



OptoPower Lab

# SENSORI IN FIBRA OTTICA PER IL MONITORAGGIO STRUTTURALE E LA SICUREZZA

Prof. G BREGLIO

FBG  
Sensori a Fibra Ottica

# Indice

2

- Introduzione
- I sistemi in tecnologia Elettronica e IoT
- I sensori basati sulla tecnologia delle Fibre Ottiche: gli FBG
- Principali Campi di Applicazione
- Principio di Sensing
  - ▣ Sensori di Temperatura e Strain
  - ▣ Tecniche di Interrogazione per sensori FBG
- Alcune Applicazioni come Casi di Studio
- Un approccio alternativo per monitoraggio con Fibre ottiche
  - ▣ La tecnica di sensing distribuito alla Brillouien

# Il Problema

3

- **L'invecchiamento delle infrastrutture è un problema conclamato**, che riguarda tutti i Paesi dove si è iniziato a costruire a partire dagli anni quaranta. Il monitoraggio strutturale è comunque in genere limitato alle strutture più importanti a causa della complessità e dei costi di installazione/gestione.
- **La costruzione di nuove infrastrutture integrate con sistemi di SHM (Structural Health Monitoring)** è anche un campo di interesse estremamente sentito e pressante, sempre con un occhio ai costi del sistema di monitoraggi, dell'installazione e di gestione.

# Il Problema

4

- Il monitoraggio strutturale (**Structural Health Monitoring**) è indispensabile per prevenire eventuali problematiche che possono minare la sicurezza pubblica.
- Un sistema di monitoraggio strutturale è un insieme di strumenti e procedure progettati per monitorare e valutare le condizioni di una struttura, come un edificio, un ponte, una diga o un'altra infrastruttura. Comprende sensori, hardware di acquisizione dati, software per l'analisi e l'interpretazione dei dati e strategie per prendere decisioni basate sui dati acquisiti (che possono anche prevedere approcci di AI).



# Il Problema

5

- Si tratta di sistemi fondamentali per garantire la sicurezza, identificare eventuali problemi strutturali e pianificare le attività di manutenzione:
- **1 sensori:** i sensori sono gli elementi più fondamentali di un sistema di monitoraggio strutturale. Possono includere accelerometri, inclinometri, sensori di deformazione, sensori di temperatura, sensori di umidità e molti altri. Questi sensori rilevano e registrano vari parametri fisici che possono indicare cambiamenti nella condizione della struttura.
- **2 hardware di acquisizione dei dati:** questo componente raccoglie i dati dai sensori e li trasmette al sistema di elaborazione dei dati. Questo può includere moduli di acquisizione dati, sistemi di trasmissione dati e altri dispositivi.
- **3 software di elaborazione dei dati (SHM – Structural Health Monitoring software):** questo è il cuore del sistema di monitoraggio strutturale. Questo software riceve i dati dall'hardware di acquisizione dei dati, li elabora e produce risultati utili. Questi risultati possono includere grafici, diagrammi, tabelle e altri visualizzazioni che rendono i dati facilmente comprensibili.
- **4 modelli di interpretazione dei dati:** questi sono algoritmi o procedure utilizzati per interpretare i dati raccolti. Questi modelli possono aiutare a identificare tendenze, rilevare anomalie e prevedere possibili problemi futuri.
- **5 protocolli di risposta:** questi sono piani d'azione che vengono implementati quando il sistema di monitoraggio strutturale rileva un problema. Questi possono includere procedure di manutenzione, evacuazione, o altri interventi.

# Il Problema

6

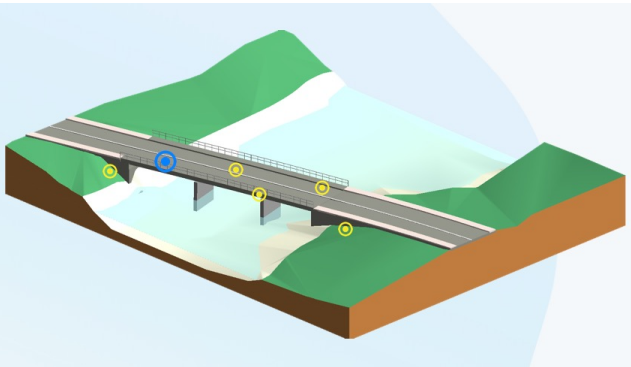
In conclusione, un **sistema di monitoraggio strutturale** è un insieme complesso di componenti che lavorano insieme per monitorare e mantenere l'integrità di una struttura. Il successo di questi sistemi dipende dalla qualità dei sensori, dall'efficacia dell'hardware e del software di acquisizione e di elaborazione dei dati e dalla capacità di interpretare e rispondere adeguatamente ai dati raccolti.

In questo seminario tratteremo il tema dei SENSORI, con particolare riferimento ai sensori in Fibra Ottica

# e le Autostrade...

7

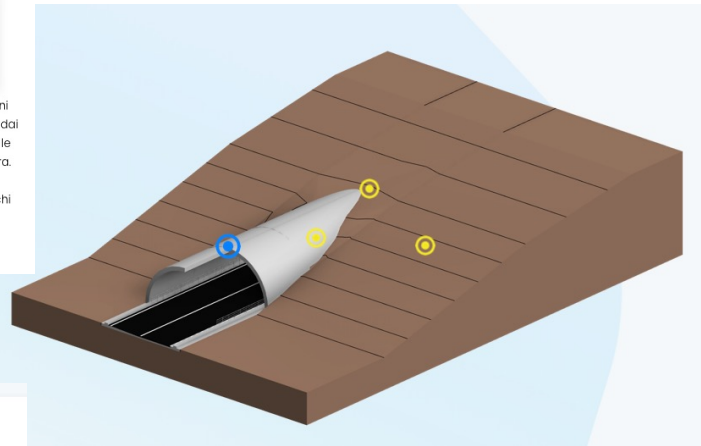
- Ovviamente non fanno eccezioni le grandi strutture del sistema Stradale – Autostradale italiano
  - ▣ Ponti, Viadotti, Gallerie, etc...



## Analisi modale



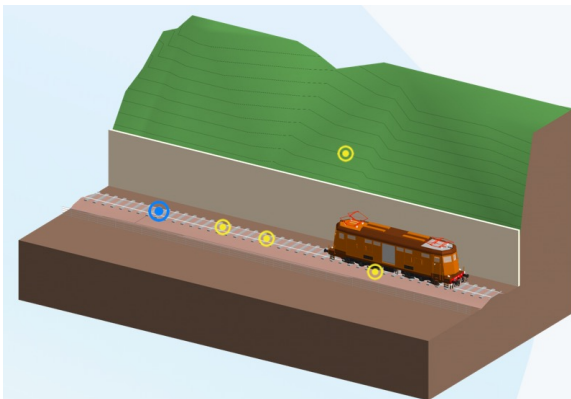
Mettendo in relazione tutte le oscillazioni giornaliere rilevate da Accelerometri e dai sensori Deck, è possibile comprendere le frequenze modali naturali della struttura. Le frequenze modali sono epurate dal rumore bianco come il traffico o i carichi pesanti anomali.



## Convergenza



L'inserimento di un sistema di Inclinatori nella stessa sezione permette di ottenere variazioni angolari e una misura della convergenza/divergenza del tunnel. Il sistema così studiato può essere applicato in corso d'opera per monitorare la stabilità a breve/lungo termine e facilmente implementato in corso d'opera.



## Dislivello dei binari

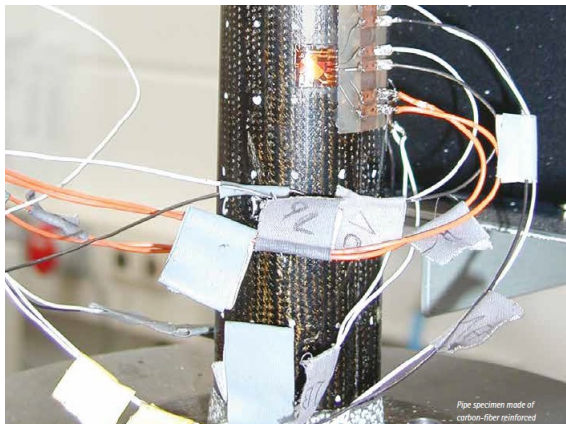
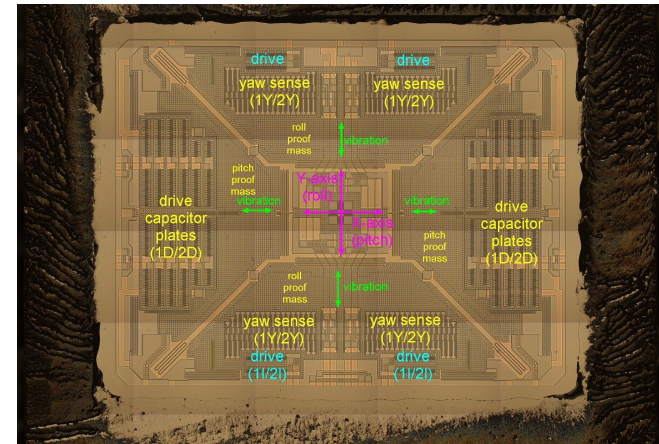
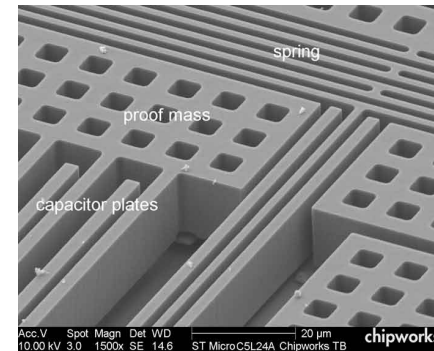


Il livello trasversale è definito come la pendenza trasversale del binario espressa come la differenza di altezza tra le due rotaie. L'uso dei Inclinatori, posizionato sulla traversina, permette di ottenere la misura del dislivello dei binari utilizzando lo strumento e di monitorare il suo trend nel tempo.

