10^{-7} m^{-1}$. Misurando le variazioni di intensità nel segnale retro-riflesso alla stessa lunghezza d'onda dell'impulso di lancio, si possono individuare modifiche locali della fibra ottica: un brusco picco di ritorno viene interpretato come una riflessione dovuta a dei connettori o a danni sulla fibra, e un improvviso calo dell'intensità può corrispondere, per esempio, ad una perdita per rottura.

Le variazioni di intensità della luce non possono essere direttamente corre-

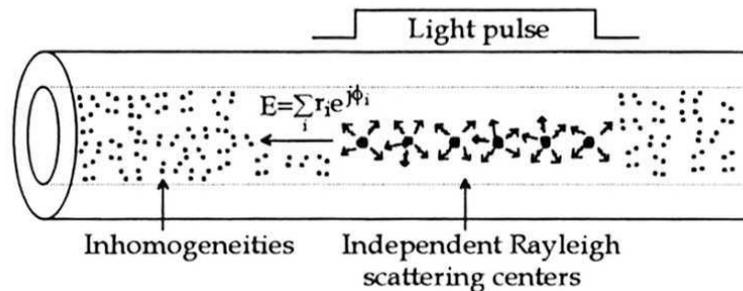


Figura 5.2: Diffusione Rayleigh in una fibra ottica

late con le deformazioni del mezzo su cui la fibra ottica è stata installata. Per eseguire delle misure di deformazione, il valore del segnale di retro-diffusione Rayleigh deve essere associato a delle fibre ottiche preliminarmente equipaggiate con sensori specifici, come sensori *'microbend'* o altre configurazioni che incorporino perdite pre-calibrate. Un altro approccio consiste nel fornire una misura relativa. L'azienda americana Luna Technologies ha messo sul mercato nella primavera 2006 un dispositivo optoelettronico che permette di misurare le deformazioni in fibra ottica (a una temperatura omogenea) su una distanza di 150 m con una risoluzione spaziale nell'ordine dei millimetri e un livello di precisione equivalente a pochi $\mu\varepsilon$. La prestazione è stata ottenuta con un OFDR, associato ad un metodo avanzato di correlazione tra la misura effettuata e una situazione di riferimento, con cui è stato possibile analizzare le variazioni spettrali del picco della retro-diffusione Rayleigh [11]. Esistono anche altri metodi che sfruttano la retro-diffusione lineare, per esempio, il riflettometro di polarizzazione ottica (POTDR) che risolve, in funzione del tempo, lo stato di polarizzazione della luce retro-diffusa; ciò fornisce la distribuzione spaziale delle proprietà che la influenzano.

Una difficoltà che si può evidenziare con le tecniche che sfruttano la retro-diffusione lineare è che spesso non sono in grado di distinguere la grandezza misurata; esse devono, per risultare appetibili, trovare applicazioni di nicchia, facendo soprattutto affidamento a speciali arrangiamenti che permettono l'adattamento a particolari situazioni.

5.2 Sistemi basati sulla retro-diffusione non lineare

5.2.1 DOFS di temperatura basati sull'effetto Raman

Il primo sistema basato sulla retro-diffusione non lineare che verrà descritto costituisce quello che è indubbiamente il sistema DOFS di più grande successo che si possa incontrare, sia dal punto di vista tecnico che da quello commerciale. Esso fa uso dell'effetto non lineare Raman abbinato ad una tecnica nota come 'termometria differenziale anti-Stokes Raman' (DART). L'effetto possiede il singolare vantaggio di essere essenzialmente indipendente dal materiale e, perciò, di poter essere sfruttato con qualsiasi tipo di fibra. Il metodo in questione sfrutta l'effetto Raman spontaneo che consente alle vibrazioni e rotazioni molecolari che avvengono in un mezzo di modulare la luce che vi si propaga all'interno. L'interazione avviene, naturalmente, a livello quantico, l'effetto, quindi, rappresenta l'assorbimento di un fotone incidente su una molecola (che viene elevata ad uno stato virtuale eccitato) e la riemissione di un fotone ad energia differente (e perciò a differente lunghezza d'onda), più grande o più piccola di quella del fotone originale. In ciascun caso, la differenza è uguale a una delle energie discrete vibrazionali o rotazionali della molecola. Ora, se il fotone emesso si trova ad avere un'energia maggiore dell'originale, la molecola deve fornire l'energia extra richiesta, il che può accadere solo se la molecola è già in uno stato eccitato. Il numero delle molecole che sono eccitate dipende direttamente dalla temperatura assoluta e, perciò, la quantità di radiazione che viene riflessa ad una energia più alta può essere utilizzato per misurare la temperatura assoluta. Un fotone con energia più bassa dell'originale si ottiene da un'eccitazione della molecola dallo stato '*ground*'. Lo spettro Raman per il silicio è una conseguenza delle oscillazioni delle energie di legame che avvengono in un solido amorfo. La radiazione con un'energia maggiore di quella originale (lunghezza d'onda più corta) è conosciuta come luce anti-Stokes, mentre quella con

