

POLITECNICO DI TORINO

Corso di laurea magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

Valutazione sperimentale di sensori basati su reticolo di Bragg



Relatori:

Prof. Alberto Godio

Prof. Davide Luca Janner

Candidato: Jacopo Cavalli

Anno accademico 2017/2018

SOMMARIO

INTRODUZIONE	3
1 FIBRE OTTICHE.....	5
1.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO	5
1.2 DIMENSIONI E MATERIALE.....	10
1.3 ATTENUAZIONE	11
1.4 FABBRICAZIONE FIBRE OTTICHE CONVENZIONALI.....	13
1.5 CHIMICA DROGANTI.....	15
1.6 FIBER DRAWING	16
2 FIBER BRAGG GRATINGS	17
2.1 PROPRIETÀ OTTICHE DELL'FBG	18
2.2 RELAZIONE DEFORMAZIONE SPOSTAMENTO λ_B	21
2.3 PRODUZIONE DI FIBER GRATINGS.....	23
2.4 ACCELEROMETRO FBG	26
3 STRUMENTAZIONE	28
3.1 ACCELEROMETRO FBG	28
3.2 INTERROGATORE.....	30
4 ACQUISIZIONE SEGNALI.....	32
4.1 TAB ACQUISIZIONE.....	35
4.2 SENSORS TAB	37
4.3 ACQUISIZIONE DI PROVA	39
5 PROVA HVSR.....	44
5.1 INTRODUZIONE	44
5.2 PROCEDURA PREIMINARE.....	48
5.3 REGISTRAZIONI.....	55
5.4 FINESTRATURA	59
5.5 CALCOLO SPETTRI E HVSR	60
5.6 CONSIDERAZIONI PROVA HVSR.....	62
6 REVISIONE LETTERATURA	64
6.1 CONFIGURAZIONE MASSA-MOLLA	64

6.2	CANTILEVER BEAM	68
7	PROPOSTA SENSORE	73
7.1	CALCOLO DEFORMAZIONE CANTILEVER.....	75
7.2	EQUAZIONI DEL MOTO E FREQUENZA NATURALE.....	77
7.3	SENSIBILITÀ SENSORE	79
7.4	CALCOLO PRESTAZIONI SENSORE	80
7.5	ANALISI PARAMETRI.....	82
7.5.1	Analisi dell'influenza di L_1 sulle prestazioni del sensore fbg	83
7.5.2	Analisi dell'influenza di h sulle prestazioni del sensore fbg	84
7.6	SPECIFICHE SENSORE	85
8	CONCLUSIONE	87
	BIBLIOGRAFIA.....	88

INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo lavoro è la verifica della possibilità di utilizzare accelerometri commerciali basati su tecnologia *Fiber Bragg grating* (FBG) in alcune applicazioni di sismica passiva confrontandoli con strumenti tradizionali di tipo elettrico, data la minore suscettività a disturbi di tipo elettromagnetico e alla maggiore facilità nel multiplexing dei sensori.

Nell'eventualità del fallimento di queste prove si prevede di revisionare la letteratura nell'ambito della stessa tecnologia FBG al fine di trovare configurazioni con maggiore sensibilità e di relativa semplicità costruttiva.

L'attività sperimentale è stata svolta nel Laboratorio di Geofisica del DIATI (Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture) del Politecnico di Torino.

Il seguente lavoro di tesi è strutturato in tre sezioni:

Nella prima parte vengono descritte brevemente le proprietà delle fibre ottiche e del grating di Bragg inscritto in esse, focalizzandosi in particolare sulla proprietà di quest'ultimo di riflettere la luce incidente in una banda molto stretta attorno alla *Bragg wavelength* e la dipendenza di essa dalle sollecitazioni applicate alla fibra.

Nella seconda parte è descritto il sistema di acquisizione ed è effettuata una prova comparativa con un sismometro tradizionale in una rilevazione a singola stazione di sismica passiva con la tecnica HVSR.

Nella terza parte si effettua una revisione della letteratura riguardante sensori basati sulla tecnologia del reticolo di Bragg e si propone un trasduttore che si prevede di realizzare.

1 FIBRE OTTICHE

Una fibra ottica è un filamento, trasparente, generalmente in silice o plastica, di piccolo diametro, utilizzata per trasmettere luce tra i suoi capi e trova ampio uso nell'ambito delle telecomunicazioni, permettendo la trasmissione su lunghe distanze ed a più alti *datarate* rispetto ai cavi elettrici.

Le fibre inoltre sono avvantaggiate rispetto ai cavi metallici grazie alla minore perdita di energia e per la loro immunità ad interferenze elettromagnetiche.

1.1 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

La fibra ottica ricade in un subset di strutture note come guide d'onda ottica (*waveguides*) dielettriche.

Figura 1.1 mostra la generica struttura di una fibra ottica, con un *core* con alto indice di rifrazione circondato da un *cladding* avente più basso indice di rifrazione.

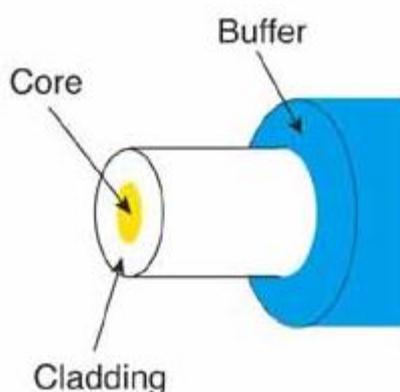


Figura 1.1 Struttura schematica di una fibra ottica (*htt*)

Questa differenza nell'indice di rifrazione costringe la luce all'interno del *core* (Figura 1.2), incidente con un angolo maggiore dell'angolo critico θ_c , ad essere riflessa all'interfaccia con il cladding :

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_1}{n_0}\right) \quad (1-1)$$

Dove:

n_1 : indice di rifrazione del cladding

n_0 : indice di rifrazione del core

θ_c : Angolo critico

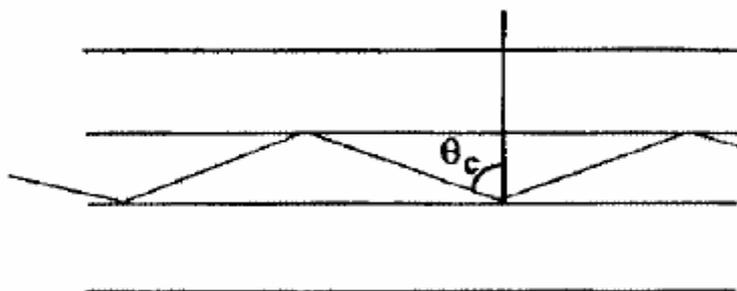


Figura 1.2 Percorso di un raggio che si propaga con angolo critico per riflessione interna totale ,(Handbook of Optics Vol. IV)

Poiché la luce deve colpire l'interfaccia con un angolo maggiore dell'angolo critico, solo la luce che entra nella fibra entro un certo intervallo di angoli può viaggiare lungo la fibra stessa senza fuoriuscirne. Questa gamma di angoli è chiamata cono di accettazione (Figura 1.3) della fibra. La dimensione di questo cono di accettazione è una funzione della differenza dell'indice di rifrazione tra il nucleo e il rivestimento della fibra.

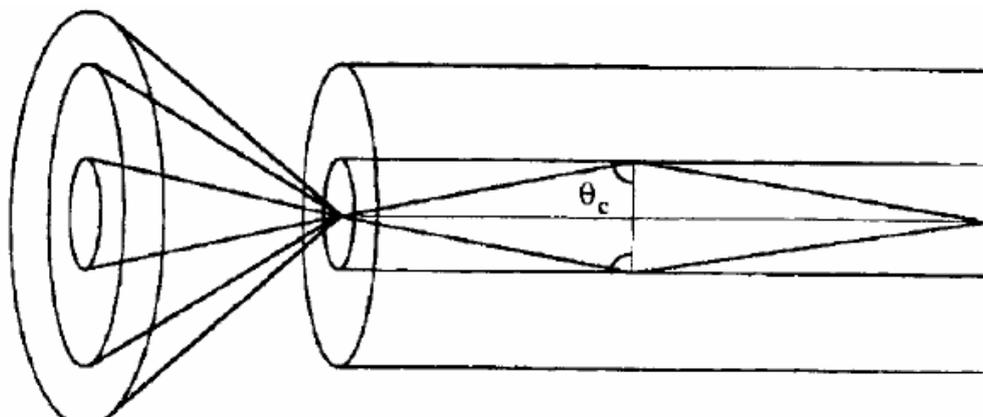


Figura 1.3 Rappresentazione cono di accettazione fibra ottica, (Handbook of Optics Vol. IV)

Il seno di questo angolo è detto *numerical aperture* della fibra (Figura 1.4). Sia la dimensione del nucleo che l'apertura numerica sono molto importanti quando si considerano problemi di accoppiamento fibra-fibra o fibra laser.

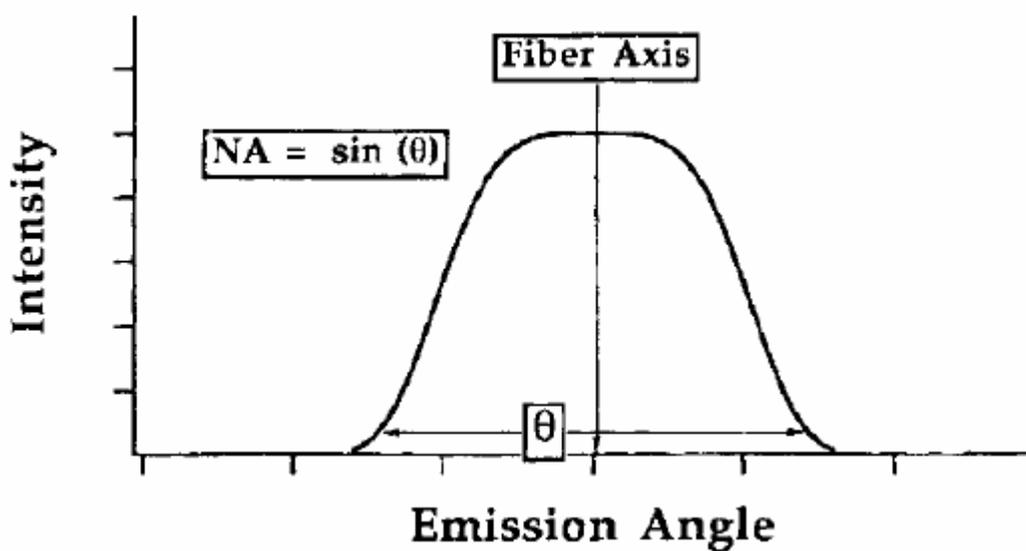


Figura 1.4 L'apertura numerica definisce il range dell'angolo di accettazione, (Handbook of Optics Vol. IV)

L'immagine che illustra il fenomeno della riflessione interna totale (*Figura 1.2*) sembra rendere possibile un range continuo di raggi propagantesi internamente alla struttura; in realtà, essendo la luce un'onda, deve soddisfare una condizione di auto interferenza per essere intrappolata nella *waveguide*.

Ci sono solo un numero finito di percorsi che soddisfano questa condizione, questi corrispondono ai modi elettromagnetici di propagazione della struttura.

Le fibre che supportano un alto numero di modi (aventi largo *core* e *numerical aperture*) possono essere analizzate con i metodi dell'ottica geometrica; le fibre che supportano un piccolo numero di modi, al limite solo il modo fondamentale, devono essere caratterizzate tramite la risoluzione delle equazioni di Maxwell con le appropriate condizioni al contorno della struttura.

Le fibre possedenti una discontinuità nell'indice di rifrazione all'interfaccia tra *cladding* e *core* sono chiamate *step-index fibers*, quando invece l'indice di rifrazione varia in modo continuo si parla di *gradient-index fiber*; in queste ultime il percorso geometrico dell'onda non segue una linea retta spezzata ma curvilinea (*Figura 1.5*).

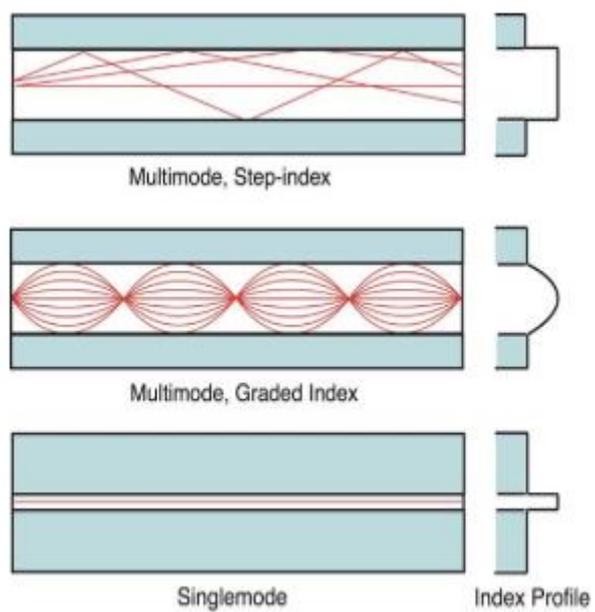


Figura 1.5 Rappresentazione diversi tipi di fibre (www.thefoa.org)

1.2 DIMENSIONI E MATERIALE

La tipica fibra ottica *monomodale* ha un diametro del nucleo compreso tra 8 e 10,5 μm e un diametro del *cladding* di 125 μm mentre la fibra multimodale ha tipicamente una dimensione del nucleo di 62,5 micrometri (μm) e un diametro del *cladding* di 125 μm (Figura 1.6).



Figura 1.6 Dimensioni tipiche fibre ottiche

Le fibre ottiche di vetro sono quasi sempre costituite da silice, ma alcuni altri materiali, come fluorozirconato, fluoroalluminato e vetri calcogenuri, nonché materiali cristallini come lo zaffiro, vengono utilizzati per le lunghezze d'onda dell'infrarosso o altre applicazioni specifiche. I vetri di silice e fluoruro hanno solitamente indici di rifrazione di circa 1.5, ma alcuni materiali come i calcogenuri possono avere indici alti come 3.

Molte delle fibre ottiche moderne sono *weakly guiding*, ossia la differenza tra l'indice di rifrazione tra il core ed il cladding è molto piccola (tipicamente meno dell'1%).

Le fibre ottiche plastiche (POF) sono comunemente fibre multimodali a gradini con diametro del nucleo di 0,5 millimetri o superiore. Le POF hanno in genere coefficienti di attenuazione più elevati rispetto alle fibre di vetro, 1 dB/m o superiore e questa elevata attenuazione limita la gamma di sistemi basati su POF.

1.3 ATTENUAZIONE

Una delle specifiche principali associate ad una fibra ottica è l'attenuazione (*Figura 1.7*), che consiste nella perdita di potenza ottica lungo il percorso della luce nella fibra. L'attenuazione di una fibra ottica viene espressa dal coefficiente di attenuazione, definito come la perdita potenza determinata della fibra per unità di lunghezza, in dB / km.

Questo fenomeno è il risultato di due fattori: assorbimento e scattering:

- L'assorbimento è causato dall'assorbimento della luce e dalla conversione in calore da parte delle molecole nel vetro. Gli assorbitori principali sono OH + residui e droganti usati per modificare l'indice di rifrazione del vetro. Questo assorbimento avviene a lunghezze d'onda specifiche, determinate dagli elementi che assorbono la luce, l'assorbimento di OH+ che è quello predominante si verifica più intensamente attorno a 1000 nm, 1400 nm e oltre 1600 nm (*Figura 1.7*). Per ridurre questo problema molte fibre oggi sono cosiddette a "basso picco d'acqua" in cui le bande di assorbimento OH + sono state notevolmente ridotte, consentendo alla tecnica di multiplexing a divisione di lunghezza d'onda di utilizzare anche queste lunghezze d'onda.
- Lo scattering di Rayleigh si verifica quando la luce interagendo con singoli atomi nel vetro viene dispersa in modo anisotropo; se l'angolo di dispersione è al di fuori dell'apertura numerica della fibra sarà assorbita nel rivestimento o riflessa indietro verso la sorgente. Lo scattering è anche una funzione della lunghezza d'onda, essendo proporzionale all'inverso della quarta potenza della lunghezza d'onda della luce.

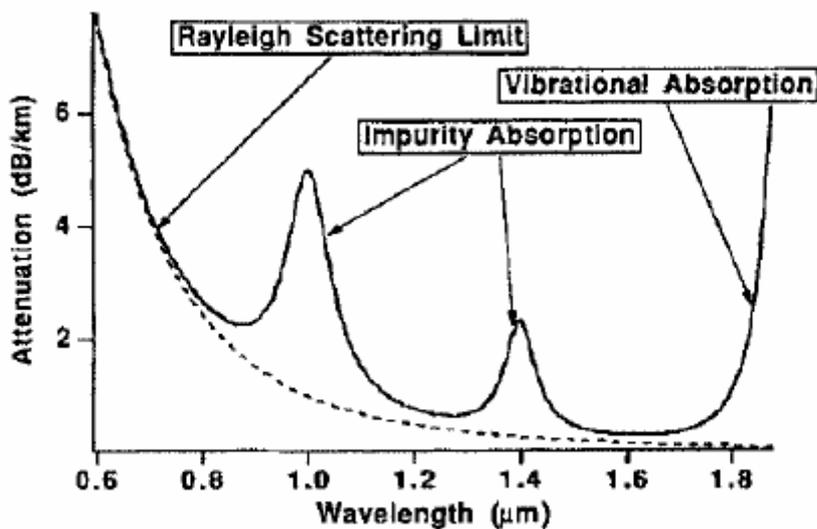


Figura 1.7 Caratteristica di attenuazione di una tipica fibra ottica ,(Handbook of Optics Vol. IV)

I sistemi a fibre ottiche in vetro trasmettono nelle "finestre" create tra le bande di assorbimento a 850 nm, 1300 nm e 1550 nm, e hanno un valore dell'attenuazione che si aggira attorno a 0.4 dB/km per sorgenti a 1550 nm (thefoa.org) mentre la fibra di plastica ha una banda avente lunghezza d'onda più limitata, che limita l'uso pratico a sorgenti LED a 660 nm.

1.4 FABBRICAZIONE FIBRE OTTICHE CONVENZIONALI

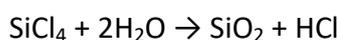
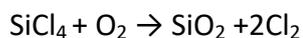
La fabbricazione convenzionale di fibre ottiche richiede inizialmente che il profilo dell'indice di rifrazione venga fabbricato in dimensioni macroscopiche in una preforma.

Una tipica preforma è diversi centimetri in diametro e di lunghezza metrica, essa possiede le stesse dimensioni relative e la distribuzione del drogante nel nucleo e nel rivestimento che si vogliono ottenere nella fibra.

La *Chemical vapor deposition* (CVD) è la tecnologia primaria utilizzata nella produzione di fibre ottiche.

Il processo di fabbricazione deve soddisfare due requisiti: elevata purezza e controllo preciso dei profili di composizione (quindi l'indice di rifrazione).

Nei processi CVD, le particelle di silice submicronica sono prodotte attraverso le seguenti reazioni chimiche:



Le reazioni avvengono ad una temperatura di circa 1800 ° C e portano alla deposizione di particelle solide di dimensione submicronica, chiamate anche "*soot*" (fuliggine) costituite da silice di elevata purezza che devono successivamente essere sinterizzate per formare un vetro di qualità ottica.

Questo processo si può ottenere con una delle tecniche più comuni, chiamata Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD): montando un tubo di silice pura su di un tornio, mentre i gas vengono fatti scorrere all'interno del tubo, una torcia, che si sposta lungo la lunghezza del tubo, è applicata all'esterno dello stesso, questa torcia ha il doppio compito di fornire l'energia necessaria per l'ossidazione dei gas e successivamente per la sinterizzazione della silice depositata; il *soot* viene depositato in corrispondenza del fronte della torcia, mentre quest'ultima si muove lungo la zona di deposizione le particelle sono sinterizzate a formare uno strato vetroso, privo di

pori. Con multipli passaggi della torcia è possibile creare più layers con le caratteristiche volute dell'indice di rifrazione (Figura 1.8).