# Per il monitoraggio di strutture

8

Si usa(va)no strain gages  
sensori elettronici, capacitive,  
MEMS, MOEMS  
Etc...



Che di solito prevedono complessi sistemi di cablatura e  
diventano sensibili alle condizioni ambientali  
Ora siamo nell'era dell'IoT



# Perché sensori in Fibra Ottica?



Source: NASA Langley  
Composite wing IVHM testing



**400 sensori convenzionali a strain gauge**



**500 sensori di strain a fibra ottica FBG**

# Possibili sensori Elettronici in IoT

10



Sensore di spostamento GPS



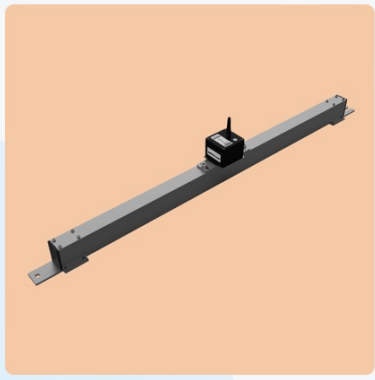
Sensore di Tilt



Accelerometro



Vibrometro



Tilt Bar



Nodo analogico



Nodo Digitale

# Possibili sensori Elettronici in IoT

11



Sensore multi-parametrico



Gateway SHM



Sensore di spostamento a filo



# Fiber Bragg Gratings: applicazioni

12

## □ Applicazioni:

- ▣ Filtri ottici in sistemi TLC
- ▣ Add/Drop Multiplexer in sistemi TLC
- ▣ **Sensoristica**

## □ Vantaggi

- ▣ Piccoli e Leggeri
- ▣ Immunità ad interferenze ElettroMagnetiche
- ▣ Possibilità di lavorare in ambienti 'pericolosi'
- ▣ Alta sensibilità, versatilità e banda passante
- ▣ Semplicità di multiplexing
- ▣ Assenza di circuiteria elettronica nel luogo della misura



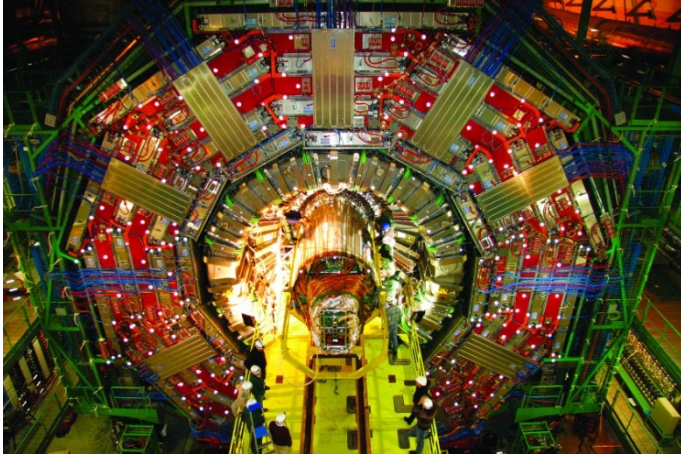
# L' FBG come sensore

13

- Dagli anni '80, gli FBG sono stati usati in applicazioni di monitoraggio
- Il gran numero di vantaggi e la facilità d'uso ha consentito un rapido e inarrestabile sviluppo di questa tecnologia
- Applicazioni di monitoraggio più comuni e diffuse :
  - ▣ Monitoraggio di deformazioni strutturali
  - ▣ Monitoraggio della Temperatura
- Oggi i sensori FBG sono una tecnologia di monitoraggio consolidata ed efficiente
- In alcuni casi costituiscono l'unica opzione per effettuare misurazioni, soprattutto in ambienti ostili all'elettronica classica o dove è presente un elevato livello di radiazioni ionizzanti

# Principali Campi di Applicazione

14



# La storia dell'Fiber Bragg Grating

15

- 1978 Scoperta della fotosensibilità delle fibre ottiche (K. O. Hill) [1]
- 1989 Tecnica di scrittura laterale UV (G. Meltz) [2]
- 1993 Tecnica di scrittura con maschera (K. O. Hill) [3]  
Fotosensibilizzazione da drogaggio di idrogeno (J. Lemaire) [4]
- 1995 Produzione commerciale di FBG (3M, Bragg Photonics, ecc.)  
Primo interrogatore FBG commerciale (*Electro-Photonics*)
- 1997 Impiego degli FBG nei sistemi WDM (Ciena)
- 2000 Strumentazione FBG avanzata (Micron Optics)
- 2003 Array FBG commerciali da bobina a bobina (LxSix, Sabeus)
- 2007 Primo strain-gauge FBG preconfezionato (Micron Optics)  
Prima azienda produttrice di strain-gauge a offrire sensori FBG (HBM)

[1] K. O. Hill, et al. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication", Appl. Phys. Lett. 32 (10): 647 (1978).

[2] G. Meltz, et al. "Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method", Opt. Lett. 14 (15):823 (1989).

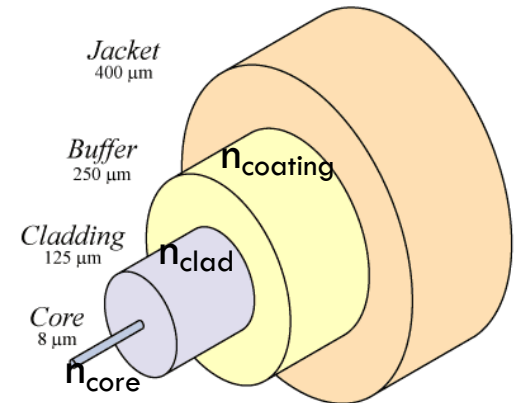
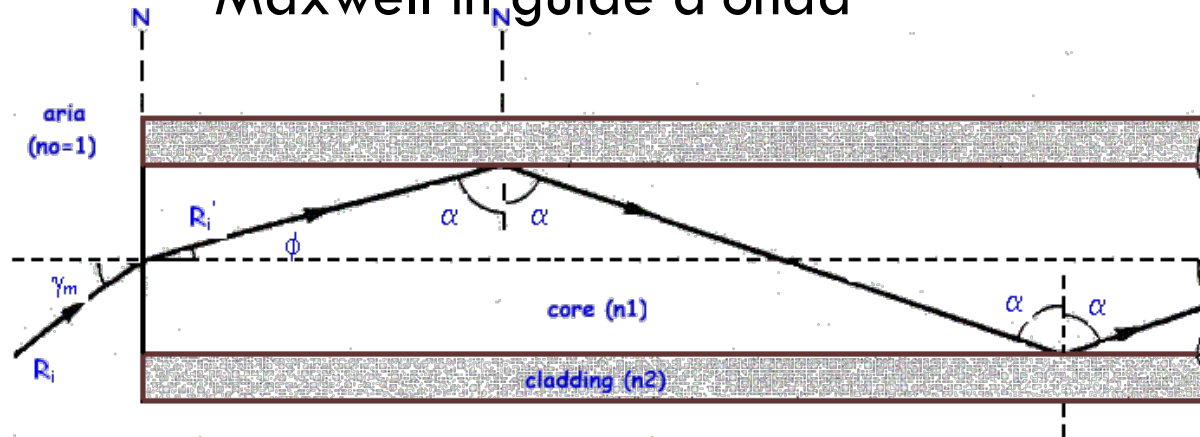
[3] K. O. Hill, et al. "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", Appl. Phys. Lett. 62, 1035 (1993).

[4] J. Lemaire, et al. "High pressure H2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity of GeO2 doped optical fibers", Elec Lett., vol. 29, pp.1191-1193 (1993).

# La Propagazione in Fibra Ottica

16

- I Modi di Propagazione: sono soluzioni delle equations Maxwell in guide d'onda



- Il campo EM si propaga longitudinalmente, in condizioni TIR, senza una significativa attenuazione
- La perdita di potenza residuale è dovuta ad effetti di scattering non radiativa.
- Meno di 0,2dB/Km (@ 1550nm) sono i valori di perdita