un'energia minore è conosciuta come luce Stokes. Nello schema per l'utilizzo di questo fenomeno nel monitoraggio distribuito di temperatura, un impulso ottico con un'alta potenza di picco viene lanciato in una fibra ottica multimodale a frequenza ν_1 e la retro-diffusione alle lunghezze d'onda di Stokes e di anti-Stokes viene rilevata con l'aiuto di un monocromatore, un dispositivo che scompone un singolo fascio di luce policromatica in più fasci di luce monocromatica, permettendo così di analizzare la sua intensità in funzione della lunghezza d'onda. In pratica, viene scelto un intervallo conveniente di frequenze ν e vengono misurati i livelli della radiazione in piccoli intervalli intorno a $\nu_s = \nu_1 - \nu$ e $\nu_a = \nu_1 + \nu$, dove ν_s e ν_a sono rispettivamente le frequenze di Stokes e di anti-Stokes. La dipendenza della radiazione anti-Stokes dalla temperatura viene normalizzata dividendola per il livello della radiazione di Stokes, in modo da rimuovere tutti gli effetti, ad eccezione della temperatura, che causano perdite (per esempio, l'attenuazione del materiale della fibra, le perdite per torsione, le variazioni dell'efficienza di lancio, etc). Il rapporto dei livelli di potenza anti-Stokes è dato da

$$R(T) = \left(\frac{\nu_a}{\nu_s}\right)^4 e^{\left(\frac{h\nu}{kT}\right)}$$

confermando l'indipendenza dell'effetto Raman dal tipo di materiale (il fattore $(\nu_a/\nu_s)^4$ è il fattore di diffusione Rayleigh). In principio, fu escogitato un sistema sperimentale che utilizzava un laser ad argon in grado di fornire impulsi di 15 ns a 514,5 nm di lunghezza d'onda e una potenza di picco di 5 W. Le lunghezze d'onda di Stokes e di anti-Stokes vennero scelte per essere a ± 10 nm (cioè, una differenza di 400 cm^{-1} numeri d'onda) dalla linea a 514,5 nm.

Un'importante caratteristica, degna di enfasi, è che una tale tecnica, di fatto, permette ad ogni fibra ottica già installata di diventare un sensore distribuito di temperatura (per i suoi primi 10 km o giù di lì), non importa per quale scopo sia stata originariamente installata. L'idea è stata ora sviluppata in un sistema commerciale che utilizza dei laser a semiconduttori.

Uno sviluppo intensivo di questo sistema, spinto da una grande varietà di applicazioni industriali, potenziali o già esistenti, ha condotto ad alcuni

importanti miglioramenti nella progettazione e nelle prestazioni. Tra di essi c'è l'utilizzo di due lunghezze d'onda cosicché le lunghezze d'onda Stokes e anti-Stokes non soffrano di perdite differenziali, la misurazione effettuata da entrambi i terminali per compensare le perdite in fibra e, più recentemente, l'utilizzo di dispositivi per il conteggio di fotoni per migliorare la risoluzione spaziale, portandola a pochi centimetri. I sistemi disponibili attualmente in commercio forniscono prestazioni di grande effetto, permettendo una risoluzione nelle misure di temperatura di $\pm 0,5$ °C con una risoluzione spaziale di 1 m, per distanze superiori a 10 km, e di 5 m, per distanze maggiori di a 30 km. I tempi di misurazione sono nell'ordine delle decine di secondi. Per le distanze più lunghe, deve essere utilizzata una fibra monomodale, in modo da ridurre gli effetti dell'oscillazione dell'impulso dovuti alla dispersione nella fibra. La commercializzazione di dispositivi per il conteggio di fotoni, tuttavia, potrà presto condurre a una nuova generazione di sistemi e fare da apripista ad una nuova gamma di applicazioni ad alta risoluzione. Il singolare vantaggio che si ha col conteggio di fotoni è che il sistema di ricezione deve riconoscere, in ogni istante, solamente l'impulso elettronico prodotto da un singolo fotone. Poiché le caratteristiche dell'impulso (per esempio, larghezza, altezza e forma) sono note, il ricevitore può discriminare tra l'impulso e i livelli di rumore relativamente alti; quindi, il rapporto segnale-rumore aumenta considerevolmente, circa di 20 dB. Un aumento così significativo della sensibilità effettiva di un sistema permette un miglioramento del compromesso sensibilità/risoluzione, cosicché la risoluzione spaziale può essere migliorata di quasi due ordini di magnitudo, abbassandola a circa 0,01 m. I vantaggi del conteggio di fotoni sono molto importanti perché sono applicabili alla maggior parte dei sistemi DOFS, specialmente a quelli che utilizzano le tecniche di retro-diffusione. Il metodo di ricezione col conteggio di fotoni è pensato per essere applicato diffusamente nella progettazione di sistemi DOFS, vista la proliferazione delle aree di applicazione e vista la richiesta di aumenti nelle prestazioni. Il conteggio di fotoni è stato utilizzato al posto dell'OTDR, per alcuni anni, per la diagnostica nelle telecomunicazioni ottiche.

