



PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

OBIETTIVO REALIZZATIVO 2

**“STATO DELL’ARTE DEI SISTEMI DI PESATURA DINAMICA
NELLA GESTIONE DI SMART ROAD”**

D 2.4 Report Finale Attività:
**STATO DELL’ARTE SUI SISTEMI OPTOELETTRONICI PER
ACQUISIZIONE ED ELABORAZIONE DI SEGNALI**
CODICE PROGETTO: ARS01_00243

Coordinatore dell’OR
Consorzio TRAIN
Dot. Filippo Ragazzo

Visto del Responsabile Tecnico Scientifico
Ing. Ptero De Fazio

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

<i>Contributi dei partecipanti</i>		
<i>Responsabile</i>	<i>Contributo</i>	<i>Descrizione contributo e note</i>
TAKIUS	Stesura documento	Report Tecnico sull'A.R. 2.4
<i>Partecipanti</i>		
ANAS	Commenti	
ENEA	Commenti	
TRAIN (ETT-UNISA)	Commenti	

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

Sommario

1. Sintesi.....	4
2. Introduzione	6
3. Stato dell'arte sui sistemi optoelettronici per acquisizione ed elaborazione di segnali	11
3.1 Tecnologie per interrogatori ottici.....	11
3.2 Interrogatori disponibili in commercio.....	17
3.2.1. Redondo FBGT.....	17
3.2.2. I-MON Ibsen.....	18
3.2.3. Micron Optics SM130	18
3.2.4. National Instruments PXIe-4844	19
3.3 Esempio applicativo n.1: sistema di monitoraggio della struttura e della temperatura del rotore di coda di un elicottero.	20
3.4 Esempio applicativo n.2: health monitoring di una struttura in materiali compositi mediante sensori di deformazione in fibra ottica.	25
3.5 Esempio applicativo n.3: sensore in fibra ottica per alte temperature.....	32
3.6 Applicazioni dei sensori FBG.	33
4. Studio dello stato dell'arte delle tecnologie per l'acquisizione di segnali da sensori in fibra ottica con sistemi di elaborazione a basso consumo	35
5. Gestione in tempo reale dei veicoli pesanti in prossimità di infrastrutture critiche o comunque in condizioni di criticità per il traffico	40
6. Bibliografia	42

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

1. Sintesi

Il presente documento rappresenta il deliverable 2.4 dell'OR 2 “Stato dell'arte dei sistemi di pesatura dinamica nella gestione di smart road”.

Nel Capitolato Tecnico l'attività AR2.4 è denominata “Stato dell'arte sui sistemi optoelettronici per acquisizione ed elaborazione di segnali” ed il suo obiettivo è quello fare una panoramica dello stato dell'arte sui sistemi e tecnologie per l'acquisizione di segnali di sensori in fibra ottica con sistemi di elaborazione a basso consumo e ad elevata disponibilità tipici di applicazioni embedded.

Le attività dell'AR2.4 saranno focalizzate allo studio ed all'analisi dell'applicazione della fibra ottica utilizzata come trasduttore, opportunamente impiegato, per la misura di una grandezza fisica: tipicamente temperatura e peso. La prima viene generalmente misurata in via diretta in quanto la fibra ottica (sensore) è direttamente influenzata dalla temperatura che determina una rifrazione dipendente funzionalmente dalla stessa. Mentre il peso viene determinato indirettamente mediante misura della deformazione di una struttura che ospita il sensore in fibra ottica. Vengono inoltre esplorate le tecniche di misura particolari, atte ad effettuare il disaccoppiamento del segnale dei sensori, al fine di misurare la grandezza desiderata.

La ricerca tecnologica per soddisfare aspetti operativi legati prevalentemente alla sicurezza ed all'efficienza, è stata orientata all'adozione di metodi innovativi volti alla razionalizzazione delle procedure di ispezione manutentiva al fine di minimizzare gli effetti di condizioni di carico inusuali, compensare condizioni locali gravose e ridurre i livelli di rischio operativo.

A tal proposito l'innovazione tecnologica è sempre più indirizzata verso lo sviluppo di differenti sistemi che possano permettere il monitoraggio dello stato di salute delle strutture (Structural Health Monitoring) lato senso inteso, ovvero di determinare preventivamente l'insorgere e la propagazione di un danno al suo interno, dovuto a sollecitazioni estreme ed eccezionali, escluse dal range di utilizzo, e di valutarne gli effetti sulla vita residua della struttura e sulla sicurezza per gli utilizzatori. Lo stato di una generica struttura può così essere individuato e identificato per mezzo di dispositivi integrati nella struttura stessa, aventi la possibilità di trasmettere queste informazioni ad un dispositivo esterno permettendo di valutare lo stato di salute della struttura in tempo reale. Queste metodologie possono garantire la sicurezza strutturale riducendo al minimo i tempi di reazione che possono prevedere operazioni di ispezione, inibire l'utilizzo della struttura stessa, avviare le attività di manutenzione.

É in questo contesto che si inseriscono le attività di ricerca sulle strutture intelligenti (Smart Structures) che, inglobando al loro interno opportune tipologie di sensori, sono in grado di monitorare l'ambiente fisico operativo, raccoglierne ed interpretarne le informazioni attraverso l'elaborazione dei dati, per poi rispondere ai cambiamenti dello stesso con delle azioni appropriate. Le smart structures hanno l'obiettivo di aumentare l'efficienza strutturale esibendo proprietà funzionali senza aggravio di peso, di costo e di affidabilità, mantenendo inalterate le elevate prestazioni dei materiali compositi. L'impiego di sensori inglobati nelle strutture offre molteplici vantaggi rispetto ai sistemi di trasduzione e attuazione convenzionali. Essi, infatti, sono protetti dagli effetti ambientali dalla struttura stessa in cui sono posti, inoltre possono essere collocati più facilmente nei punti critici della struttura anche in zone non raggiungibili attraverso un accesso

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

esterno. L'immunità alle interferenze con i campi elettrici e magnetici nonché la possibilità di gestire contemporaneamente più segnali (multiplexing), rendono le fibre ottiche (FO) i candidati ideali ad essere impiegati come sensori negli smart materials.

Le smart structures presentano, però, alcuni aspetti “particolari” che è necessario prendere in considerazione. In particolare, l'inglobamento di sensori all'interno di taluni materiali, come a titolo esemplificativo e non esaustivo i laminati, comporta problemi di compatibilità elastico - strutturale, con conseguente nascita di stati di sforzo concentrati localmente con conseguente difettosità che deve essere compensata dalla rivisitazione della progettazione effettuata in maniera puntuale in modo da rendere complessivamente a livello di struttura trascurabile l'invasività del corpo estraneo “sensore”. Per questo motivo assume fondamentale importanza l'interfaccia fra i sensori ed il materiale ospite dalla quale dipende la mutua capacità di trasferimento del carico. Un elevato grado di adesione (embedded) tra i costituenti è condizione imprescindibile per avere misure accurate, ma anche per evitare l'innescò di danneggiamenti in zone di forte discontinuità per il materiale ospite.

Questo lavoro concerne lo studio dell'impiego dei sensori ottici a reticoli di Bragg (Fiber Brag Grating - FBG) in grado di risentire sia delle variazioni di temperatura che delle deformazioni applicate alla struttura che li ospita. Nonché le tecniche di misura particolari atte ad effettuare il disaccoppiamento del segnale dei sensori, al fine di misurare la grandezza desiderata. Oggigiorno non esiste una tecnica di disaccoppiamento del segnale dei sensori FBG considerata universalmente superiore alle altre, ma a seconda del campo di applicazione e delle specifiche richieste è preferibile optare per l'una o per l'altra tecnica.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

2. Introduzione

Il ricorso a tecniche sempre più sofisticate per la misurazione “on going” di grandezze come temperatura e peso (dei veicoli in movimento) al fine di prevenire, nella fattispecie del presente lavoro, eventuali fratture e danneggiamenti nelle strutture viarie sopraelevate, è diventato sempre più importante e necessario per vari motivi:

- ✓ le analisi non distruttive prevedono l'utilizzo di tecnologie che non compromettono negativamente la vita operativa dei componenti;
- ✓ la possibilità di avere in tempo reale le informazioni riguardo ai carichi agenti su una struttura;
- ✓ la possibilità di creare un centro di controllo e decisionale (Decision Support System), o centrale operativa, che in via predittiva, ricevendo in tempo reale dai sensori la misura della grandezza desiderata in modo da determinare le condizioni di carico e dello stato della struttura e delle relative sollecitazioni, possa attuare anche in via automatica in base a scenari preconfigurati, azioni “on condition” di inibizione all'uso del manufatto, così come avviare verifiche mirate ed attività di manutenzione, in condizioni di reale necessità;
- ✓ è molto difficile progettare un componente utilizzando coefficienti di sicurezza che diano la completa certezza circa l'affidabilità e la sicurezza dello stesso;
- ✓ la riduzione dei tempi di ispezione della struttura, soprattutto nei punti di difficile accesso.

Lo sviluppo di un sistema di SHM (Structural Health Monitoring) efficiente è un'operazione molto complessa in quanto è necessario tener conto di diversi fattori, che spaziano dalla scelta dei sensori alla progettazione del sistema di elaborazione e misurazione. In ogni caso un sistema di SHM deve prevedere i seguenti elementi fondamentali, che consentono un corretto svolgimento dell'attività di monitoraggio e predizione del comportamento della struttura:

1. Apparato di monitoraggio: comprende i sensori e la strumentazione necessaria all'acquisizione e alla trasmissione dei dati rilevati dai sensori stessi.
2. Sistema di diagnosi: utilizzando le informazioni ricevute dalla rete di sensori, deve essere in grado di determinare la presenza di un alert che possa creare un potenziale danneggiamento della struttura.
3. Sistema di prognosi: effettua previsioni sulla propagazione del danno e sulla vita residua della struttura.

L'uso della fibra ottica come sensori di misura ha origini contemporanee, infatti studi recenti, addì 1965, fanno risalire a Charles K. Kao, che dimostrò teoricamente, l'effettiva possibilità di utilizzare la fibra ottica come mezzo di telecomunicazione, segnando l'inizio di un esponenziale incremento della ricerca in questo ambito. Tant'è che il limite pratico di attenuazione di 20 dB/Km, previsto dallo stesso Kao, fu abbattuto appena cinque anni più tardi. Immediatamente dopo, altri studiosi, Hockam e Werts misero in evidenza che le perdite delle fibre ottiche potevano essere sostanzialmente ridotte rimuovendo impurità, come ad esempio ioni di metalli pesanti. Ciò portò ad una serie di ricerche ed allo sviluppo di tecniche di fabbricazione delle fibre che permisero di ottenere valori di perdita al di sotto dei 20 dB/km. Ad oggi sono disponibili fibre ottiche con attenuazioni al di sotto di 0,15 dB/km, valori prossimi al limite teorico imposto dalla teoria della

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

diffusione Rayleigh. Questi valori di perdite così bassi, permettono l'utilizzo di fibre ottiche in canali di telecomunicazione lunghi diverse decine di chilometri. Oltre all'impiego in sistemi di telecomunicazione, le fibre iniziarono ad essere utilizzate anche come sensori in grado di rilevare le variazioni di alcune grandezze dell'ambiente circostante la guida, come la temperatura e la deformazione. Infatti ad oggi la fibra è variamente impiegata anche, per esempio, in microscopia, endoscopia, spettroscopia, illuminotecnica. Un affascinante ambito di ricerca e sviluppo è rappresentato dalla sensoristica, in particolare monitoraggio e telemetria nel campo dell'industria. Dal punto di vista realizzativo, una volta portato a dimensioni micrometriche, il vetro perde la sua caratteristica di fragilità e diventa un filo flessibile e robusto. Una fibra ottica si presenta proprio come un sottilissimo filo di materiale trasparente. In genere è realizzata in vetro o silicio fuso, e purché il materiale sia un dielettrico trasparente alla luce, può essere realizzata anche in plastica. Il suo utilizzo è quello di trasportare energia luminosa in modo guidato. Le fibre ottiche sono classificate come guide d'onda dielettriche. Esse, in altre parole, permettono di convogliare e guidare al loro interno la luce con perdite estremamente limitate. Vengono comunemente impiegate nelle telecomunicazioni come mezzo trasmissivo di segnali ottici anche su grandi distanze ovvero su rete di trasporto e nella fornitura di accessi di rete a banda larga cablata (dai 100 Mbit/s al Tbit/s). Le fibre ottiche vengono realizzate attraverso strutture cilindriche concentriche aventi indice di rifrazione differente, la parte centrale viene detta core e la parte che lo avvolge è il cladding. Le metodologie per produrre fibre ottiche sono la filatura diretta della fibra o da una preforma, che è quello maggiormente utilizzato. In Figura 1 è rappresentata la struttura di una fibra ottica con doppio rivestimento. Questo doppio rivestimento è necessario per evitare fenomeni di microflessione e proteggere la fibra contro l'urto sia durante il processo di fabbricazione che nell'installazione.

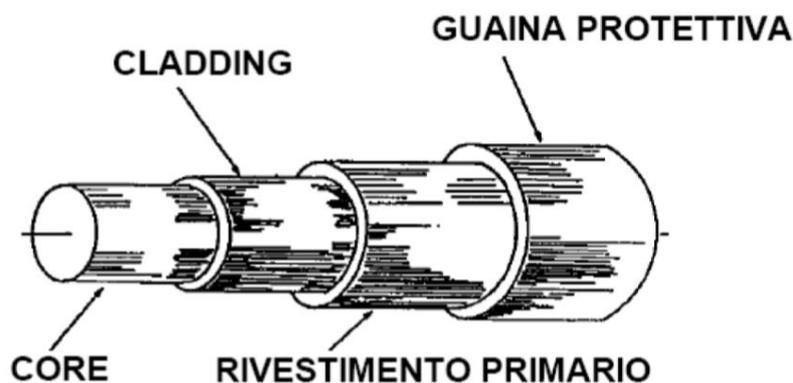


Figura 1. Struttura di una fibra ottica con doppio rivestimento

La fibra ottica funziona come una specie di specchio tubolare. La luce (campo elettromagnetico) che entra nel core con un certo angolo (angolo limite), si propaga mediante una serie di riflessioni sulla superficie di separazione tra i due materiali del core e del cladding. Diversi tipi di fibre si distinguono per diametro del core, indici di rifrazione, caratteristiche del materiale, profilo di transizione dell'indice di rifrazione e drogaggio (aggiunta di piccole quantità di altri materiali per modificare le caratteristiche ottiche). Il core e il cladding della fibra ottica possono essere realizzati in silice oppure in polimeri plastici:

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

- ✓ La fibra ottica in silice è composta da una singola fibra di vetro realizzata a partire da silice ultrapura, la quale viene ottenuta dalla reazione fra il tetracloruro di silicio e l'ossigeno. Nel silicio destinato alla produzione del core viene aggiunto del germanio (sotto forma di tetracloruro di germanio) in modo da aumentarne l'indice di rifrazione senza variarne l'attenuazione. Nella silice destinata al cladding, invece, viene aggiunto del boro, allo scopo di ridurne l'indice di rifrazione. Il principale svantaggio delle fibre ottiche realizzate in silice è la loro fragilità. A causa del diametro estremamente ridotto esse hanno anche una piccola apertura numerica ($NA \approx 0.16$ - parametro che indica il massimo angolo utile per ricevere o emettere luce) e sono difficili da raccordare.
- ✓ Le fibre ottiche polimeriche sono costituite da materiale plastico e sono molto più facili da maneggiare rispetto alle fragili fibre in vetro. La dimensione del core è molto più grande (circa 1mm) rispetto alle fibre in silice, quindi garantiscono un'ampia capacità di trasmissione dei dati e un'apertura numerica più elevata con la possibilità di realizzare fibre multimodali. Tuttavia queste fibre presentano lo svantaggio di avere un'attenuazione abbastanza elevata e una scarsa resistenza termica.