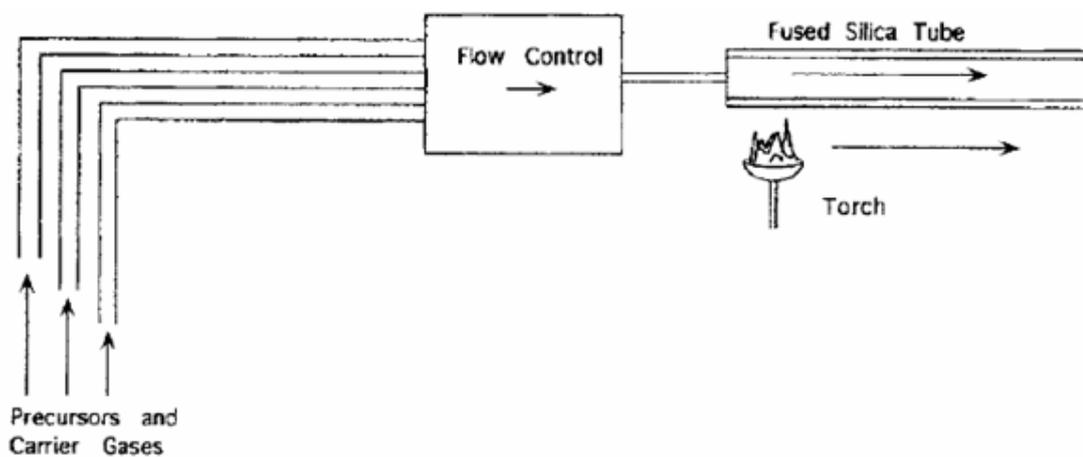
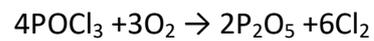
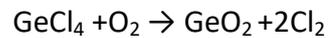


Figura 1.8 Processo MCVD (Modified chemical vapor deposition) per la fabbricazione della preforma, (Handbook of Optics Vol. IV)

1.5 CHIMICA DROGANTI

I droganti standard per la fibra di silice includono GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3 e SiF_4 . I primi due sono usati per aumentare l'indice di rifrazione (e sono quindi usati nel *core*), mentre i secondi diminuiscono l'indice di rifrazione (vengono usati nel *cladding*). I processi CVD utilizzano spesso l'ossigeno come gas di trasporto di liquidi ad alta tensione di vapore di GeCl_4 , POCl_3 o SiF_4 - Le reazioni che producono il *soot* drogante sono le seguenti:



1.6 FIBER DRAWING

Il prossimo passo nel processo di produzione di fibre ottiche è quello di convertire la preforma fabbricata, avente grosso diametro, in una fibra del diametro voluto. Questo viene fatto tramite un'operazione chiamata *Fiber Drawing* descritta rapidamente in seguito.

La punta della preforma viene abbassata in un forno di grafite ad alta purezza. I gas puri vengono iniettati nella fornace per fornire un'atmosfera priva di impurità e conduttiva.

Nel forno, temperature strettamente controllate che si avvicinano a 1900°C ammorbidiscono la punta della preforma. Una volta raggiunto il punto di rammollimento la gravità consente a una goccia fusa di colare dalla punta della preforma fino a quando non viene allungata in un filo sottile.

Questo filo viene quindi trainato da una cinghia di trazione situata nella parte inferiore della torre di trazione e quindi avvolta su tamburi avvolgenti.

Durante l'estrazione, la preforma viene riscaldata alla temperatura ottimale per ottenere una tensione di trafilatura ideale. Le velocità di prelievo di 10 - 20 metri al secondo sono comuni nel settore.

Durante il processo di estrazione il diametro della fibra trafilata è controllato a 125µm con una tolleranza di solo 1 micron.

2 FIBER BRAGG GRATING

Il *fiber Bragg grating* (FBG) è una variazione periodica, di passo Λ (detto anche *pitch* del grating), in direzione longitudinale dell'indice di rifrazione nel *core* della fibra ottica.

La principale proprietà del FBG è quella di riflettere la luce in una stretta banda centrata attorno alla cosiddetta *Bragg wavelength* λ_B .

Le variazioni dell'indice di rifrazione sono generate dall'esposizione della fibra ad un intenso pattern di interferenza ottica di luce ultravioletta capace di indurre cambiamenti permanenti dell'indice di rifrazione nel *core* di una fibra ottica grazie ad un fenomeno chiamato fotosensibilità che interessa la parte della fibra drogata con Germanio.

2.1 PROPRIETÀ OTTICHE DELL'FBG

A causa della struttura periodica dell'indice di rifrazione nel nucleo della fibra ottica la luce che si propaga nel reticolo di Bragg viene riflessa parzialmente a causa della riflessione di Fresnel da ogni successiva perturbazione dell' indice di rifrazione.

Normalmente, la quantità di luce riflessa è molto piccola, tranne quando la luce ha una lunghezza d'onda nella regione della lunghezza d'onda di Bragg λ_B :

$$\lambda_B = 2N_{eff} \Lambda \quad (2-1)$$

Dove:

N_{eff} : Indice di rifrazione del modo propagante

Λ : Periodo del grating (pitch)

Alla lunghezza d'onda di Bragg, ogni riflessione dalle successive perturbazioni dell'indice è in fase con quella successiva. Le riflessioni si sommano in modo coerente e si ottiene un forte segnale di luce riflessa(Figura 2.1).

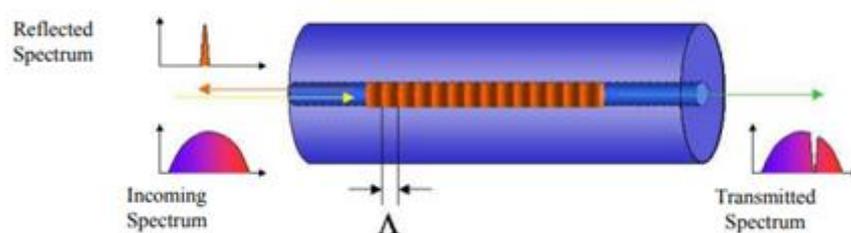


Figura 2.1 Rappresentazione schematica degli spettri di riflessione e trasmissione prodotti da un grating

La riflettività di un reticolo può avvicinarsi al 100% alla lunghezza d'onda di Bragg, mentre la luce alle lunghezze d'onda più lunghe o più corte della lunghezza d'onda di Bragg passa attraverso il reticolo con trascurabile perdita.

È questo comportamento dipendente al passo (pitch) dei reticoli di Bragg che li rende così utili per applicazioni di comunicazione ottica, in particolare il pitch ottico ($N_{eff} \Lambda$)

di un reticolo di Bragg contenuto nel core di una fibra viene modificato applicando uno sforzo longitudinale ad essa.

Questo effetto fornisce un mezzo semplice per rilevare la deformazione della fibra monitorando otticamente il concomitante cambiamento nella lunghezza d'onda riflessa.

I reticoli di Bragg possono essere descritti teoricamente usando le equazioni della *Coupled mode theory*; si riassumono in seguito le formule rilevanti che descrivono la propagazione della luce attraverso una fibra monomodale con inscritto un grating uniforme.

Si assume che il reticolo sia costituito da una perturbazione sinusoidale dell'indice di rifrazione di ampiezza costante Δn e si considera la propagazione in una fibra *monomodale* che è il più comune tipo di fibra in cui si inscrivono gratings. La riflettività del reticolo è determinata da tre parametri: il *coupling coefficient* κ , la costante di propagazione del modo $k = 2\pi f N_{eff} / \lambda$, la lunghezza del reticolo, L .

Il *coupling coefficient* κ , che dipende solo dalla lunghezza d'onda operativa e dall'ampiezza della perturbazione dell'indice Δn è dato da $\kappa = (\pi/\lambda)\Delta n$; quando la lunghezza d'onda della luce corrisponde alla lunghezza d'onda di Bragg la riflettività, R , del grating è data dall'espressione $R = \tanh^2(\kappa L)$, dove κ è il coefficiente di accoppiamento alla lunghezza d'onda di Bragg e L è la lunghezza del grating. Per $\kappa L = 1, 2, 3$, la riflettività del grating è rispettivamente 58, 93 e 99%.

Un grating avente il prodotto κL maggiore di 1 è detto grating forte per mentre un grating debole è minore di 1.

L'altra importante proprietà del reticolo è la sua *bandwidth*, che è una misura del intervallo di lunghezze d'onda lungo la quale il grating riflette la luce. Un parametro per misurare la bandwidth di un grating è la sua larghezza a metà massimo $\Delta\lambda_{FWMH}$ della riflessione del picco centrale, che è definito come l'intervallo di lunghezza d'onda tra i punti di -3 dB, questa è la separazione nella lunghezza d'onda tra i punti su entrambi i lati della lunghezza d'onda di Bragg dove la riflettività è scesa al 50 per cento del suo valore massimo.

Tuttavia, una quantità molto più semplice per calcolare è la larghezza di banda è la lunghezza d'onda dove negli spettri di riflessione si verifica il primo zero $\Delta\lambda_0 = \lambda_0 - \lambda_B$, dove λ_0 è la lunghezza d'onda in cui si verifica il primo zero nello spettro di riflessione.

Questa larghezza di banda può essere trovata calcolando la differenza tra le costanti di propagazione $\Delta\beta_0 = \beta_0 - \beta_B$ dove $\beta_0 = 2\pi N_{eff} / \lambda_0$.

In caso di gratings deboli ($\kappa L < 1$), $\Delta\beta_0 = \beta_0 - \beta_B = \pi/L$ da cui può essere ricavato che $\Delta\lambda_{FWHM} \sim \Delta\lambda_0 = \lambda_B^2 / 2N_{eff} L$; la bandwidth di un grating debole è inversamente proporzionale alla lunghezza del grating, L, quindi deboli gratings possono avere bandwidths molto strette .

Per quanto riguarda il grating forte, ($\kappa L > 1$), $\Delta\beta_0 = \beta_0 - \beta_B = 4\kappa$, $\Delta\lambda_{FWHM} \sim 2\Delta\lambda_0 = 4\lambda_B^2 \kappa / \pi N_{eff}$, invece la bandwidth è direttamente proporzionale al coefficiente di accoppiamento ed è indipendente dalla lunghezza del grating.

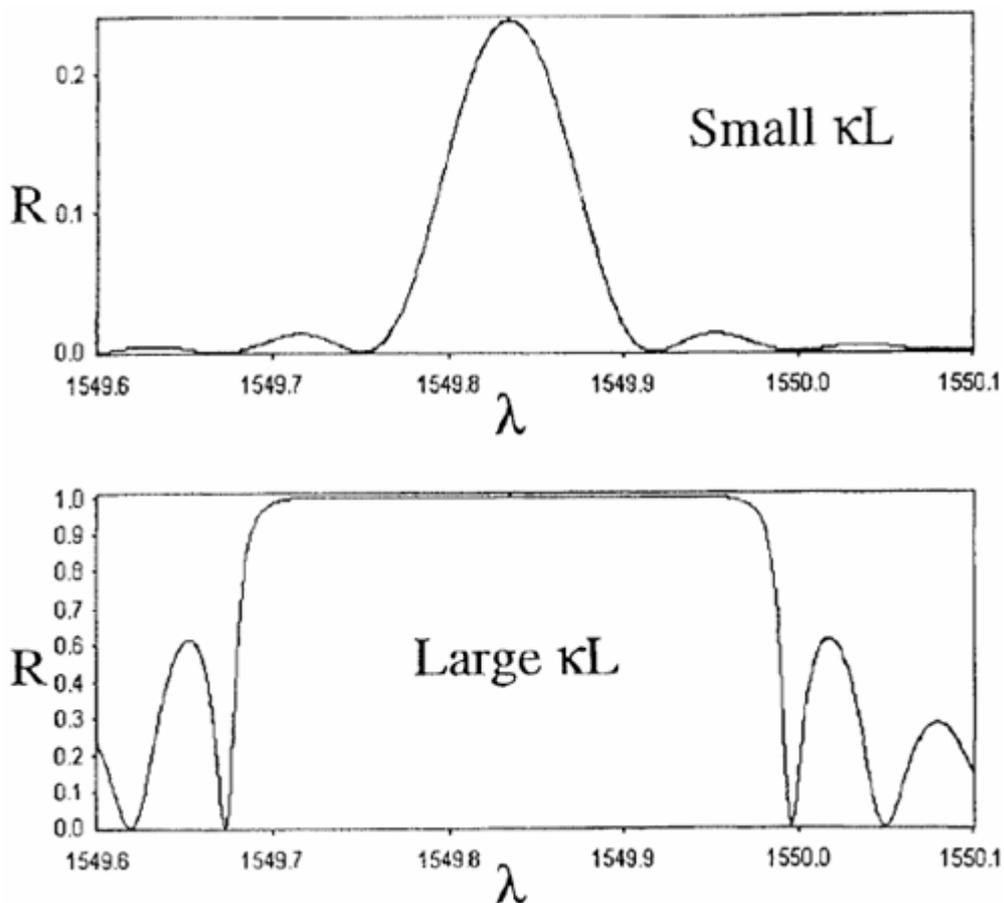


Figura 2.2 Tipici spettri di riflessione per grating deboli (sopra) e forti(sotto),(Handbook of Optics Vol. IV)

2.2 RELAZIONE DEFORMAZIONE SPOSTAMENTO λ_B

Come già detto, l'ordine più basso di risonanza di Bragg per la riflessione modale si verifica intorno alla lunghezza d'onda $\lambda_B = 2 N_{eff} \Lambda$; lo spostamento di questa frequenza indotto dalla deformazione può essere derivato come:

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} \approx (1 - p_\varepsilon)\varepsilon \quad (2-2)$$

Dove p_ε è la costante fotoelastica della fibra, che tiene conto della variazione dell'indice di rifrazione con la tensione assiale. Per la maggior parte delle fibre ottiche di silice, essendo l'effetto del drogaggio del nucleo (tipicamente con Germanio) trascurabile, si prende il valore del costante fotoelastica tipico della silice fusa pari a $p_\varepsilon \approx 0.22$ e si ha:

$$\frac{\delta\lambda_B}{\lambda_B} \approx 0.78\varepsilon \quad (2-3)$$

Quando una fibra viene allungata, la deformazione ε è correlata alla forza applicata F tramite il modulo elastico E_{silice} e l'area della sezione trasversale A_{fibra} :

$$\varepsilon = F / (E_{silice} A_{fibra}) \quad (2-4)$$

Da letteratura, (Black, et al., 2015), si ottiene un valore di $E_{silice} \approx (72.9 \pm 1.6)GPa$.

Se si considera questo valore per una fibra avente diametro 125- μm si ottiene:

$$\frac{\varepsilon}{F} = \frac{1}{E_{silice} A_{fibra}} \approx 1.12 \mu\varepsilon / gms^{-2} \quad (2-5)$$

Tenendo conto del coefficiente fotoelastico e delle equazioni (2-3)-(2-4) come del modulo di Young E_{silice} si ottiene per una fibra di silice con diametro 125 μm :

$$(\delta\lambda_B/\lambda_B)/F \approx 0.087 \% / N \quad (2-6)$$

Alla luce delle equazioni precedenti (2-3)-(2-6), per una lunghezza della Bragg wavelength centrale (quando la fibra non è sollecitata) di 1550nm (valore tipico) si ha:

$$\frac{\delta\lambda_B}{F} \approx 1.35 \frac{nm}{N} \quad (2-7)$$

$$\frac{\delta\lambda_B}{\delta\varepsilon} \approx 1.21 \frac{pm}{\mu\varepsilon} \quad (2-8)$$

2.3 PRODUZIONE DI FIBER GRATINGS

Inscrivere otticamente un fiber Bragg grating nel nucleo di una fibra ottica richiede l'irraggiamento del nucleo con un pattern di interferenza periodica. Storicamente, questo veniva ottenuto tramite l'interferenza della luce che si propagava in una direzione lungo una fibra ottica con la luce riflessa dall'estremità della fibra e propagantesi nella direzione opposta. Questo metodo per la formazione di reticoli in fibra è nota come *internal writing technique* e le griglie erano chiamate *Hill gratings*.

I reticoli di Bragg, formati dalla *internal writing technique*, soffrono della limitazione che lunghezza d'onda della luce riflessa è vicino alla lunghezza d'onda a cui vengono scritti i gratings.

Un secondo metodo per fabbricare gratings è la *transverse holographic technique*, che è mostrata schematicamente in *Figura 2.3*.

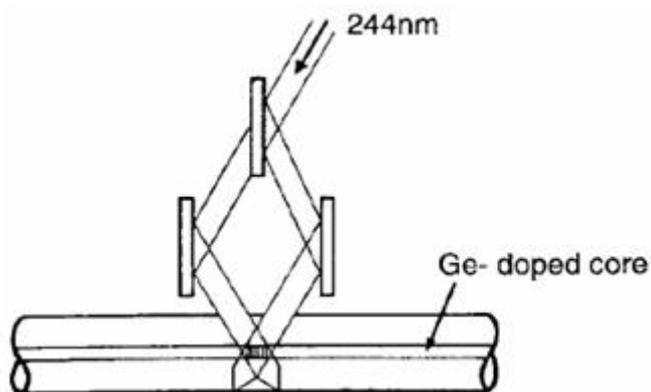


Figura 2.3 Transverse holographic technique, (Handbook of Optics Vol. IV)

La luce proveniente da una sorgente ultravioletta è divisa in due fasci che sono riuniti in modo che si intersechino con un certo angolo, come mostra la *Figura 2.3*, l'intersezione dei fasci di luce forma un pattern di interferenza che viene focalizzato utilizzando lenti cilindriche sul nucleo della fibra ottica.

A differenza della *internal writing technique*, il nucleo della fibra è irradiato dal lato, dando così origine al suo nome *transverse holographic technique*.

La tecnica funziona perché il rivestimento in fibra è trasparente alla luce ultravioletta, mentre il nucleo, contenente Germanio, assorbe fortemente la luce.

Poiché il periodo del reticolo dipende dall'angolo θ tra i due fasci coerenti interferenti attraverso la relazione $\Lambda = \lambda_{UV} / \sin(\theta/2)$ può essere prodotto un grating che riflette la luce a lunghezze d'onda molto più lunghe rispetto alla luce ultravioletta utilizzata nella sua fabbricazione; cosa importante perché permette agli FBG di essere resi funzionali in regioni di spettro che sono di interesse per la comunicazione in fibra ottica e il rilevamento ottico.

Una terza tecnica per la fabbricazione di FBG è la *phase mask technique*, che è illustrata in *Figura 2.4*. La *phase mask* è costituita da una lastra piana di vetro di silice che è trasparente all'ultravioletto.

Su una delle superfici piate viene incisa una struttura di rilievo superficiale periodica unidimensionale usando tecniche fotolitografiche. La forma del motivo periodico si avvicina a un'onda quadra e la fibra ottica è posizionata quasi a contatto e perpendicolarmente alle corrugazioni della maschera di fase.

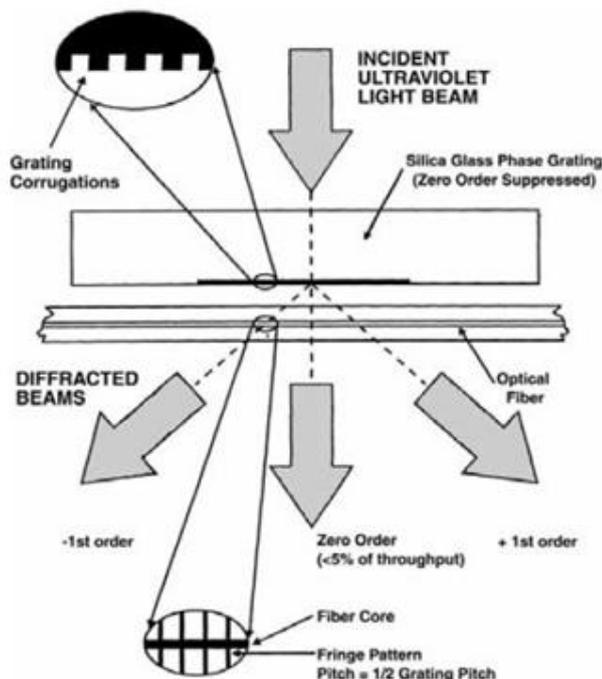


Figura 2.4 Phase mask tecnica, (Handbook of Optics Vol. IV)

La luce ultravioletta, che è incidente perpendicolarmente alla *phase mask*, passa attraverso di essa e viene diffratta dalle corrugazioni periodiche della maschera di fase. Normalmente, la maggior parte della luce diffratta è contenuta negli ordini diffratti 0, 1 e -1 (Figura 2.4), però, la maschera di fase e la profondità delle ondulazioni, sono progettate in modo da sopprimere la diffrazione nell'ordine zero. In pratica, la quantità di luce nell'ordine zero può essere ridotto a meno del 5% con circa l'80% dell'intensità della luce totale divisa equamente negli ordini 1 e -1.

I due fasci di ordine 1 e -1 diffratti interferiscono generando un pattern periodico che imprime una griglia corrispondente nella fibra ottica.

Se il periodo della *phase mask* è Λ_{mask} il periodo dell'indice di rifrazione è $\Lambda_{\text{mask}}/2$ quindi questo periodo è indipendente dalla lunghezza d'onda della luce ultravioletta che irradia la maschera di fase.

2.4 ACCELEROMETRO FBG

I sensori FBG superano i sensori elettrici convenzionali in molti aspetti, ad esempio, l'immunità alle interferenze elettromagnetiche, le dimensioni compatte, il peso leggero, la flessibilità, la stabilità, la tolleranza alle alte temperature e la resistenza ad ambienti difficili (Baldwin, et al.). Ulteriori vantaggi dei sensori FBG includono perdita di inserzione molto bassa, linearità in risposta su molti ordini di grandezza e compatibilità con il sistema di fibre ottiche esistente.

Uno dei vantaggi più importanti offerti dalla tecnologia dei sensori a reticolo di Bragg è il multiplexing.

Il multiplexing seriale implica l'uso della selettività della lunghezza d'onda dei sensori FBG per multiplexare molti sensori entro una determinata banda dopo l'illuminazione a banda larga o con luce bianca.

Come mostrato in *Figura 2.5*, il multiplexing seriale viene realizzato producendo una fibra ottica con una sequenza di reticoli di Bragg separati fisicamente, ciascuno con differenti *pitch*. Lo spettro riflesso contiene una serie di picchi, ciascuno caratterizzato da una lunghezza d'onda di Bragg diversa, associabile ad altrettanti differenti sensori.