I sistemi Raman sono stati utilizzati in differenti applicazioni nel monitoraggio strutturale, in particolare per i pozzi petroliferi e per il monitoraggio delle perdite nelle dighe di terra.

5.2.2 DOFS basati sulla diffusione Brillouin spontanea

La diffusione Brillouin è simile all'effetto Raman, in quanto una pompa ottica causa l'eccitazione delle molecole che si trovano allo stato zero o ad uno stato già eccitato; il decadimento da questi nuovi stati conduce a componenti Stokes (una lunghezza d'onda più lunga di quella della pompa) o anti-Stokes (una lunghezza d'onda più corta di quella della pompa). L'importante differenza è che, nella diffusione Brillouin, l'eccitazione degli stati è legata ad un movimento di grandi quantità di molecole, piuttosto che alle rotazioni e alle vibrazioni delle singole molecole, come nel caso Raman.

La diffusione avviene, essenzialmente, in conseguenza di una riflessione di tipo Bragg su reticoli di diffrazione mobili creati da variazioni dell'indice di rifrazione causate da onde acustiche che si propagano nel materiale lungo l'asse principale della fibra. Alcune onde acustiche possono essere generate spontaneamente da un'eccitazione termica e, quando questo accade, l'effetto risultante sulle onde è conosciuto come diffusione Brillouin 'spontanea'. L'onda Stokes riflessa, quindi, nasce da un'onda acustica che si propaga, lungo l'asse della fibra, allontanandosi da un impulso generato dalla pompa ottica, mentre l'onda anti-Stokes nasce da un'onda acustica che si muove verso l'impulso; essi sono, di fatto, effetti Doppler quantizzati e, nella teoria dei quanti, sono visti come una diffusione di fotoni da fononi. L'effetto Brillouin porta ad uno spostamento delle frequenze di Stokes e di anti-Stokes nella fibra ottica che è dato da:

$$\nu_B = \pm \frac{2nv_a}{\lambda_p}$$

dove n è l'indice di rifrazione del materiale della fibra, v_a è la velocità acustica e λ_p è la lunghezza d'onda che viene pompata nello spazio libero. Per una fibra in silicio ad una lunghezza d'onda di pompa di $1,55 \mu\text{m}$ si ha

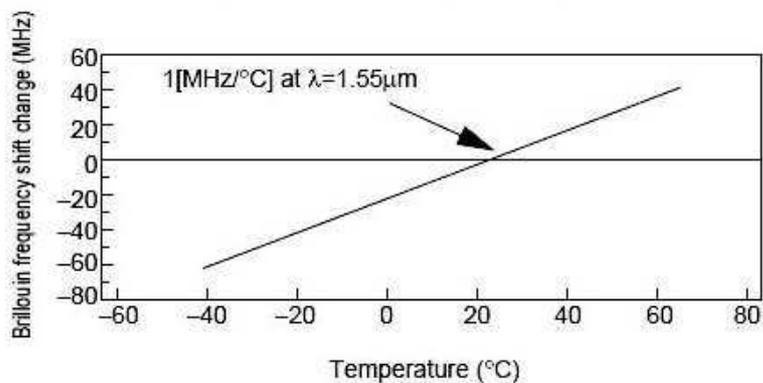


Figura 5.3: Dipendenza della variazione di frequenza Brillouin dalla temperatura

$\nu_B = 11,1$ GHz. Le variazioni di frequenza, quindi, avvengono nel dominio elettronico, piuttosto che in quello ottico e, perciò, sono richieste tecniche di ricezione molto differenti da quelle usate per l'effetto Raman. Altre differenze si riscontrano nel fatto che la forza delle interazioni è più grande, poiché sono coinvolte molte più molecole; la larghezza di banda riflessa è molto più stretta, poiché il mezzo, nell'insieme, dal punto di vista acustico si sposta, e in più ora devono essere applicate delle condizioni sull'accoppiamento di fase. Tali condizioni possono essere soddisfatte soltanto su un range di frequenze relativamente stretto. La larghezza delle linee Stokes e anti-Stokes è tipicamente di 30-40 MHz. Inoltre, in conseguenza delle condizioni sull'accoppiamento di fase, il pompaggio ottico deve essere effettuato a banda stretta e in maniera coerente, per ottenere una grande efficienza di diffusione. I requisiti sulla pompa, quindi, sono più rigidi di quelli per l'effetto Raman.