I sensori in fibra ottica a reticolo di Bragg, FBG, rappresentano attualmente la scelta complessivamente valutata più idonea per la misura del peso dei veicoli in movimento sulla sede stradale, obiettivo realizzativo del presente progetto.

Questi sensori sono costituiti da un reticolo inscritto all'interno della fibra, che ha l'effetto di riflettere solo alcune lunghezze d'onda della luce incidente. Se le proprietà geometriche del reticolo cambiano per effetto di una deformazione, cambia anche la forma dello spettro riflesso. Inoltre, con il tipo di sensore usato, è possibile correlare lo spettro con la posizione di eventuali danneggiamenti interni al materiale.

La larghezza di banda del segnale accoppiato in fibra, ossia l'intervallo di frequenza in cui opera il segnale, può essere molto grande; va tuttavia considerato il fenomeno della dispersione e il coefficiente di attenuazione della fibra (in particolare il suo andamento in frequenza) affinché i raggi si propaghino senza perdere eccessiva potenza e non subiscano distorsioni. Risulta così possibile definire delle finestre di trasmissione che rappresentano gli intervalli di lunghezza d'onda, λ , entro i quali si hanno i minimi di attenuazione nel trasferimento del segnale. Le tre principali finestre di trasmissione impiegate per le fibre ottiche sono di 850nm, 1300nm e 1550nm. La scelta di tali finestre è di facile comprensione visualizzando la Figura 2, dove viene riportato l'andamento della perdita di segnale in funzione della lunghezza d'onda. Le tre finestre di trasmissione corrispondono ai tre minimi della funzione.

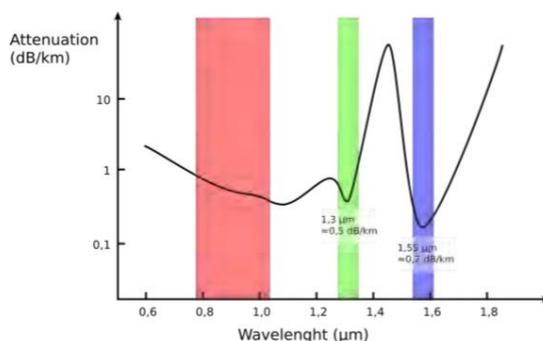


Figura 2. Andamento della perdita del segnale in funzione della lunghezza d'onda

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

I reticoli di Bragg, Fiber Bragg Grating (FBG), inscritti in fibre ottiche monomodali tipicamente in vetro di silice, vengono realizzati mediante un’opportuna modulazione locale dell’indice di rifrazione del core di una fibra ottica fotosensibile, effettuata tramite una sorgente energetica, come i raggi UV (Figura 3).

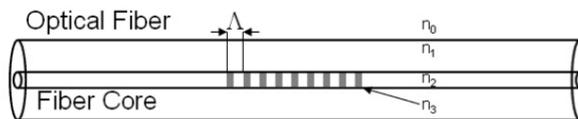


Figura 3. I reticoli di Bragg (FBG)

Il tratto di fibra ottica modificato ha la funzione di filtro, permettendo quindi di selezionare delle particolari lunghezze d’onda. In particolare la luce viaggiando attraverso la fibra ottica viene in parte riflessa in corrispondenza di ogni piccola variazione dell’indice di rifrazione. Per un piccolo range di lunghezze d’onda, i raggi luminosi riflessi agiscono costruttivamente percorrendo a ritroso la fibra ottica. La riflessione massima avviene per la lunghezza d’onda chiamata lunghezza d’onda di Bragg, λ_B , ricavabile attraverso l’equazione fondamentale di Bragg, che la relaciona al periodo delle frange del reticolo, Λ , e all’indice di rifrazione effettivo, n_{eff} .

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

L’equazione precedente implica che la lunghezza d’onda di Bragg, subisca una variazione ad ogni alterazione delle proprietà fisiche o meccaniche del reticolo. L’applicazione di una deformazione provocherà ad esempio una variazione del passo del reticolo e dell’indice di rifrazione effettivo attraverso effetti ottici. In modo analogo il reticolo sarà soggetto a rispondere diversamente se soggetto a modifiche della temperatura. Per questo motivo i reticoli di Bragg possono essere utilizzati come sensori per la misura di deformazione e temperatura attraverso la variazione della lunghezza d’onda di Bragg. L’intensità della risposta del sensore dipende dalla lunghezza del reticolo di Bragg e quindi dal numero di variazioni dell’indice di rifrazione all’interno del reticolo. In

Figura 4 viene mostrata la variazione di intensità della risposta, al variare della lunghezza del reticolo (a parità di passo Λ).

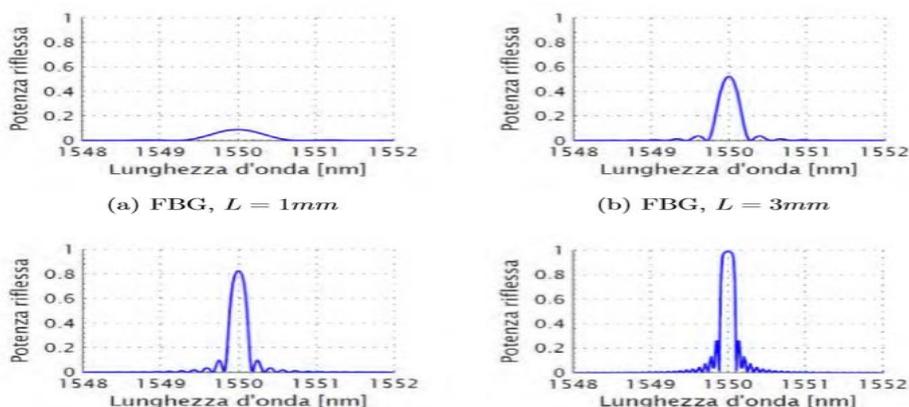


Figura 4. Confronto tra le intensità delle risposte per reticoli di Bragg uniformi di lunghezza differente.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

Un'altra variante che possono presentare i reticoli, oltre alla lunghezza, è la spaziatura tra le frange. In particolare esistono due differenti tipologie di reticolo:

- uniforme;
- non uniforme (chirped).

Il primo presenta una periodicità costante delle frange di interferenza, permettendo così la riflessione di una sola lunghezza d'onda luminosa, ottenendo uno spettro di riflessione stretto e centrato in corrispondenza della λ_B . Contrariamente il reticolo chirped presenta una variazione monotona delle sue caratteristiche, ottenuta sia modificando la spaziatura delle singole frange, sia modificando l'indice di rifrazione del core. I reticoli chirped danno quindi luogo ad uno spettro di riflessione più ampio rispetto ai reticoli uniformi perché la riflessione della luce avviene a differenti lunghezze d'onda. In Figura 5 viene presentato un esempio delle differenti caratteristiche geometriche dei due reticoli e lo spettro di riflessione corrispondente.

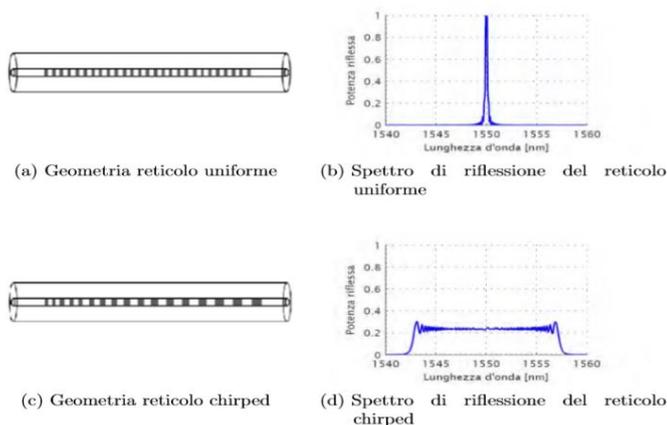


Figura 5. Geometria e spettro di un reticolo uniforme e di un reticolo chirped

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

3. Stato dell'arte sui sistemi optoelettronici per acquisizione ed elaborazione di segnali

Il presente capitolo illustra l'indagine svolta sullo stato dell'arte dei trasduttori optoelettronici utilizzati in applicazioni di misurazione di grandezze. La scelta del sistema optoelettronico per l'acquisizione di segnali è la summa delle valutazioni relative al contesto operativo ed applicativo in cui il sistema di sensori deve funzionare. Per cui una specifica scelta architettonica dipende dall'applicazione e dai requisiti fissati.

Aspetti peculiari come la possibilità di installare i sensori optoelettronici sul o nel sistema da controllare, la possibilità di impiegare più sensori iscritti nello stesso tratto al fine di eliminare o compensare errori o perturbazioni indotti dall'ambiente esterno possono non essere presi in considerazione in quanto i sensori FBG posti in finestre differenti possono richiedere allo stato attuale l'impiego di sistemi di interrogazione più evoluti e di dimensioni maggiori non sempre utilizzabili per motivi di installazione e di ingombri. Analogamente talvolta non si possono utilizzare sistemi di misura basati sull'impiego di sensori phase-shifted. In taluni casi quando si ha la necessità di effettuare misure di temperatura, per motivi operativi, si può dare la necessità di trascurare le tecniche in grado di effettuare una compensazione termica diretta quali ad esempio la tecnica del tubo LPC.

Nel presente lavoro si prendono in esame le tecniche in cui si fa uso di uno o più sensori a reticolo di Bragg come trasduttori collegati al relativo sistema di misura.

3.1 Tecnologie per interrogatori ottici

Gli interrogatori o demodulatori nei sistemi basati su FBG sono le unità di lettura che estraggono informazioni sulla deformazione dal segnale luminoso retroriflesso dai sensori FBG; la dizione 'interrogatore' è più propriamente riservata agli strumenti che integrano la sorgente luminosa, la dizione 'demodulatore' è più propriamente riservata agli strumenti da accoppiare a sorgente luminosa esterna. Gli strumenti misurano la lunghezza d'onda di Bragg; in alcuni casi gli strumenti processano parzialmente il segnale in tempo reale (filtraggio, media, ..) e/o lo convertono nel valore della deformazione che è funzione lineare della variazione della lunghezza d'onda di Bragg.

In laboratorio ed in particolare se è richiesta una elevata risoluzione e piccolo errore, nello sviluppo di applicazioni con sensori FBG, si utilizzano gli analizzatori di spettro ottico (OSA) basati su tecnologie interferometriche. Questi sono indispensabili, per il monitoraggio degli spettri riflessi e trasmessi dagli FBG per le loro eccellenti prestazioni metrologiche. Però non sono particolarmente adatti per applicazioni reali, sia per i costi eccessivi e sia per la bassa velocità di campionamento che ne limita la risposta dinamica. Pertanto sono state sviluppati interrogatori che utilizzano differenti tecnologie per misurare la lunghezza d'onda di Bragg; i differenti interrogatori maggiormente diffusi sono presentati nella seguente review.

I principali tipi di interrogatori sono:

1. Edge filter
2. Spettrometro CCD

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

3. Interferometri Mach-Zehnder
4. Filtro accordabile Fabry-Perot sorgente a larga banda
5. Sorgente ottica accordabile
6. Spettrometro FFT.

Le prime due tipologie riportate in elenco sono basati su tecnologie di misura della lunghezza d'onda di Bragg che utilizzano elementi ottici passivi, ovvero non necessitanti di alimentazione elettrica o altra sollecitazione opto-meccanica. Le rimanenti tipologie utilizzano dispositivi attivi di tipo elettrico, meccanico e ottico. In generale gli interrogatori attivi, nonostante risultino essere sistemi più complessi, hanno una risoluzione migliore.

1. EDGE FILTER

Il modo più semplice di misurare lo shift di lunghezza d'onda della luce riflessa da un FBG è utilizzare un filtro linearmente dipendente dalla lunghezza d'onda. Questo metodo è stato uno dei primi ad essere utilizzato nei sistemi di interrogazione dei sensori FBG (**Errore. 'origine riferimento non è stata trovata.6).**

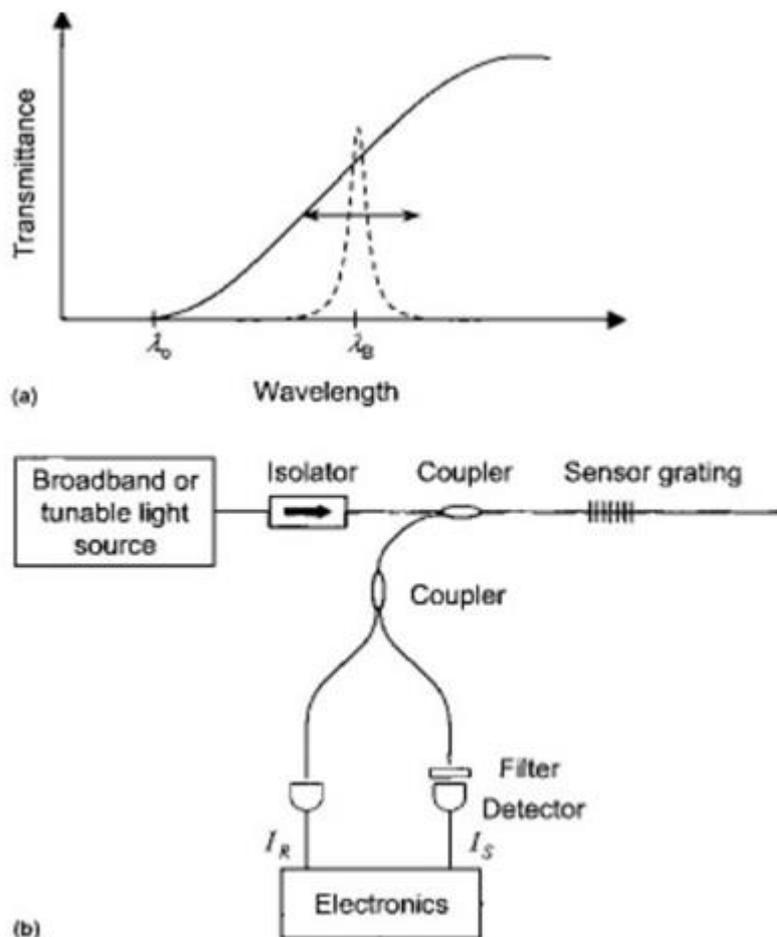


Figura 6. a) Edge filter b) Schema di interrogazione mediante edge filter

L'intensità della luce trasmessa dal filtro dipende proporzionalmente dalla lunghezza d'onda. In base al range di risposta lineare, il filtro è chiamato edge filter (range lineare

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

stretto e pendenza elevata) oppure broadband filter (range lineare largo e pendenza minore). Nel primo caso si ha una sensibilità maggiore, mentre nel secondo si ha un range di misura maggiore. Questo interrogatore è basato sulla misura dell'intensità luminosa in quanto lo shift di lunghezza d'onda è ottenuta misurando l'intensità della luce al detector. La luce retroriflessa dal sensore FBG è divisa in due, una parte va al filtro, l'altra va direttamente al detector ed è utilizzata come riferimento. Il rapporto tra le due intensità (IR/IS) dipende linearmente dallo shift della lunghezza d'onda di Bragg ed è indipendente dalle eventuali fluttuazioni dell'intensità della sorgente luminosa. Questo perché le variazioni di intensità sono eliminate dalla comparazione dei segnali IR e IS.