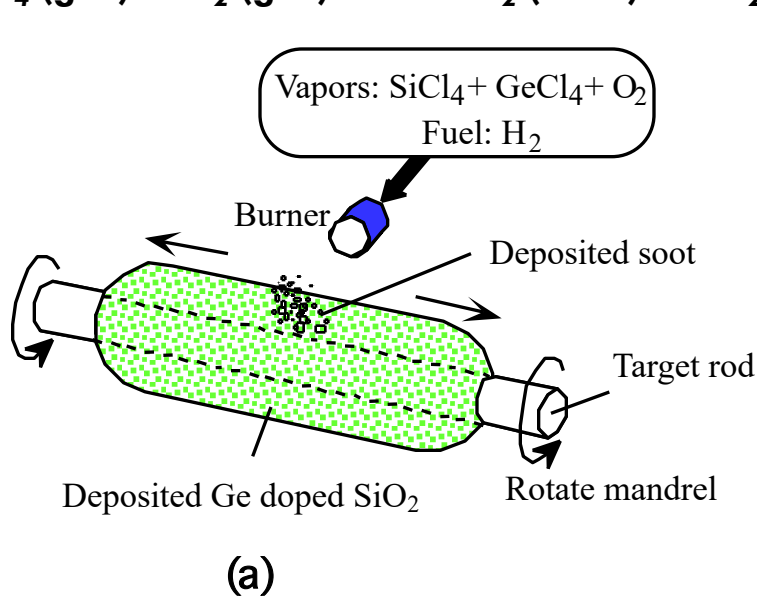
# Tecnologie delle Fibre Ottiche

## ❑ Le tecnologie per la costruzione delle Fibre Ottiche

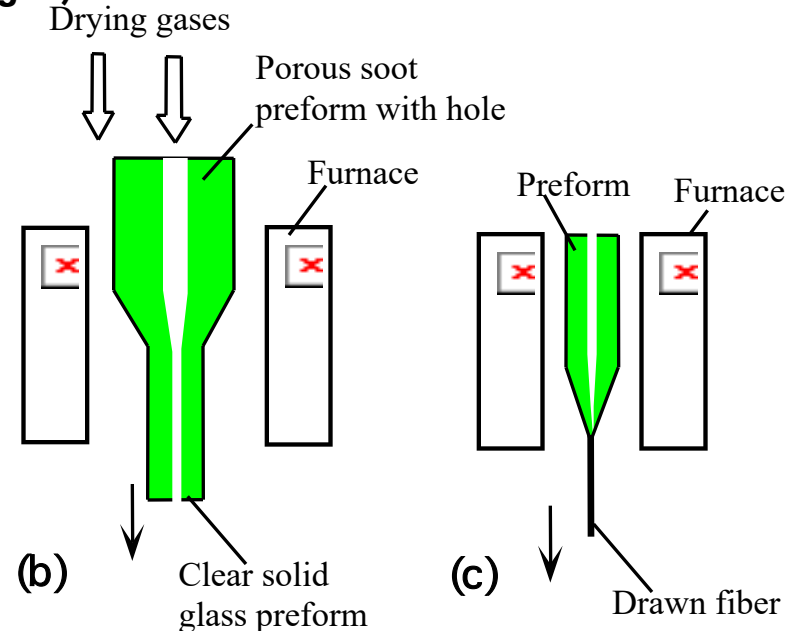
- Ossidazione Esterna da Fase Vapore
- Deposizione Assiale da Fase Vapore
- Deposizione Modificata a Vapori Chimici
- Deposizione attivata da plasma a Vapori Chimici
- Metodo del Doppio Crogiuolo

# Tecnologie delle Fibre Ottiche

❑ **Illustrazione schematica dell'OVD e della preparazione della preforma per la trafilatura delle fibre**



Reaction of gases in the burner flame produces glass soot that deposits on to the outside surface of the mandrel.

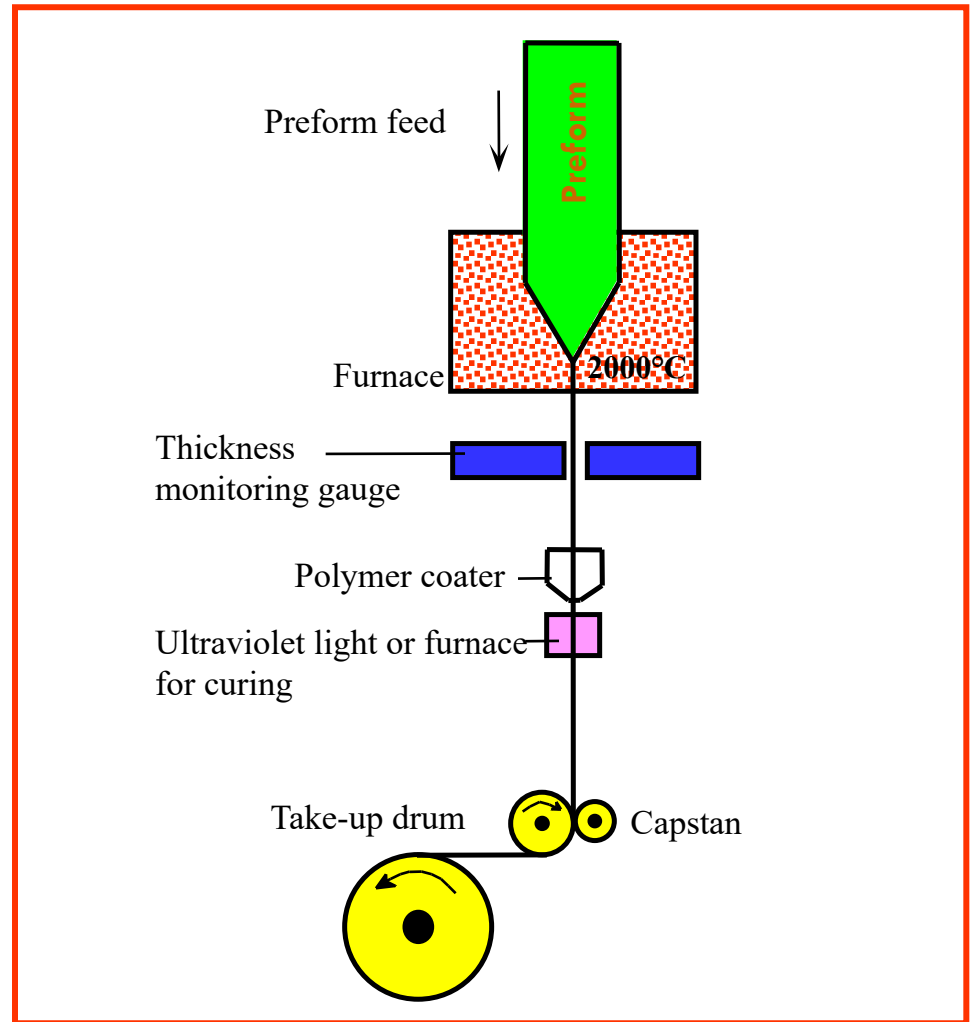


The mandrel is removed and the hollow porous soot preform is consolidated; the soot particles are sintered, fused, together to form a clear glass rod.

The consolidated glass rod is used as a preform in fiber drawing.