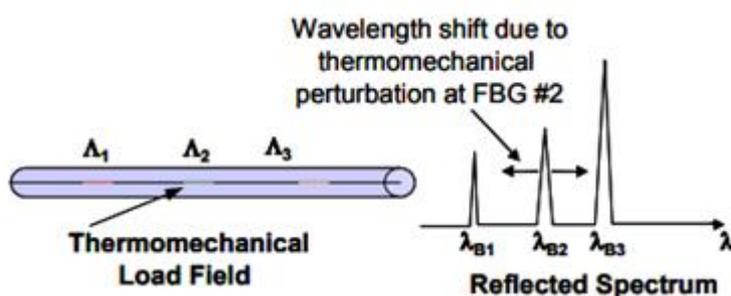


Figura 2.5 Multiplexing di Bragg gratings (Baldwin, et al.)

Affinché un sensore FBG funzioni come un accelerometro, l'accelerazione deve essere accoppiata a un carico meccanico sull'FBG che ne determini la deformazione. Lo spostamento risultante della lunghezza d'onda viene quindi calibrato al livello di accelerazione. Si possono immaginare più schemi per costruire tali dispositivi e più fornitori offrono questi tipi di sensori come prodotti commerciali. Il design dell'accelerometro determina le caratteristiche del sensore: risposta in frequenza, massima accelerazione e sensibilità del sensore (in termini di spostamento della lunghezza d'onda in funzione dell'accelerazione).

A fine esemplificativo, un semplice modello di accelerometro basato su di un sistema massa-molla (Wu, et al., 2014) viene rappresentato nella *Figura 2.6*, in cui si ha un cilindro elastico che agisce come una molla collegata a una massa inerziale.

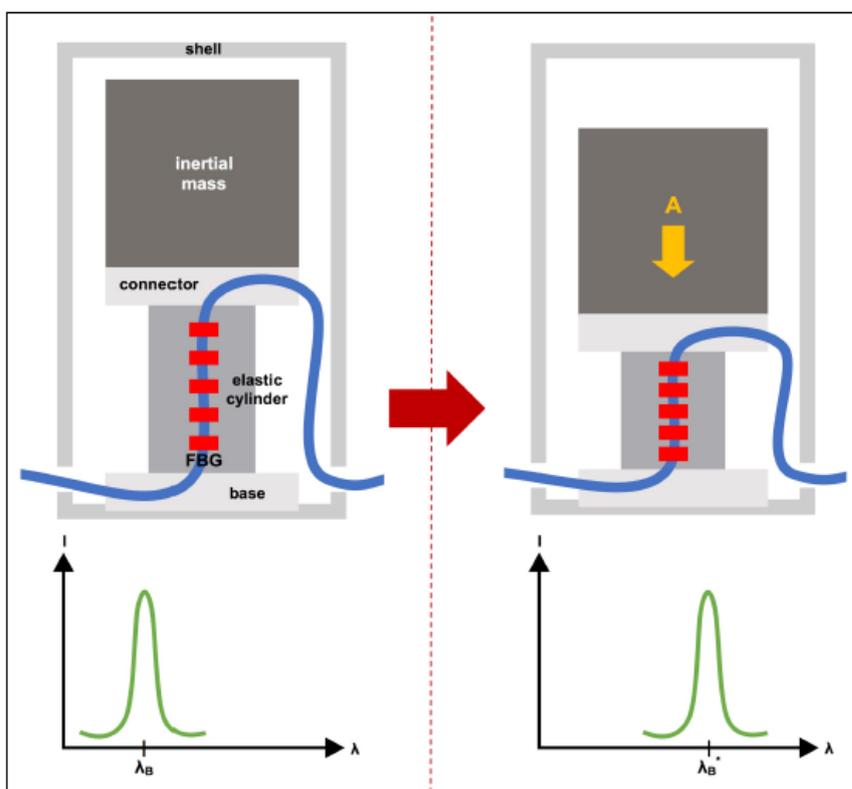


Figura 2.6 Esempio accelerometro FBG (Wu, et al., 2014)

3 STRUMENTAZIONE

La strumentazione, di cui verrà verificato il funzionamento nelle prove successive, viene riportata in questo capitolo; consiste di un sistema commerciale di accelerometri basati su tecnologia FBG e di un apparato di interrogazione in grado di misurare la frequenza di Bragg degli accelerometri ed il suo spostamento quando questi ultimi sono soggetti a sollecitazioni.

3.1 ACCELEROMETRO FBG

L'accelerometro FS65 della HBM è un sensore basato sulla tecnologia Fiber Bragg Grating, utilizzabile per un vasto range di applicazioni dove sono presenti basse frequenze e vibrazioni con piccole ampiezze.



Figura 3.1 Accelerometro FS65 della HBM

In *Figura 3.2* sono mostrate le specifiche date dal produttore.

Sensore	
Sensibilità	$\approx 50 \frac{pm}{g} @ 40Hz$
Range di misura	$\pm 10 g$
Range di frequenze	0 - 50 Hz
Frequenza di risonanza	$\approx 430 Hz$
Flattness	< 2%
Risoluzione	$12.5 \mu g / \sqrt{Hz}$
Sensitività trasversale	< 0.1%
Proprietà ottiche	
Lunghezza d'onda centrale	1500 – 1600 nm
Larghezza spettrale (FWHM)	< 0.2 nm
Riflettività	> 65%
Caratteristiche meccaniche	
Materiale	Alluminio
Dimensioni	73 × Ø53 mm
Peso	250 g
Classe di protezione	IP68

Figura 3.2 Specifiche accelerometro FS65

Ogni sensore HBM viene fornito con un foglio di calibrazione. Il layout di questo documento è lo stesso per tutti gli accelerometri e contiene informazioni quali: Informazioni generali come il tipo, il numero di serie e il numero di tracciamento della produzione.

Dati di calibrazione come lunghezza d'onda centrale a temperatura ambiente e la sensibilità.

3.2 INTERROGATORE

L'interrogatore è il *si155* prodotto dalla *Micron Optics*:

Il nucleo centrale del core x55 è la tecnologia di swept wavelength laser. Il laser è in grado di scansionare un'ampia gamma di lunghezze d'onda da 1460 a 1620 nm alle velocità dinamiche fino a 1 kHz “con un basso grado di rumore e jitter” per supportare le misurazioni con precisione di lunghezza d'onda di 1 pm (da manuale *Micron Optics*).



Figura 3.3 Interrogatore si155

In *Figura 3.4* sono mostrate le specifiche date dal produttore.

Performance	
Opzione di misura	Standard (1000Hz)
Numero di canali	4 canali
Range lunghezze d'onda	1460 – 1620 nm
Accuratezza/Stabilità	1pm/1pm
Ripetibilità	1pm/0.05pm @ 1Hz
Range dinamico	25dB peak
Proprietà fisiche	
Dimensioni	206mm×274mm×79mm
Peso	3 kg
Voltaggio di input	9-36 VDC, AC/DC converter included (100 – 240 VAC, 47-63Hz)
Consumo di potenza @12V	30 W typ,40 max

Figura 3.4 Specifiche interrogatore si155 della Micron optics

4 ACQUISIZIONE SEGNALI

L'interrogatore acquisisce ed elabora dati a spettro completo a una frequenza di 1kHz. I dati sorgente vengono elaborati dall'algoritmo di rilevamento dei picchi di riflessione interno all'interrogatore, che viene brevemente illustrato nei paragrafi successivi.

Il primo passo nel rilevamento dei segnali provenienti sensori è la conversione della luce in elettricità, che è effettuata grazie a dei fotodiodi. L'uscita di corrente del fotodiode viene convertita in tensione da un amplificatore a transimpedenza ad alta larghezza di banda, il cui segnale di uscita viene convertito in un segnale digitale.

La prima fase di elaborazione del segnale digitale nell'algoritmo consiste nel filtrare il rumore ad alta frequenza e sopprimere i modi spettrali indesiderati dal rilevamento. Questi obiettivi sono raggiunti applicando un filtro *Boxcar* (media mobile) allo spettro grezzo. È possibile esprimere la lunghezza del filtro BoxCar in unità di pm (picometri).

La rappresentazione digitale del picco di riflessione determinato dal FBG è mostrata in *Figura 4.1* dove è presente la curva del segnale grezzo (blu) e quella del segnale filtrato (azzurro).

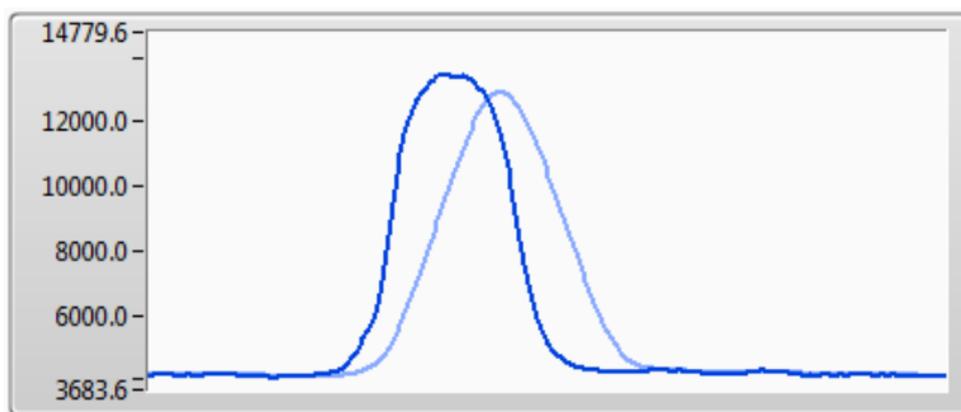


Figura 4.1 Rappresentazione digitale dello spettro di riflessione prima (curva blu) e dopo (curva azzurra) il filtraggio

Una volta che il segnale è stato liscio dalla *Boxcar*, viene convertito in un segnale differenziato mediante un *Difference Filter*. Sebbene sia possibile definire una lunghezza del filtro diversa dal filtro *Boxcar*, viene raccomandato dal manuale che la lunghezza del *Difference Filter* sia uguale a quella del primo.

Il segnale nero nella *Figura 4.4* mostra il risultato della differenziazione del segnale filtrato dalla *Boxcar*.

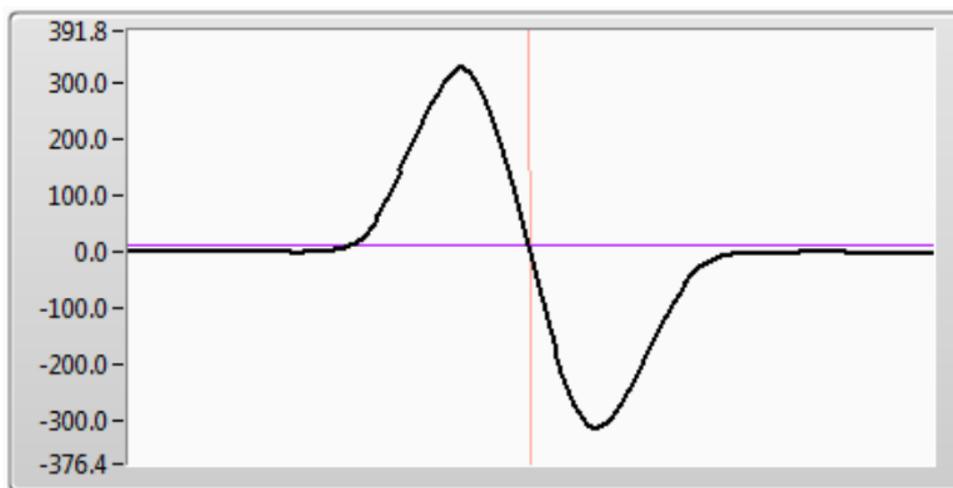


Figura 4.2 Segnale differenziato (in nero), zero crossing (linea arancione), threshold (viola)

L'ampiezza del segnale differenziato rappresenta la pendenza del segnale filtrato dalla *Boxcar*. Ne consegue che il punto in cui il segnale differenziato incrocia lo zero (cioè la pendenza del segnale originale è uguale a zero) rappresenta la posizione del picco del segnale. Si può vedere dal grafico di *Figura 4.2* che il segnale differenziato in realtà assume nella maggior parte del suo dominio valori vicini allo zero, in questo modo ci sono molti più passaggi a zero di quelli realmente validi lungo lo spettro. Per garantire che vengano considerati solo gli attraversamenti dallo zero validi, viene introdotto un controllo *Threshold* nell'algoritmo. La soglia è rappresentata dalla linea orizzontale viola nell'immagine sopra.

Il valore di *threshold* è impostato in modo tale che i segnali di zero crossing saranno validi se vengono generati durante una finestra specificata dopo che il segnale differenziale ha attraversato la soglia specificata. La finestra per la considerazione dello zero crossing si apre con un incrocio positivo del segnale differenziato (nero attraverso il valore di soglia) e viene tenuta aperta per un periodo di tempo specificato come periodo NTV

Nell'acquisire i dati verrà utilizzato un insieme di parametri preimpostati, in particolare il 0,25 nm Peak Default preset, che è consigliato dal manuale per sensori FBG, il quale utilizza un filtro *boxcar* di lunghezza 250pm.

4.1 TAB ACQUISIZIONE

All'avvio, il software ENLIGHT della *Micron Optics*, installato su di un computer portatile, stabilisce una connessione tramite cavo Ethernet (Figura 4.3) all'interrogatore; il software è configurato automaticamente per la connessione al core interno dell'interrogatore.

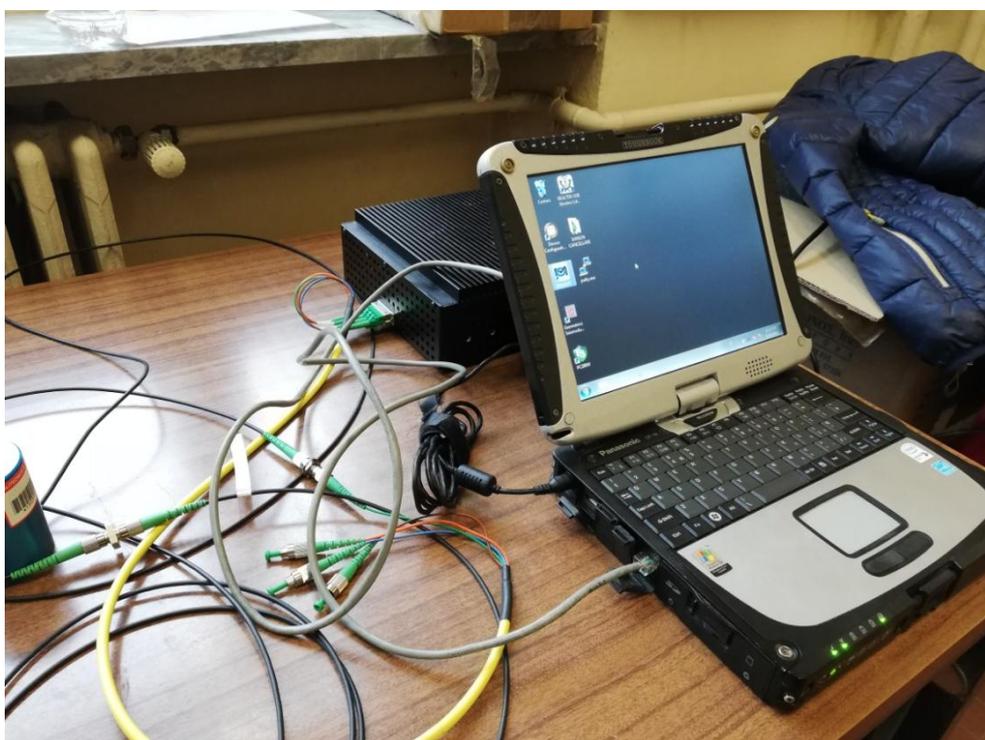


Figura 4.3 Connessione del PC all'interrogatore tramite cavo ethernet

Una volta stabilita la connessione con l'interrogatore l'interfaccia utente di ENLIGHT viene caratterizzata inizialmente dalla scheda Acquisizione. In questa prima scheda operativa sono stabilite tutte le configurazioni di livello hardware di base dell'interrogatore. Lo scopo principale dell'Acquisition tab è di confermare che i componenti ottici dell'FBG siano stati effettivamente collegati all'interrogatore e che le informazioni spettrali vengano raccolte con successo dal sistema di misura.

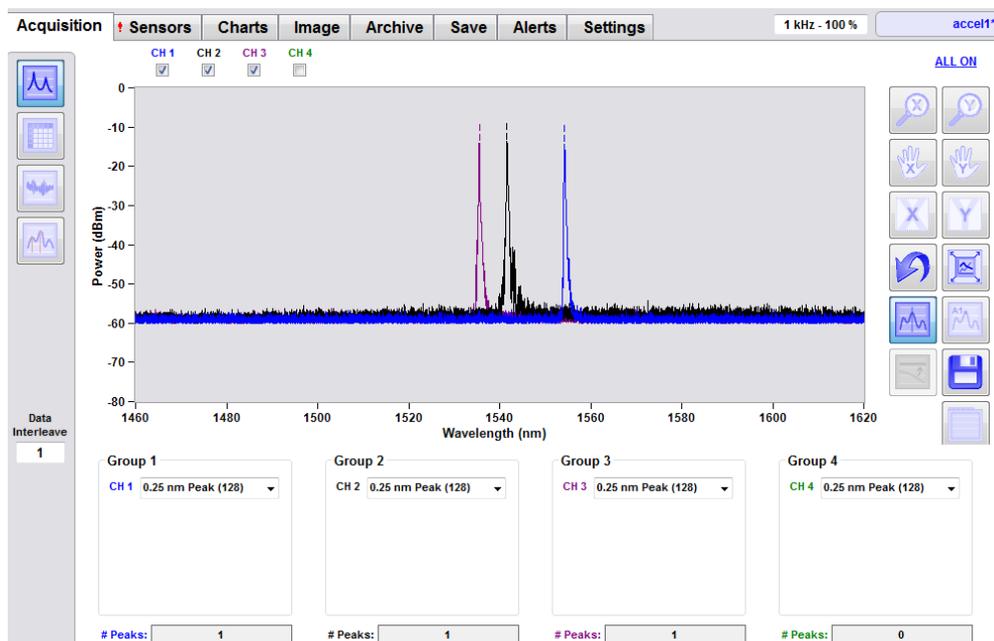


Figura 4.4 Screenshot della schermata di acquisizione con la rappresentazione contemporanea, in real time, dello spettro di riflessione proveniente di canali 1, 2 e 3 nella banda 1460nm-1620nm

Nella Figura 4.4 viene mostrato uno screenshot dell'*acquisition tab* dove si possono vedere tre picchi associati ad altrettanti sensori collegati ognuno ad un canale diverso. I piccoli trattini verticali sopra i picchi indicano che l'algoritmo di peak detection ha correttamente individuato i picchi che sono visivamente evidenti negli spettri.

L'output desiderato dall' *Acquisition tab* è la produzione di valori stabili e ripetibili delle lunghezze d'onda dei picchi spettrali che rifletta accuratamente la rete di sensori ottici da cui si vogliono ottenere le misure. Una volta che i picchi sono stati correttamente estratti dal modulo, il tab *Sensors* aggiungerà significato e valore a queste misurazioni non elaborate.

A sinistra della schermata, il controllo di interleave dei dati, consente all'utente di ridurre la velocità dei dati dall'interrogatore. Ad esempio, se un interleave 10 viene applicato al core dell' interrogatore da 1 kHz, i dati verranno trasmessi ad ENLIGHT ad una frequenza di 100 Hz.

4.2 SENSORS TAB

Una volta che lo spettro è stato raccolto, ed i picchi rilevati nella scheda Acquisizione, i valori della lunghezza d'onda corrispondente a picchi nello spettro sono pronti per l'uso nel successivo livello di elaborazione dei dati: il *Sensors tab*.

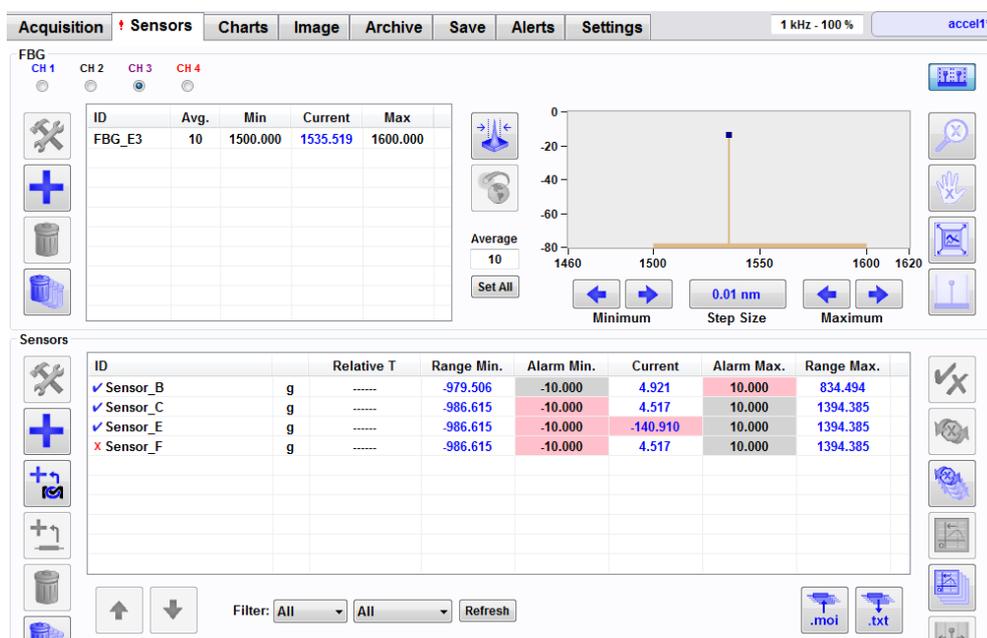


Figura 4.5 Sensors tab

La scheda Sensori (Figura 4.5) è la sezione del software ENLIGHT in cui ai picchi spettrali vengono assegnati determinati attributi e proprietà, venendo quindi definiti come *FBG*. Gli elementi *FBG* risultanti possono quindi servire come base per i calcoli di elementi calibrati di ordine superiore chiamati *sensori*. La scheda Sensori è suddivisa in due sezioni. La metà superiore della scheda tratta del concetto di *FBG*, mentre la metà inferiore tratta dei Sensori.