2. SPETTROMETRO CCD

Un interrogatore adatto per catene di reticoli di Bragg è lo spettrometro costituito da un array di CCD come detector. La luce retroriflessa dai sensori FBG è inviata ad un reticolo di diffrazione e poi focalizzata su un CCD. L'angolo di diffrazione dipende dalla lunghezza d'onda della luce incidente e pertanto componenti luminose relative a lunghezze d'onda diverse illuminano differenti aree di pixel. Il cambiamento della lunghezza d'onda provoca uno shift della luce sul detector costituito da un array di CCD (**Errore. L'origine iferimento non è stata trovata.7**)

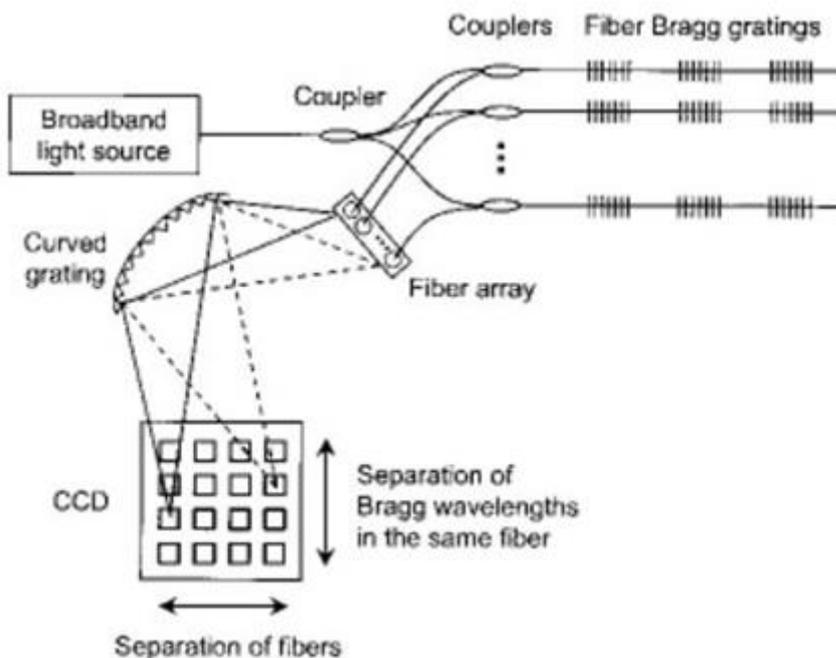


Figura 7. Schema di un interrogatore a CCD a due-dimensioni

Questo sistema di interrogazione è capace anche di rilevare una luce retroriflessa abbastanza debole rispetto ad altri interrogatori come ad esempio l'interferometro Fabry-Perot. Quando l'immagine di ciascun FBG si estende su diversi pixel adiacenti da una media pesata delle posizioni dei pixel illuminati si riesce a calcolare la variazione della lunghezza d'onda della luce retroriflessa. Con la configurazione di un CCD bi-dimensionale riportata in figura è

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

possibile rilevare le deformazioni su più catene di sensori FBG. Le luci retroriflesse da catene differenti possono essere multiplexate e focalizzate su differenti colonne del CCD. Il reticolo curvato agisce sia da elemento diffrattivo che da dispositivo focalizzante.

3. INTERFEROMETRI MACH-ZEHNDER

Un'altra tipologia di interrogatore, il cui schema è visibile in **Errore. L'origine riferimento on è stata trovata**.8, mostra un sistema più complesso dei precedenti, basato sull'uso di un interferometro non bilanciato di Mach-Zehnder che però possiede una risoluzione molto elevata. Lo shift di lunghezza d'onda del sensore FBG viene convertito in una variazione di fase rilevata al detector. Lo schema adottato è del tipo “pseudo-eterodina”, ed adotta anche un secondo reticolo di riferimento, che non è sottoposto all'azione del misurando, come variazione di temperatura o di strain, ma all'azione delle stesse grandezze di influenza che agiscono sull'elemento sensibile principale. Il principio di misura adottato, quindi, è di tipo differenziale.

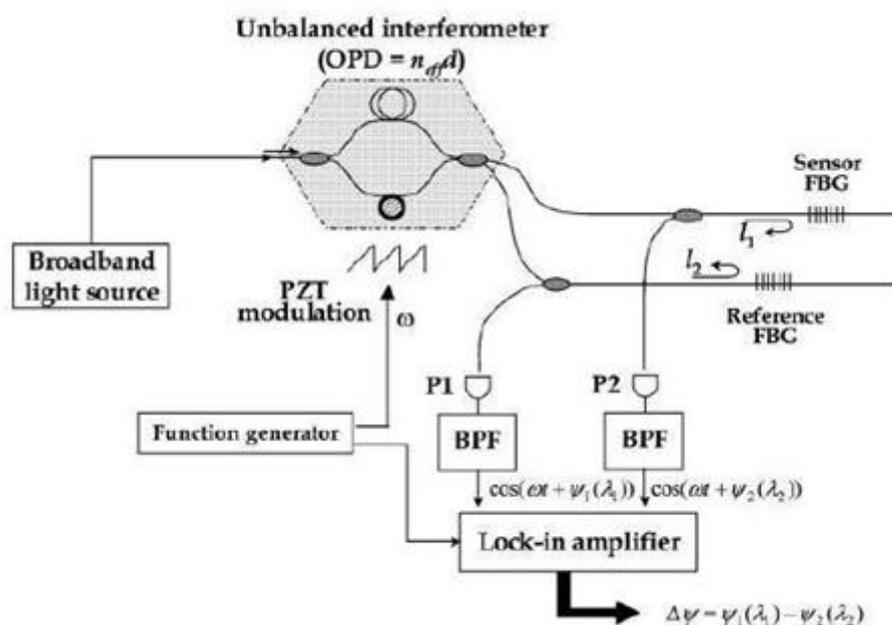


Figura 8. Schema di interrogazione di un reticolo di Bragg mediante interferometro di Mach-Zehnder

L'interferometro non bilanciato di Mach-Zehnder può essere anche utilizzato per interrogare una catena di sensori FBG usando tecniche di multiplexing TDM o WDM.

4. FILTRO ACCORDABILE FABRY-PEROT SORGENTE A LARGA BANDA

Una delle tecniche di interrogazione più diffuse è basata sull'uso di un filtro accordabile passa-banda. Il filtro più comunemente utilizzato è il filtro accordabile a banda stretta di Fabry-Perot, il cui schema è riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata**.9. Questo schema consente di interrogare più reticoli inseriti sulla stessa fibra (purché introducano delle variazioni di lunghezza d'onda diverse tra loro) grazie al filtro di

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

Fabry-Perot, la cui banda passante ottica può essere controllata tramite una tensione. Tale tensione di tuning è prodotta da un generatore di funzione, in modo da variare con continuità la banda selezionata, e dunque realizzare una vera e propria scansione in frequenza del segnale riflesso.

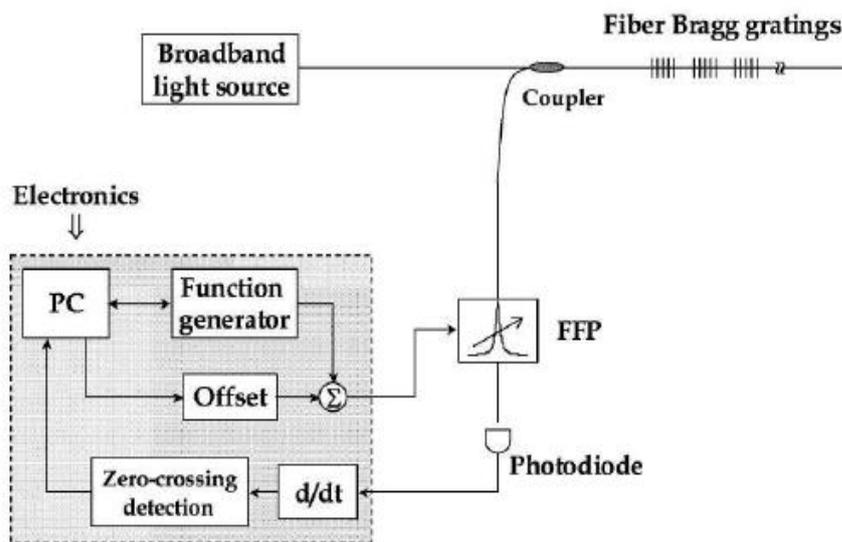


Figura 9. Interrogatore di un array di FBG con un filtro Fabry-Perot

Quando la lunghezza d’onda di risonanza del filtro si sovrappone alla lunghezza d’onda riflessa dal sensore FBG, la potenza rilevata dal photodetector raggiunge il massimo in conseguenza del massimo overlap dei due spettri nello spazio delle frequenze. Il metodo di interrogazione è applicabile sia ad un singolo sensore FBG che a catene di sensori FBG, purchè le variazioni di lunghezza d’onda dovute alle deformazioni non si sovrappongano e le lunghezze d’onda di Bragg cadano nella larghezza di banda della sorgente.

5. SORGENTE OTTICA ACCORDABILE

La maggior parte delle sorgenti a banda larga non sono dispositivi ad alta potenza e di conseguenza anche le potenze ottiche riflesse dai sensori FBG sono ridotte. La bassa potenza porta ad un basso rapporto segnale/rumore che potrebbe ridurre l’affidabilità dell’interrogazione e aumentarne il tempo. Pertanto invece di una sorgente a larga banda questa tecnica utilizza una sorgente ottica accordabile che ha un’alta potenza e una banda stretta. Se è nota la lunghezza d’onda della sorgente che viene indirizzata sul sensore FBG, la potenza ottica riflessa indica la risposta spettrale del sensore a quella data lunghezza d’onda. Come risultato, è possibile interrogare a pieno la variazione spettrale del sensore accordando la lunghezza d’onda della sorgente laser sull’intervallo spettrale di interesse.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 "SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE"

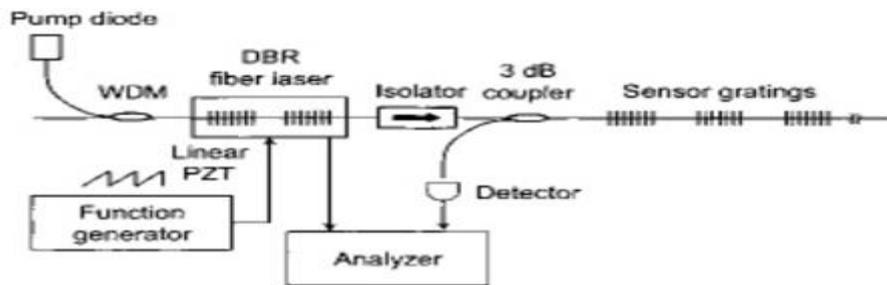


Figura 10. Schema di un interrogatore con una sorgente accordabile di tipo DBR (Distributed Bragg Reflector)

Sono presenti comunque in letteratura varie tecnologie per rendere accordabile la sorgente laser, che sono state sviluppate e commercializzate: Temperature-tuned DFB (distributed feedback laser), Multisection DBR (distributed Bragg reflector) (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.10), External cavity, Optically pumped VCSEL (vertical cavity surface emitting laser), Monolithic tunable VCSEL.

6. SPETTROMETRO FFT

Un ulteriore metodo di analisi spettroscopica diretta della lunghezza d'onda di Bragg è l'interrogatore FFT, il cui schema, basato sull'interferometro di Michelson, è riportato in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.11.