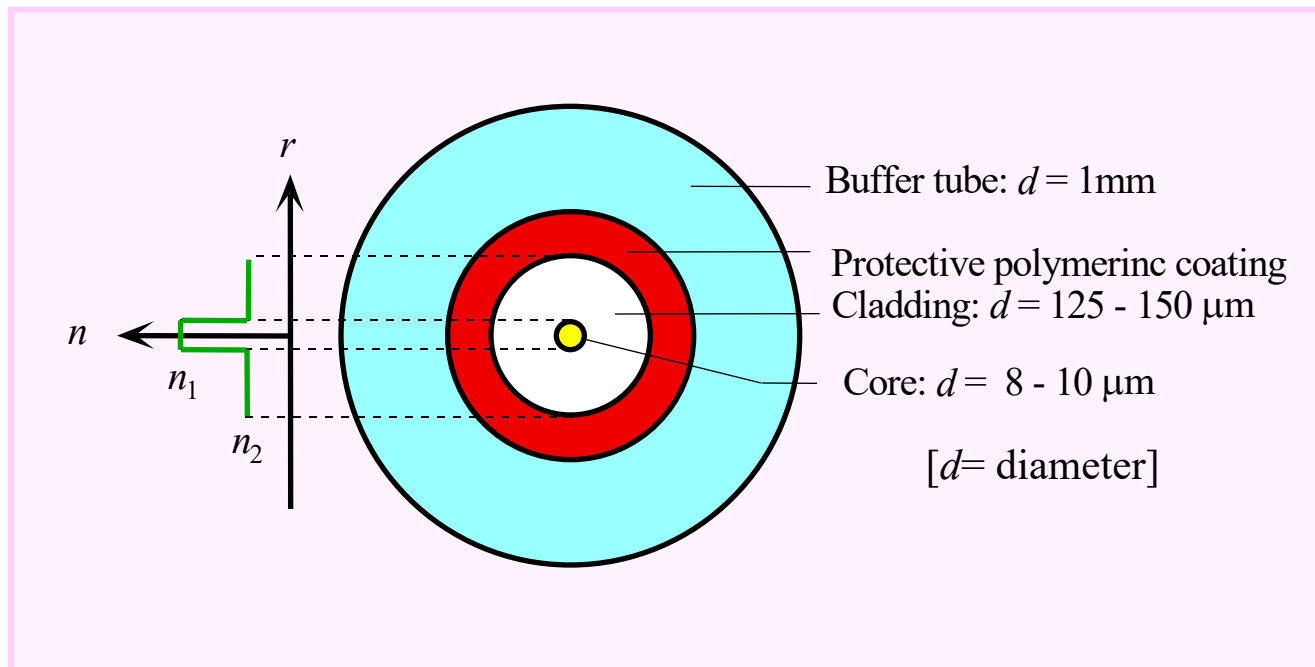
# Tecnologie delle Fibre Ottiche

❑ **Rappresentazione schematica di una torre di trafilatura in fibra.**



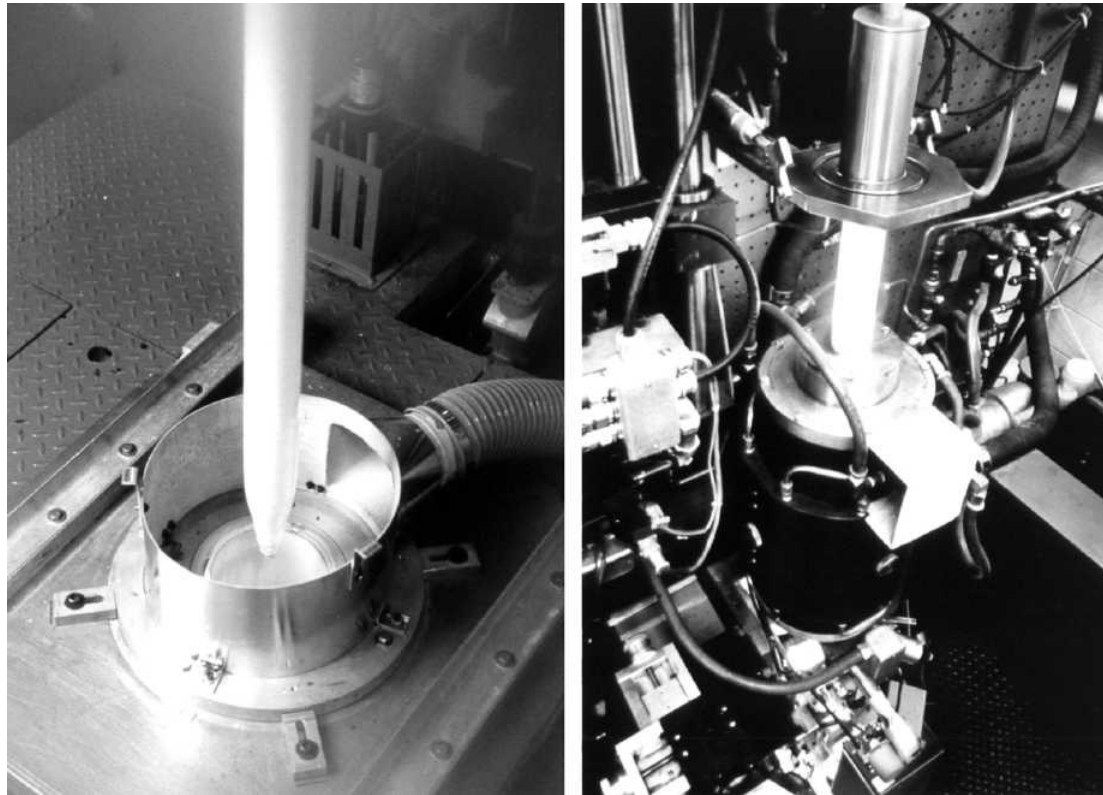
# Tecnologie delle Fibre Ottiche

- ❑ **La sezione trasversale di una tipica fibra monomodale con buffer di ricopertura stretto.**





# Tecnologie delle Fibre Ottiche



# Tecnologie delle Fibre Ottiche

22





# Fiber Bragg Gratings (FBG)

# L' FBG come sensore

- Dagli anni '80, gli FBG sono stati usati in applicazioni di monitoraggio
- Il gran numero di vantaggi e la facilità d'uso ha consentito un rapido e inarrestabile sviluppo di questa tecnologia
- Applicazioni di monitoraggio più comuni e diffuse :
  - ▣ Monitoraggio di deformazioni strutturali
  - ▣ Monitoraggio della Temperatura
- Oggi i sensori FBG sono una tecnologia di monitoraggio consolidata ed efficiente
- In alcuni casi costituiscono l'unica opzione per effettuare misurazioni, soprattutto in ambienti ostili all'elettronica classica o dove è presente un elevato livello di radiazioni ionizzanti

# La storia dell'Fiber Bragg Grating

- 1978 Discovery of optical fiber photosensitivity (*K. O. Hill*) [1]
- 1989 UV side-writing technique (*G. Meltz*) [2]
- 1993 Mask writing technique (*K. O. Hill*) [3]  
Hydrogen loading photosensitization (*J. Lemaire*) [4]
- 1995 Commercial FBG production (*3M, Bragg Photonics, etc*)  
First commercial FBG interrogator (*Electro-Photonics*)
- 1997 Deployment of FBGs in WDM systems (*Ciena*)
- 2000 Advanced FBG instrumentation (*Micron Optics*)
- 2003 Commercial reel-to-reel FBG arrays (*LxSix, Sabeus*)
- 2007 First pre-packaged FBG strain gauge (*Micron Optics*)  
First strain gauge company to offer FBG sensors (*HBM*)

[1] K. O. Hill, et al. "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection fiber fabrication", Appl. Phys. Lett. 32 (10): 647 (1978).

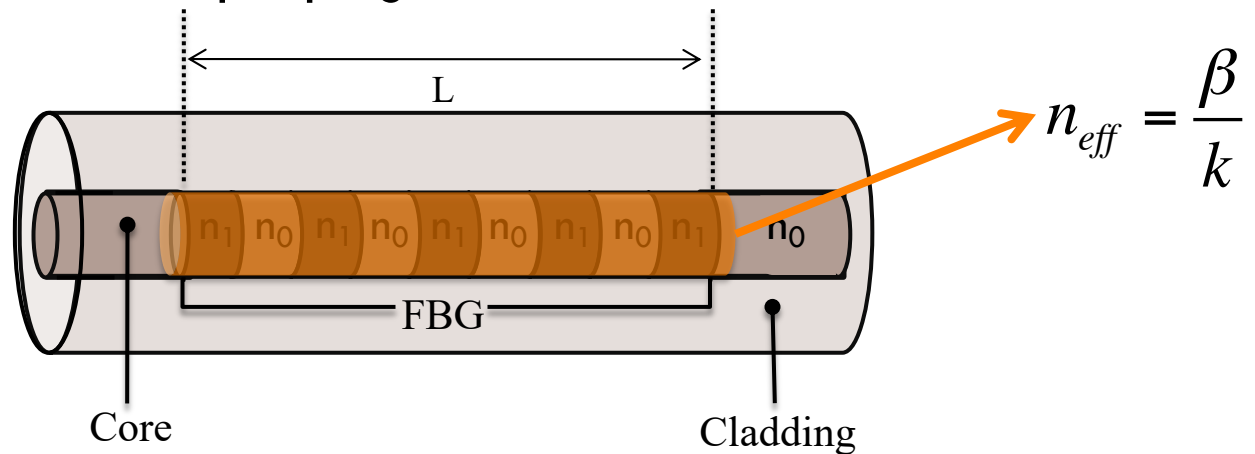
[2] G. Meltz, et al. "Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method", Opt. Lett. 14 (15):823 (1989).

[3] K. O. Hill, et al. "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask", Appl. Phys. Lett. 62, 1035 (1993).

[4] J. Lemaire, et al. "High pressure H2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity of GeO2 doped optical fibers", Elec Lett., vol. 29, pp.1191-1193 (1993).

# FBG

Un Bragg Grating in una fibra ottica è realizzato creando una a perturbazione periodica dell' indice di rifrazione nel core lungo la direzione di propagazione



- L'inomogeneità del core «attiva» un accoppiamento multiplo dei modi di propagazione e genera modi countro-propagati

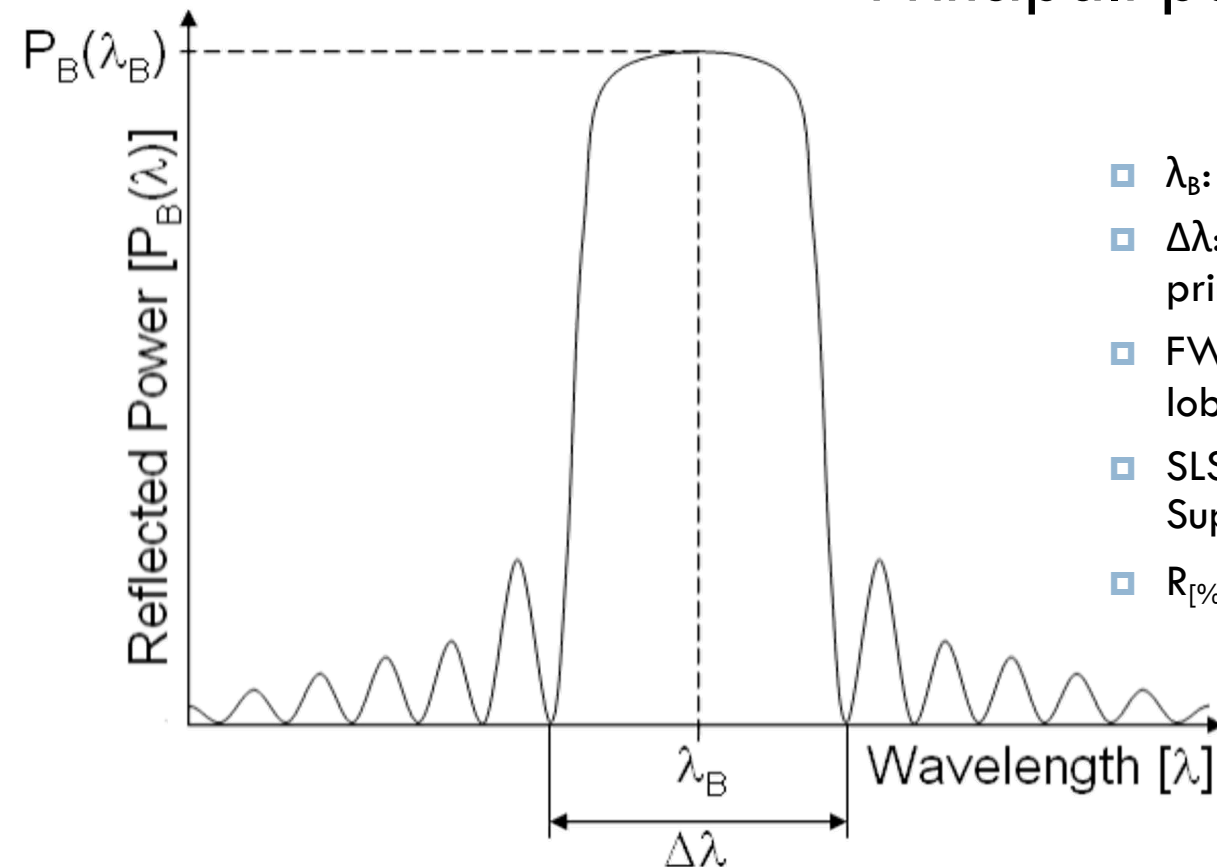
# Coupled Mode Theory (CMT)

- La Coupled Mode Theory permette di ottenere le soluzioni dei modi contro-propaganti
  - ▣ Modi accoppiati in distribuzioni differenziali spaziali del campo
  - ▣ Modi accoppiati in differenti polarizzazioni
  - ▣ O in condizioni miste.
- CMT è usata per studiare i fenomeni di accoppiamento fra modi co-propaganti, modi contro-propaganti e modi radiativi .