Un altro punto importante riguardante i DOFS è che sia la variazione delle frequenze Brillouin, sia i livelli di potenza riflessa sono dipendenti dalla temperatura (Fig. 5.3) e dalla deformazione longitudinale (Fig. 5.4), visto che la velocità del suono nel materiale e la sezione trasversale riflettente sono entrambe dipendenti dalle grandezze in esame. E' dunque possibile misurarne alcune in maniera distribuita usando l'effetto Brillouin e una considerevole

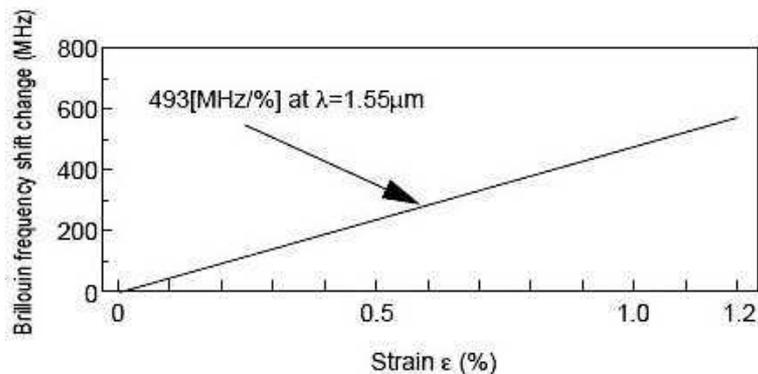


Figura 5.4: Dipendenza della variazione di frequenza Brillouin dalle deformazioni

mole di lavoro è stata fatto in questo campo. Nei laboratori è stato progettato il 'riflettometro ottico Brillouin nel dominio del tempo' (BOTDR).

Il primo vantaggio per le misure di temperatura usando il BOTDR è che il livello di retro-diffusione è più grande di quello dovuto all'effetto Raman e che in ricezione viene richiesta solamente la misura di una variazione di frequenza. Il BOTDR permette misure distribuite su lunghezze molto lunghe, anche più di 30 km, e l'utilizzo di una gran varietà di tecniche opto-elettroniche sofisticate, nel processo di ricezione. Gli svantaggi, tuttavia, sono che la persistenza dell'onda acustica (il tempo di vita del fonone nella descrizione quantica) limita la risoluzione spaziale, ben che vada, a circa 1 m, un valore troppo grande per molte applicazioni; un altro svantaggio è che la variazione di frequenza dipende contemporaneamente sia dalla temperatura, sia dalla deformazione longitudinale, rendendo difficile la discriminazione tra queste due grandezze.

Per una misura efficace della variazione Brillouin sono state studiate molte tecniche, si va da una ricezione coerente con un laser a *offset* di frequenza (Fig. 5.5), all'utilizzo di celle Bragg acusto-ottiche, a modulatori elettro-ottici per il calcolo delle tre caratteristiche dello spettro (Stokes, Rayleigh e anti-Stokes). Nei casi in cui debba venir misurata solo la variazione di frequenza, è impossibile discriminare gli effetti provocati dalla temperatura

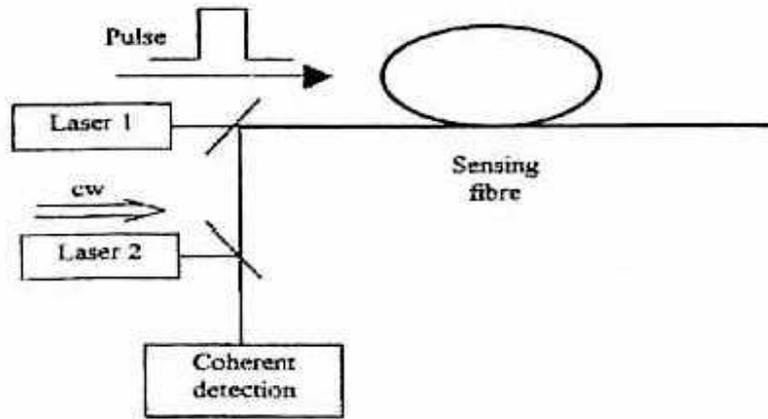


Figura 5.5: Schema per un BOTDR

o da una deformazione, cosicché, per misurare solamente una delle due, gli effetti dell'altra devono essere noti o assenti. I coefficienti delle grandezze oggetto di misura, per il calcolo delle variazioni della frequenza di Brillouin, riferiti alla temperatura (θ) e alla deformazione (ε) sono:

$$C_{\nu\theta} = 1,1 \text{ MHz K}^{-1}$$

$$C_{\nu\varepsilon} = 48 \text{ kHz } \mu\text{strain}^{-1}$$

E' relativamente facile isolare una fibra da una possibile deformazione longitudinale (installandola in un tubo libero, per esempio) e, quindi, misurare la temperatura, ma è quasi impossibile misurare una deformazione isolandola dagli effetti delle variazioni di temperatura. Nella prima dimostrazione del BOTDR la distribuzione della temperatura fu misurata su 11,5 km in uno schema libero da deformazioni e fu ottenuta un'accuratezza della misurazione di temperatura di ± 6 °C con una risoluzione spaziale di 100 m. Per misurare efficacemente la distribuzione della temperatura e della deformazione contemporaneamente, è necessario misurare anche i livelli di potenza riflessi Brillouin. I coefficienti misurati per la dipendenza del livello di potenza dalla temperatura e dalla deformazione sono

$$C_{p\varepsilon} = -7,7 \times 10^{-4} \% \mu\text{strain}^{-1}$$

$$C_{p\theta} = 0,36 \% \text{ K}^{-1}$$

Tali coefficienti, insieme a quelli che determinano la dipendenza della variazione di frequenza dalle due grandezze, forniscono ai DOFS una matrice per la discriminazione nel momento in cui il livello di potenza e la variazione di frequenza sono misurati in funzione della posizione lungo la fibra. Le misure distribuite della potenza riflessa Brillouin vengono fatte utilizzando un interferometro Fabry-Pérot. Di recente è stato presentato il primo sistema capace di misurare contemporaneamente la distribuzione della temperatura e delle deformazioni. Esso utilizza un interferometro a scansione Fabry-Pérot e un insolito schema di elaborazione capace di rendere lineari i livelli di potenza, in presenza della manifestazione della diffusione ‘stimolata’. L’attività di ricerca in questo campo sta continuando e promette grosse prospettive di sviluppo nel futuro.

Per le misure di temperatura, un sensore basato sulla diffusione Brillouin stimolata compete fortemente con i sistemi basati sull’effetto Raman, mentre per le misure di deformazioni non ha praticamente rivali. Un suo problema rimane, però, il livello estremamente basso del segnale ricevuto che richiede un’analisi del segnale più sofisticata e tempi di elaborazione più lunghi.

5.3 Sistemi non lineari basati sulla diffusione co-direzionale

L’essenza di un sistema DOFS che sfrutta la diffusione co-direzionale si può riassumere nell’azione di due radiazioni contro-propaganti che, all’interno della fibra, interagiscono attraverso un effetto ottico non lineare. Quando l’interazione non lineare viene influenzata, in maniera deterministica, da un fattore esterno, il valore della grandezza lungo la fibra può essere mappato. Nella maggior parte dei casi le radiazioni contro-propaganti sono costituite da un impulso ottico e una CW ottica. L’informazione spaziale è fornita attraverso la conoscenza della posizione dell’impulso in ogni istante (in co-

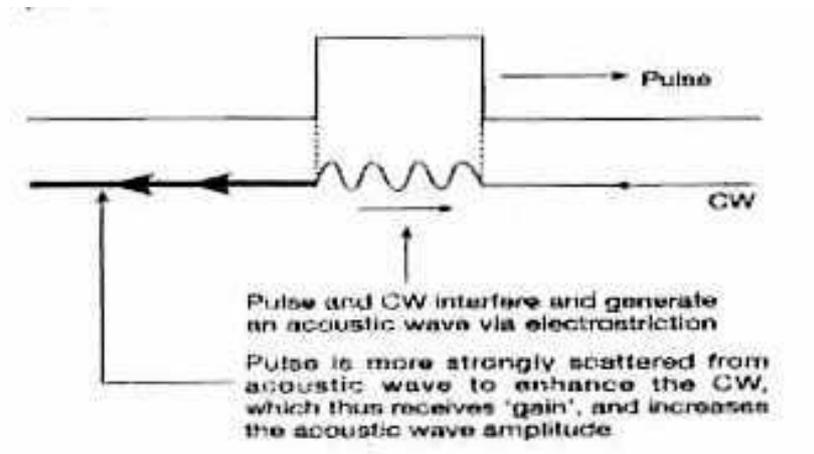


Figura 5.6: Principi della diffusione Brillouin stimolata nelle fibre

mune con i sistemi che sfruttano la retro-diffusione), mentre l'interazione non lineare viene mappata, in funzione del tempo, tramite l'osservazione della magnitudo dell'effetto non lineare sulla CW che emerge dall'estremità della fibra in cui viene lanciato l'impulso.