Questo controllo  crea automaticamente una raccolta di elementi FBG sul canale selezionato. Il numero di FBG creati sarà uguale al numero di picchi spettrali trovati nella scheda Acquisizione per il canale corrispondente.

La FBG ID è una variabile identificativa che viene associata a un *FBG* al momento della sua creazione in modo che le successive espressioni del sensore possano utilizzare la variabile all'interno di espressioni matematiche.

La metà inferiore della scheda Sensori è dotata degli strumenti per creare e gestire elementi *sensori*.

L'ID del sensore verrà utilizzato per tutti i grafici, i display di immagini, i registri eventi e i file di dati.

Cliccando sull'ID di un particolare sensore è possibile inserire manualmente una espressione che viene utilizzata per calcolare una nuova quantità (solitamente una quantità fisica come temperatura, deformazione, ecc) a partire da una combinazione di uno o più ID FBG e / o altri sensori.

Nel caso trattato in questa Tesi, i valori della lunghezza d'onda riflessa da ogni accelerometro verranno convertiti in valori di accelerazione utilizzando le espressioni di calibrazione presenti nei fogli, forniti dal produttore, contenenti le specifiche ed associati ad ogni accelerometro; In particolare moltiplicando la variazione della Bragg wavelength rispetto al valore centrale per l'inverso della sensibilità di ogni sensore è possibile ricavare il valore di accelerazione.

4.3 ACQUISIZIONE DI PROVA

Al fine di verificare il funzionamento del sistema di misura, 4 accelerometri sono stati posizionati su di un tavolo (*Figura 4.6*);

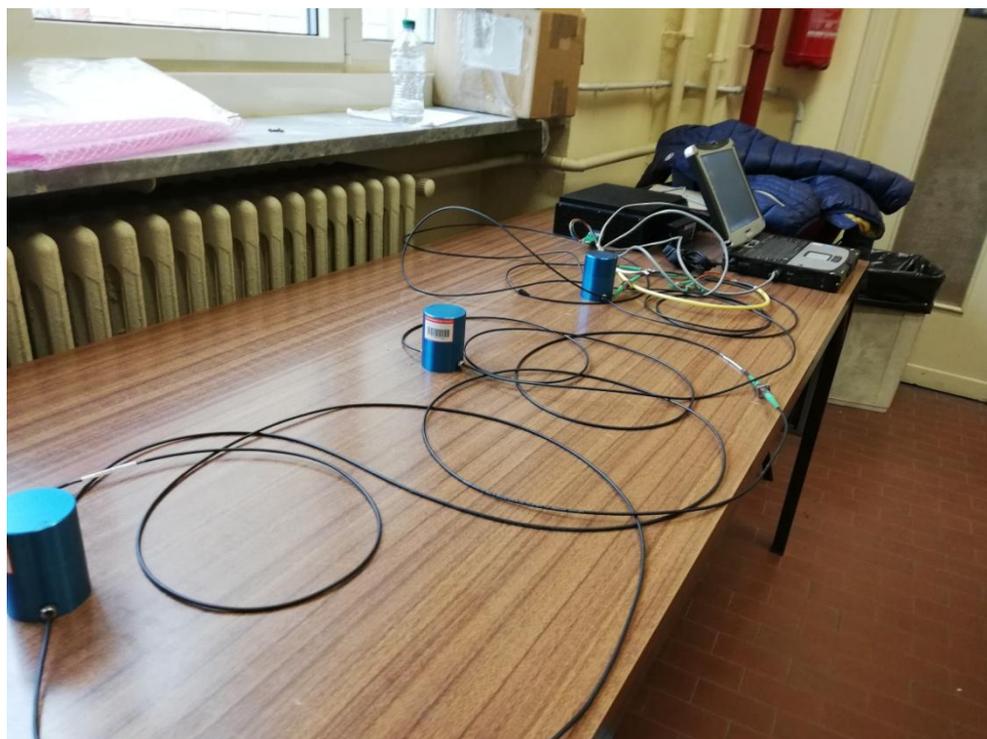


Figura 4.6 Posizionamento accelerometri su tavolo

per verificarne la multiplexabilità li si è collegati ad uno stesso canale (canale 1).

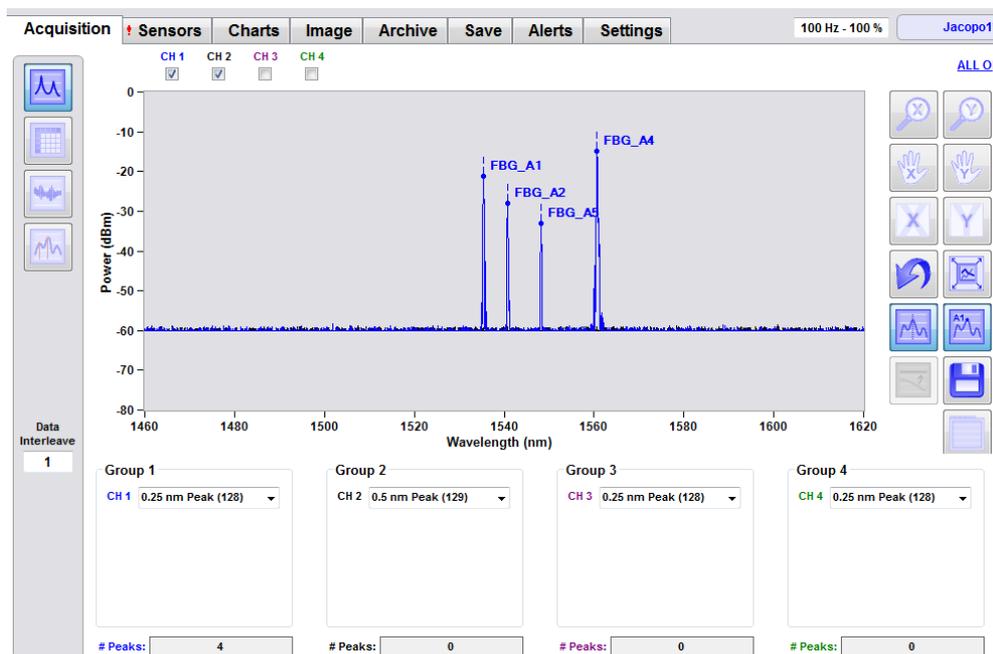


Figura 4.7 Tab acquisizione, con in evidenza i picchi di riflessione determinati dai 4 sensori collegati al canale 1

Come si osserva in *Figura 4.7* lo spettro osservato sul canale 1 possiede 4 picchi, questo perché ogni sensore è caratterizzato da una propria *Bragg wavelength* centrale leggermente diversa dagli altri sensori ed è quindi distinguibile da questi ultimi pur essendo collegato allo stesso canale.

I trattini verticali in corrispondenza di ogni picco confermano che è avvenuta con successo la rilevazione dei 4 sensori.

L'etichetta associata ad ogni picco rilevato indica che alla lunghezza d'onda riflessa dai sensori viene associata una variabile FBG.

Queste variabili FBG entrano quindi, come già detto, nella espressione di calibrazione specifica di ogni sensore.

Range

Min: Max:  Current:

Parameters

Active Visible Rate Of Change

ID:

Group:

Type:

Averages:

Minimum:

Maximum:

Warn Thresh.: (0.0 - 1.0)

Expression:

Expression is valid

Constants

Name	Value

Figura 4.8 Tab sensori, inserimento dell'espressione di calibrazione di un sensore

A titolo di esempio si riporta in *Figura 4.8* l'espressione di calibrazione inserita per il sensore 4 che consente di convertire lo spostamento della *Bragg wavelength* rispetto alla lunghezza d'onda centrale (*1560.730nm nel caso specifico*) in nm con l'accelerazione in g.

I valori dell'accelerazione misurati possono essere mostrati in tempo reale nel tab Charts (Figura 4.9).

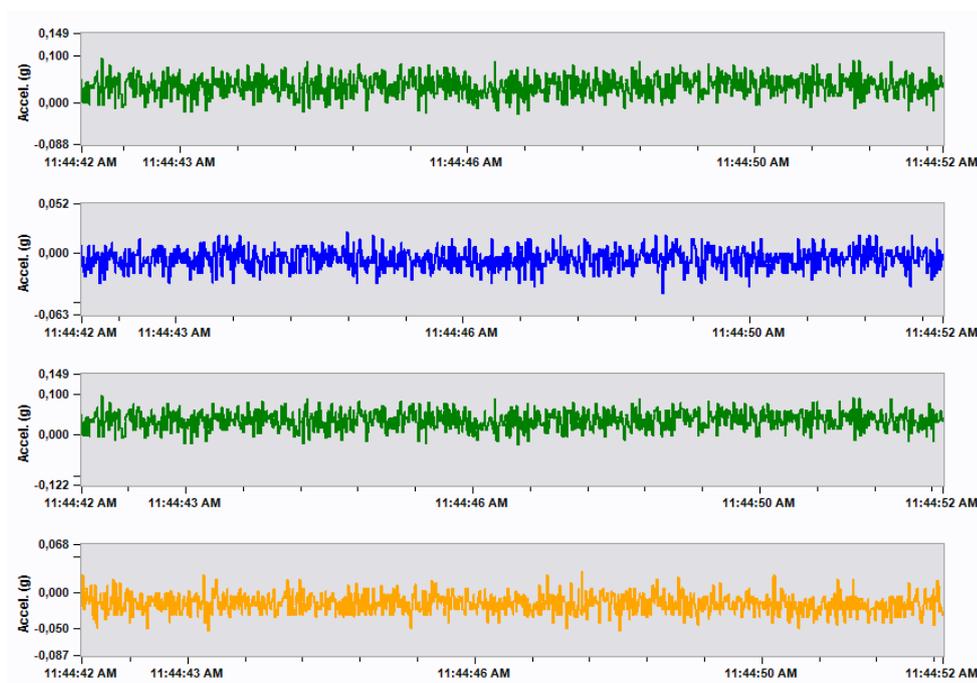


Figura 4.9 Tab charts, rappresentazione in tempo reale dei segnali provenienti dai sensori

Si è effettuata una registrazione di 18 secondi battendo 5 volte un martello di gomma sul tavolo in prossimità dell'estremità della stringa di accelerometri, in *Figura 4.10* sono mostrate le tracce dei 4 accelerometri.

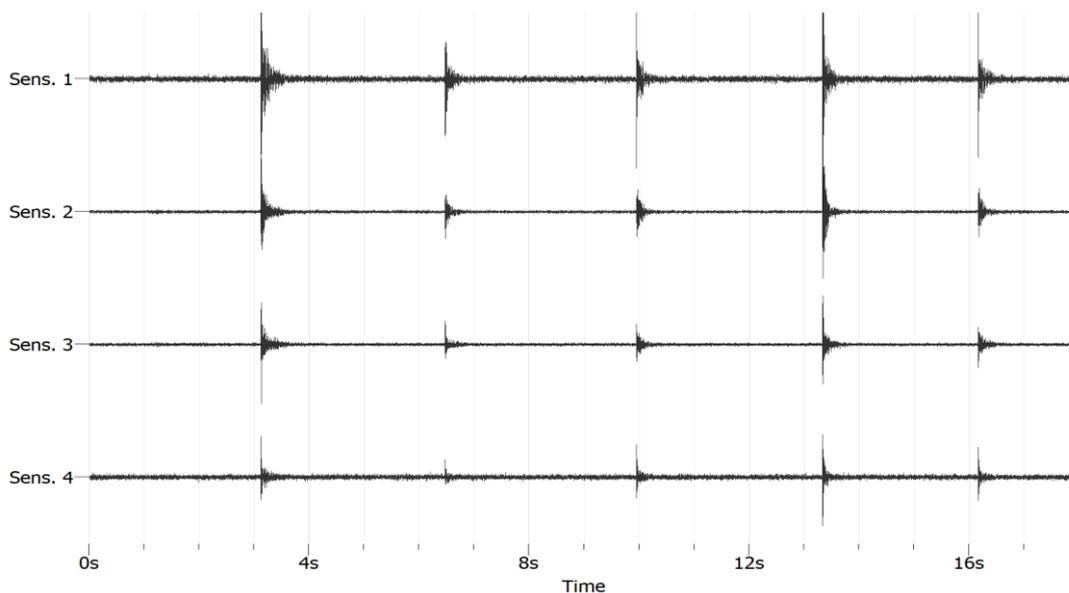


Figura 4.10 Rappresentazione tracce dei 4 accelerometri

Come si può osservare sono stati rilevate le cinque energizzazioni e si denota una diminuzione dell'ampiezza man mano che la distanza dell'accelerometro dalla sorgente aumenta. (Sensore da 1 a 4 progressivamente più distanti dalla sorgente).

5 PROVA HVSR

5.1 INTRODUZIONE

La tecnica HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) è una indagine di sismica passiva utile per recuperare informazioni sulle proprietà sismiche della parte superficiale del sottosuolo mediante misurazioni a stazione singola eseguite sulla superficie terrestre.

Questo metodo è ampiamente utilizzato nell'esplorazione sismica come strumento per una rapida rilevazione e valutazione degli effetti di amplificazione sismica in termini di frequenza di risonanza delle onde S e per caratterizzare le proprietà elastiche della struttura geologica superficiale (di solito sotto l'assunzione di stratificazione orizzontale).

Come espresso in (Nakamura, 2000) , l'autore che da il nome a questa tecnica, se si considera l'insieme delle vibrazioni ambientali come composto solo dalle onde P e S incidenti verticalmente insieme alle onde di Rayleigh, si può separare queste componenti scrivendo le ampiezze spettrali orizzontale e verticale della vibrazione sulla superficie terrestre come:

$$\begin{aligned}
 A_{\delta,surf}^{FW}(\omega) &= A_{\delta,surf}^{BW}(\omega) + A_{\delta,surf}^{SW}(\omega) \\
 &= T_{\delta}(\omega) * A_{\delta,bedrock}^{BW}(\omega) + A_{\delta,bedrock}^{SW}(\omega)
 \end{aligned}
 \tag{5-1}$$

dove $\delta = H, V$ significa componente orizzontale e verticale, BW sta per bodywaves (onde di volume), SW per onde di superficie e T_δ sono le funzioni di trasferimento orizzontale e verticale.

L'equazione (5-1) poi dà:

$$HV(\omega) = \frac{T_H(\omega) * A_{H,bedrock}^{BW}(\omega) + A_{H,surf}^{SW}(\omega)}{T_V(\omega) * A_{V,bedrock}^{BW}(\omega) + A_{V,surf}^{SW}(\omega)} \quad (5-2)$$

$$= \frac{A_{H,bedrock}^{BW}(\omega)}{A_{V,bedrock}^{BW}(\omega)} * \frac{T_H(\omega) + \frac{A_{H,surf}^{SW}(\omega)}{A_{H,bedrock}^{BW}(\omega)}}{T_V(\omega) + \frac{A_{V,surf}^{SW}(\omega)}{A_{V,bedrock}^{BW}(\omega)}}$$

che l'autore chiama "quasi transfer spectrum" (QTS).

Sulla base dell'ipotesi che il rapporto spettrale H/V al bedrock sia approssimativamente unitario, cioè:

$$A_{H,bedrock}^{BW}(\omega) / A_{V,bedrock}^{BW}(\omega) \simeq 1 \quad (5-3)$$

Eq. (5-2) mostra che, quando il contributo delle onde di superficie è trascurabile, la funzione HV è vicina a T_H / T_V .

Poiché si considera che le *bodywaves* siano incidenti verticalmente, l'oscillazione dell'onda P e dell'onda S costituiscono rispettivamente le componenti verticali e orizzontali della vibrazione della superficie. In questa teoria, l'amplificazione in onde P non è prevista vicino alla frequenza di risonanza dell'onda S, poiché la velocità dell'onda P si considera essere molte volte maggiore di quella dell'onda S, quindi la

funzione HV dovrebbe approssimarsi alla *transfer function* dell'onda S attorno alla sua frequenza di risonanza.

Se invece le onde di Rayleigh dominano, la funzione HV approssima il rapporto $A_{H, surf}^{SW} / A_{V, surf}^{SW}$, la cui frequenza di picco dovrebbe, secondo Nakamura, approssimare la frequenza di risonanza del sito dell'onda S.

Basandosi su altre forti assunzioni controverse (Bard 1998), l'autore conclude che il massimo della funzione HVSR rappresenta la frequenza di risonanza più bassa dell'onda S del sito e il fattore di amplificazione relativo, indipendentemente dal grado di influenza delle onde di Rayleigh.

Quello sopra descritto è, di fatto, la prima spiegazione teorica della curva H / V, la cui implicazione più importante è probabilmente che la frequenza di picco e l'ampiezza della funzione HVSR corrispondono alla frequenza di risonanza dell'onda S e al fattore di amplificazione del sito, rispettivamente. Sebbene questa descrizione sia probabilmente inadeguata, ha segnato una svolta e ha fatto la fortuna della tecnica H / V. Infatti, mentre l'affermazione sull'ampiezza si è dimostrata quasi sempre falsa, la corrispondenza tra risonanza dell'onda S e la frequenza de picco H / V è stata sempre confermata da allora, in innumerevoli esperimenti sul campo e con simulazioni numeriche(*Figura 5.1*).

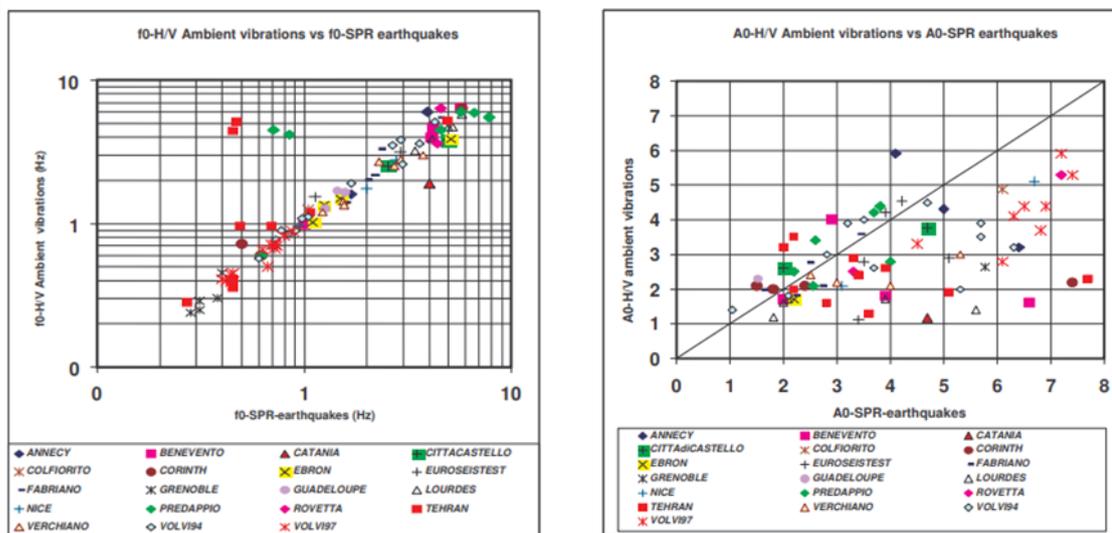


Figura 5.1 Comparazione tra il rapporto H/V di vibrazioni ambientali e rapporto spettrale di terremoti per frequenza di risonanza (sinistra) e ampiezza (destra), (SESAME, 2004).

Una volta stimata la frequenza di risonanza delle onde S con questa tecnica è possibile ricavare una stima dello spessore (H) dello strato di copertura superficiale, nota la velocità delle onde S (V_s) nello strato superficiale, con la nota formula:

$$f = V_s / 4H \quad (5-4)$$

Dal punto di vista sperimentale, questa tecnica richiede un'acquisizione delle 3 componenti del moto (una verticale e due orizzontali) e consiste nell'eseguire il rapporto tra lo spettro di ampiezza della componente orizzontale e di quella verticale, opportunamente mediato su un campione adeguato. Questo rapporto, che è funzione della frequenza, è chiamato curva H / V o HVSR .

Il rapporto viene solitamente calcolato utilizzando spettri di velocità del moto al suolo, ma è possibile utilizzare anche spettri di spostamento o di accelerazione.