# Soluzione caratteristica per un FBG

28

## Principali parametri di un FBG



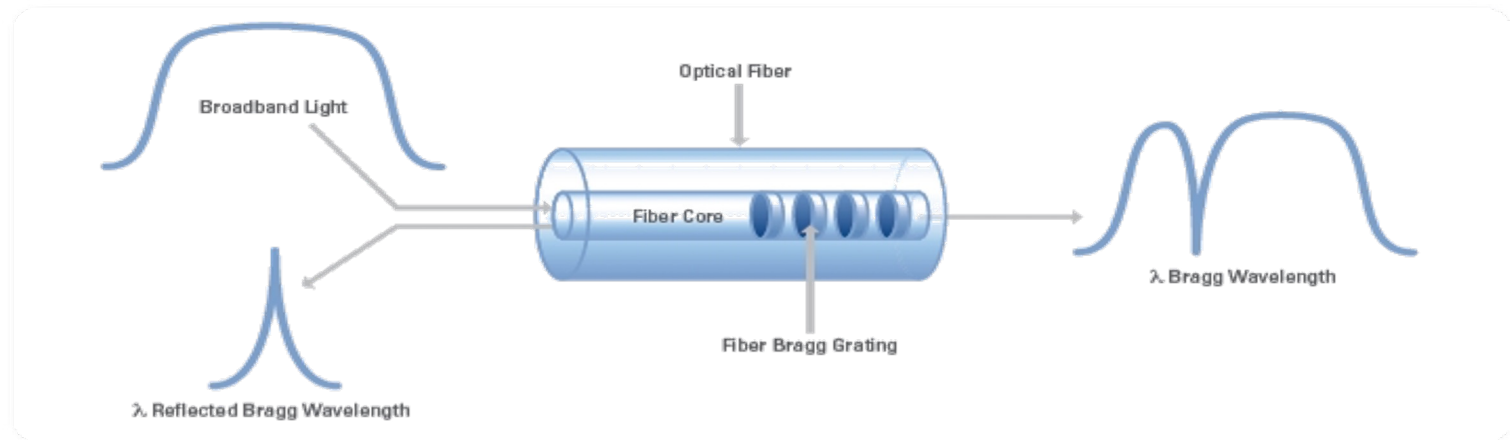
- ▣  $\lambda_B$ : lunghezza d'onda di Bragg
- ▣  $\Delta\lambda$ : larghezza del lobo principale width
- ▣ FWHM: larghezza a 3 dB del lobo principale
- ▣ SLSR [dB]: Side Lobe Suppression Ratio
- ▣  $R_{[\%]}$ : Grating Power Reflectivity



# Risposta Spettrale di FBG

29

- Un reticolo in fibra di Bragg è costituito da modifiche periodiche dell'indice di rifrazione (RI) nel nucleo di vetro di una fibra ottica monomodale (SMF-28). Le modifiche RI vengono apportate dall'esposizione ai raggi UV.



Lunghezza d'onda di Bragg

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

$n_{eff}$ : indice di rifrazione effective

$\Lambda$ : periodo del grating

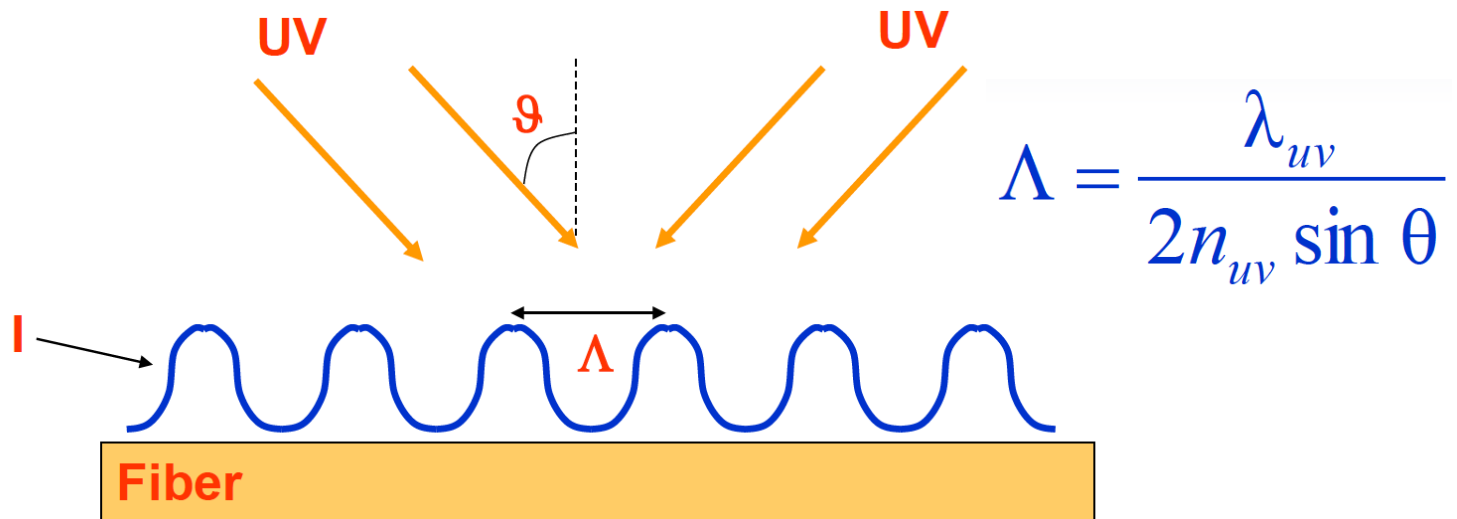
# Come si fabbrica un sensore FBG

- Si sfrutta la fotosensibilità della fibra ottica
  - ▣ Le fibre ottiche monomodali drogate al germanio, sono molto più fotosensibili ai raggi UV rispetto a quelle standard.
  - ▣ L'esposizione ai raggi UV cambia sull'indice di rifrazione del nucleo (solo)
  - ▣ Il rivestimento in fibra è trasparente ai raggi UV
- Tecnica Olografica [Meltz - 1989]:
  - ▣ Due raggi UV interferenti che producono uno schema periodico lungo la fibra la
  - ▣ alta intensità: aumento dell'indice di rifrazione ( $+10^{-4}$ )
  - ▣ bassa intensità: indice di rifrazione invariato
- Tecnica della Maschera di Fase [Hill - 1993]:
  - ▣ un elemento diffrattivo (la maschera) crea i raggi interferenti
- LASER ai Femtosecondi [Bennion – 2004]:
  - ▣ Scrittura diretta del Bragg utilizzando la tecnologia infrarossa di fs-LASER.

Possibilità di progettare la risposta FBG manipolando le caratteristiche del reticolo: modulazione dell'indice, indici cladding/core, periodo del reticolo.