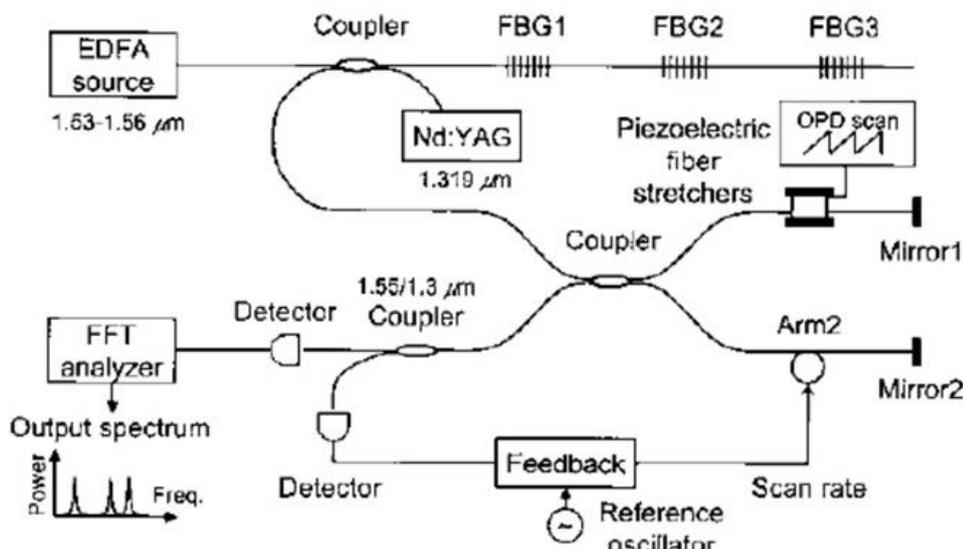


Figura 11. Schema di un interrogatore FFT

L'interferenza tra i segnali luminosi provenienti dai due bracci dell'interferometro con il segnale riflesso dai sensori FBG produce un interferogramma come in Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.12.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

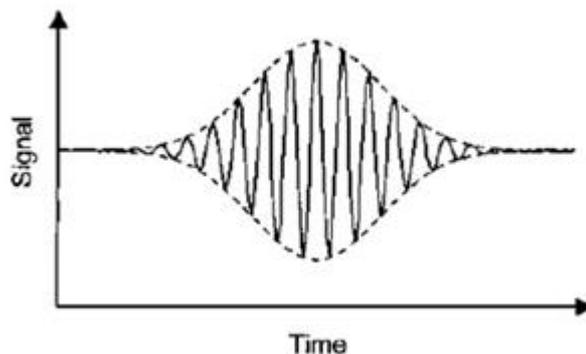


Figura 12. Esempio di interferogramma per un singolo FBG

In seguito ad una deformazione applicata all’FBG cambia la lunghezza d’onda di Bragg e di conseguenza anche il periodo delle frange di interferenza. Quindi eseguendo una FFT (Fast Fourier Transform) sul segnale con un analizzatore di spettro è possibile determinare la deformazione.

In presenza di catene di sensori FBG l’interferogramma totale nel dominio del tempo mostra una forma complessa dovuta alla sovrapposizione degli interferogrammi dei singoli FBG. Invece nel dominio delle frequenze gli spettri sono chiaramente separati, come si può vedere in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** 11.

3.2 Interrogatori disponibili in commercio

Nel presente paragrafo sono analizzate le caratteristiche di alcuni interrogatori ottici disponibili in commercio che potrebbero risultare idonei al Progetto Sentinel.

3.2.1. Redondo FBGT

Redondo Optics propone una serie di dispositivi miniaturizzati (serie FBGT) che sono in grado di interrogare da 1 a 12 sensori FBG a seconda del modello. Questi interrogatori sono basati sulla tecnologia di demodulazione *Edge Filter*. Utilizzano una sorgente interna a larga banda di 60 nm con lunghezza d’onda centrale di 1550 nm e un numero di canali di demodulazione dell’intensità pari al numero di sensori FBG interrogabili. I sensori collegabili all’interrogatore devono avere una lunghezza d’onda di Bragg pari a quella tipica dei diversi modelli di demodulatori. Il sampling rate arriva fino a 40 kHz con una risoluzione di 10 pm. Gli interrogatori FBGT sono dotati di interfacce USB sia per comunicare con altri dispositivi che per alimentazione. Questa tipologia di interrogatore, a basso costo, può essere utilizzato per il monitoraggio in real-time statico e dinamico di sensori FBG installati in applicazioni a bassa potenza come aerospaziali, navali, civili come ponti, dighe, edifici, ecc.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”



Figura 13. Redondo Optics FBGT

3.2.2. I-MON Ibsen

Questa tipologia di interrogatore ottico presenta due modelli I-MON 256 (intervallo di lunghezza d'onda 1525-1570nm) e I-MON 512 (intervallo di lunghezza d'onda 1510-1595nm) con interfaccia USB o in versione OEM. Il numero di sensori FBG collegabili è pari a 70 con una distanza tra le lunghezze d'onda degli FBG di 1200pm e con una risoluzione di 0.5pm. Le massime frequenze di misura sono pari rispettivamente a 6kHz e 3kHz per il modello USB. L'IMON Ibsen necessita di una sorgente di luce esterna a larga banda. Per la demodulazione dei segnali riflessi dai sensori FBG questo interrogatore utilizza una tecnologia basata su array CCD (14).



Figura 14. Interrogatore I-MON Ibsen

3.2.3. Micron Optics SM130

Un altro gruppo di interrogatori è la serie sm130 Micron Optics, basato sulla tecnologia a sorgente ottica accordabile (swept laser). La sorgente laser scansiona l'intervallo di lunghezze d'onda 1510-1590 nm in un range dell'ordine di grandezza dei micro-secondi. Il numero massimo di sensori

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

FBG collegabili all’interrogatore è pari ad 80 per ciascuno dei 4 canali presenti. L’interrogatore è espandibile mediante un multiplexer a 16 canali in modo da aumentare il numero di sensori interrogabili. La massima frequenza di campionamento è pari ad 1kHz con risoluzione di 1pm. Questo interrogatore integra un PC industriale (dotato di interfacce di comunicazione USB, Ethernet, VGA, ecc.), una sorgente laser di alta potenza e basso rumore e analizzatore del segnale ottico di sensori FBG. Questo permette di effettuare con un solo modulo sia misure dinamiche che statiche con alta risoluzione (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**5).



Figura 15. Interrogatore Micro Optics sm130

3.2.4. National Instruments PXIe-4844

L’interrogatore National Instruments PXIe-4844 è basata su piattaforma PXI e quindi integrabile con una grande varietà di moduli per acquisizione dati da molteplici tipologie di sensori e moduli di output analogici e digitali per funzioni di controllo. L’interrogatore non è uno strumento stand-alone ma è integrato con un controller PXI che ha tutte le caratteristiche di un PC industriale con interfacce di comunicazione USB, Ethernet, ecc. Il PXIe-4844 utilizza una sorgente laser a larga banda e come tecnologia di demodulazione appartiene alla classe degli interrogatori con filtro accordabile. Possiede 4 canali separati interrogabili simultaneamente su ciascuno dei quali si possono collegare fino a 20 sensori FBG nell’intervallo di lunghezze d’onda 1510-1590nm. La frequenza di campionamento operativa è di 10Hz con una risoluzione di 1pm. Comunque lo stesso interrogatore è stato testato in configurazione con 1 solo FBG per canale con frequenza di campionamento di 2MHz con una risoluzione di 12pm. Anche per questo interrogatore è possibile aumentarne la capacità collegando un multiplexer per ogni canale.



Figura 16. Interrogatore National Instruments PXIe-4844

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

3.3 Esempio applicativo n.1: sistema di monitoraggio della struttura e della temperatura del rotore di coda di un elicottero.

Il sistema di monitoraggio del caso preso in esame è basato su fibre ottiche da implementare sul rotore di coda dell'elicottero.

Le difficoltà intrinseche di quest'applicazione sono legate alla necessità di trasferire il segnale tra parti in mutuo movimento. Ciò ha profondamente influenzato la scelta della tecnica di disaccoppiamento del segnale da impiegare. Requisito fondamentale del sistema è la possibilità di installare la strumentazione optoelettronica sul rotore. Ne consegue che il sensore deve avere dimensioni ridotte e deve essere sufficientemente robusto per resistere alle gravose sollecitazioni meccaniche.

Si è quindi scelto di indagare la tecnica facente uso di due sensori a reticolo di Bragg uno dei quali posizionato sull'estremo di una fibra ottica e inserito all'interno di un tubo capillare metallico (che nel seguito indicheremo con il nome tecnica capillare d'estremità).

La configurazione tecnologica considerata è, come richiesto, di semplice implementazione, in quanto necessita di soli due sensori FBG posti nella stessa finestra, una sorgente ed un interrogatore opto-elettronico entrambi posizionati su una sola finestra spettrale. La schematizzazione del sistema di misura adottato è rappresentata nella Figura 17. La limitazione presentata da questa tecnica di misura è rappresentata dalla necessità di porre il sensore FBG sull'estremo della fibra ottica, impedendo così il seguito della fibra stessa oltre il capillare.

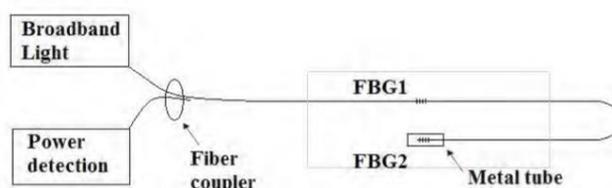


Figura 17. Configurazione della tecnica avente sensore FBG posto in estremità di una fibra ottica e inglobato in un tubo capillare.

La naturale evoluzione di questa tecnica applicativa è stata sempre l'adozione di due sensori a reticolo di Bragg, ma questa volta uno dei due è posto all'interno di un tubo capillare passante (tecnica capillare passante). A differenza del primo sistema di misura indagato, la fibra ottica non è più interrotta potendo così trasmettere il segnale a valle del capillare stesso. Ciò consente una ridondanza del segnale.

Il principio di funzionamento della prima tecnica illustrata è molto semplice e permette la discriminazione tra sollecitazioni termiche e meccaniche utilizzando due sensori FBG e un tubo capillare. Seguendo la schematizzazione di fig.6, un sensore a reticolo di Bragg (FBG1) viene inglobato direttamente all'interno della struttura under test. Esso è quindi soggetto alle deformazioni, sia di tipo meccanico che termico, proprie della struttura. In particolare, andando ad analizzare i coefficienti di proporzionalità, che legano la variazione di lunghezza d'onda del reticolo di Bragg alle deformazioni e alle variazioni di temperatura a cui è soggetto, si ottengono le relazioni analitiche

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

$$K\epsilon_1 = \lambda B_1(1 - \nu_{pe ris})$$

$$KT_1 = \lambda B_1(\zeta + \alpha_{ris})$$

dove alla deformazione termica della struttura under test, corrisponde tramite il coefficiente di proporzionalità, l'espansione termica della fibra ottica del materiale in test, ricavato attraverso la legge della micromeccanica. Dove α_{ris} rappresenta il coefficiente di espansione termica ottenuto come combinazione dei coefficienti di espansione termica della fibra ottica.

$$\alpha_{ris} = \frac{\alpha_{FO} S_{FO} E_{FO} + \alpha_{matrice} S_{matrice} E_{matrice} + \alpha_{fibra} S_{fibra} E_{fibra}}{S_{FO} E_{FO} + S_{matrice} E_{matrice} + S_{fibra} E_{fibra}}$$

I termini α_i rappresentano i coefficienti di espansione termica, S_i le superfici ed E_i il modulo di Young dei diversi componenti. Le stesse considerazioni possono essere effettuate sul coefficiente di Poisson presente nel termine $\nu_{pe ris}$ dell'equazione precedente, la cui incidenza risulta però essere molto minore rispetto a quella della variazione del coefficiente di espansione termica.

Il secondo sensore a reticolo di Bragg utilizzato (FBG2) è, come precedentemente affermato, disposto sull'estremità della fibra ottica. L'isolamento del sensore FBG, rispetto alle sollecitazioni meccaniche, viene realizzato ponendo il sensore all'interno di un tubo capillare metallico e prestando attenzione affinché il tratto di fibra ottica interno al capillare sia libero da vincoli ad eccezione del vincolo di estremità, come mostrato nella Figura 18.

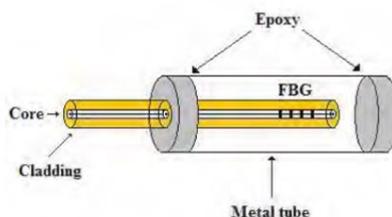


Figura 18. Schematizzazione del posizionamento del sensore di estremità nel tubo capillare.

Il sensore è in questo modo soggetto alle sole sollecitazioni termiche tramite il coefficiente termo-ottico ed il coefficiente di dilatazione termica della fibra ottica. Il coefficiente di proporzionalità della risposta del sensore alla deformazione è dunque nullo. Il tratto di fibra ottica interno al capillare è infatti meccanicamente isolato e le deformazioni subite dal capillare stesso non vengono trasmesse.

$$K\epsilon_2 = 0,$$

$$KT_2 = \lambda B_2(\zeta + \alpha_{FO}).$$

Conoscendo i coefficienti di proporzionalità alla risposta dei sensori a reticolo di Bragg utilizzati, risulta possibile riscrivere il sistema, di due equazioni in due incognite, nel modo seguente:

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

$$\begin{Bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{\epsilon 1} & K_{T1} \\ 0 & K_{T2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon \\ \Delta T \end{Bmatrix}$$

Osservando il sistema è possibile notare come la variazione di temperatura, rispetto ad una condizione di riferimento, possa essere immediatamente determinata andando ad invertire la seconda equazione del sistema. La variazione di temperatura può essere così ricavata:

$$\Delta T = \frac{1}{K_{T2}} \Delta\lambda_2.$$

Mediante sostituzione è possibile determinare la deformazione applicata alla struttura:

$$\epsilon = \frac{1}{K_{\epsilon 1}} \left(\Delta\lambda_1 - \frac{K_{T1}}{K_{T2}} \Delta\lambda_2 \right).$$

La seconda tecnica indagata, viene realizzata utilizzando, anche in questo caso, due sensori a reticolo di Bragg ed un tubo capillare metallico. In questo caso il sensore inserito all'interno del capillare metallico non è posizionato sull'estremità della fibra ottica. Conseguentemente esso è soggetto alle deformazioni della struttura. Il sistema di misura è schematizzato in Figura 19 all'interno della quale si può notare il passaggio della fibra ottica attraverso il capillare.

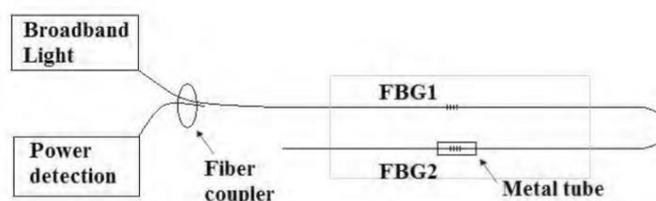


Figura 19. Configurazione della tecnica avente sensore FBG posto in un tubo capillare ma su fibra ottica passante attraverso il capillare.

Il principio di funzionamento di questa configurazione tecnologica si basa nuovamente sull'inversione del sistema visto in precedenza. La risposta differenziata per i due sensori non viene realizzata scegliendo sensori disposti in finestre diverse, ma utilizzando due sensori posti nella finestra di 1550nm e andando a modificare meccanicamente i coefficienti di proporzionalità a deformazione e temperatura. In particolare, il coefficiente di proporzionalità relativo alla temperatura risulta essere il più semplice da variare in quanto è sufficiente inglobare il sensore a reticolo di Bragg direttamente nel materiale. A causa delle differenti caratteristiche meccaniche del materiale composito e della fibra ottica, infatti, si ottiene una variazione del coefficiente di espansione termica come evidenziato dall'equazione precedente. I coefficienti di proporzionalità rispetto alla temperatura per i due sensori sono quindi differenti e possono essere così riscritti per rettificarli opportunamente. Analiticamente si ha:

$$KT1 = \lambda B1(\zeta + \alpha_{ris}),$$

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

$$KT2 = \lambda B2(\zeta + \alpha FO)$$

Evidentemente il comportamento del sensore FBG2 è tale solo nel caso in cui il reticolo sia efficacemente isolato. Se questo non fosse possibile, il coefficiente di espansione termica del sensore si modificherebbe secondo le leggi della micromeccanica.