Il singolare vantaggio di questo sistema è che ora l'effetto viene osservato su un'onda ottica di diffusione co-direzionale, opposta a quella retro-diffusa, grazie alla quale il livello del segnale e, quindi, il rapporto segnale-rumore vengono aumentati di molto. Tutto ciò offre, attraverso un conveniente compromesso sulle prestazioni, una risoluzione spaziale migliore (di circa un ordine di magnitudo). Tali vantaggi sono sicuramente da aggiungere a quelli offerti, generalmente, dall'utilizzo di effetti non lineari (per esempio, la varietà di effetti a disposizione e la specificità delle risposte a determinate grandezze). Gli svantaggi dei sistemi basati sulla diffusione co-direzionale sono, in primo luogo, la richiesta di due sorgenti e, in secondo luogo, la necessità di dover garantire, solitamente, l'accesso ad entrambe le estremità della fibra (benché siano possibili schemi basati sulla diffusione co-direzionale che coinvolgono una sola estremità).

5.3.1 DOFS basati sulla diffusione Brillouin stimolata

Quando un'onda acustica si propaga in un mezzo, le variazioni di pressione danno luogo a variazioni dell'indice di rifrazione del mezzo, attraverso l'effetto ottico provocato dalla deformazione. Alcune onde acustiche sono sempre presenti, al di sopra dello zero assoluto, poiché le molecole sono in movimento e scambiano parte della loro energia tra i modi dinamici della fibra. La diffusione ottica che proviene dalle onde acustiche termicamente eccitate costituisce il fenomeno della diffusione Brillouin spontanea. Non appena la potenza della pompa ottica viene aumentata, l'onda riflessa all'indietro da un'onda acustica aumenta in ampiezza e interferisce significativamente con l'onda di pompa che viaggia in avanti. Tutto ciò dà luogo a un'onda 'permanente' che, poiché l'onda riflessa risente dell'effetto Doppler in frequenza, che aumenta o diminuisce, provocato dalla sua diffusione dall'onda acustica in movimento, viaggia anche lei alla velocità del suono. Tale onda 'permanente' produce variazioni nell'indice di rifrazione del materiale attraverso il fenomeno dell'elettrostrizione, dando luogo perciò ad un'onda acustica potenziata dalla quale si può ottenere una retro-diffusione più forte. Questo processo di retro-diffusione a tre onde, retro-azionato positivamente, è noto come diffusione Brillouin stimolata (SBS) (Fig. 5.6). Essa porta ad una retro-diffusione più grande delle frequenze di Stokes e anti-Stokes rispetto a quella spontanea e, infatti, causa problemi di diminuzione del segnale nei sistemi di telecomunicazione in fibra ottica a banda stretta, sebbene ora siano disponibili metodi per alleviare il problema.

Nello schema di base, un impulso coerente agisce da segnale di pompa, e una CW contro-propagante viene scannerizzata in frequenza intorno alla linea di Stokes. Quando essa coincide con la linea di Stokes riceve un guadagno dal segnale di pompa grazie al processo di SBS. Essenzialmente quel che succede in questo caso è che la CW dà luogo ad un'interferenza a larga ampiezza con l'impulso, generando perciò l'onda acustica dalla quale il segnale di pompa viene fortemente riflesso. Osservando il livello del segnale in funzione del tempo e della frequenza al propagarsi del segnale di pompa con uno specifico

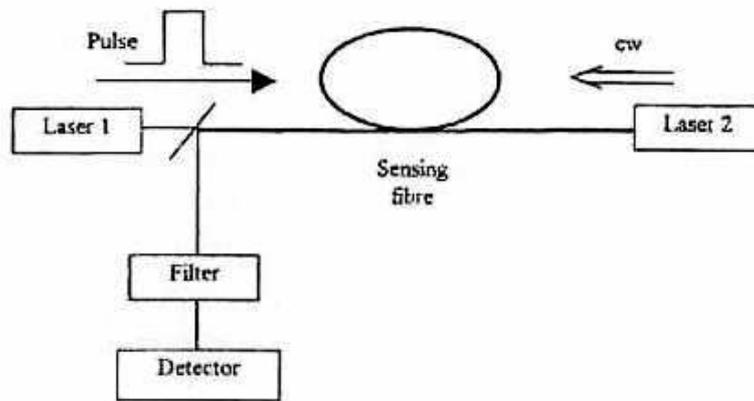


Figura 5.7: Schema per un BOTDA

analizzatore (BOTDA) (Fig. 5.7), la frequenza di Stokes può essere mappata in funzione della posizione lungo la fibra.