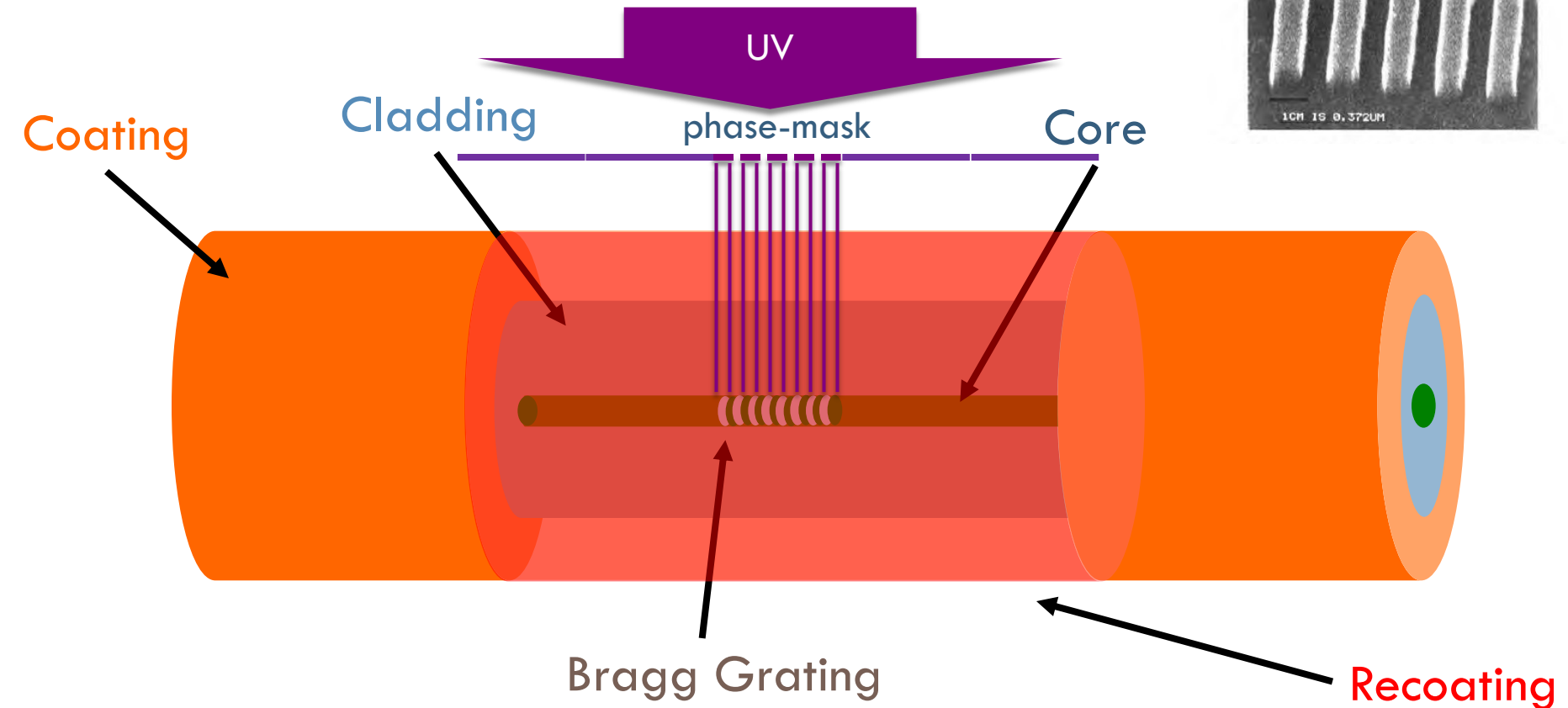
# Tecnica Olografica

**Raggi UV interferenti con differenza di angolo:  $\Delta n$  sinusoidale**



# Tecnica della Maschera di Fase

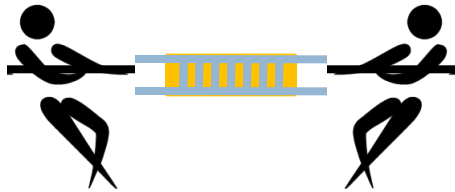
- Gli FBG sono fabbricati da una fibra monomodale standard mediante "scrittura" UV del core della fibra



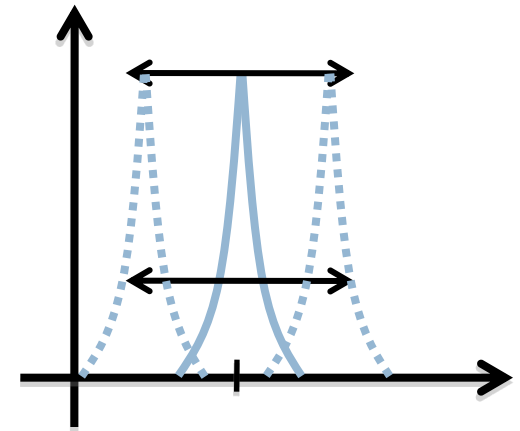
FBG come sensore

# Effetti dello Strain & Temperature

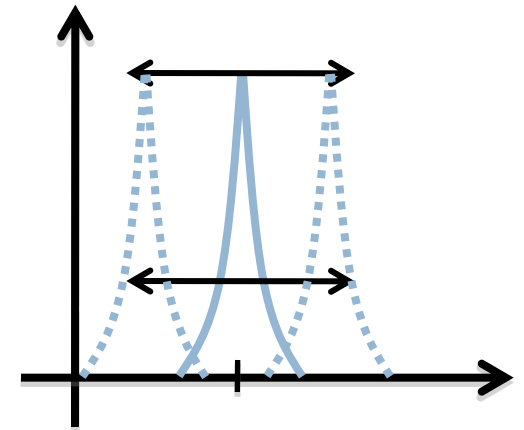
34



Lo Strain  
cambia  $\Lambda$  in via diretta  
tramite la deformazione e  
la variazione di  $n$  via  
effetto elasto ottico



La Temperatura cambia  $n$   
via effetto termo ottico e  
 $\Lambda$  via espansione termo  
meccanica



# Sensibilità alla Temperature

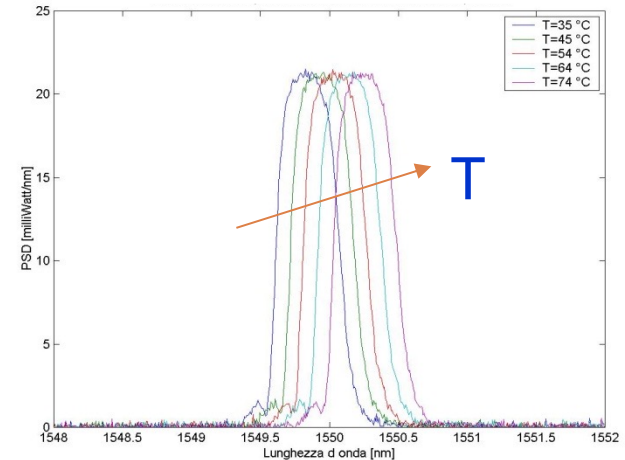
35

$$\left( \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} \right)_T = \alpha \Delta T \quad \text{Effetto di Espansione Termica}$$

$$\left( \frac{\Delta n}{n} \right)_T = \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \Delta T \quad \text{Effetto Termo Ottico}$$

$$\left( \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \right)_T = \left( \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} \right)_T + \left( \frac{\Delta n}{n} \right)_T = \left( \alpha + \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial T} \right) \Delta T = S_T \Delta T$$

$S_T$ : generalmente 10pm/°C



Con :

$\alpha$  : coefficiente di espansione termica per FO

$\Lambda$  : Periodicità del Reticolo

$n$  : Indice di rifrazione del core della FO

# Sensibilità allo Strain

36

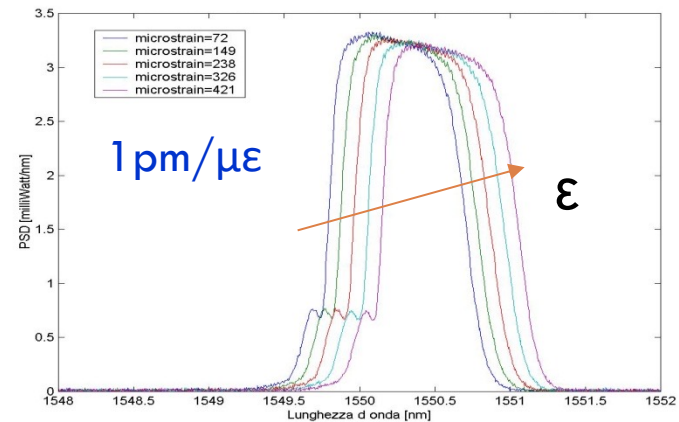
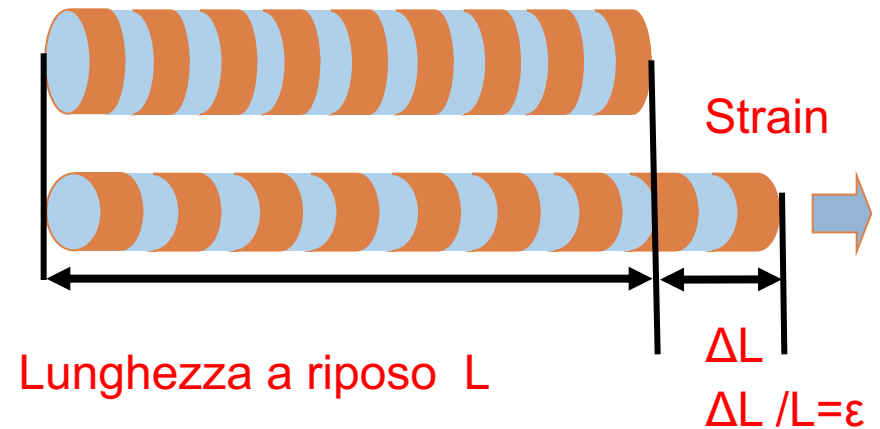
Axial Strain

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = \varepsilon \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\nu \varepsilon \end{cases}$$

$\nu$ : coefficiente di Poisson



$$\left( \frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} \right)_{\varepsilon} = \left( \frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} \right)_{\varepsilon} + \left( \frac{\Delta n}{n} \right)_{\varepsilon} = \left\{ 1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu \cdot (p_{11} + p_{12})] \right\} \varepsilon_1 = S_{\varepsilon} \varepsilon$$



Strain Sensitivity  $[(\Delta \lambda_B / \lambda_B) / \varepsilon]$ :  
 $8,0 \cdot 10^{-7} \mu \varepsilon^{-1}$  @  $\lambda_B = 1550 \text{ nm}$



# Principio di Sensing : misure dirette

37

- La lunghezza d'onda di Bragg  $\lambda_B$  dipende dalle proprietà geometriche e fisiche del reticolo in fibra

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

- Le fibre ottiche drogate con germanio presentano un coefficiente termo-ottico elevato e un modulo Young abbastanza buono
- Possibilità di uso del sensore FBG in configurazione standard
  - Variazioni di  $n_{eff}$  by TOE: Misure di Temperatura
  - Variazioni di  $\Lambda$  by EOE: Misure di strain
  - Variazioni di  $n_{eff}$  by SRI: Caratterizzazioni di RI
- Misurando le variazioni di  $\lambda_B$  è possibile utilizzare i sensori FBG come estensimetri, termometri e rifrattometri.