La fibra ottica, vincolata in entrambi gli estremi del capillare, risente della deformazione del capillare stesso. Per poter modificare la deformazione percepita dal sensore rispetto a quella realmente agente sulla struttura è stato deciso di disporre il tratto di fibra interno al capillare lungo una traiettoria parabolica, come illustrato nella seguente Figura 20.



Figura 20. Traiettoria parabolica del tratto di fibra nel capillare

Per verificare qualitativamente il funzionamento della tecnica è effettuata un’analisi numerica preliminare. Imponendo degli spostamenti relativi, corrispondenti alle deformazioni trasmesse dal capillare, agli estremi del tratto di fibra collocato nel capillare, viene effettuato un confronto tra le deformazioni agenti sul tratto centrale della fibra ottica rispetto a quelle esercitate dal capillare mediante analisi numerica di tipo non lineare a causa degli spostamenti elevati della fibra ottica. Usualmente viene utilizzato il programma agli elementi finiti ABAQUS.

Un esempio della modellazione numerica effettuata viene riportato nella Figura 21.



Figura 21. Modellazione numerica della fibra

L’analisi numerica ha confermato la possibilità di variare il coefficiente di proporzionalità alla deformazione per il sensore disposto nel tubo capillare. Nella Figura 22 viene riportato l’andamento della deformazione del tratto di fibra ottica posizionato centralmente nel capillare (corrispondente alla posizione del sensore a reticolo di Bragg), rispetto alla deformazione applicata al capillare stesso.

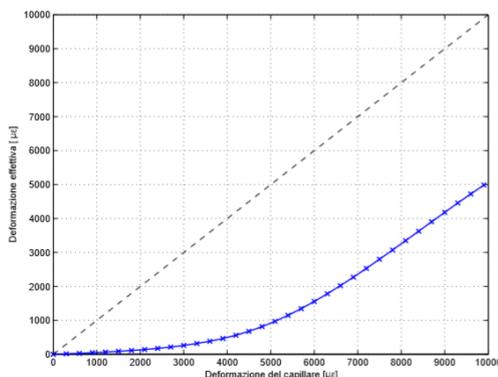


Figura 22. Deformazione effettiva rispetto alla deformazione applicata al capillare

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

L'analisi realizzata ha mostrato la possibilità di ridurre la deformazione percepita dal sensore di circa un ordine di grandezza rispetto a quella realmente agente per deformazioni inferiori a $3000\mu\epsilon$. È però necessario evidenziare come la risposta del sensore non sia lineare, ma suddivisibile in due tratti con andamento differente. Il primo, corrispondente alle deformazioni minori, avente andamento quadratico, mentre il secondo approssimabile a lineare. La linearità presentata dalla risposta del sensore a elevate deformazioni è conseguente al raggiungimento di una traiettoria quasi rettilinea del tratto di fibra posto nel capillare. Conseguentemente la deformazione percepita dal sensore cresce linearmente con quella esercitata dal capillare stesso. Dal grafico di Figura 22 si evince che il sistema può essere risolto in un limitato intervallo di deformazioni a causa della perdita di linearità della risposta del sensore. È possibile ampliare il range di utilizzo della tecnica adottando soluzioni tecnologiche che consentano di aumentarne il dominio di linearità.

L'impiego di Smart Materials permette il monitoraggio della struttura fin dalla fase di produzione. Per poter analizzare il comportamento dei sensori FBG durante le differenti fasi del ciclo di realizzazione del provino è stato monitorato il segnale dei sensori posti al suo interno utilizzando un analizzatore di spettro (OSA). Inoltre la possibilità di monitorare il ciclo produttivo permette di verificare il corretto isolamento dei sensori posto all'interno dei capillari. Nella Figura 23 viene riportato l'andamento della risposta dei sensori FBG, inglobati, come variazione della lunghezza d'onda di Bragg dei due sensori rispetto alla condizione iniziale.

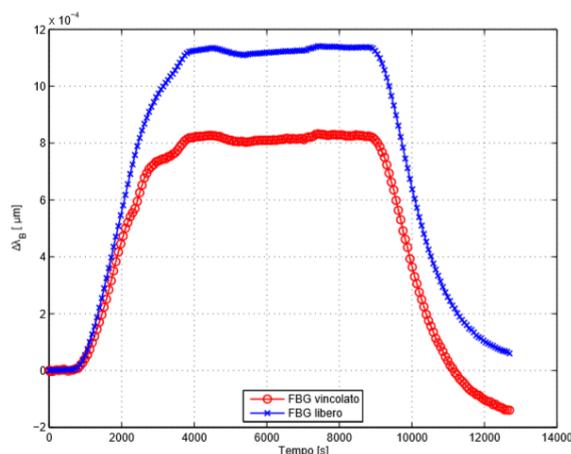


Figura 23. Risposta dei due sensori FBG rispetto alla condizione iniziale

Con FBG libero si intende il sensore di estremità posto nel capillare (quindi lasco a causa del vincolo imposto su un solo estremo); per FBG vincolato si vuole indicare il sensore inglobato direttamente all'interno del provino di materiale under test (pertanto vincolato al materiale per tutta la sua interezza). È possibile notare che a fine ciclo di reticolazione le variazioni di lunghezza d'onda dei sensori non sono sovrapposte. La discrepanza del valore finale della variazione di lunghezza d'onda è originata da due differenti contributi. In primo luogo la risposta dei due sensori alla temperatura è leggermente differente, in quanto il coefficiente di proporzionalità per la variazione di temperatura dipende dal valore della lunghezza d'onda di Bragg del sensore, come è stato osservato in precedenza. Pertanto avendo utilizzato sensori aventi lunghezze di Bragg differenti, seppur posizionate nella finestra corrispondente a 1550nm, le loro risposte alla variazione

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

di temperatura non coincidono. Conseguentemente, terminando il ciclo di reticolazione ad una temperatura diversa rispetto a quella iniziale, la variazione di lunghezza d'onda di Bragg per i due sensori sarà differente e diversa da zero. La variazione di temperatura residua a fine ciclo non può completamente spiegare l'elevata discrepanza della risposta dei due sensori. Il principale apporto alla variazione di lunghezza d'onda è infatti dato dal differente coefficiente di espansione termica della fibra ottica e del materiale composito in cui è inglobata. Durante la fase di riscaldamento del provino il sensore FBG subisce un'espansione termica differente rispetto al materiale in cui è inglobato. In seguito alla reticolazione della matrice il sensore viene vincolato alla struttura e il suo comportamento non può essere scorrelato da essa.

Per questo motivo a fine ciclo il sensore vincolato risente di una deformazione residua espressa in termini di variazione di lunghezza d'onda di Bragg.

3.4 Esempio applicativo n.2: health monitoring di una struttura in materiali compositi mediante sensori di deformazione in fibra ottica.

Come illustrato in precedenza, esistono diversi tipi di sensori che utilizzano le fibre ottiche. Questo studio analizza l'utilizzo dei sensori di deformazione basati sui reticoli di Bragg (Fiber Bragg Gratings - FBG) chirped. Questi sensori sono costituiti da un reticolo inscritto all'interno della fibra, che ha l'effetto di riflettere solo alcune lunghezze d'onda della luce incidente. Se le proprietà geometriche del reticolo cambiano per effetto di una deformazione, cambia anche la forma dello spettro riflesso. Inoltre, con il tipo di sensore usato, è possibile correlare lo spettro con la posizione di eventuali danneggiamenti interni al materiale.

Questa ricerca illustra gli effetti della presenza di una fibra ottica sulle caratteristiche meccaniche di un laminato e di trovare un legame tra la risposta in frequenza del sensore FBG e lo stato tensionale e il grado di danneggiamento di un componente in composito.

La fase di monitoraggio prevede l'utilizzo di sensori che misurino determinate caratteristiche della struttura che sono influenzate dalla presenza di un danno. Le tecniche più diffuse si basano su misure di deformazione o sull'analisi della risposta in frequenza della struttura.

Le tecniche di SHM che fanno uso di sensori di deformazione sfruttano il fatto che, in presenza di un danneggiamento, la distribuzione di deformazione subisce delle variazioni, dovute alla redistribuzione dei carichi in prossimità della zona danneggiata.

L'utilizzo di sensori quali gli estensimetri elettrici, trasduttori piezoelettrici o alcuni tipi di sensori in fibra ottica permette un monitoraggio di tipo puntuale, rendendo necessario un loro corretto posizionamento nei punti più sensibili al danneggiamento. Tali punti, che vengono definiti hot spots, si trovano principalmente nelle zone in cui sono presenti delle concentrazioni di sforzo, ad esempio in presenza di brusche variazioni di sezione o di giunzioni. Nel caso in cui sia necessario monitorare delle zone molto ampie, ad esempio per identificare il carico agente sulla struttura, si ottengono buoni risultati con l'adozione di sistemi costituiti da sensori a fibra ottica. Questi sono particolarmente adatti ad applicazioni di questo tipo, poiché attraverso tecniche di multiplexing è possibile veicolare su di una fibra il segnale proveniente da diversi sensori, rendendo quindi realizzabile il monitoraggio distribuito di porzioni molto ampie della struttura. Sensori di questo tipo, formati cioè da tanti sensori più piccoli iscritti sulla stessa fibra, prendono il nome di array.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

Uno degli svantaggi più grandi dell'utilizzo di sensori localizzati per il monitoraggio di grosse strutture riguarda il loro posizionamento. È infatti molto difficile identificare correttamente i punti più sensibili alla nucleazione di un danno, e allo stesso tempo risulta impraticabile inserire un numero di sensori tale da coprire l'intera struttura. Questa strada, oltre ad avere costi elevatissimi, risulta essere estremamente invasiva per la struttura ospite. Invasività che, nel caso di sensori inglobati nella struttura, si traduce in un notevole degrado delle caratteristiche meccaniche della struttura stessa. Il problema dell'interazione tra struttura e sensori è un fattore da tenere in conto anche nell'utilizzo di tecniche di distributed sensing, soprattutto in vista del fatto che i sensori utilizzati raggiungono lunghezze dell'ordine dei metri.

La grande versatilità dei sensori a fibra ottica, così come la loro bassa invasività e facilità di installazione hanno fatto sì che negli ultimi anni ci sia stato un crescente interesse verso questo tipo di sensori. La possibilità di misurare diverse grandezze, l'alta sensibilità, l'insensibilità alle interferenze elettromagnetiche e la bassa invasività rendono questi sensori adatti ad una grande varietà di applicazioni. In particolare le dimensioni contenute e il basso peso dei sensori rendono le fibre ottiche i candidati ideali all'inglobamento nei laminati in composito per applicazioni di health monitoring.

Un'importante caratteristica dei sensori a fibra ottica è data dalla possibilità di realizzare delle reti di sensori per il monitoraggio distribuito della struttura. Facendo uso di tecniche di multiplexing è infatti possibile avere più sensori sulla stessa fibra, costruendo, di fatto, sensori quasi distribuiti aventi lunghezze dell'ordine dei metri. Il prerequisito è che i sensori abbiano differenti lunghezze d'onda di Bragg caratteristiche in modo che sia garantita una distanza di sicurezza tra i picchi delle lunghezze d'onda dei vari sensori per permettere all'interrogatore di analizzare le riflessioni in sequenza. Gli array permettono quindi di monitorare porzioni molto estese della struttura, e, noto il campo di deformazione su di essa, di identificare eventuali danneggiamenti o di risalire ai carichi applicati.

In molti casi, tuttavia, la risoluzione spaziale dei sensori distribuiti non è sufficiente a individuare danneggiamenti localizzati di piccole dimensioni, quali a esempio le delaminazioni dovute all'impatto di piccoli oggetti. D'altra parte esistono anche sensori in grado di dare indicazioni molto precise sull'andamento delle deformazioni sulla lunghezza del sensore stesso, con una risoluzione dell'ordine dei millimetri. Se correttamente collocati, tali sensori possono rilevare la nascita e l'evoluzione del danneggiamento in maniera molto precisa. Il problema sta però nel riuscire a individuare le zone in cui è più probabile la generazione di un danno. I due tipi di misura, localizzata o distribuita, presentano anche differenze dal punto di vista dell'acquisizione. Misurazioni con sensori in grado di arrivare a risoluzioni dell'ordine dei millimetri richiedono infatti sistemi di acquisizione molto complessi e delicati che non permettono frequenze di acquisizione elevate. Al contrario, se non è richiesta una grande risoluzione spaziale possono essere utilizzate tecniche di acquisizione molto veloci e strumenti più compatti e resistenti. Queste peculiarità rendono i sensori del secondo tipo particolarmente adatti ad applicazioni real time, irrealizzabili invece per sensori appartenenti alla prima categoria.

I compositi sono materiali eterogenei, anisotropi, leggeri, rigidi e resistenti e trovano un sempre maggiore impiego grazie al loro elevato rapporto tra le proprietà meccaniche e la massa del materiale. Inoltre non sono soggetti a corrosione e hanno una buona resistenza a fatica.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

I sensori a fibra analizzati prevedono che la struttura dell'FBG può variare sia nell'indice di rifrazione sia nel periodo del reticolo. I vari tipi di reticolo che si possono avere sono (Figura 24):

- ✓ uniforme, se il periodo non varia lungo la fibra;
- ✓ chirped, se il periodo non è uniforme;
- ✓ tilted, se la variazione è inclinata rispetto la normale alla fibra;
- ✓ superstructured, se la variazione d'indice è distribuita in superstrutture lungo la fibra.

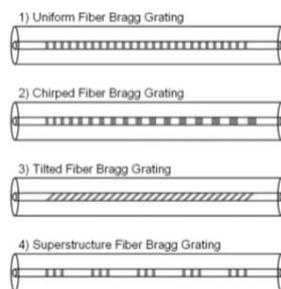


Figura 24. Varie tipologie di reticolo

La variazione dell'indice di rifrazione può essere (Figura 25):

- ✓ uniforme positiva, se è costante per ogni periodo, con offset positivo;
- ✓ gaussiana apodized, se ha una forma longitudinale gaussiana, con offset positivo;
- ✓ raised-cosine-apodized, se ha una forma longitudinale a coseno rialzato, con offset nullo;
- ✓ discrete phase shift, se le due metà della struttura sono in opposizione di fase, con offset positivo.