I primi esperimenti su queste linee guida ottennero una risoluzione di deformazione di 2×10^{-5} , equivalente ad una risoluzione di temperatura di $3 \text{ }^\circ\text{C}$, con una risoluzione spaziale di 100 m su 1,2 km. I sistemi più recenti hanno migliorato la risoluzione spaziale a 1 m per una fibra di 22 km. Ulteriori sviluppi sono attesi per superare il problema legato alla diminuzione del segnale di pompa, causato dalla forte retro-diffusione, usando la linea di anti-Stokes piuttosto che quella di Stokes. In questo caso il segnale CW viene attenuato e il segnale di pompa amplificato. Con questa tecnica è stata ottenuta una risoluzione di temperatura di $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e una risoluzione spaziale di 5 m su una lunghezza totale di 51 km. E' stato anche proposto un approccio più elegante che consiste nel far generare entrambe le onde da una singola sorgente laser utilizzando un modulatore ottico integrato. L'arrangiamento offre il vantaggio di eliminare il bisogno di due laser e di assicurare che la differenza di frequenza rimanga stabile indipendentemente dalle derive del laser. Un'azienda svizzera commercializza un sistema basato su questa tecnica che effettua misure su 10 km con una risoluzione spaziale di 1 m o su 30 km con una risoluzione di 10 m. La risoluzione per le deformazioni è di $20 \mu\varepsilon$ e la risoluzione per la temperatura è di $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Tali valori sono molto

vicini ai limiti teorici per un sistema Brillouin.

Essendo lo spostamento di frequenza della diffusione Brillouin dipendente sia dalle deformazioni, sia dalla temperatura della fibra, la concezione del cavo-sensore determina il tipo di sensibilità del sistema. Per le misure di temperatura è sufficiente usare un cavo standard per telecomunicazioni. Essi sono appositamente concepiti per proteggere le fibre ottiche in caso di deformazione del cavo. La fibra rimane quindi permanentemente lasca e gli spostamenti di frequenza possono essere assegnati senza ambiguità alle variazioni di temperatura. Se lo spostamento di frequenza della fibra è conosciuto per una data temperatura di riferimento, è possibile calcolare la temperatura assoluta in ogni punto lungo la fibra. Le misure distribuite di deformazioni richiedono, invece, un sensore progettato in maniera speciale che garantisca un accoppiamento meccanico tra il sensore e la struttura ospite per l'intera lunghezza della fibra. La conoscenza dello spostamento in frequenza in una fibra lasca di riferimento, permette una misura assoluta delle deformazioni.

Ricapitolando, il maggior vantaggio dei sensori che sfruttano la diffusione Brillouin stimolata è quello di lavorare con un segnale forte, portando ad una semplificazione dei problemi di ricezione, con i relativi benefici nel compromesso con la risoluzione spaziale. Ciò fornisce ottime prestazioni su distanze molto grandi. Il maggior svantaggio, a parte una richiesta di maggiori requisiti sulla coerenza della sorgente, è che ora non c'è più dipendenza della potenza del segnale dalla temperatura o da una deformazione poiché il processo di diffusione è controllato dall'interferenza dell'onda invece che dalle proprietà intrinseche della fibra. Non è più possibile, di conseguenza, misurare temperatura e deformazione simultaneamente, come nel caso spontaneo. Ciascuna grandezza può essere misurata solamente se si sa che le variazioni dell'altra sono assenti o determinate indipendentemente. Le potenzialità nell'effettuare misure su distanze molto grandi (50-100 km) assicurano, comunque, che questa tipologia di sensori troverà sempre preziose applicazioni [1, 10].

Capitolo 6

Conclusioni

I sistemi distribuiti in fibra ottica indubbiamente giocheranno nel futuro un ruolo molto importante nella diagnostica e nel monitoraggio di strutture critiche, anche molto estese. Tutto ciò vale specialmente per la nuova generazione di strutture ‘intelligenti’, o ‘*smart structures*’, auto-adattanti e auto-monitoranti.

I sistemi quasi-distribuiti sono più adatti ad applicazioni specifiche, ‘*ad-hoc*’, che lavorano su distanze relativamente più brevi, visto che l’attenuazione della luce che li interroga può essere rilevante e la capacità di *multiplexing/decoding* è limitata.

Ad ognuna delle tre principali classi di sistemi totalmente distribuiti (basati su retro-diffusione lineare, retro-diffusione e diffusione co-direzionale non lineare) si possono associare speciali vantaggi e svantaggi. I DOFS offrono soluzioni particolari per applicazioni in aree considerate spesso di nicchia; essi sono, comunque, generalmente più versatili dei sistemi quasi-distribuiti e operano su distanze più grandi (fino a 100 km). Per contro, risultano più complessi da progettare e da implementare, specialmente in relazione ai requisiti sulla sorgente e alle richieste in fase di elaborazione del segnale.