5.2 PROCEDURA PREIMINARE

Si procede costruendo un accelerometro triassiale utilizzando 3 accelerometri *HBM FS65*, lo si assembla avvitando gli accelerometri solidamente ad una base di montaggio ed allineando gli accelerometri stessi nella rispettiva direzione di misura (*Figura 5.2*).

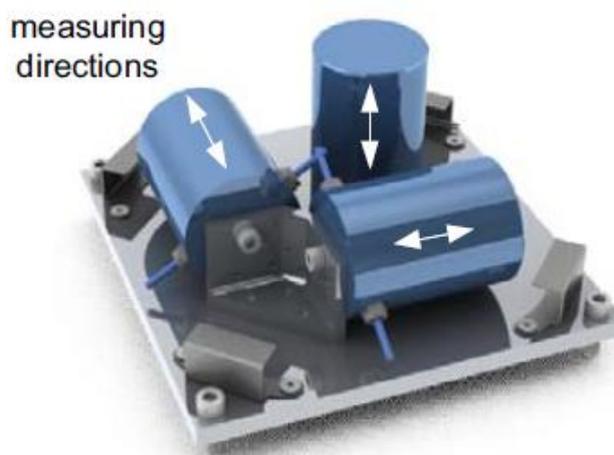


Figura 5.2 Illustrazione dell'assemblaggio dell'accelerometro triassiale (*Manuale HBM*)

Per valutare l'efficacia degli accelerometri ottici nell'effettuare questo tipo di misure di sismica passiva, in cui si vogliono misurare dei microtremori, si è deciso di confrontarne i risultati con un sismometro PFC_130B della *Reftek*.

Il Luogo in cui si sono posizionati gli strumenti di misura si trova presso la palazzina di caccia di Stupinigi (*Figura 5.3*) ad una distanza dalla strada provinciale 143 (100m) tale da ridurre l'effetto preponderante di sorgenti quali il passaggio di automobili.



Figura 5.3 Luogo di effettuazione della prova presso Stupinigi (freccia gialla)

Il suolo in corrispondenza della postazione di misura è privo di erba e piano in modo da ridurre gli effetti distorsivi dati dalla presenza di copertura superficiale erbosa o di asfalto, e dell'angolo di tilt della strumentazione (*Figura 5.4*).



Figura 5.4 Sismometro e accelerometro triassiale posizionati in corrispondenza del punto di misura

Al fine di ottenere la funzione HVSR si è usufruito del programma open source *Geopsy*, nato durante il progetto europeo SESAME nel 2005 e sviluppato specificamente per applicazioni geofisiche.

La procedura per ottenere le curve H/V è riassunta nei seguenti passi:

Acquisizione:

Sono state acquisite due tracce della lunghezza di 15 minuti ciascuna (*Figura 5.5*) con frequenza di campionamento di 100Hz, che è sufficiente ad indagare frequenze fino a 50Hz per il noto teorema di Nyquist.

Le acquisizioni vengono effettuate utilizzando in parallelo sia l'accelerometro triassiale basato su tecnologia FBG che il sismometro per effettuare la comparazione.

La lunghezza delle acquisizioni è tale da consentire di indagare basse frequenze fino ad 1 Hz (*Figura 5.6*)



Global time range

From T0 0s

To End 14m59.9900s

Reference signal

Figura 5.5 Selezione su Geopsy della finestra temporale in cui effettuare le analisi

Finestratura:

Ciascuna traccia viene suddivisa in finestre di uguale dimensione: si sono utilizzate finestre da 15 secondi con overlap del 5% (*Figura 5.7*).

Affinché la misura sia affidabile viene raccomandato (SESAME, 2004) di soddisfare la condizione $f_0 > 10 / l_w$. Dove l_w è la lunghezza temporale della finestra e f_0 la frequenza che si vuole indagare.

Questa condizione fa sì che, in corrispondenza della frequenza più bassa che si voglia indagare, ci siano almeno 10 cicli significanti in ogni finestra.

Per avere un alto numero di cicli totali è inoltre necessario avere un adeguato numero di finestre; viene raccomandato che il numero totale di cicli significativi: $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_0$ debba essere maggiore di 200 (che significa, per esempio, per un picco a 1 Hz, ci sono almeno 20 finestre da 10 s ciascuna, oppure, per un picco a 0,5 Hz, 10 finestre da 40 s ciascuna o 20 finestre da 20 s, ma non da 40 finestre da 10 s), vedere la *Figura 5.6*.

f_0 [Hz]	Minimum value for l_w [s]	Minimum number of significant cycles (n_c)	Minimum number of windows	Minimum useful signal duration [s]	Recommended minimum record duration [min]
0.2	50	200	10	1000	30'
0.5	20	200	10	400	20'
1	10	200	10	200	10'
2	5	200	10	100	5'
5	5	200	10	40	3'
10	5	200	10	20	2'

Figura 5.6 Durata delle registrazioni raccomandata (SESAME, 2004)

Siccome l'obiettivo è di considerare le parti più stazionarie delle vibrazioni ambientali e di evitare i transienti spesso associati a fonti specifiche (passi, traffico), questi dovrebbero essere rimossi dal segnale che viene elaborato: la durata totale della registrazione dovrebbe essere quindi aumentata, al fine di soddisfare le condizioni sopra menzionate per ottenere un numero

soddisfacente di finestre contenente segnale di "buona qualità", viene per questo motivo utilizzato un algoritmo anti-trigger integrato nel programma *Geopsy* per trascurare i transienti.

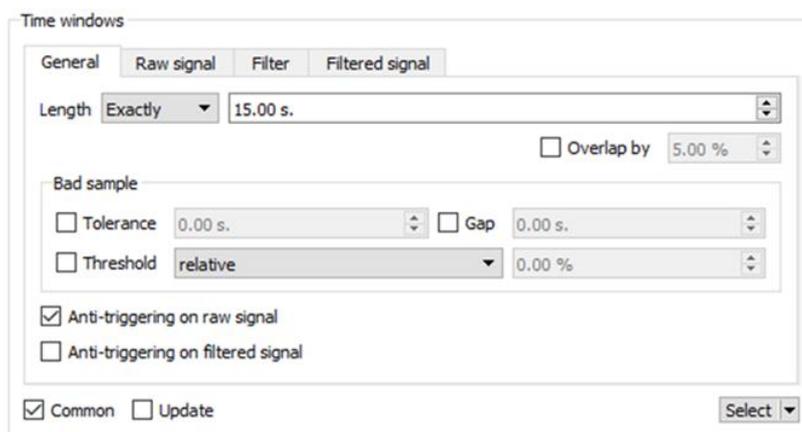


Figura 5.7 Selezione su *Geopsy* della lunghezza finestre escludendo i tratti del segnale con transienti

Tapering:

Il *tapering* viene effettuato per ridurre al minimo gli effetti di bordo dovuti all'estrazione di una finestra, in modo da migliorarne le proprietà nel dominio della frequenza.

Viene utilizzata per il tapering una *cosine window*.

Window type



Figura 5.8 Definizione su *Geopsy* della tipologia finestra di tapering

Calcolo spettri:

Si calcola la *power spectral density* (PSD) per ogni finestra, che da informazioni su come la potenza del segnale è distribuita sulle varie frequenze.

Gli spettri grezzi contengono molti campioni di frequenza e generalmente mostrano molte oscillazioni e picchi molto stretti che ne alterano la leggibilità. Inoltre, calcolando il rapporto H/V, valori molto piccoli raggiunti dagli spettri grezzi portano a valori insoliti del rapporto. Per questo motivo prima di effettuare il rapporto H/V gli spettri delle 3 componenti sono "lisciati" per ridurre la variabilità stocastica nella stima delle ordinate spettrali; viene utilizzato a questo scopo la funzione "Konno-Ohmachi":



Figura 5.9 Smoothing degli spettri tramite la funzione Konno Ohmachi

Una volta ottenuti gli spettri lisciati si calcola, per ogni finestra il rapporto H/V dividendo la media quadratica degli spettri nelle direzioni orizzontali per lo spettro in direzione verticale.

Si effettua quindi la media delle curve H/V delle finestre in cui sono state suddivise le tracce ottenendo in questo modo la curva HVSR.

5.3 REGISTRAZIONI

Si riportano in questo capitolo i risultati delle registrazioni delle tracce ed i grafici rappresentanti le curve HVSR ottenute tramite la prova.

Registrazione Accelerometri FBG:

Sono rappresentate le tracce ottenute dai 3 accelerometri (*Figura 5.10*) allineati rispettivamente nella direzione Nord-Sud (N), Est-Ovest(E), e verticale (Z).

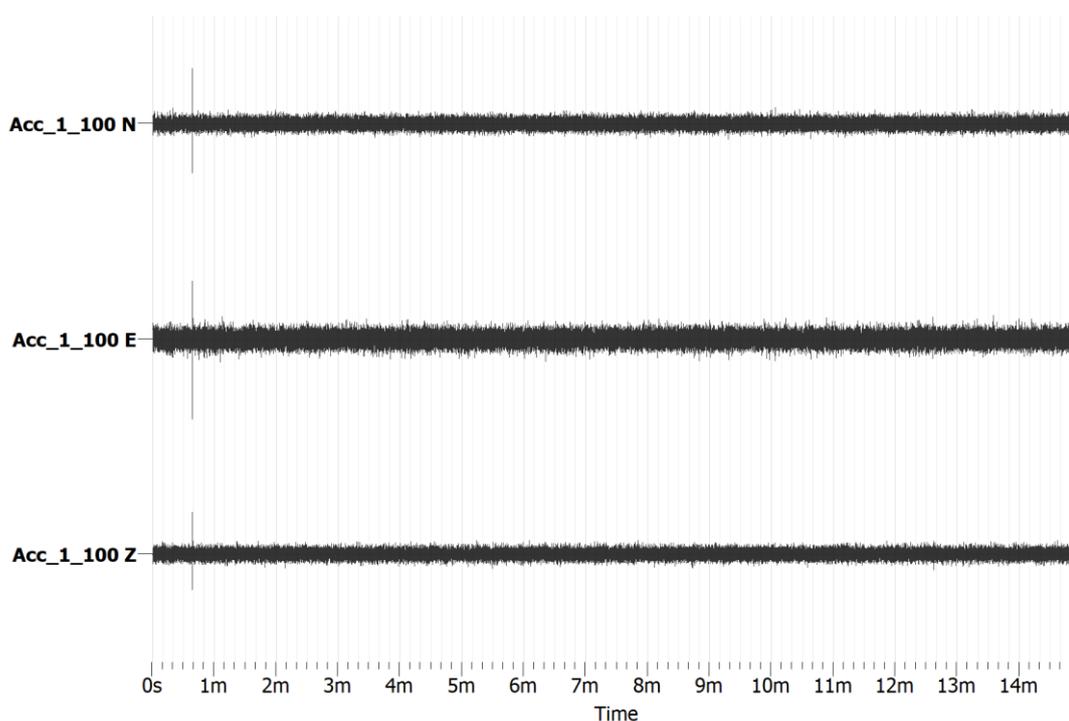


Figura 5.10 Tracce accelerometro triassiale FBG ottenute da una registrazione di 15min

Si osserva come apparentemente, a parte la energizzazione iniziale, ottenuta colpendo una piastra metallica con una mazza e per sincronizzare i dati tra accelerometro e sismometro, i tre segnali siano costituiti da rumore, la cui entità sembra essere correlata alla leggermente diversa sensibilità degli accelerometri utilizzati. (l'ampiezza delle oscillazioni dell'accelerometro in direzione E-W appaiono essere maggiori rispetto agli altri due sensori, questo poiché il sensore ha una sensibilità leggermente inferiore).

Viene riportata di seguito (Figura 5.11), a titolo di esempio, una traccia, misurata dall'accelerometro montato verticalmente, in cui si osserva che la ampiezza delle oscillazioni si aggira attorno al valore di 0.01g.

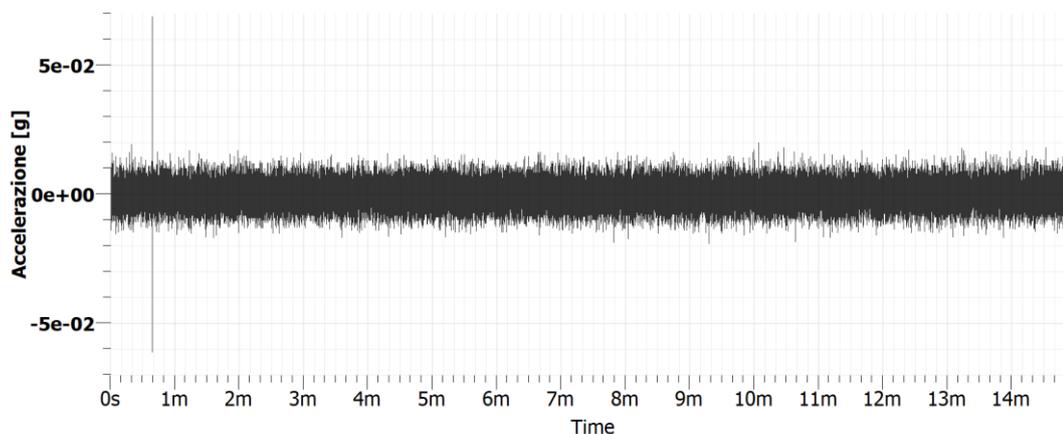


Figura 5.11 Traccia singola ottenuta dall'accelerometro allineato in direzione verticale

Registrazione Sismometro:

Sono rappresentate le tracce ottenute dal sismometro nelle 3 direzioni (*Figura 5.12*): rispettivamente verticale (Z), Nord-Sud (N), Est-Ovest(E), i valori di velocità misurati sono stati trasformati in accelerazione, con apposito script Matlab, prima di essere plottati sul grafico in modo da essere confrontabili con i valori misurati dagli accelerometri.

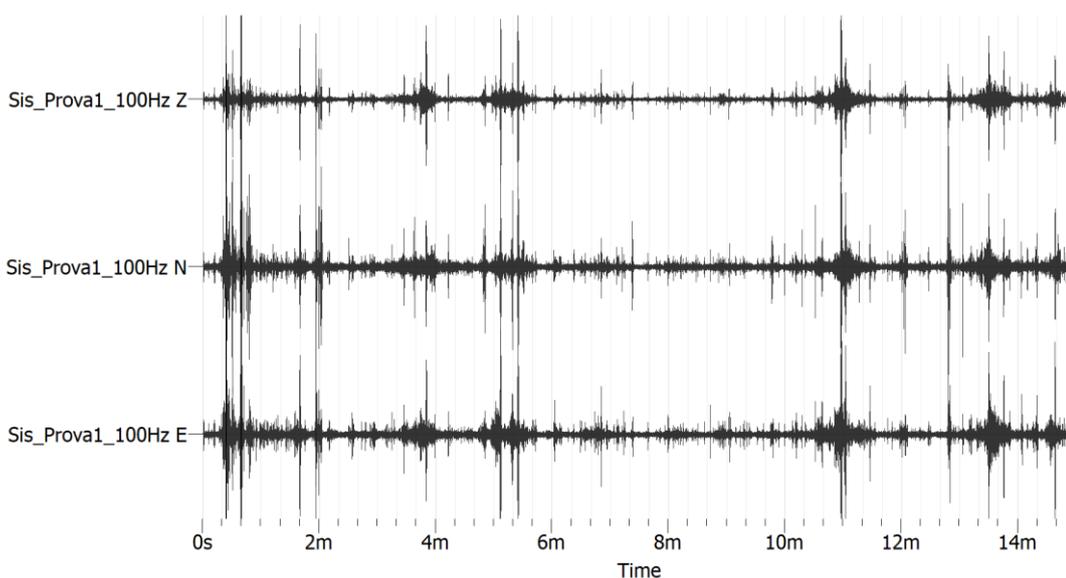


Figura 5.12 Tracce sismometro ottenute da una registrazione di 15min

Si osserva la presenza nelle tracce, a differenza di quanto visto per le misure con l'accelerometro basato su tecnologia FBG, di transienti dovuti probabilmente al passaggio di persone.

Nella *Figura 5.13* è rappresentata una traccia singola misurata dal sismometro per potere meglio apprezzare la magnitudine delle accelerazioni misurate.

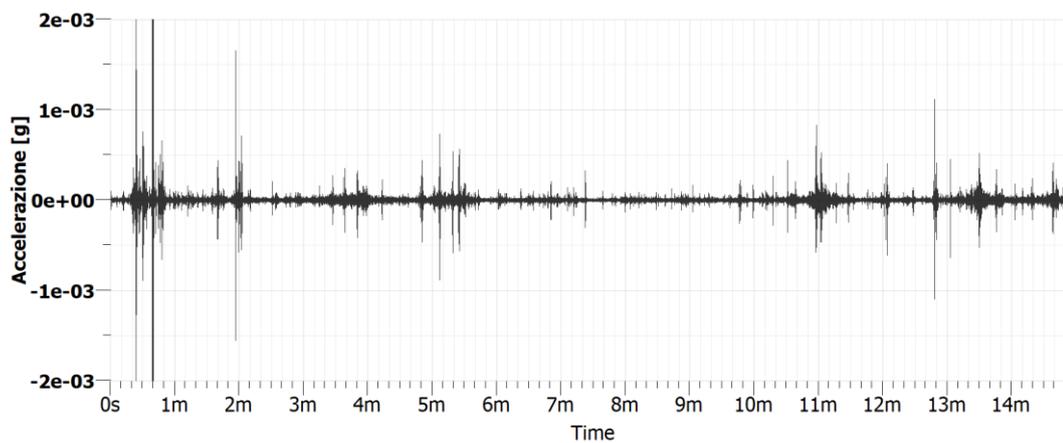


Figura 5.13 Traccia singola registrata dal sismometro allineato in direzione verticale

5.4 FINESTRATURA

I segnali registrati rispettivamente dall'accelerometro triassiale e dal sismometro sono suddivisi ciascuno in 23 finestre da 15 secondi (Figura 5.14)

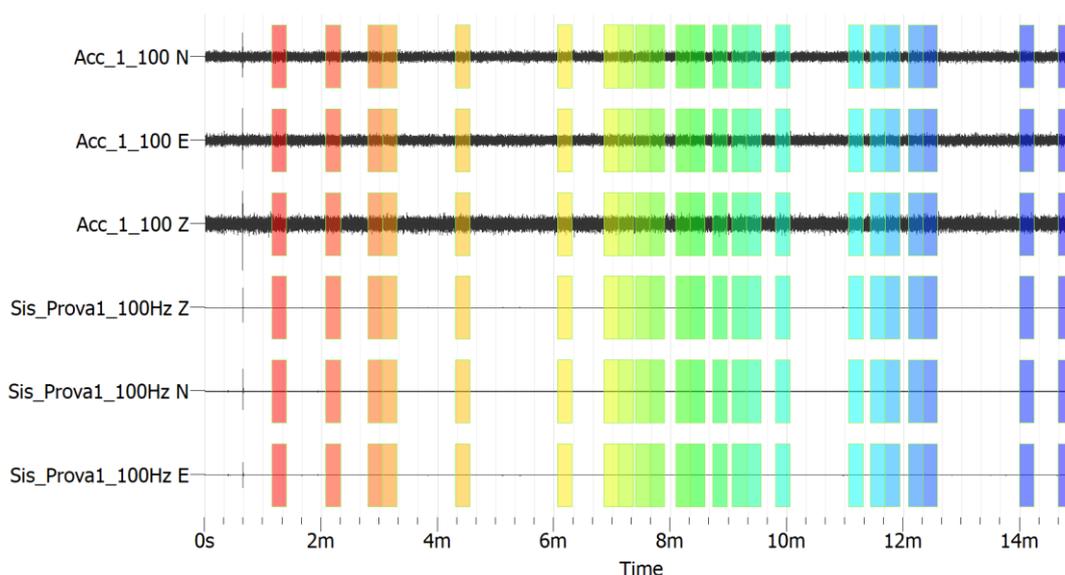


Figura 5.14 Finestratura segnali con finestre di 15 secondi in sezioni delle tracce con assenza di transienti

Si osserva come non tutto il segnale sia stato finestrato poiché sono stati trascurati i transienti dovuti a sorgenti troppo vicine ai sensori e contenenti quindi informazione in frequenza dipendente più dalle caratteristiche della sorgente che del sottosuolo (Figura 5.15).

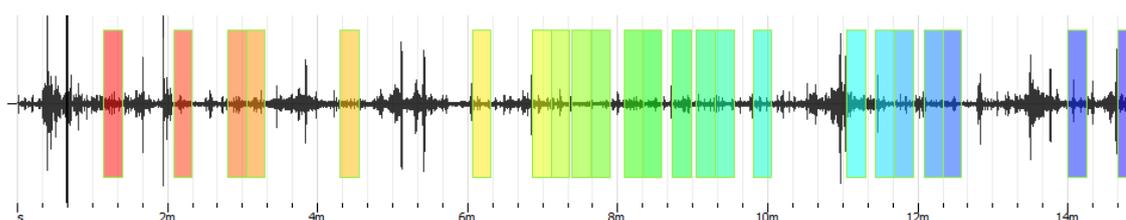


Figura 5.15 Esempio selezione finestre su traccia Sismometro

5.5 CALCOLO SPETTRI E HVSR

Una volta suddiviso il segnale in finestre è possibile calcolare per ognuna di esse la *power spectral density* e quindi, per ottenere le curve HVSR, si divide lo spettro in direzione orizzontale H, calcolato facendo la media quadratica degli spettri nelle direzioni N-S ed E-W, per lo spettro in direzione verticale V.