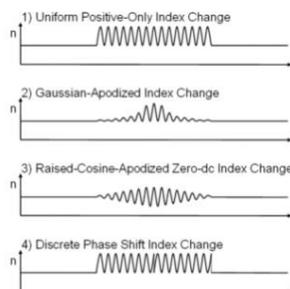


Figura 25. Variazione dell'indice di rifrazione

Sono state svolte due tipi di prove sperimentali: la prima ha l'obiettivo di valutare l'effetto dell'inserimento di una fibra ottica sulle caratteristiche meccaniche di un laminato, mentre con la seconda si cerca di correlare la risposta rilevata dai sensori FBG chirped, posti all'interno di provini in composito e caratterizzati da due layup differenti, con il grado di danneggiamento e lo stato tensionale del materiale. Sono stati condotti test sui provini con diversa orientazione e posizione della fibra ottica al loro interno. Successivamente i provini sono stati sottoposti a test di trazione per acquisire la risposta dei sensori e, parallelamente, analizzare la loro microstruttura al fine di rilevare il danneggiamento interno del materiale. Prima di descrivere nel dettaglio come sono state eseguite le prove, vengono elencati i materiali e le attrezzature utilizzati. Sono stati utilizzati anche gli estensimetri per avere un riscontro della deformazione del materiale sottoposto al test. Mentre come sensore è utilizzato la fibra ottica monomodale G 657A avente un diametro del cladding di $125,0 \pm 0,7 \mu\text{m}$ con rivestimento in kapton per un diametro complessivo di $250 \pm 15 \mu\text{m}$. L'interrogatore di

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

fibra ottica utilizzato è una sorgente laser che permette di interrogare fino a 16 sensori FBG collegati ad esso tramite connettori (Figura 26).



Figura 26. Interrogatore ottico utilizzato

Attraverso un cavo Ethernet, l'interrogatore può essere collegato a un personal computer, grazie al quale, si può analizzare lo spettro degli FBG. A titolo esemplificativo viene proposta una delle schermate di controllo che si possono visualizzare sul PC (Figura 27).

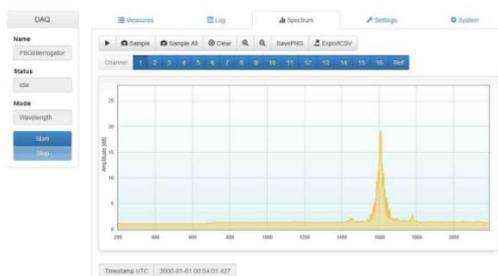


Figura 27. Schermata di controllo del software

Nella pagina Measures è possibile leggere, in tempo reale, la lunghezza d'onda di picco, rilevata dall'interrogatore, mentre nella pagina Log si può tener traccia di tutte le lunghezze d'onda calcolate in precedenza. La pagina Spectrum (Figura 27) permette di analizzare visivamente ed in tempo reale lo spettro captato dall'interrogatore, consentendo di apprezzare il comportamento dello spettro quando l'FBG è sottoposto a deformazioni. Tramite i comandi Sample e SampleAll è possibile campionare lo spettro in un dato istante di tempo. Successivamente è possibile salvare un'immagine dello spettro, oppure salvare il file CSV dello spettro. Il file CSV (comma-separated values) non è altro che un file di testo che, se importato in un foglio di calcolo, presenta una colonna con le lunghezze d'onda misurate dallo spettro e una colonna con le ampiezze (in Decibel) dello spettro. Ponendo le lunghezze d'onda su un asse X e le ampiezze su un asse Y, si può ricostruire lo spettro. È stata usata una giuntatrice per collegare la fibra ottica presente all'interno dei provini con altre fibre ottiche dotate, ad una estremità, di un connettore compatibile con l'interrogatore dei sensori (Figura 28). Questo strumento permette anche di applicare le guaine termoretraibili con rinforzo in metallo, che servono per proteggere la zona in cui le fibre sono state unite, in quanto è dotato di una piccola cella che consente di riscaldare la guaina facendola restringere e aderire alla fibra.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”



Figura 28. Giuntatrice.

Lo Strain Indicator utilizzato permette di visualizzare le deformazioni lette dagli estensimetri. Tale strumento va regolato impostando il Gage Factor sul valore proprio dell'estensimetro montato e annullando il valore della deformazione letta quando l'estensimetro è a riposo. Il Gage Factor è il fattore di trasduzione che esprime la sensibilità dell'estensimetro. L'incremento di resistenza dell'estensimetro viene espresso come rapporto tra la variazione di resistenza e la resistenza totale del filo e fornisce la misura della deformazione localmente prodotta nel provino.

Da test condotti sui provini strumentati con sensore FBG ed estensimetro, sono stati registrati la deformazione misurata dall'estensimetro e lo spettro fornito dall'FBG. Per effettuare le misure, la fibra ottica è stata collegata all'interrogatore e, questo, al PC. Lo spettro è stato registrato in condizioni di riposo, ovvero quando il provino è montato tra gli afferraggi della pressa ma non è ancora stato caricato, e in condizioni di carico, ovvero quando il provino è sottoposto ad uno sforzo di trazione. La misura dello spettro è stata effettuata mettendo in pausa la pressa ai carichi prefissati, garantendo, quindi, che il provino rimanesse in trazione. Su questo tipo di procedimento c'è da fare una piccola precisazione: mettendo in pausa la pressa, ad esempio a 10 kN, questa non rimane perfettamente ferma a quel carico, ma oscilla attorno a tale valore, perciò la misura dello spettro non è mai stata effettuata esattamente ai carichi indicati. Inoltre anche lo spettro registrato dall'interrogatore non è fisso ma oscilla leggermente, questo vuol dire che, a seconda dell'istante in cui esso viene “congelato” (in modo da salvarne i dati), potrebbe essere lievemente diverso da quello visibile, ad esempio, sempre a 10 kN. Queste discrepanze, tra misure realizzabili idealmente e misure effettuate nella pratica, sono in realtà assolutamente trascurabili ma per completezza si è voluto specificarle.

Sono stati registrati gli spettri a riposo del provino under test. Nella Figura 29 e nella Figura 30 sono raffigurati gli spettri misurati.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

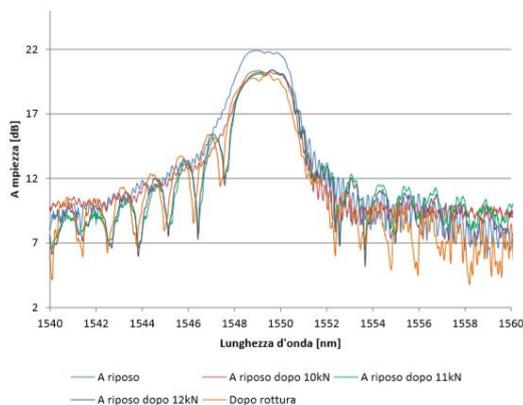


Figura 29. Spettri a riposo del provino

Dai grafici è possibile notare che lo spettro rilevato dopo lo step di carico di 10 kN è molto simile a quello a riposo, ovvero quello misurato prima di iniziare la prova di trazione. L’unica differenza che si nota chiaramente è che lo spettro dopo i 10 kN, così come i successivi, presenta un’ampiezza massima della campana inferiore. All’aumentare dei carichi la forma dello spettro non varia di molto anche se risulta più distorto presentando tante piccole campane ai lati di quella principale.

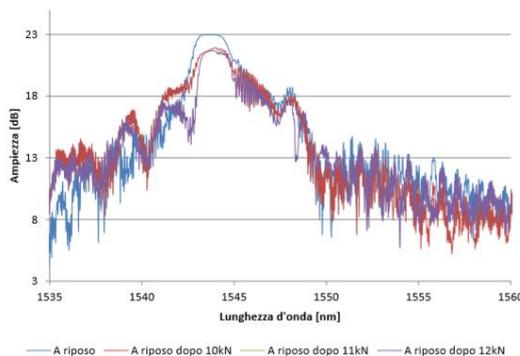


Figura 30. Spettri a riposo del provino under test

Nella Figura 31, Figura 32 e Figura 33 sono mostrati gli spettri rilevati ai vari step di carico.

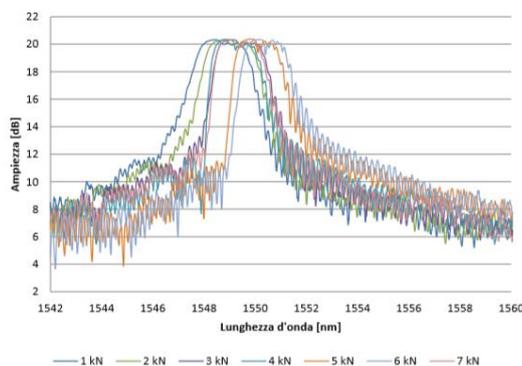


Figura 31. Spettri per vari step di carico

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

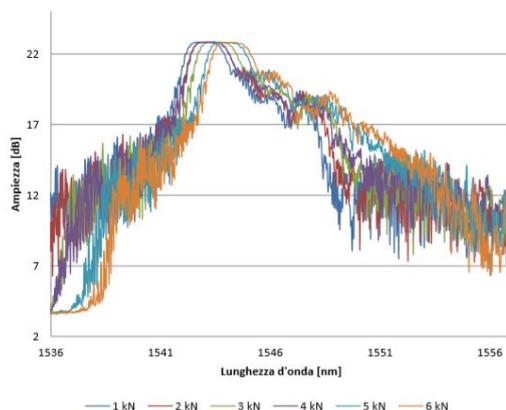


Figura 32. Spettri per vari step di carico

Durante l'applicazione del carico, gli spettri registrati mostrano un aspetto leggermente diverso da quello mostrato a riposo. La campana risulta leggermente più stretta e con un valore di picco inferiore. La forma dello spettro si mantiene molto simile all'aumentare del carico con la campana che si sposta verso lunghezze d'onda maggiori. Si possono osservare anche disturbi via via crescenti ai lati della campana.

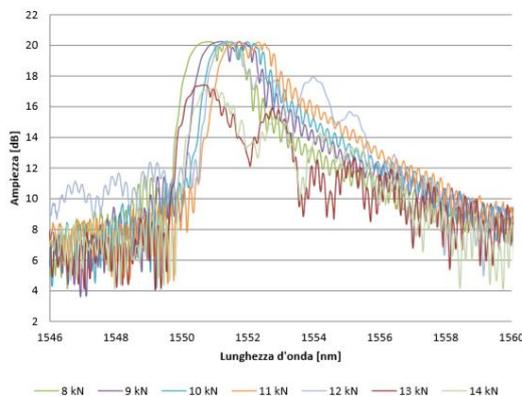


Figura 33. Spettri per vari step di carico

Dai test di trazione effettuati sui provini strumentati è stato possibile verificare il comportamento e l'affidabilità dei sensori FBG. In prima analisi dalla misura della lunghezza d'onda di Bragg è possibile ottenere informazioni relative alla tensione che sopporta e alla deformazione che subisce il sensore. Dal calcolo dello Strain Gauge si ha avuto conferma di questa proprietà che candida gli FBG a valida alternativa all'uso degli estensimetri elettrici nella misurazione delle deformazioni.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

3.5 Esempio applicativo n.3: sensore in fibra ottica per alte temperature

La realizzazione di un sensore per alte temperature comporta delle particolari difficoltà e implica sofisticati accorgimenti progettuali per garantire l'affidabilità richiesta come:

- ✓ monitoraggio dello scudo termico di veicoli spaziali in fase di rientro, che può raggiungere e superare i 1000 °C, per un tempo di 10 minuti circa;
- ✓ monitoraggio di strutture civili (edifici, gallerie, etc.) in caso di incendio: il sensore viene inserito all'interno del cemento, che durante l'incendio può raggiungere 800-850 °C, per un periodo di alcune ore durante l'incendio;
- ✓ monitoraggio continuato per due anni a 700 °C.

In ambito di ricerca, sono stati sviluppati sensori in fibra ottica non standard che riescono a raggiungere temperature di molto superiori ai 1000°C. Comunque, questi prodotti non sono ancora presenti in commercio. Essi si basano sempre sulla tecnologia FBG, ma la fibra utilizzata non è quella standard a causa del più basso valore di melting point della silice. La fibra più utilizzata per le applicazioni ad alta temperatura è la fibra di zaffiro a cristallo singolo (single-crystal sapphire), la cui temperatura di transizione è 2030 °C. A differenza delle fibre tradizionali a singolo modo, le fibre di zaffiro presentano un mantello forato longitudinalmente che rende la guida multimodo a 1550 nm e sensibile alle perdite per flessione e alla conversione dei modi [2]. I reticoli fs-IR scritti su fibre sapphire (SFBG) sono quindi dispositivi intrinsecamente multimodo, i quali generano una risposta in riflessione che non è sensibile alla temperatura come gli FBG standard. Infatti lo spettro di riflessione osservato è caratterizzato da una larghezza di banda più ampia con una struttura complessa che consiste nella sovrapposizione di differenti modi riflessi dal reticolo. Ovviamente è preferibile una risposta in riflessione a banda stretta generata da un singolo modo. Per ottenere ciò da SFBG multimodo, si stringe il mantello della fibra SM in modo tale che all'interfaccia il modo fondamentale abbia un diametro pari a quello della fibra di zaffiro. Il modo fondamentale della guida in zaffiro viene eccitato producendo una risposta in riflessione monomodale. Gli SFBG non evidenziano degradazioni nella forza meccanica del reticolo fino a temperature pari a 1745 °C. Nonostante ciò risultano essere svantaggiosi perché non sono costituiti da fibra standard e quindi bisogna operare meccanicamente per interfacciare i due tipi di fibra. Da prendere in considerazione anche il costo più elevato della fibra di zaffiro.

Per realizzare un sensore in grado di funzionare a 1000°C, è indispensabile progettare un contenitore che soddisfi le seguenti caratteristiche:

- ✓ utilizzo di fibra standard delle telecomunicazioni;
- ✓ mantenimento delle proprietà ottiche del reticolo;
- ✓ stabilità delle proprietà ottiche del reticolo rigenerato;
- ✓ competitività coi sensori operativi fino a 700 °C esistenti in commercio.

La fibra utilizzata è una fibra standard in normale commercio tipo SMF-28e® prodotta da Corning®. Gli FBG sono anch'essi standard.

Come sorgente emittente è stata impiegato un dispositivo standard in commercio. Per le misure in frequenza è stato utilizzato un analizzatore di spettro.

Per interrogare il sensore, si utilizza un interrogatore specifico per sistemi basati su FBG. che possiede le caratteristiche idonee all'uso. In particolare, si utilizza questo strumento quando si ha

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

bisogno di misure ad alta frequenza, dell'ordine del kHz, come ad esempio la misura del tempo di risposta del sensore. Una volta realizzato il sensore e confrontato con altri e tutti testati nelle medesime condizioni, i dati strumentali manifestano che il sensore realizzato è conforme ai requisiti, ha un grado di precisione paragonabile ai concorrenti ed il tempo di realizzazione stimato ed il prezzo di vendita sono molto minori dei sensori attualmente in commercio.