Il costo dei sistemi che utilizzano i sensori ottici è ancora, in molti casi, superiore a quello dei sistemi tradizionali; ciò è dovuto principalmente al costo

dei componenti, che nella maggior parte dei casi non hanno ancora un mercato adeguato, e al costo delle unità di interrogazione, spesso molto sofisticate. In tal senso, va sempre fatta una stima della convenienza economica dell'installazione di un sistema di DOFS, rispetto ad un sistema tradizionale meno performante.

La commercializzazione delle idee innovative (che arrivano in gran parte dalle università) è stata lenta e le ragioni sono molteplici. I progressi della tecnologia che si basa sulle fibre ottiche sono, comprensibilmente, condizionati dai risultati raggiunti nel campo delle telecomunicazioni ottiche; in questo senso, benché il rapido sviluppo nelle telecomunicazioni abbia fornito una varietà di fibre e di componenti decisamente molto utili ai ricercatori che operano nel campo dei sensori, le particolari esigenze di questa tecnologia non hanno avuto la giusta attenzione. Se si vogliono raggiungere stadi di sviluppo davvero efficaci e se si vogliono trovare nuove applicazioni per i DOFS, dunque, c'è bisogno che vengano risolti alcuni problemi, soprattutto per quanto riguarda l'offerta di fibre e rivestimenti speciali.

Un altro ostacolo è dato dal problema dell'interfaccia, cioè, dalla necessità di assicurare un'interazione ottimale tra il sistema in fibra e l'ambiente che lo circonda. Il problema è particolarmente importante, soprattutto, per i sistemi totalmente distribuiti. Se la commercializzazione vuole procedere rapidamente, il problema dell'interfaccia deve essere affrontato vigorosamente; ciò significa che deve essere fatto un accordo sull'attenzione che la ricerca deve dedicare ai rivestimenti per le fibre in grado di migliorare alcune situazioni.

Infine, c'è il problema del naturale (e in parte comprensibile) conservatorismo di quelle industrie che si occupano di misure e del monitoraggio di grandi strutture. Tutto ciò può essere interrotto soltanto da un'efficace dimostrazione a lungo termine dei vantaggi che i DOFS sono sicuramente in grado di offrire: molto spesso è difficile persuadere le persone dei vantaggi dati da qualcosa di innovativo anche dopo un'esauriente dimostrazione pratica.

Guardando con ottimismo alla situazione attuale si nota, però, come la

rapida avanzata delle telecomunicazioni in fibra ottica abbia già fatto sviluppare una grande varietà di componenti ad alte prestazioni e tipologie di fibre che hanno contribuito considerevolmente ai progressi fatti dalla sensoristica negli ultimi anni. Per ulteriori sviluppi, applicazioni e per favorire la diffusione sul mercato è, comunque, necessario enfatizzare il fatto che la ricerca ha bisogno di nuove risposte ad alcune esigenze dei sensori ottici. Rimane, quindi, la speranza che la richiesta di una sempre miglior gestione del monitoraggio e del controllo delle grandi strutture civili farà aumentare la domanda verso la tecnologia sensoriale; in tal caso, varrà la pena spendere maggior attenzione, sia tecnica che commerciale, a tutela dei forti e indiscussi vantaggi offerti dai DOFS.

Bibliografia

- [1] A. J. Rogers, 'Distributed optical-fiber sensing', *Meas. Sci. Technol.*, vol. 10 (8), R75-R99, 1999.
- [2] Personick S. D., Photon probe – An optical fiber time-domain reflectometer', *Bell System Technical Journal*, vol. 56, 355-66, 1977
- [3] A. H. Hartog and D. N. Payne, 'Remote measurement of temperature distribution using an optical fiber', *Proc. ECOC '82*, 215-220, 1982
- [4] J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby and J. N. Ross, 'Distributed optical fiber Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector', *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 13, 569-570, 1985
- [5] T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda, 'Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers', *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 1, no. 5, 107-108, 1989
- [6] D. Culverhouse et al., 'Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors', *Electron. Lett.*, vol. 25, no. 14, 913-915, 1989
- [7] J. L. Arce-Diego, 'Light and waveguiding', *Handbook of optical fibre sensing technology*, edited by José Miguel Lopez-Higuera, 40-41, 2002
- [8] Hill K. O. et al., 'Photosensitivity in optical-fiber waveguides', *Appl. Phys. Lett.*, 32, 647, 1978

- [9] Lars Hoffmann et al., ‘Application of fibre optic temperature measurement’, *Proc. Estonian Acad. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 4, 363-378, 2007
- [10] D. Inaudi, ‘Photonic sensing technology in civil engineering applications’, *Handbook of optical fibre sensing technology*, edited by José Miguel Lopez-Higuera, 517-541, 2002
- [11] S. Delepine-Lesoille, E. Merliot, Y. Gautier, ‘Optical fiber strain sensors for use in civil engineering: State-of-the-art, industrial applications and outlook’, *BPLC*, vol. 272, 123-140, 2008