In (Figura 5.16) è rappresentata la curva HVSR ottenuta con il sismometro.

La banda tratteggiata a sinistra, di colore rosa, delimita l'intervallo di frequenza in cui i dati sono poco significativi a causa della frequenza di campionamento e della lunghezza insufficiente della finestra temporale, le linee colorate rappresentano le curve HVSR per ogni finestra, la linea nera continua rappresenta la media, quella tratteggiata la deviazione standard.

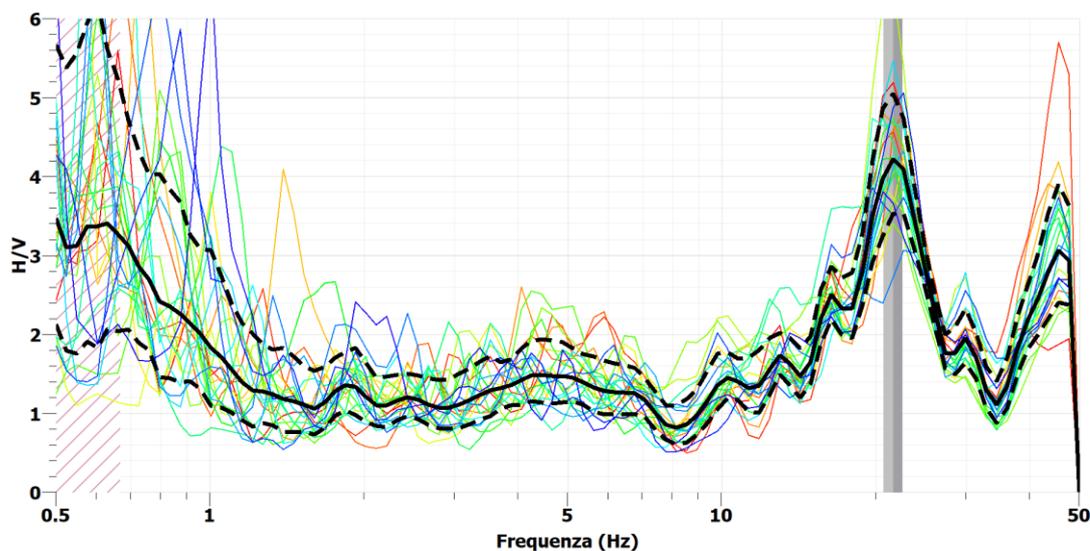


Figura 5.16 Curva HVSR ottenuta dalla registrazione del Sismometro

Si nota un picco a 23Hz che soddisfa le condizioni necessarie per essere considerato significativo (SESAME, 2004) e che è compatibile con un contrasto di impedenza sismica a pochi metri di profondità.

In *Figura 5.17* è rappresentata la stessa curva ottenuta dall'accelerometro, dove palesemente vi è la mancanza di tale picco.

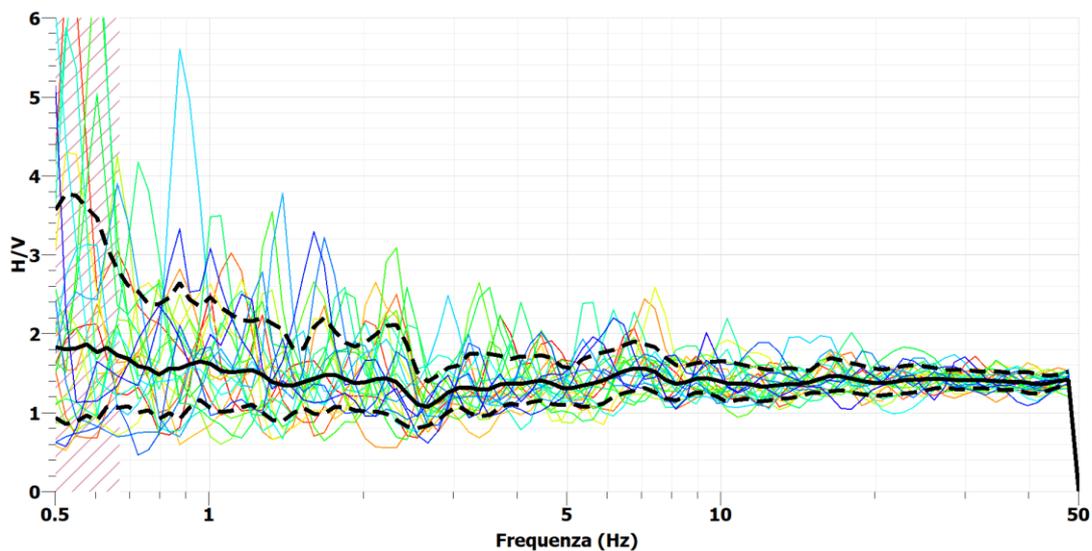


Figura 5.17 Curva HVSR ottenuta dalle registrazioni dell'accelerometro triassiale

Infine in *Figura 5.18* viene rappresentata una comparazione delle due curve.

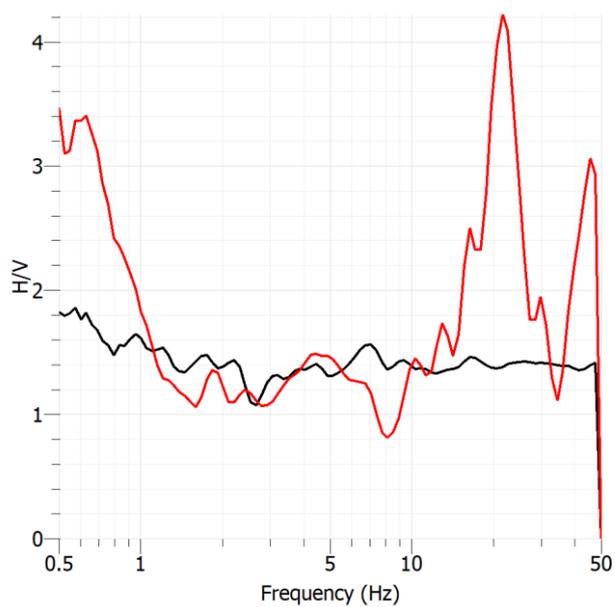


Figura 5.18 Comparazione curve HVSR Sismometro (in rosso) e accelerometro (in nero)

5.6 CONSIDERAZIONI PROVA HVSR

Si osserva come, sulla base delle misurazioni effettuate dal sismometro, si ottenga un picco attorno a 23 Hz, caratteristica totalmente assente nelle curve ottenute tramite l'accelerometro triassiale costruito a partire dagli accelerometri basati su tecnologia FBG, le cui tracce sembra siano costituite praticamente da rumore del sistema di misura, mentre il segnale, che invece viene misurato dal sismometro, non viene rilevato.

La comparazione di due tracce è emblematica a questo proposito (Figura 5.19)

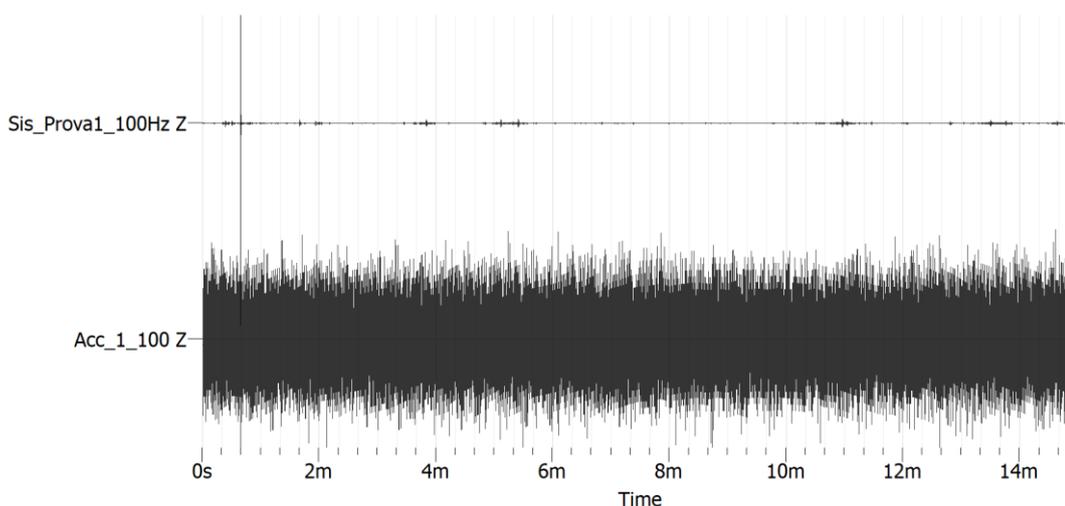


Figura 5.19 Comparazione tracce Sismometro a accelerometro FBG in direzione verticale

Osservando gli spettri di potenza (Figura 5.20 e Figura 5.21) si osserva come la misura dell'accelerometro sia affetta da rumore più o meno costante a tutte le frequenze (rumore bianco) che supera di tre ordini di grandezza il valore della densità di potenza misurata a 10Hz sullo spettro di potenza ricavato dalla misura con il sismometro.

Questo può essere imputato ad una troppo bassa sensibilità degli accelerometri associato ad una risoluzione del sistema di interrogazione insufficiente per questo tipo di applicazioni.

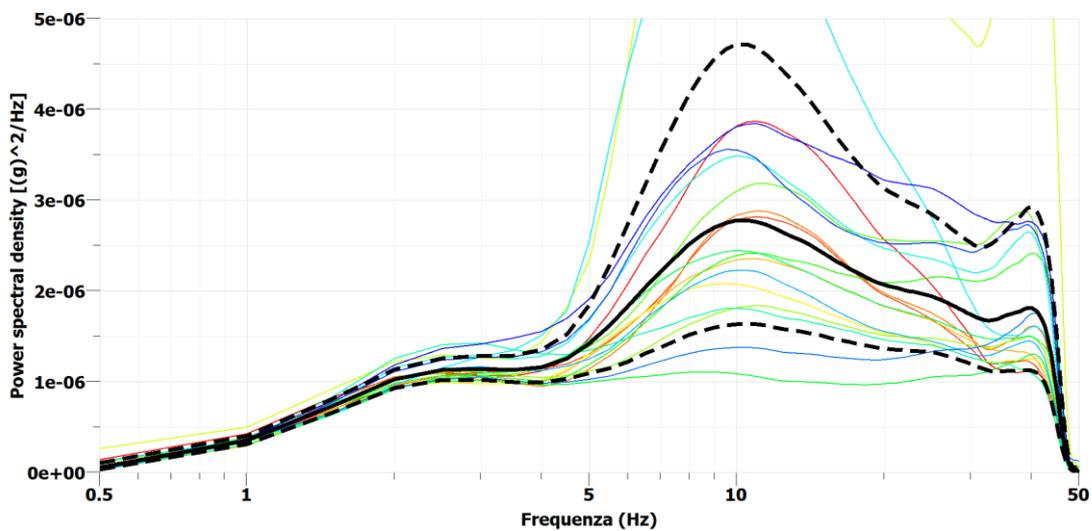


Figura 5.20 PSD Sismometro direzione verticale

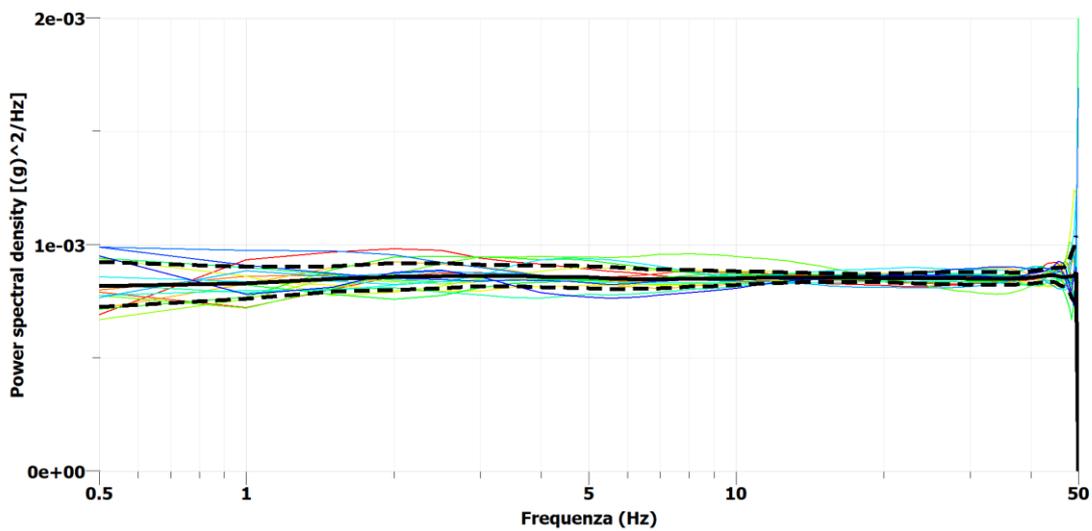


Figura 5.21 PSD Accelerometro direzione verticale

6 REVISIONE LETTERATURA

Al fine di verificare la possibilità di realizzare un accelerometro basato su tecnologia FBG avente "alta sensibilità" si effettua una revisione della letteratura scientifica per comparare le varie configurazioni utilizzate e valutarne le prestazioni, specialmente se verificate sperimentalmente e non solo stimate teoricamente.

In base al loro principio di funzionamento gli accelerometri basati su tecnologia FBG possono essere separati in due grandi famiglie: i sensori con struttura **massa-molla** e a trave elastica (*Cantilever beam*).

6.1 CONFIGURAZIONE MASSA-MOLLA

L'accelerometro FBG basato su una struttura a massa molla è di solito composto da elastomero, massa inerziale e FBG. Quando l'accelerometro vibra con il segnale di accelerazione esterno, l'elastomero si deforma a causa dell'inerzia della massa. La deformazione dell'elastomero porterà all'allungamento-accorciamento della fibra e quindi ad uno spostamento della lunghezza d'onda di Bragg.

Un accelerometro FBG basato su cilindro elastico è proposto da (Shan, et al., 2015), l'FBG è posizionato lungo l'asse del cilindro, il materiale del cilindro è gomma siliconica vulcanizzata bi componente. La risposta di ampiezza-frequenza, la risposta lineare e le caratteristiche di temperatura del sensore sono state verificate mediante esperimento. I risultati sperimentali mostrano che il sensore ha un'ampia gamma di frequenze piatte, da 30 a 300 Hz, e la sensibilità dell'accelerometro è 42,7 pm / G .

Un modello in cui il corpo elastico è costituito da un guscio cilindrico in poliuretano sottile (*Figura 6.1*) è proposto da (Wang, et al., 2015). Inserendo una massa metallica all'interno del cilindro cavo la dimensione assiale dell'accelerometro è ridotta della “metà rispetto a quella tradizionale” in cui le masse sono esposte all'esterno. La sensibilità sulla zona di risposta in frequenza piatta è 54 pm / g, e la frequenza di risonanza è 480 Hz.

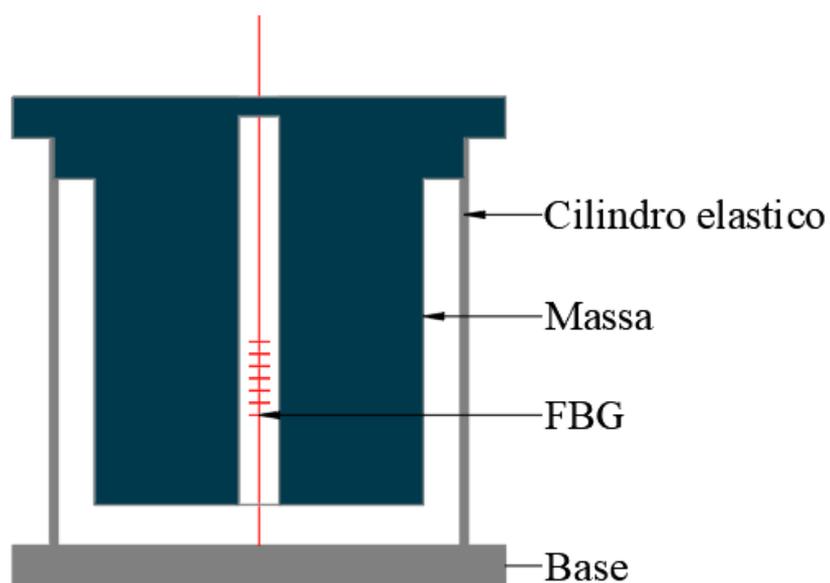


Figura 6.1 Accelerometro basato su cilindro in poliuretano (Wang, et al., 2015)

In (Wang, et al., 2014) viene proposto un accelerometro FBG basato su una struttura costituita da cilindri elastici (Figura 6.2) che esercitano un'azione di push-pull. La sensibilità viene efficacemente migliorata progettando una struttura del cilindro elastica che varia di sezione longitudinalmente. La sensibilità risulta essere 623 pm / g mentre la frequenza di risonanza è 449Hz.

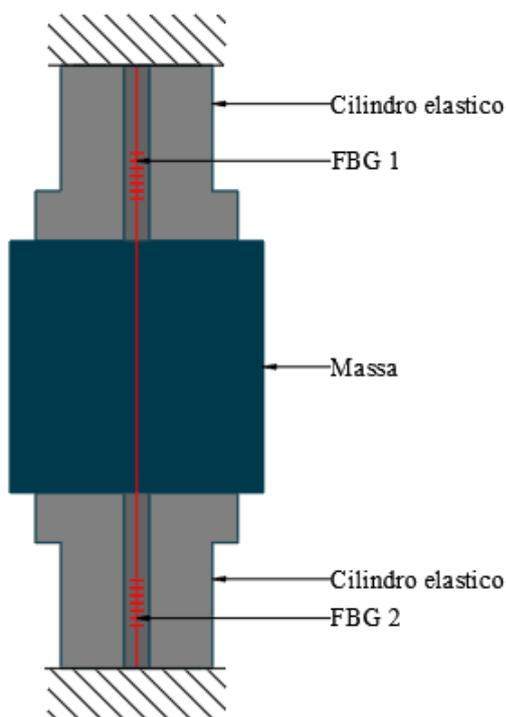


Figura 6.2 Accelerometro FBG basato su struttura a due cilindri elastici con raggio variabile (Wang, et al., 2014)

In generale i sensori osservati in letteratura basati su questo tipo di funzionamento possiedono alte frequenze di vibrazione naturale e di conseguenza come tradeoff una sensibilità relativamente bassa.

Tuttavia teoricamente aumentando la massa inerte o diminuendo la rigidità dell'elemento elastico è possibile aumentare la sensibilità fino a superare 1000pm/g a scapito di una diminuzione della frequenza di risonanza ($\approx 100\text{Hz}$).

Il principale problema riscontrato in tutte queste configurazioni è una elevata cross sensibiività dei sensori, ossia una risposta in termini di deformazione della fibra anche a fronte di accelerazioni trasversali rispetto all'asse dell'accelerometro, motivo tra l'altro che limita la possibilità di ridurre la rigidità dell'elemento elastico semplicemente riducendone la sezione. In (Wang, et al., 2014) si misura addirittura una sensibilità trasversale di un ordine di grandezza superiore rispetto a quella assiale.

Il rimedio al problema della cross sensibilita consiste nel limitare lo spostamento laterale della massa grazie ad una specifica costruzione del packaging contenete il dispositivo.

6.2 CANTILEVER BEAM

La trave elastica (*cantilever beam*) può funzionare come trasduttore se si utilizza la sua flessione, dovuta alla accelerazione applicata, per provocare l'allungamento della fibra con inscritto il grating.

Caratteristiche quali sensibilità e frequenza di risonanza possono essere opportunamente modulate variando lunghezza, sezione e modulo elastico della trave od il peso della massa (cambiando volume o densità) eventualmente posta all'estremità della trave stessa.

Un modo in cui viene sfruttata la trave elastica per la misura delle accelerazioni è quello di incollare la fibra, con inscritto il grating, sulla superficie del cantilever (*Figura 6.3*): l'inflessione della mensola, quando sottoposta ad accelerazione, avviene a causa del peso proprio del cantilever e di una massa inerziale posta alla sua estremità libera e questo provoca un allungamento delle fibre della trave lontane dall'asse neutro e con queste del grating incollato sulla sua superficie.

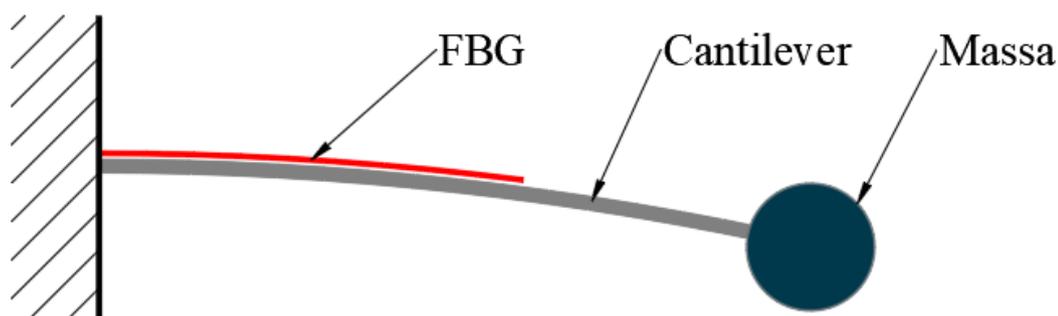


Figura 6.3 Struttura trasduttore basata su trave elastica

La sensibilità di un accelerometro di questo tipo può essere variata in modo efficiente, indipendentemente dalle caratteristiche geometriche o fisiche del cantilever stesso, alterando la distanza tra l'asse della fibra con inscritto FBG e l'asse neutro del cantilever.