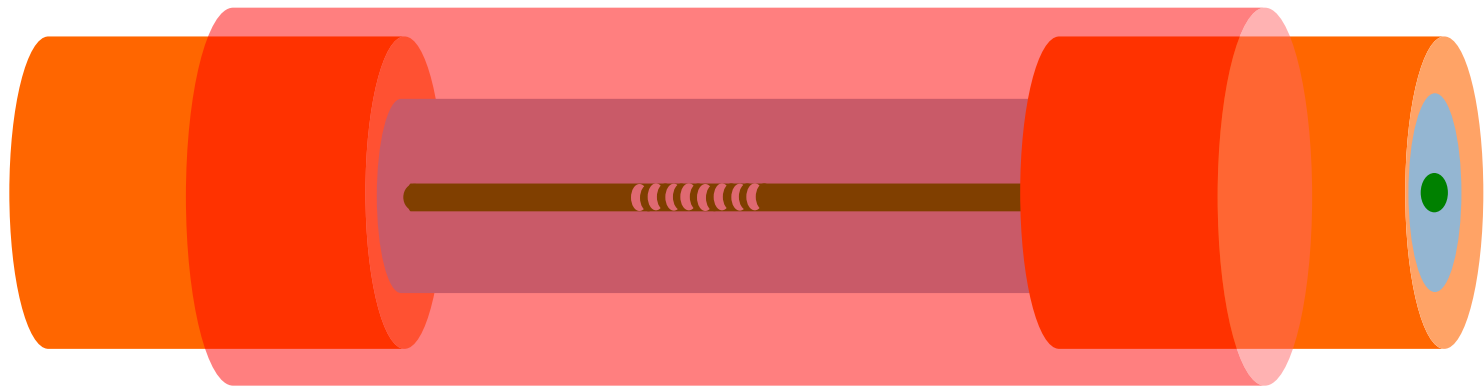
# Sensing di Temperatura

## Thermo-Optic Effect (TOE)

38

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T$$

TEMPERATURE



Tipica sensibilità: 10pm/°C ±1.7pm/ °C

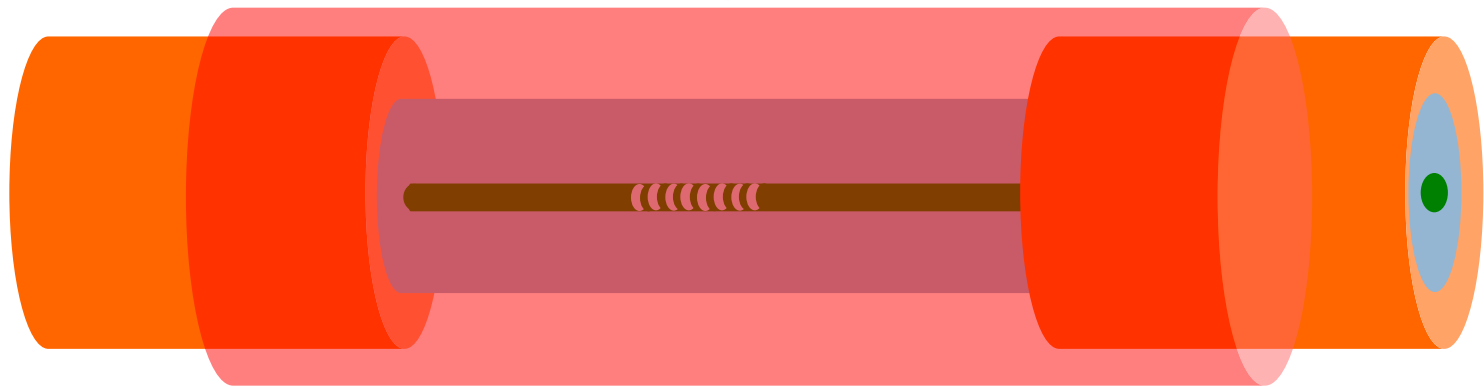
# Sensing di Strain/Stress

Elasto-Optic Effect (EOE)

39

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon + (\alpha_\Lambda + \alpha_n)\Delta T$$

STRAIN/STRESS



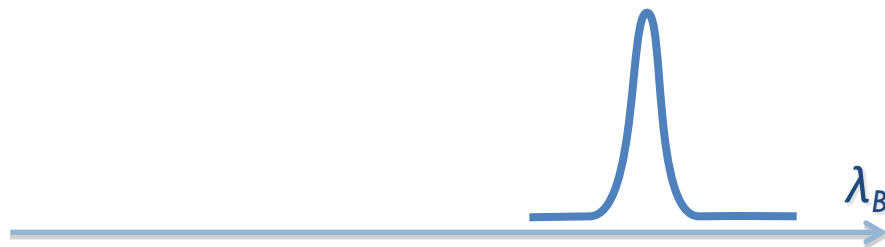
Tipica sensibilita: 1 pm/1 microstrain (um/m)

# Sensing di Indice di Refrazione Esterno

40

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial SRI}\right)\Delta SRI$$

Refractive index Variation



# Tecniche di Interrogazione di FBG

41

## Tecniche Interferometriche

- complesse e costose
- alto livello di risoluzione
- stabile

## Optical Spectrum Analyser (OSA)

- molto costoso
- bassa risoluzione
- bandwidth temporale basso

## Tecniche del Tunable Laser

- costoso
- alto livello di risoluzione
- limitata bandwidth temporale

## Optical Edge Filtering

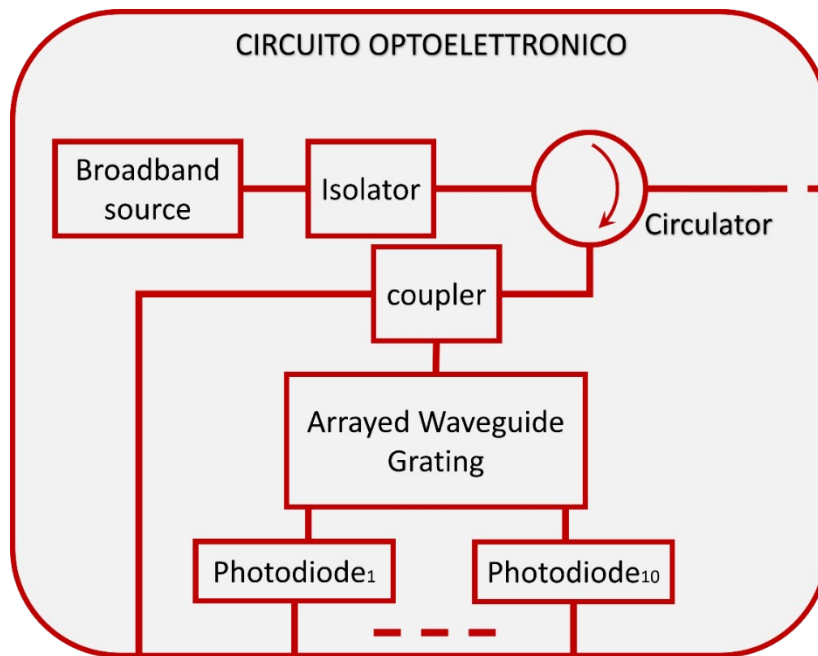
- non complesso & non costoso
- sufficiente livello di risoluzione
- ampia bandwidth temporale

## Optical AWG

- non complesso & non costoso
- buon livello di risoluzione
- ampia bandwidth temporale

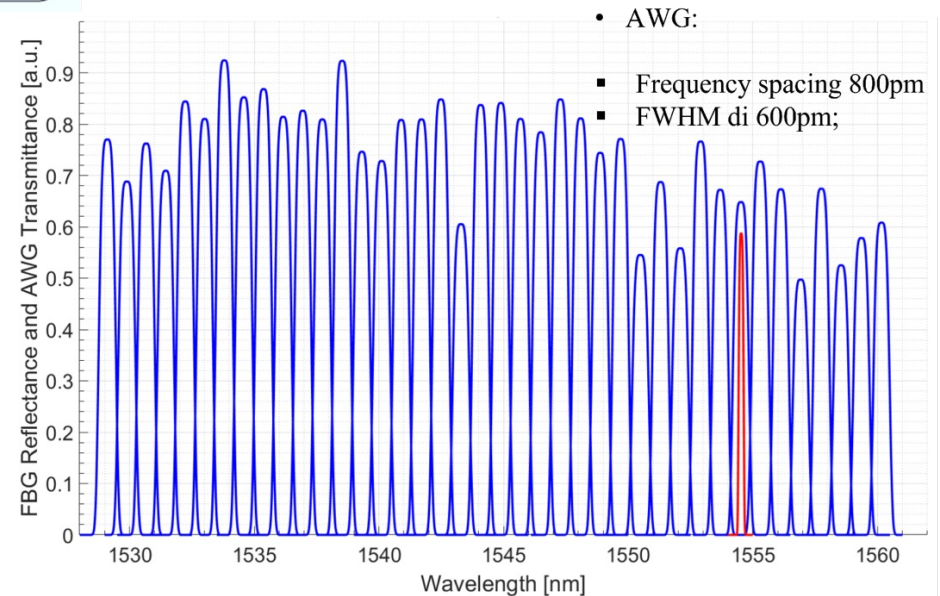
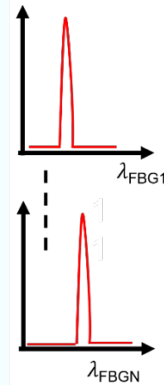
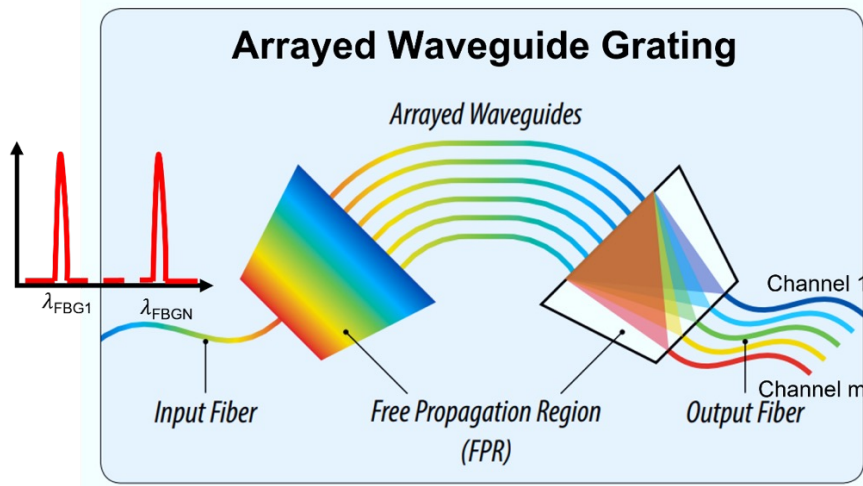
# Sistema di lettura basato su AWG