3.6 Applicazioni dei sensori FBG.

I sensori FBG, per la loro versatilità, sono stati applicati nei campi più vari.

- ✓ Ingegneria aeronautica ed aerospaziale. I sensori sono stati utilizzati per:
 - monitorare il curing dei compositi in fibra di carbonio rinforzata (materiali utilizzati per la costruzione di aeromobili e veicoli spaziali ed il cui impiego è caratterizzato da livelli alti di strain dinamici, tipicamente dell'ordine dell'1%);
 - per monitorare le prestazioni aerodinamiche degli aeromobili;
 - per lo studio del limite di fatica delle ali degli aeromobili;
 - per lo studio delle condizioni di operatività di serbatoi criogenici di veicoli spaziali presso la NASA (con i sensori FBG impiegati in un intervallo di temperature tra -250°C e 380°C).
- ✓ Ingegneria navale. I sensori sono stati utilizzati per valutare lo strain dinamico nei punti critici della carena di navi sotto condizioni di carico estreme.
- ✓ Industria degli idrocarburi. I sensori FBG trovano applicazione nelle trivellazioni per la ricerca di giacimenti di idrocarburi (petrolio o metano), poiché riescono ad operare in condizioni estreme ($T \approx 150^{\circ}\text{C}$, $P \approx 1000$ bar) in cui la strumentazione elettronica può presentare invece dei problemi. Sono inoltre stati utilizzati per il monitoraggio strutturale di condotte di trasporto di gas e petrolio, piattaforme petrolifere e raffinerie.
- ✓ Ingegneria civile. È un campo dove questa tecnologia trova vasto impiego: monitoraggio dell'integrità strutturale di edifici, viadotti, ponti, dighe, gallerie, beni architettonici ed opere d'arte (ad esempio la sorveglianza di fessurazioni in statue). Si riesce ad investigare in tempo reale la formazione e la crescita di difetti, valutare i carichi dinamici e le deformazioni strutturali. Ad esempio, nel caso di ponti e viadotti, posizionando i sensori nei punti critici, si identificano, mediante l'analisi modale, le risonanze strutturali causate dai carichi dinamici, e quindi si estraggono informazioni relative al deterioramento e ai danni delle strutture esaminate. Infine i sensori FBG trovano spazio nel campo delle cosiddette strutture intelligenti, branca che costituisce un punto di incontro tra sensoristica, intelligenza artificiale, ingegneria strutturale e scienza dei materiali. Si tratta di strutture che si automonitorano, o persino riparano, e in cui i sensori sono direttamente inglobati nel materiale con funzioni di autodiagnostica.
- ✓ Trasporti su rotaia. Grazie alla loro immunità alla radiazione elettromagnetica, i sensori FBG sono stati utilizzati per valutare i difetti delle linee di contatto integrandoli nei collettori di corrente dei treni [11] e per la misura di vibrazioni sulle rotaie.
- ✓ Sismologia. È possibile il monitoraggio di onde sismiche mediante dei sensori sismici basati sui reticoli di Bragg in fibra ottica.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

- ✓ Applicazioni mediche. Sfruttando la caratteristica di bassa invasività dei sensori FBG, in questo campo trovano impiego come sensori di temperatura. Sono inseriti in cateteri ed aghi ipodermici per misure locali di temperatura nel corso di terapie mediche alternative alla chirurgia (radioterapia, ipertermia indotta da microonde). Sono inoltre utilizzati per misure di temperature in dispositivi NMR (Nuclear Magnetic Resonance). Vi sono degli studi per l'eventuale applicazione in cateteri per il monitoraggio cardiaco.
- ✓ Industria Nucleare. Per la loro caratteristica di poter ben operare in ambienti altamente ostili (strain dell'ordine di $2500\mu\epsilon$ e temperature di circa 500°C), i sensori FBG sono utilizzati nelle centrali nucleari per il monitoraggio delle deformazioni di trasformatori, generatori, strutture di contenimento di reattori, torri di raffreddamento e condotte per il vapore.
- ✓ Fusione nucleare. I sensori FBG sono utilizzati nell'esperimento Wendelstein 7-X Stellarator al Max Planck Institute für Plasmaphysik per monitorare la stabilità e il posizionamento dei magneti superconduttori a temperature criogeniche.
- ✓ Turbine a gas. In questo campo i sensori sono utilizzati per misurare temperature fino a 800°C .

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

4. Studio dello stato dell’arte delle tecnologie per l’acquisizione di segnali da sensori in fibra ottica con sistemi di elaborazione a basso consumo

I sistemi optoelettronici offrono molti ed importanti vantaggi rispetto a quelli elettrici tradizionali. I sensori FBG sono esenti da corrosione, immuni ai disturbi elettromagnetici dell’ambiente circostante e sono in grado di trasmettere il segnale a distanze estremamente elevate senza distorsioni o interferenze. Facendo un parallelo tra i due tipi di tecnologie di sensori possiamo tracciare queste nette differenze:

Sensori elettrici;	Fibre Ottiche;
✓ Decadimento del segnale su lunghe distanze	✓ Nessuna perdita di segnale;
✓ 3 cavi per gestire un unico sensore;	✓ Su una fibra si possono collegare fino a 100 sensori di tipologie differenti;
✓ Sensibile agli agenti atmosferici;	✓ Immune agli agenti atmosferici;
✓ Elevati costi di manutenzione	✓ Ridotti costi di manutenzione

Come illustrato nel capitolo precedente, un sistema optoelettronico per la misurazione di una grandezza, è costituito da un sensore in fibra ottica opportunamente progettato e realizzato per lo specifico impiego (con questo si intende sottolineare come per la particolare applicazione al fine di evitare disturbi indesiderati sul funzionamento dello stesso, siano stati messi in atto tutti gli adeguati accorgimenti per aumentarne l’immunità) ed un sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati misurati. I sistemi di acquisizione ed elaborazione dei segnali provenienti dai sensori in fibra ottica, sono caratterizzati in base alla specifica applicazione di destinazione.

I sistemi di acquisizione dati adottano l’impiego di tecniche numeriche per la rappresentazione dei segnali al fine della successiva elaborazione in modo potente e flessibile. Nei sistemi di acquisizione dati il segnale associato alla grandezza fisica viene sottoposto dapprima a un processo di campionamento (circuiti sample & hold) e di quantizzazione (convertitori AD). Queste due operazioni sono comuni a ogni tipo di segnale e sono caratterizzate, rispettivamente, dalla velocità di campionamento e dalla risoluzione del convertitore AD. Il trattamento dell’informazione numerica avviene mediante dispositivi logici. Tali dispositivi, nel presente progetto, sono dedicati a una specifica applicazione e, in questo caso, svolgono solo i compiti previsti in sede di progetto.

Il sistema di misura digitale prevede, di norma, una fase di condizionamento preliminare del segnale in ingresso, al fine di renderlo idoneo alla successiva fase di campionamento e conversione in forma numerica. I dispositivi di condizionamento del segnale sono progettati per elaborare il segnale proveniente dai sensori FBG. In generale, lo schema di un canale di acquisizione a ingresso singolo è rappresentato nella Figura 34. I compiti di gestione della misura sono assegnati a un microprocessore, che fornisce il segnale di campionamento al circuito di sample & hold e successivamente il comando di inizio della conversione (start) al convertitore AD. In fase più

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

avanzata di progetto sarà definita l'architettura hw che dovrà tener conto dell'elevata velocità di elaborazione, valutando anche l'uso di dispositivi hw programmabili come l'FPGA.

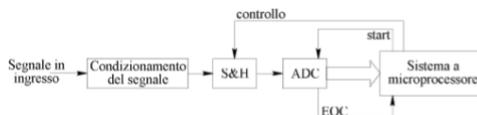


Figura 34. Schema di un canale di acquisizione a ingresso singolo

Quest'ultimo, completata la conversione, restituisce al processore il controllo della procedura tramite il segnale End of Conversion, EOC. La velocità di campionamento, con la quale può essere interrogato il segnale d'ingresso, è limitata dalla durata di tutti questi compiti. Infatti, deve consentire l'immagazzinamento del dato nel campionatore S&H (tempo di acquisizione), la successiva conversione nel dispositivo ADC (tempo di conversione), il trasferimento del numero in una opportuna area di memoria del sistema. Pertanto sarà importante stabilire la frequenza di campionamento f_c massima consentita, conoscendo i tempi necessari per l'esecuzione di tutte queste operazioni.

Nel dettaglio dello studio dello stato dell'arte delle tecnologie per l'acquisizione di segnali da sensori in fibra ottica, possiamo individuare i sistemi preposti per misure in laboratorio che sono sostanzialmente degli strumenti di misura, quali analizzatore di spettro, ed in quanto tali, caratterizzati da dimensioni generose e progettati per un uso specifico di laboratorio, che misurano la variazione della lunghezza d'onda indotta dalla variazione della grandezza, senza misurare direttamente la grandezza stessa. Pertanto la grandezza della misura avviene per via analitica ed indiretta.

Analogamente, vi sono dispositivi di misura portatili ed integrati predisposti per la lettura dei sensori a reticolo in fibra di Bragg (FBG) denominati in gergo Bragg meter. Hanno al proprio interno un interrogatore ottico con software integrato progettato appositamente per interrogare i sensori in fibra ottica basati sul reticolo di Bragg (FBG) sul campo. La destinazione d'uso è specifica per le attività di installazione in sito o per prove di breve durata. Gli interrogatori Bragg utilizzano la tecnologia di scansione laser a movimento continuo. Sono dotati di un riferimento di lunghezza d'onda tracciabile che fornisce una taratura continua per garantire la precisione del sistema in condizioni di funzionamento a lungo termine. L'ampio intervallo dinamico e l'elevata potenza in uscita consentono di ottenere un'alta risoluzione anche in presenza di cavi in fibra lunghi e collegamenti dissipativi. Gli interrogatori ottici portatili sono indicati per l'uso in prove di laboratorio e sviluppo sul campo tipicamente nei settori civile, aeronautica, energia e R&S.

Parimenti vi sono anche c. d. Bragg meter industriali dotati di unità di misurazione ottiche statiche e dinamiche appositamente progettate per interrogare i sensori basati sul reticolo in fibra di Bragg (FBG) in ambienti industriali. Sono caratterizzati da elevate velocità di acquisizione con frequenze di campionamento anche di migliaia di S/s in grado di effettuare operazioni aritmetiche come la media dei campioni acquisiti. Viene utilizzata la tecnologia di scansione laser continua.

Attualmente sul mercato dell'elettronica, non sono disponibili sistemi di acquisizione ed elaborazione di segnali da sensori in fibra ottica a basso consumo, utilizzabili in applicazioni ad alta

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

velocità e risoluzione. Infatti per realizzare sistemi rispondenti ai precedenti requisiti, si è fatto ricorso ad una progettazione specifica al fine di realizzare un dispositivo ad hoc.

Infatti per una particolare applicazione di acquisizione dati, è stato realizzato un hw appositamente sviluppato con caratteristiche low power, basato sul sistema operativo open-source Linux, adatto per l'acquisizione di segnali da sensori multiparametrici. Il sistema in oggetto si presta adeguatamente per misure di monitoraggio ambientale effettuate mediante sensori, con uscita analogica o digitale. Il sistema si presenta a frame aperto ed è costituito da tre schede elettroniche impilabili una sull'altra attraverso una coppia di slot. Il nucleo centrale del sistema è formato da una CPU del tipo ARM-9 a basso consumo montata su una scheda elettronica commerciale. Una seconda scheda ospita sino ad otto linee digitali di I/O, due interfacce USB con accensione a comando, tre porte seriali asincrone di tipo RS-232 ed una porta seriale asincrona half-duplex di tipo RS-485/RS-422. Su una terza scheda elettronica è presente un convertitore analogico-digitale a 12-bit ad otto canali multiplexati, utilizzato per monitorare i consumi elettrici della strumentazione e del sistema stesso. Oltre che a fornire la misura della temperatura del sistema, la scheda effettua la misura dell'inclinazione e dell'orientazione, con la presenza di una bussola magnetica digitale, e dispone di un sensore di presenza acqua, utile per applicazioni di geofisica marina. Infine, un connettore di espansione consente di collegare al sistema un'ulteriore scheda di estensione con la possibilità di rendere disponibile all'esterno sino a otto linee digitali di I/O e un'interfaccia seriale di tipo I2C, eventualmente optoisolate. Completa il tutto un modulo (opzionale) con convertitori DC/DC di bassa potenza in grado di fornire tutte le tensioni di alimentazione di cui necessita il sistema. La motivazione che ha spinto la produzione di questo sistema risiede principalmente nel fatto che, sul mercato di elettronica attuale, non sono disponibili siffatti sistemi di acquisizione a basso consumo, utili per il controllo ed il monitoraggio di sensori e strumentazione, per applicazioni particolari quali quelle relative ad analisi di interesse geofisico e non, da fondale marino oggetto della presente indagine. Sino a poco tempo fa, applicazioni hw simili erano realizzate con architetture che richiedevano un consumo intorno ai 5 W, eccessivi per siffatti sistemi. Se a questo si aggiungono i consumi dei sensori di stato esterni ad essa connessa, allora i consumi salgono ulteriormente. Il sistema di acquisizione proposto consuma meno di 1 W e contiene una CPU più potente (dotata di compilatore gcc integrato) ed integra tutti i sensori presenti nel sistema. Appaiono evidenti, quindi, i notevoli vantaggi che ne sono derivati dall'implementazione della soluzione proposta. Un'interfaccia web scritta in linguaggio PHP, una serie di script scritti in Bash e Perl, coadiuvati da una serie di applicazioni elaborate in linguaggio C, costituiscono il software di gestione del microprocessore, delle periferiche e dei sensori integrati ed esterni, per la cui descrizione dettagliata si rimanda ad un successivo documento di prossima pubblicazione.

Il sistema di acquisizione dati in questione si presenta a frame aperto ed è costituito da tre schede elettroniche impilabili una sull'altra attraverso una coppia di slot (Figura 35).