Per ottenere ciò (Nandini, et al., 2013) hanno utilizzato un *patch* (spessore) di supporto per montare l'FBG sul cantilever (Figura 6.4):

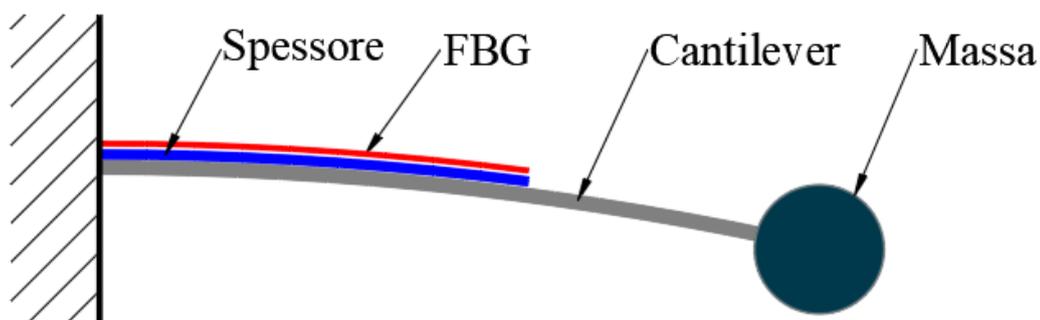


Figura 6.4 Layout cantilever con spessore

Le caratteristiche meccaniche del materiale della *patch* ed il suo spessore influenzano le caratteristiche della vibrazione naturale di un cantilever convenzionale e anche il trasferimento della deformazione alla fibra ottica.

L'effetto dello spessore e del materiale del *patch* sull'amplificazione della deformazione e sulla frequenza naturale sono stati investigati attraverso simulazione numerica con analisi agli elementi finiti e viene mostrato che per uno specifico tipo di materiale della patch vi è uno spessore che massimizza la sensibilità.

I risultati della simulazione effettuata concordano bene con gli esperimenti ed una sensibilità ≈ 1062 pm/g ed una frequenza di risonanza di 18.75Hz è stata misurata con una particolare configurazione dell'accelerometro con patch in teflon; questo valore è circa 3 volte superiore rispetto a un accelerometro FBG analogo ma senza patch (Nandini, et al., 2013).

Un cantilever con l'area di sezione trasversale variante longitudinalmente, collegata alla base da un sottile elemento a collo che funge da centro concentrato di deformazione, costituendo quindi una zona ottimale per il posizionamento dei sensori FBG, è stato progettato e verificato sperimentalmente (Khan, et al., 2014). I parametri per la progettazione della struttura sono stati ottimizzati sulla piattaforma *SolidWorks 2012*. Le prove sperimentali hanno prodotto una sensibilità di 46 pm / g per frequenze inferiori a 50 Hz e 306 pm / g per frequenze superiori a 150 Hz. In questa struttura sono state utilizzate due FBG uguali sui lati opposti del cantilever in modo da depurare le misure dall'effetto della temperatura facendo la differenza tra lo shift della lunghezza d'onda di Bragg nelle due fibre.

Nelle configurazioni esaminate fin'ora l'FBG viene incollato alla superficie della trave per rilevare la vibrazione indotta dall'accelerazione; questo tipo di accelerometri ha una struttura semplice, ma la deformazione della fibra non è uniformemente distribuita lungo la lunghezza dell'FBG (*chirping* del grating); fatto che porta all'allargamento del picco nello spettro di riflessione e di conseguenza una minore accuratezza nell'individuare la frequenza di Bragg.

Per indurre una deformazione uniforme sugli elementi del reticolo di Bragg è utile incollare la fibra al supporto solo tramite due estremità con l'FBG posizionato tra di esse libero di deformarsi.

L'accelerometro basato su FBG mostrato in *Figura 6.5* (Yokoi, 2000) consiste in una trave a sbalzo rigida a forma di L, una massa concentrata, una molla a balestra e un elemento FBG. Per rilevare la deformazione dovuta alle accelerazioni imposte, la fibra con reticolo è vincolata ai punti a e b ed il reticolo posizionato al centro tra di loro.

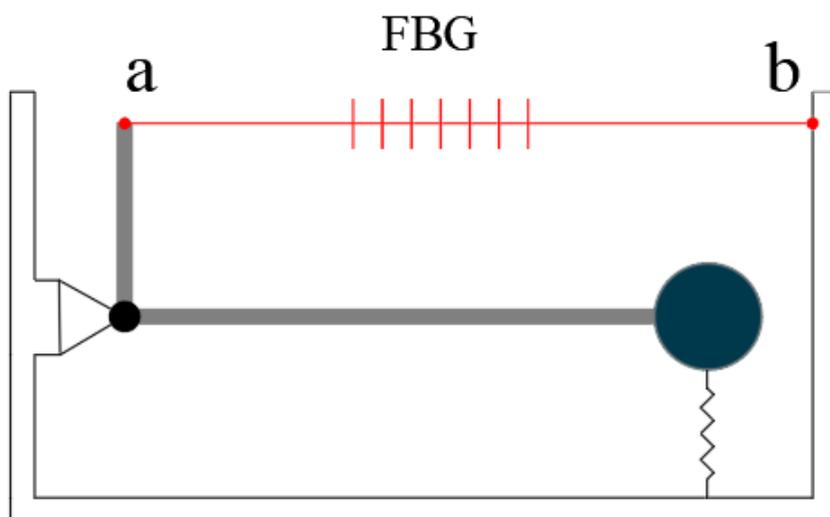


Figura 6.5 Configurazione del cantilever avente forma a L (Wu, et al.)

Sulla base dei dati in (Yokoi, 2000), ottimizzando i parametri strutturali del sensore precedente si riesce ad ottenere una sensibilità di circa $330\mu\epsilon/g \approx 400\text{pm}/g$ con banda di frequenza utile fino 80Hz (Wu, et al.).

Utilizzando una simile configurazione (Wanga, et al.) hanno ottenuto una sensibilità di $220\text{ pm} / g$ e frequenza di risonanza di 295 Hz.

Un accelerometro compatto a doppia fibra di Bragg (FBG) basato su un cantilever a doppio semicerchio (Figura 6.6), ottenuto perfondendo un gel di silicone (tipo DC-160 prodotto da Dowcorning in America) allo stato liquido in un involucro cavo, è stato proposto da (Hu, et al., 2014).

Due FBG sono fissati alle due estremità dei semicerchi, evitando quindi l'indesiderato effetto di *chirp* del reticolo. Le misurazioni dinamiche delle vibrazioni mostrano che l'accelerometro fornisce una sensibilità estremamente elevata di 1296 pm/g e un range di frequenza compreso tra 0 e 25 Hz, mentre i due FBG contribuiscono all'aumento della sensibilità ed alla depurazione dell'effetto della temperatura facendo la differenza tra le variazioni della Bragg wavelength nei due gratings.

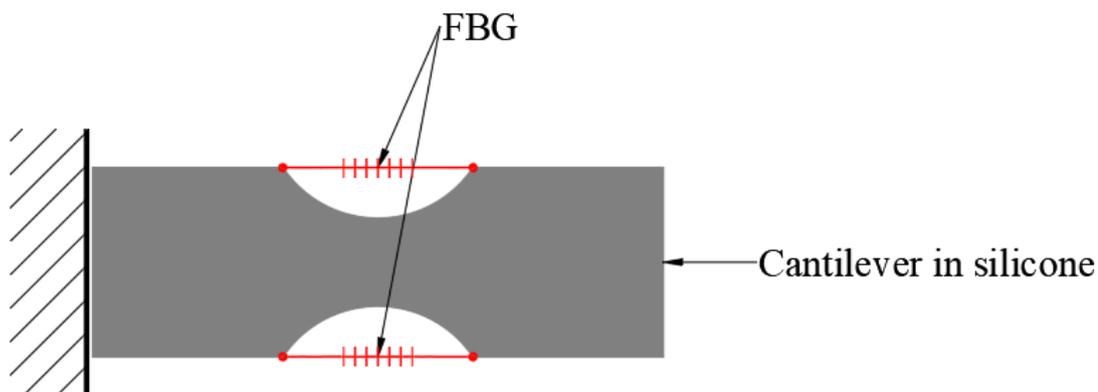


Figura 6.6 Cantilever con doppio semicerchio (Hu, et al., 2014)

Tra i vari tipi di accelerometri FBG, le configurazioni basate su cantilever sembrano essere particolarmente adatte per applicazioni in cui si richiede la misura di basse frequenze (Nandini, et al., 2013), con alta sensibilità e bassa sensibilità cross-assiale, ottenuta quest'ultima grazie alla forma della sezione del cantilever.

7 PROPOSTA SENSORE

Dopo avere effettuato la precedente revisione della letteratura si propone la costruzione di un dispositivo basato sul principio di funzionamento di un *cantilever*, ispirato all'articolo di (Casas-Ramos, et al., 2015) grazie in particolare alla sua relativa semplicità di costruzione.

La deformazione della fibra ottica contenente il reticolo di Bragg viene ottenuta posizionandola e fissandola perpendicolarmente alla superficie del cantilever, quest'ultimo allunga l'FBG flettendosi sotto l'effetto del peso proprio e della massa concentrata alla sua estremità quando viene sottoposto ad accelerazione (*Figura 7.1*). Essendo la fibra incollata in due punti: all'estremità del cantilever ed al casing dell'accelerometro, ed essendo pretensionata, la deformazione lungo di essa è uniforme, evitando il fenomeno del *chirping* che caratterizza altre configurazioni, in cui la parte della fibra con inscritto il reticolo è incollata interamente ad una superficie che si deforma non uniformemente.

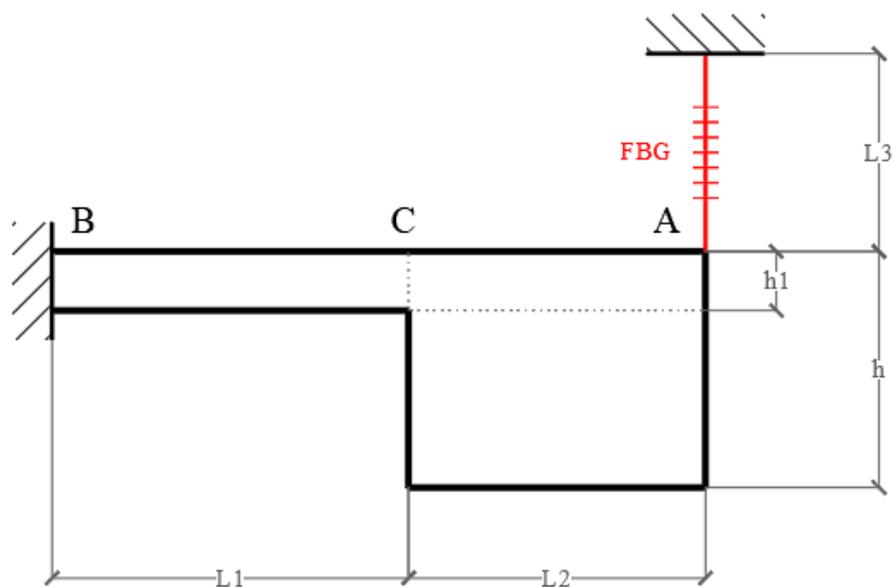


Figura 7.1 Schema della struttura del cantilever

L'analisi delle prestazioni effettuata nei prossimi capitoli è divisa in tre sezioni: Calcolo della flessione cantilever, calcolo della equazione del moto e della frequenza naturale, calcolo della sensibilità.

7.1 CALCOLO DEFORMAZIONE CANTILEVER

La deflessione totale della estremità libera viene calcolata applicando il metodo della sovrapposizione degli effetti alle due parti della trave non prismatica aventi differente sezione: il cantilever e la massa.

La forza che si esercita sulla struttura a seguito di una accelerazione a viene considerata come applicata alla estremità della trave e pari in modulo a $F = Ma$, dove $M = \text{massa effettiva} = M_0 + 0.23M_1$ (M_0 massa posta all'estremità della trave, M_1 massa del cantilever).

La deflessione della punta (A in *Figura 7.2*) dovuta alla sola curvatura della massa viene trascurata, considerato l'elevato momento di inerzia rispetto all'asse neutro della sezione nel tratto AC.

La flessione del tratto CB della trave (*Figura 7.2*) la si può considerare come prodotta da un carico concentrato F e momento $F * L_2$ applicati in C.

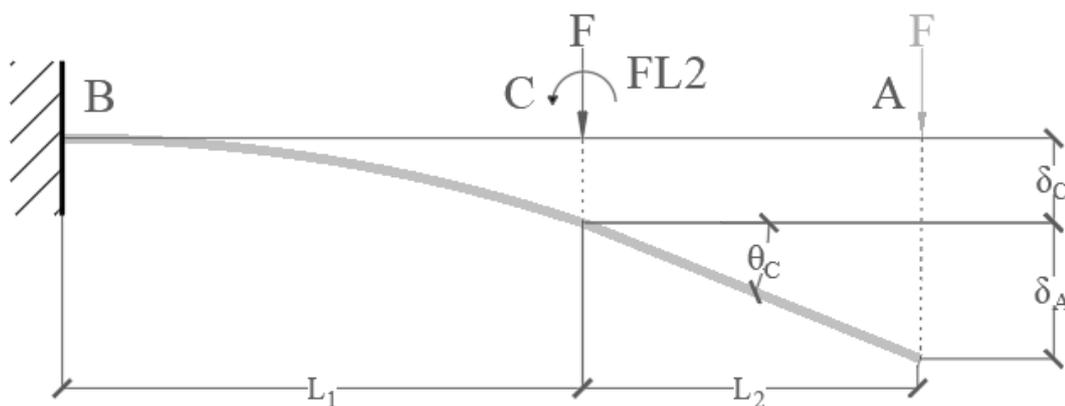


Figura 7.2 Schema deflessione trave

Considerando il momento di inerzia della sezione nella porzione CB della trave $I_2 = (bh_1^3)/12$ si ottiene quindi un angolo di inclinazione (θ_c) in C pari a:

$$\theta_c = \frac{FL_1}{2E_{AL}I_2}(L_1 + 2L_2) \quad (7-1)$$

e una freccia (δ_c):

$$\delta_c = \frac{FL_1^2}{6E_{AL}I_2}(2L_1 + 3L_2) \quad (7-2)$$

L'angolo di rotazione θ_c produce un'ulteriore contributo δ_A allo spostamento della punta della trave; Il tratto CA infatti ruota di θ_c e lo spostamento δ_A sarà quindi uguale a:

$$\delta_A = \theta_c L_2 \quad (7-3)$$

Lo spostamento totale della punta δ_T è quindi la somma dei due contributi (7-2) e (7-3):

$$\delta_T = \delta_c + \delta_A \quad (7-4)$$

7.2 EQUAZIONI DEL MOTO E FREQUENZA NATURALE

Utilizzando la teoria della flessione semplice (pura) si possono modellare sia il *cantilever*, che la FBG come delle molle aventi una propria costante elastica determinata dal rapporto tra la forza applicata e lo spostamento :

$$k_1 = F / \delta_T$$

$$k_2 = (E_{SMF} * A_{SMF}) / L_3 \quad (7-5)$$

Dove:

k_1 : Costante elastica della trave

k_2 : Costante elastica del FBG

Dal comportamento elastico sopra descritto la struttura può essere semplificata in un sistema meccanico con un grado di libertà (*Figura 7.3*).

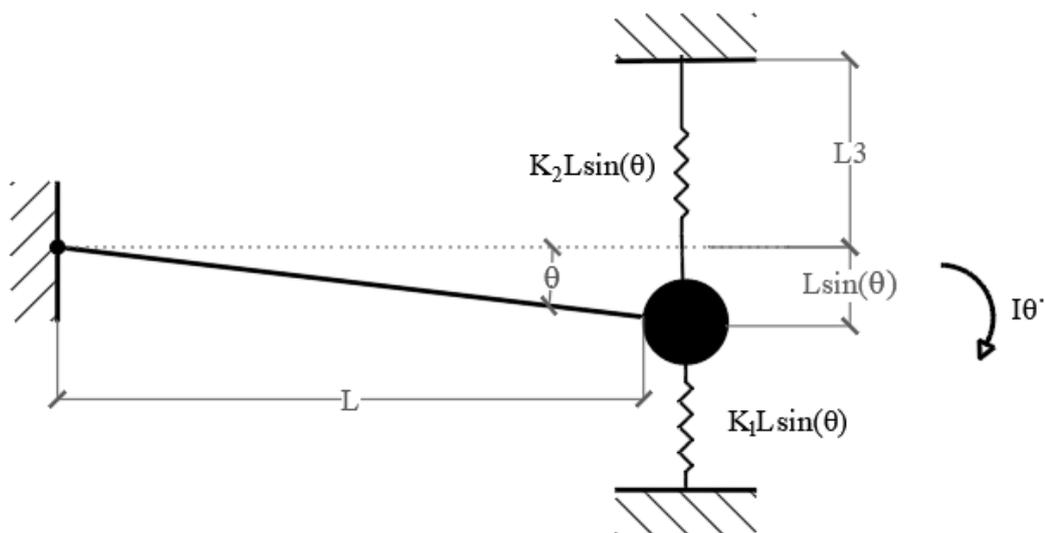


Figura 7.3 Rappresentazione del sensore come sistema meccanico ad un solo grado di libertà

Applicando il principio di d’Alambert si cerca l’equazione del moto considerando l’equilibrio del sistema di forze che agisce sulla struttura in condizioni dinamiche; si può calcolare facilmente l’espressione per il sistema:

$$I\ddot{\theta} + k_1(L\sin\theta)(L\cos\theta) + k_2(L\sin\theta)(L\cos\theta) - MgL\cos\theta = 0 \quad (7-6)$$

Per piccoli valori di θ , $\sin\theta \approx \theta$, $\cos\theta \approx 1$, ed essendo il momento di inerzia $I=ML^2$

la (7-6) si trasforma in:

$$\ddot{\theta} + \frac{k_1 + k_2}{M}\theta - \frac{g}{L} = 0 \quad (7-7)$$

Quindi la frequenza naturale espressa in Hertz può essere scritta a partire della

frequenza angolare naturale $\omega_n = \sqrt{\frac{k_1+k_2}{M}}$ nella (7-7) come :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_1 + k_2}{M}} \quad (7-8)$$

7.3 SENSIBILITÀ SENSORE

Lo spostamento della *Bragg wavelength* $\Delta\lambda_B$ causato dalla deformazione può essere descritto in termini di effetto foto-elastico ed effetto termo-ottico:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon + (\alpha + \zeta)\Delta T \quad (7-9)$$

Dove:

λ_B : Lunghezza d'onda di bragg centrale

P_e : Coefficiente foto-elastico

ε : Deformazione assiale FBG

α : Coefficiente dilatazione termica della fibra

ζ : Coefficiente termo-ottico della fibra

ΔT : Variazione della temperatura

Se si considerano le variazioni della temperatura ambientale come "lente" rispetto alle frequenze di interesse la (7-9) può essere semplificata nel modo seguente:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - P_e)\varepsilon \quad (7-10)$$

Come si vede dalla (7-10), $\Delta\lambda_B$ dipende dalla deformazione, che è data da:

$$\varepsilon = F/(k_1 + k_2) \quad (7-11)$$

Conoscendo il valore tipico del coefficiente fotoelastico di una fibra ottica in silice ($P_e = 0.22$) è quindi possibile calcolare la sensibilità del sensore come il rapporto tra lo spostamento della *Bragg wavelength* e accelerazione applicata :

$$S = \frac{\Delta\lambda_B}{a} \quad (7-12)$$

7.4 CALCOLO PRESTAZIONI SENSORE

In (Casas-Ramos, et al., 2015) sono stati trovati valori teorici di sensibilità $S=378.79$ pm/g e frequenza naturale $f_n=238.11$ Hz ottenuti utilizzando un cantilever interamente in alluminio; al fine di ridurre i costi e la difficoltà di produzione si analizzano teoricamente le prestazioni ottenibili ipotizzando di costruire il sensore grazie alla stampa 3d, cosa che si prevede di fare al di fuori del contesto di questa Tesi per ottenere conferme sperimentali dei risultati ottenuti in seguito.

Si considera di conseguenza come materiale del cantilever il *polietere etere chetone* (PEEK), un materiale appartenente al gruppo dei poli-aril-etere-chetoni (PAEK).

Questo gruppo di polimeri grazie alle loro caratteristiche meccaniche e di resistenza alla temperatura ha trovato successo nell'ambito dei processi di manifattura additiva.

Per la densità del PEEK, una volta sinterizzato dalla stampante 3d, viene assunto un valore di $\rho_{PEEK} = 1300$ kg/m² mentre per il modulo elastico $E_{PEEK} = 2.76$ GPa (T.J.Hoskinsa, et al., 2018).

Come fibra ottica si prevede di utilizzare una comune fibra *monomodale* in vetro con diametro del *cladding* di 125µm avente un coating esterno in *acrilato*.

Per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche della fibra si assume, prendendo come riferimento un dato di letteratura basato sul test di dieci diversi prodotti commerciali aventi coating protettivo in acrilato, un valore per il prodotto $E_{fibra} \times A$ (dove A sezione della fibra compreso il coating) di 780.87 N, (Antunes, et al., 2012).

Al fine di aumentare la sensibilità, mantenendo le dimensioni contenute, si pensa di posizionare una massa in piombo ($\rho_{piombo}=11340$ kg/m³) in un apposito alloggiamento posto all'estremità del cantilever (*Figura 7.4*).

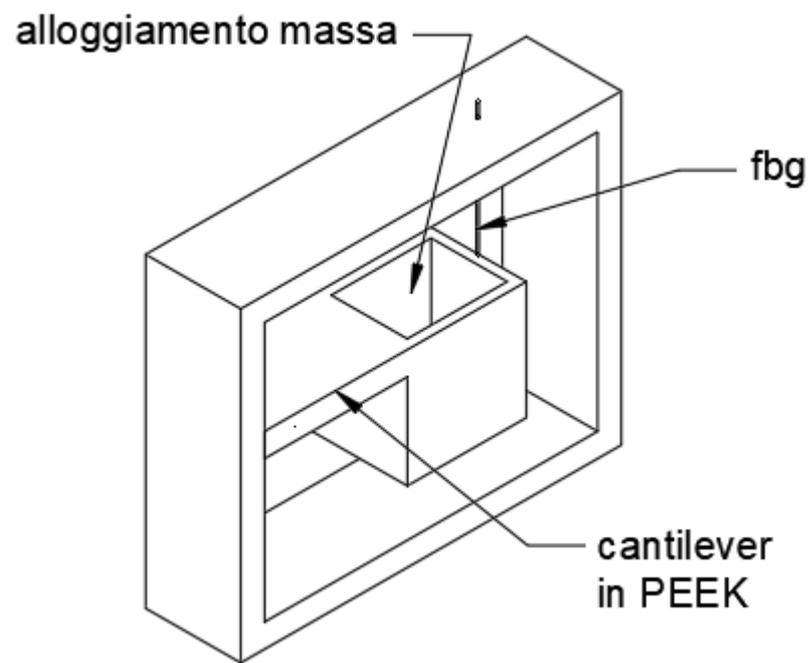


Figura 7.4 Illustrazione grafica accelerometro proposto

7.5 ANALISI PARAMETRI

Come mostrato dall'analisi effettuata nei capitoli precedenti la lunghezza del cantilever L_1 e il volume della massa, che, a parità di densità, è correlato al suo peso, sono due parametri fondamentali nel determinare la sensibilità e la frequenza naturale del sensore.

È necessario ottimizzare questi parametri in modo da ottenere delle specifiche soddisfacenti, nel caso in questione l'obiettivo è progettare un sensore adeguato ad applicazioni in cui si richieda la misura di basse frequenze (<50Hz); si cerca quindi di ottenere la massima sensibilità possibile mantenendo il valore della frequenza di risonanza superiore ai 100Hz in modo da avere una curva di sensibilità il più possibile piatta nel range di frequenze di funzionamento.

L'analisi sull'influenza dei parametri L_1 e h sul sensore è effettuata nei paragrafi successivi.

7.5.1 Analisi dell'influenza di L_1 sulle prestazioni del sensore fbg

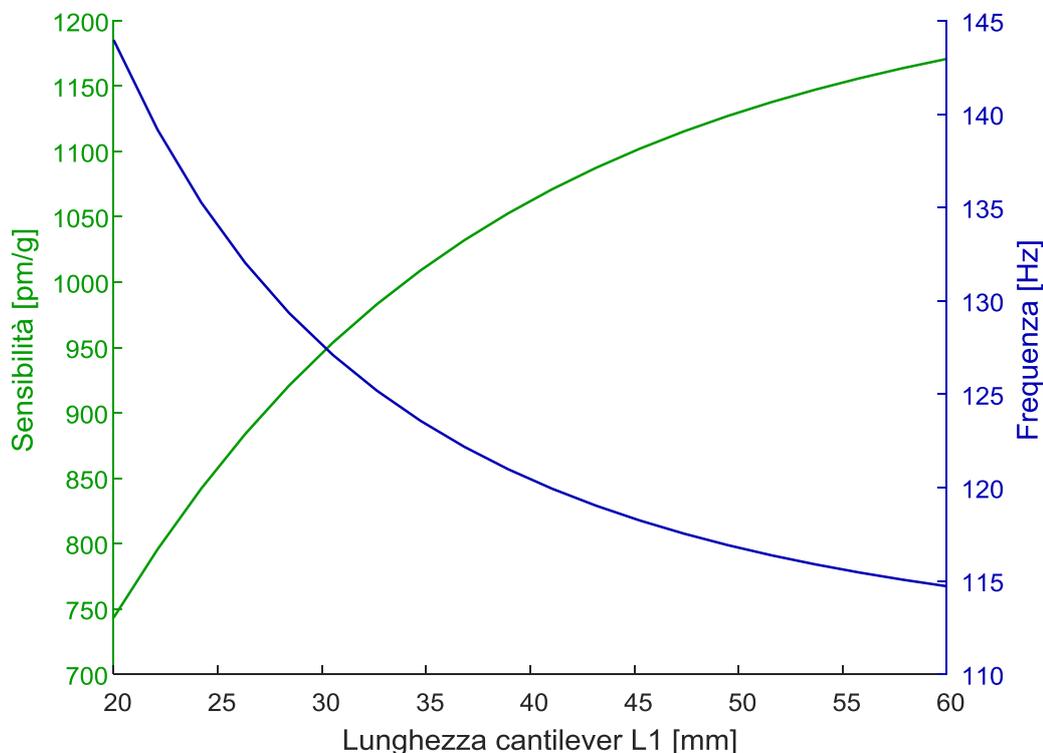


Figura 7.5 Variazione di sensibilità e frequenza naturale dell'accelerometro al variare della lunghezza del cantilever

Figura 7.5 mostra la variazione di sensibilità e frequenza naturale dell'accelerometro al variare della lunghezza L_1 del cantilever, mantenendo fissi gli altri parametri indipendenti. Si osserva che aumentando L_1 si ha un decremento della frequenza naturale di vibrazione ed un aumento della sensibilità.

Variando L_1 , infatti, si varia la resistenza che la punta del cantilever oppone al proprio spostamento ed ovviamente aumentando la lunghezza si ottiene un maggiore spostamento a parità di forza applicata a scapito di un allungamento del periodo naturale di vibrazione. Aumentando indefinitamente L_1 si otterrebbero valori di sensibilità e risonanza che tendono asintoticamente a quelli di una molla con caratteristiche di rigidità del solo FBG.

Si sceglie un valore della lunghezza del cantilever di $L_1=30$ mm per limitare le dimensioni del sensore.

7.5.2 Analisi dell'influenza di h sulle prestazioni del sensore fbg

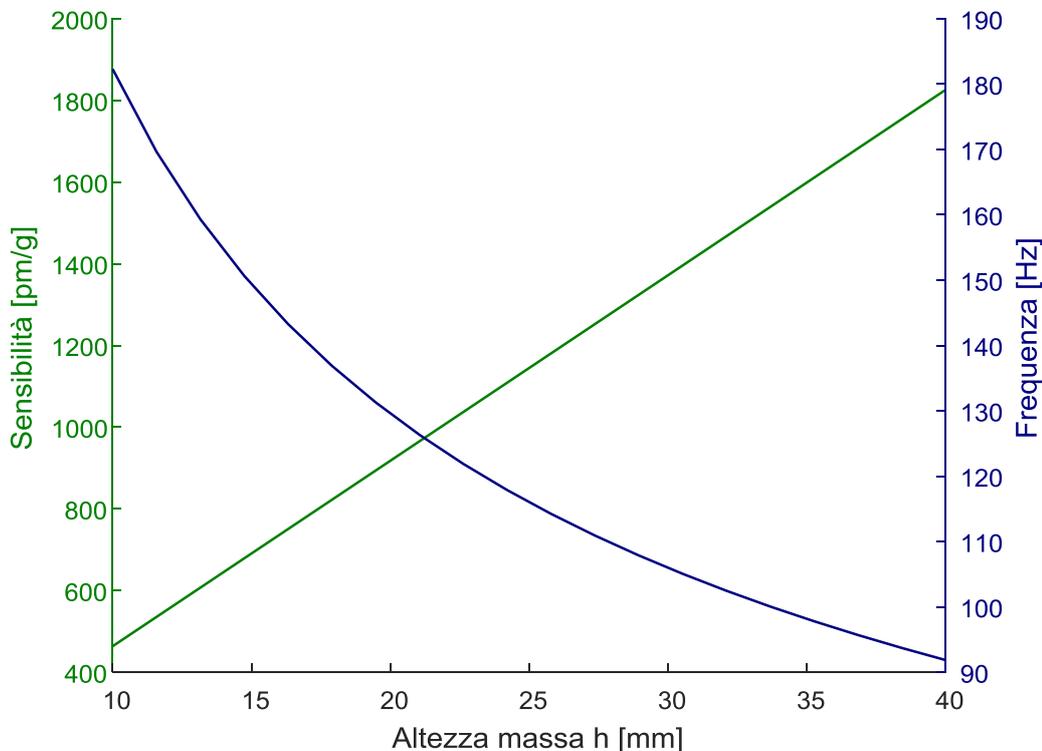


Figura 7.6 Variazione di sensibilità e frequenza naturale dell'accelerometro al variare del di h

Figura 7.6 mostra la variazione di sensibilità e frequenza naturale dell'accelerometro al variare del di h e di conseguenza di M_0 essendo la massa linearmente dipendente da h .

Variando h , prendendo come L_1 il valore di 30 mm e mantenendo fissi gli altri parametri si osserva un decremento della frequenza naturale di vibrazione ed un aumento lineare della sensibilità all'aumentare della massa.

Si decide di optare per un valore di $h = 20\text{mm}$ che corrisponde ad una massa di piombo di 88g.

7.6 SPECIFICHE SENSORE

In *Tabella 7.1* sono elencate le specifiche in termine di geometria e caratteristiche fisiche dei materiali che costituiscono il sensore.

Parametro	Valore	Descrizione
L_1	30 mm	Lunghezza cantilever
L_2	20 mm	Lunghezza massa piombo
L_3	20 mm	Lunghezza fibra
h	20 mm	Altezza massa piombo
h_1	5 mm	Spessore cantilever
b	20 mm	Larghezza cantilever e massa
A_{fbg}	$1.228 \cdot 10^{-8} \text{ m}$	Sezione fibra ottica
E_{fbg}	$72 \cdot 10^9 \text{ Pa}$	Modulo elastico fibra ottica
E_{PEEK}	$2.76 \cdot 10^9 \text{ Pa}$	Modulo elastico PEEK
ρ_{PEEK}	1300 kg/m^3	Densità PEEK
ρ_{piombo}	11340 kg/m^3	Densità piombo
M_0	88 g	Massa del Piombo
M_1	4 g	Massa cantilever in PEEK

Tabella 7.1 Caratteristiche geometriche e meccaniche sensore

In Figura 7.7 è mostrata una rappresentazione quotata del sensore:

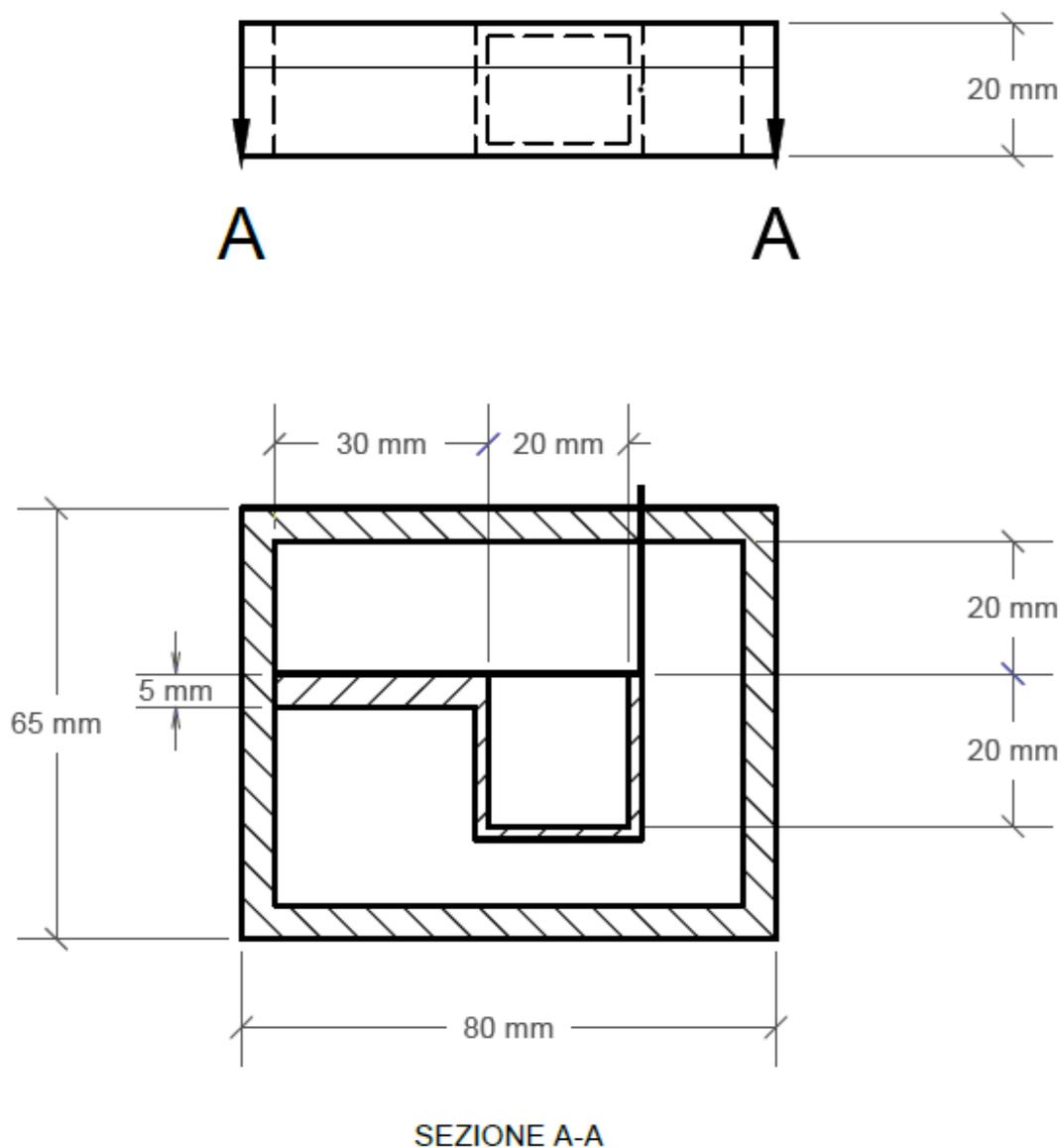


Figura 7.7 Quote geometriche sensore: vista dall'alto (sopra) e vista sezione AA (sotto)

Utilizzando i parametri elencati nella *Tabella 7.1* si ottiene, sulla base delle equazioni (7-8) e (7-12), un valore per la frequenza di risonanza di $f_n=128$ Hz e un valore della sensibilità di $S=956$ pm/g in condizioni statiche.

8 CONCLUSIONE

Confrontando i valori di sensibilità ottenuti teoricamente (≈ 1000 pm/g) con gli accelerometri commerciali utilizzati (≈ 50 pm/g) si è ottenuto un valore di sensibilità di circa 20 volte superiore e con una frequenza di risonanza (≈ 130 Hz) tale da consentire l'utilizzo del sensore per applicazioni che richiedano la rilevazione di basse frequenze (< 50 Hz).

In teoria l'accoppiamento di tale accelerometro con l'interrogatore ottico utilizzato nell'esperienza svolta in questo lavoro (*Micron optics si155*) non consente comunque l'utilizzo di tale strumentazione per prove HVSR, per raggiungere prestazioni maggiori si rende necessario demodulare il segnale proveniente dai sensori con tecnologie diverse che consentano di aumentare la risoluzione del sistema di interrogazione; si cita a titolo di esempio il sistema di interrogazione in (Gatti, et al., 2008) che sfrutta la proprietà di un grating con un π -phase shift, ossia si utilizza un FBG avente al centro del reticolo un salto di un periodo nel *pitch* del grating, quest'ultimo, funzionando in modo analogo ad una cavità di Fabry-Perot, genererà un picco di trasmissione molto stretto: se si mantiene la frequenza del laser, con la tecnica Pound-Drever-Hall, in corrispondenza della frequenza di risonanza del grating si possono ottenere forti variazioni nella potenza riflessa anche per piccoli scostamenti dalla lunghezza d'onda centrale fino a raggiungere valori di risoluzione del sistema di interrogazione di circa $0.1 \text{ n}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ @1Hz ossia tenendo conto della relazione (2-8) corrispondente a $\approx 10^{-3} \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$.

BIBLIOGRAFIA

- Antunes [et al.]** Mechanical Properties of Optical Fibers [Rapporto]. - 2012.
- Baldwin [et al.]** Review of Fiber Optic Accelerometers [Rapporto].
- Black [et al.]** On the gage factor for optical fiber grating [Rivista]. - 2015.
- Casas-Ramos, Sandoval e Gabriel** Modified optical fiber Bragg grating accelerometer [Rivista]. - [s.l.] : IEEE, 2015.
- Feng Dingyi [et al.]** A Fiber Bragg Grating Accelerometer Based on a Hybridization of Cantilever Beam [Rivista].
- Gatti [et al.]** Fiber strain sensor based on a pi-phase-shifted Bragg grating and the Pound-Drever-Hall technique [Atti di convegno]. - 2008.
- Hu [et al.]** Low-frequency fiber Bragg grating accelerometer based on a double-semicircle cantilever [Rivista]. - [s.l.] : Elsevier, 2014.
- Khan Mohd. Mansoor, Panwar Nishtha e Dhawan Ravi** Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self temperature compensation [Rapporto]. - 2014.
- Li [et al.]** Very sensitive fiber Bragg grating accelerometer using transverse forces with an easy over-range protection and low cross axial sensitivity [Rivista]. - [s.l.] : OSA, 2013.
- Li Kuo [et al.]** Biaxial Fiber Bragg Grating Accelerometer Using Axial and Transverse Forces [Rivista]. - [s.l.] : IEEE, 2014.
- Li Tianliang [et al.]** Paralleled Structure-Based String-Type Fiber Bragg Grating Acceleration Sensor [Rivista]. - [s.l.] : IEEE, 2017.
- Lunedei e Malischewsky** A Review and Some New Issues on the Theory of the H/V Technique for Ambient Vibrations [Libro]. - [s.l.] : Springer, Cham, 2015. - Vol. 39 : p. 371-394.
- Marco Bocciolone Giuseppe Bucca, Alfredo Cigada, Andrea Collina, Lorenzo Comolli** An application of FBG accelerometers for monitoring pantographs of underground trains [Atti di convegno]. - 2010.
- Nakamura** Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications [Atti di convegno] // Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering. - Auckland : [s.n.], 2000.
- Nandini Basumallick [et al.]** Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity [Rivista]. - 2013.

SESAME European research project [Rapporto]. - 2004.

Shan Yun [et al.] Study on a fiber Bragg grating accelerometer based on compliant cylinder [Rivista]. - [s.l.] : Elsevier, 2015.

T.J.Hoskinsa, K.D.Dearn e S.N.Kukureka Mechanical performance of PEEK produced by additive manufacturing [Sezione di libro]. - [s.l.] : Elsevier, 2018.

Talebinejad, Fischer e Ansari Low frequency fiber optic accelerometer for civil structural health monitoring health monitoring [Atti di convegno]. - 2009.

Vol. Handbook of Optics Handbook of Optics Vol. IV [Libro].

Wang Jun [et al.] A Miniaturized FBG Accelerometer Based on a Thin Polyurethane Shell [Rivista]. - [s.l.] : IEEE, 2015.

Wang Jun [et al.] Design and Analysis of a High Sensitivity FBG Accelerometer Based on Local Strain Amplification [Rivista]. - [s.l.] : IEEE, 2014.

Wanga Jinyu [et al.] Design and application of fiber Bragg grating (FBG) geophone for higher sensitivity and wider frequency range [Rivista].

Wu Jack, Masek Vlastimil e Cada Michael The possible use of Fiber Bragg Grating based accelerometers for seismic measurements [Rivista].

Wu Weijiun [et al.] Design of low frequency Fibre Bragg acceleration system [Rivista]. - 2014.

YawTamb KuoliaTommy H.T.ChanaMan HongYauaDavid P.ThambiratnamaHwa Fiber Bragg grating accelerometer based on a transversely rotating stick [Rivista]. - [s.l.] : Elsevier, 2015.

Yokoi A. Mita and I. Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring [Atti di convegno]. - Sydney : Fifth International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2000), 2000.

Zhang Xiaolei Rong Qiangzhou, Sun Hao, Yang Shen, Yuan Liutong, Hu Manli Low-frequency fiber Bragg grating accelerometer based on a double-semicircle cantilever [Rivista]. - 2014.