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

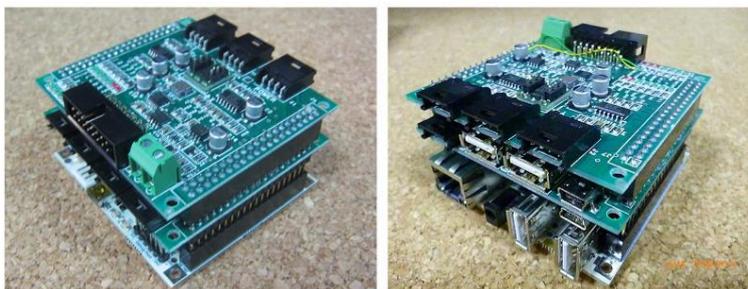


Figura 35. Sistema di acquisizione dati

Esso è costituito principalmente da una scheda elettronica con microprocessore integrato, del tipo ARM-9 a basso consumo. Questa si basa sul sistema operativo open-source Linux. Il sistema si presta adeguatamente per misure di monitoraggio ambientale effettuate mediante sensori multiparametrici, con uscita analogica o digitale, con rate di acquisizione medio-basso (da 1 sample/10 s a 10 sps). La scheda commerciale, denominata Fox Board G20, da sola offre due porte USB 2, un'interfaccia seriale di tipo I2C ed una di tipo SPI, mentre le quattro porte seriali di tipo RS-232 a corredo, non sono disponibili direttamente a causa dell'assenza dei circuiti ricetrasmittenti. Impilando dall'alto su questa, mediante due opportuni connettori, la scheda-shield denominata SERIALS (Capitolo 2), le due porte USB anzidette diventano ad accensione con comando di on/off. La presenza, inoltre, di quattro ricetrasmittitori consente di avere fisicamente disponibili tre porte seriali asincrone di tipo RS-232 ed una half-duplex di tipo RS-485/RS-422. Innestando su questa coppia di schede un'ulteriore scheda-shield denominata PIGTAIL (Capitolo 3), il sistema si completa con un convertitore analogico-digitale a 12-bit, ad otto canali multiplexati, di cui due canali per il monitoraggio di altrettanti segnali analogici in tensione provenienti da sensori esterni. La scheda offre anche la possibilità della misura dei consumi elettrici dei sensori collegati al sistema, nonché la misura della temperatura del sistema, dell'inclinazione e orientazione del modulo, con la presenza di un sensore di anti-allagamento. Infine, un connettore di espansione consente di collegare al sistema un'ulteriore scheda di estensione - separata dal sistema - con la possibilità di rendere disponibile all'esterno sino a otto linee digitali di I/O e un'interfaccia seriale di tipo I2C, eventualmente optoisolate. Una scheda (opzionale), disponibile a parte e denominata POWER, contiene una coppia di convertitori DC/DC di bassa potenza in grado di fornire tutte le tensioni di alimentazione di cui necessita il sistema.

Nella Figura 36 viene mostrato lo schema a blocchi dell'intero sistema.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
“SISTEMA DI PESATURADINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

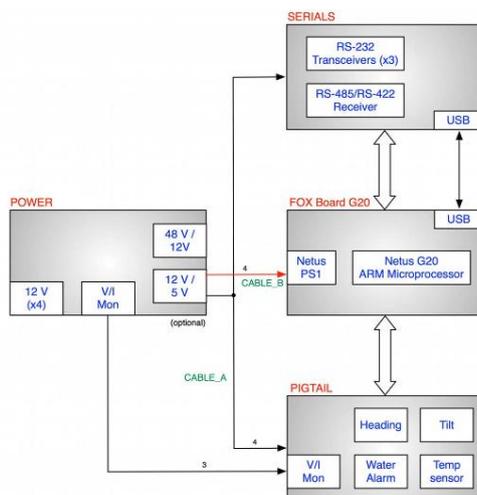


Figura 36. Schema a blocchi dell'intero sistema

Lo studio condotto sullo stato dell'arte delle soluzioni relative all'impiego di sensoristica optoelettronica per la rilevazione di una data grandezza da misurare e sulle tecnologie per l'acquisizione di segnali da sensori in fibra ottica con sistemi di elaborazione a basso consumo, chiarisce in maniera incontrovertibile come per determinate applicazioni, sia necessario sviluppare la soluzione ad hoc. Diversi ed evidenti sono i motivi che impongono la realizzazione di una soluzione embedded per uno specifico impiego. Innanzitutto l'ambiente di utilizzo del sistema di acquisizione dei segnali. Temperatura, umidità, vibrazioni, dimensioni, solo per citarne alcune, sono tutte variabili che fanno propendere per uno sviluppo specifico del controllo per l'acquisizione dei dati in quanto ben difficilmente si potrà trovare sul mercato un dispositivo compliant verso tutti questi requisiti. Allo stesso tempo aspetti legati alla manutenibilità del prodotto, alla scalabilità, agli aggiornamenti futuri, al telecontrollo dello stesso, sono tutti requisiti ormai imprescindibili che fanno sicuramente propendere per una soluzione proprietaria per avere il totale controllo dell'hw e sw per gli eventuali upgrade e per conoscere apriori quali sviluppi ulteriori possono essere parte del prodotto. Prova evidente è la scelta fatta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Napoli, che per soddisfare il requisito del basso consumo, è stato obbligato a sviluppare una nuova CPU utilizzando un microprocessore con architettura ARM-9.

Pertanto, la scelta di sviluppare in house un sistema di misura embedded specifico per il controllo dei sensori FBG e la conseguente acquisizione ed elaborazione dei dati al fine di ottenere misurazioni delle grandezze con la precisione desiderata, per poter attuare le conseguenti scelte importanti in maniera consapevole, è senz'altro vincente oltreché, per i suddetti motivi, obbligata.

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURA DINAMICA INTELLIGENTE PER LA GESTIONE DEL TRAFFICO PESANTE”

5. Gestione in tempo reale dei veicoli pesanti in prossimità di infrastrutture critiche o comunque in condizioni di criticità per il traffico

Per poter rispondere in modo adeguato alla richiesta è necessario innanzitutto riconoscere il veicolo pesante. Il riconoscimento dev'essere effettuato mediante pesatura dinamica e classificazione del veicolo stesso. La pesatura dinamica avviene applicando i principi e le conoscenze tecniche e tecnologiche illustrati in precedenza, mentre la classificazione viene ottenuta mediante sensori, anche di tipo non invasivo installati al centro ed in alto (5,5 m) di ogni corsia basati per esempio su tecnologia laser (laser scan-Figura 37).

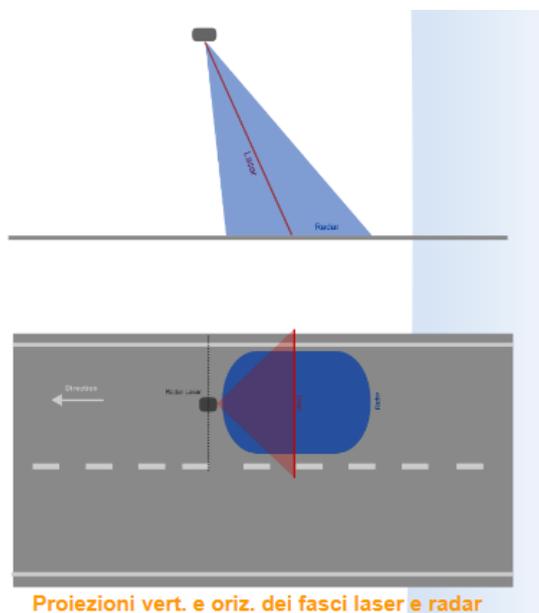


Figura 37. Laser scan

Questi sensori sono in grado di riconoscere i veicoli e di classificarli in: 1) motociclo; 2) automobile; 3) furgone; 4) camion; 5) camion con rimorchio; 6) autoarticolato; 7) bus; 8) trasporto eccezionale. Oltre a rilevare la velocità di ognuno di essi e lo stato del traffico nel tratto stradale analizzato fornendo l'indicazione di “rallentamento o code”.

Inoltre il sensore può anche fornire dei trigger in corrispondenza dell'inizio e della fine di un veicolo. I trigger possono essere utilizzati in combinazione con il sistema di pesatura dinamica in modo da far coincidere il tipo di veicolo col suo peso. A questo punto si hanno a disposizione tutti i dati (peso, classificazione, occupazione della sede stradale - rallentamento o code) indispensabili per attuare gli scenari ritenuti opportuni. Le misure del peso dei veicoli sono effettuate tramite i sensori FBG dalla relativa CPU disposta in campo. Mentre i dati di classificazione e traffico sono acquisiti dalla stessa CPU tramite i sensori descritti in precedenza. È possibile configurare nel SW della CPU degli scenari di traffico, ossia impostare i parametri (n. veicoli / ora; velocità; livello di occupazione della sede stradale, ecc.) legati alle condizioni di viabilità, per cui al verificarsi della condizione o delle condizioni configurate, la CPU, in tempo reale, può automaticamente, per. Es.,

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL
 “SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

inviare su di un pannello a messaggio variabile posto a portale lungo la larghezza della sede stradale il messaggio di uscita obbligatoria per i mezzi superiori alle “n” tonnellate.

In aggiunta, grazie alla sempre maggiore diffusione dei sistemi di guida cooperativa (V2X), l’infrastruttura di rete lato strada comunica direttamente ai veicoli in transito le condizioni del traffico e gli obblighi da rispettare, questi ultimi ricevuti dalla CPU (Figura 38).

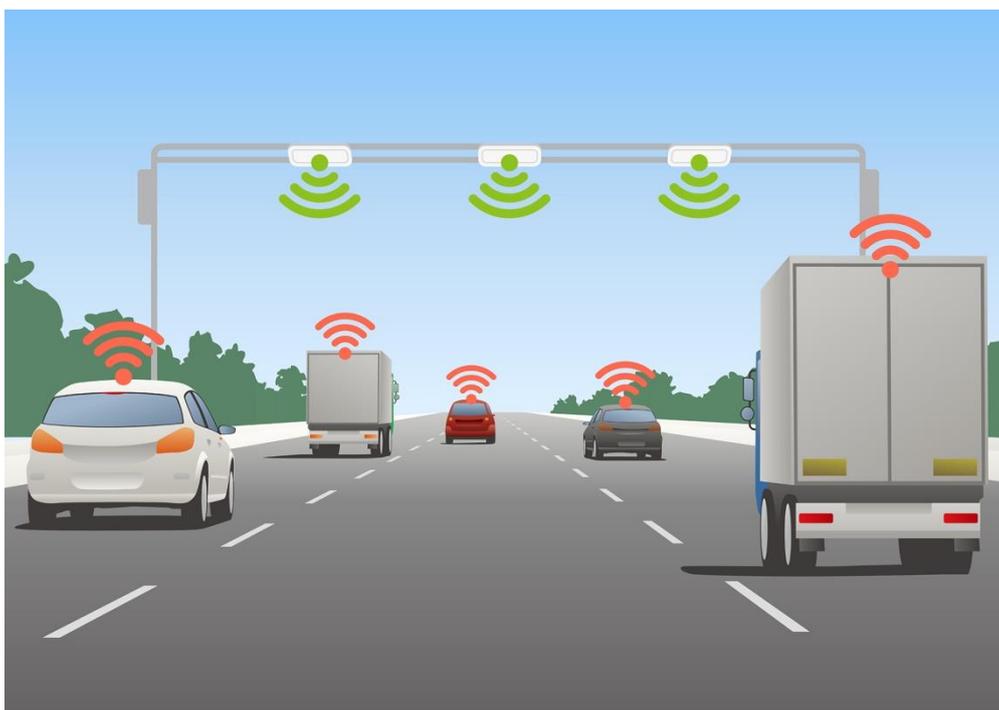


Figura 38. Comunicazione CPU con i veicoli in transito

La CPU, paragonandola ad un concentratore di campo, deve allo stesso tempo inviare in tempo reale i dati rilevati e gli scenari attivi oltre a tutti gli altri dati di traffico disponibili, alla centrale ANAS (Figura 39), dove gli operatori ivi presenti possono prendere comunque il controllo da remoto degli eventi al fine di gestirli nel modo ritenuto più opportuno.

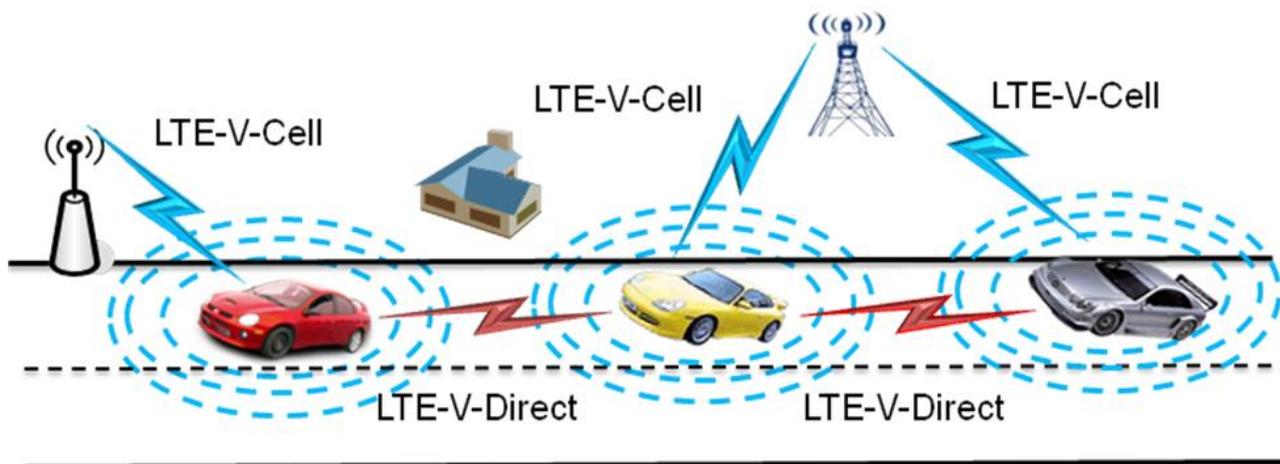


Figura 39. Comunicazione centrale ANAS con i veicoli in transito

PROGETTO DI RICERCA E SVILUPPO SENTINEL

“SISTEMA DI PESATURADINAMICAINTELLIGENTE PER LA GESTIONEDEL TRAFFICO PESANTE”

6. Bibliografia

- [1] B. Lee, Y. Jeong, *Interrogation techniques for fiber grating sensors and the theory of fiber gratings*, in: F.T.S. Yu, S. Yin (Eds.), *Fiber Optic Sensors*, Dekker, New York, 2002.
- [2] Fuhr, Peter L., "Measuring with Light," *Sensors*, Vol. 17, No. 5, May 2000.
- [3] B. Lin and V. Giurgiutiu *Exploration of Ultrasonic Guided Wave Detection with Optical Fiber Sensors and Piezoelectric Transducers*, 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, September 2013
- [4] <http://www.redondooptics.com/>
- [5] <http://www.micronoptics.com/>
- [6] <http://www.ibsen.com>
- [7] <http://www.ni.com>