42



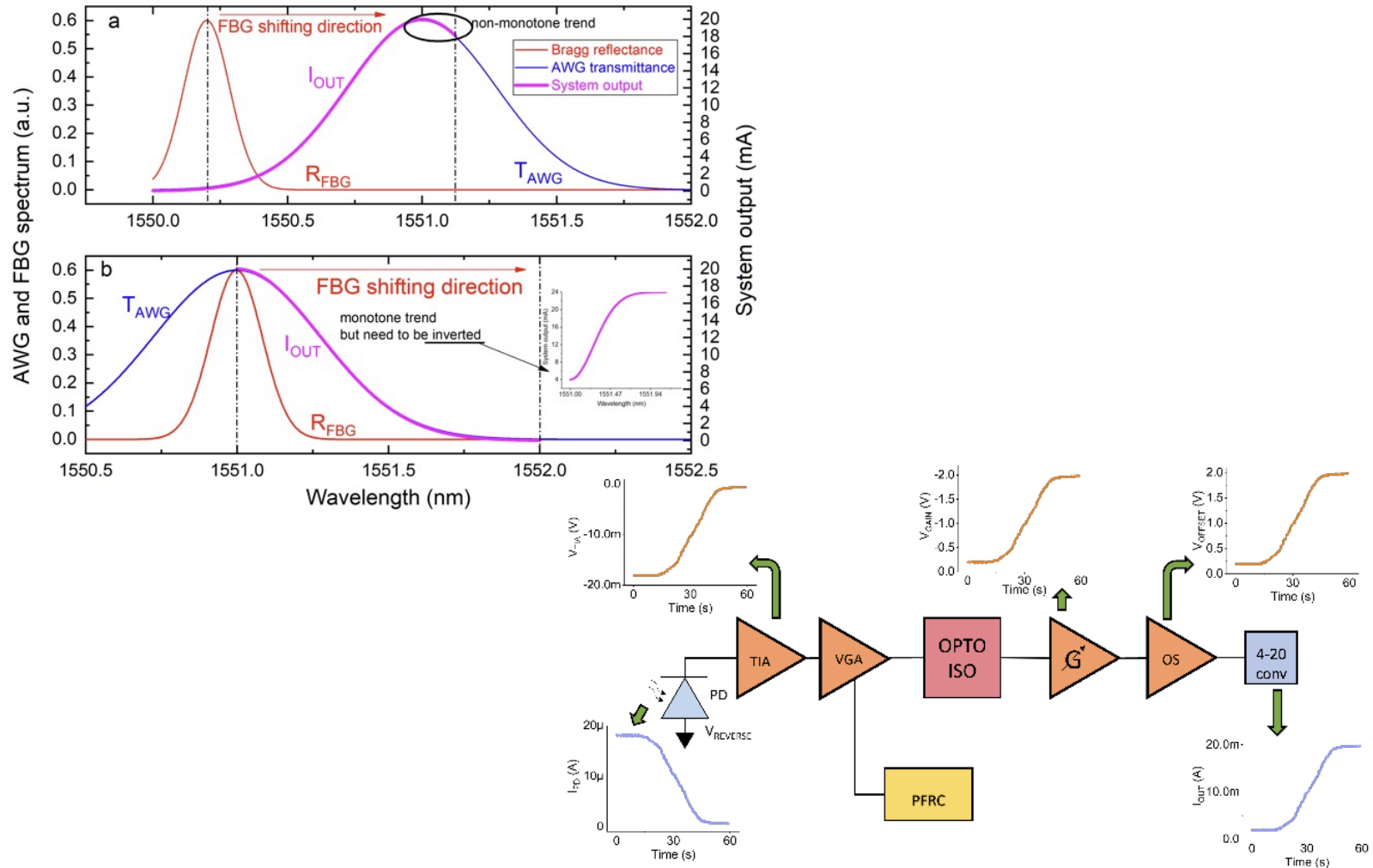
# Il componente OptoElettronico AWG

43



# Risposta ottica di singolo canale AWG: trasformazione $\Delta\lambda$ in variazione di corrente

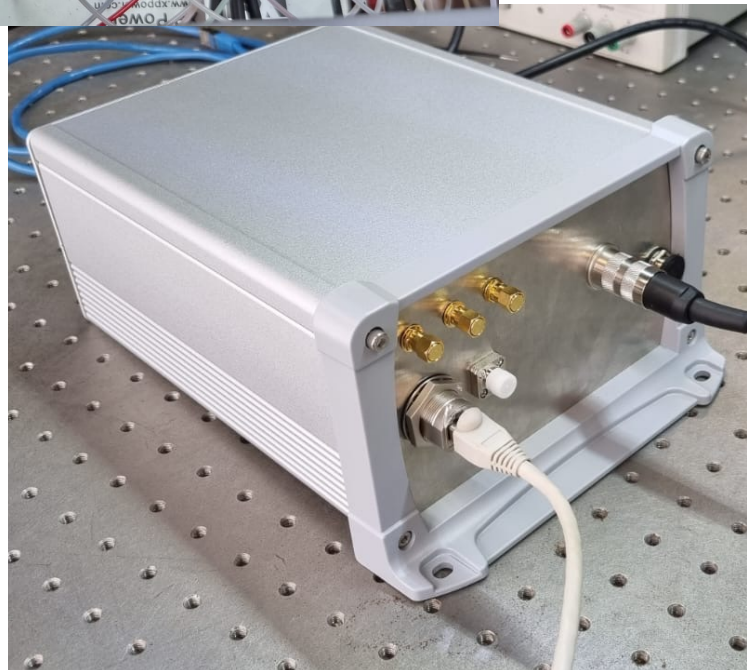
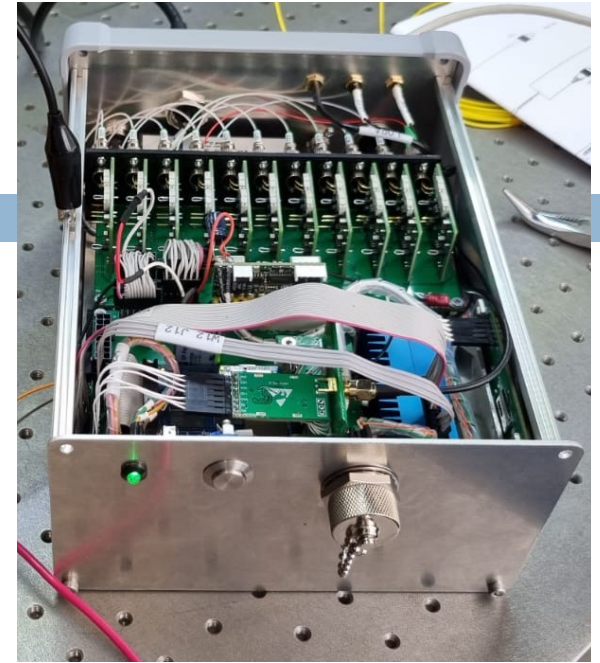
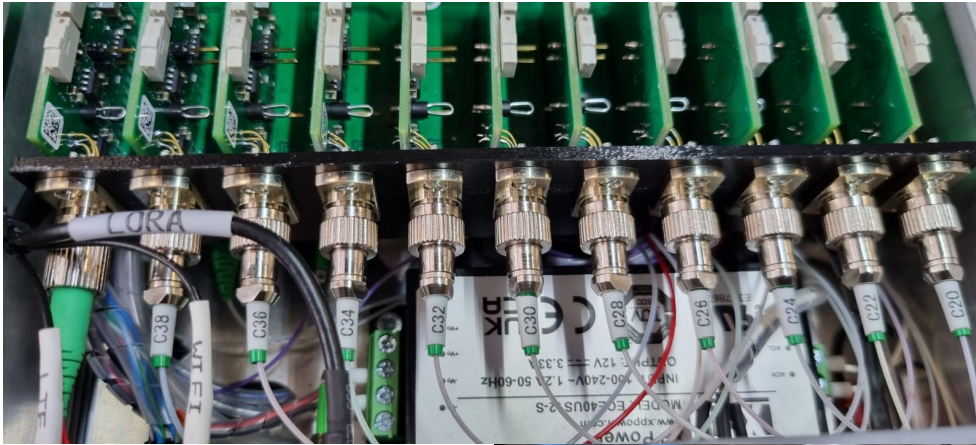
44





# L'HW finale

45

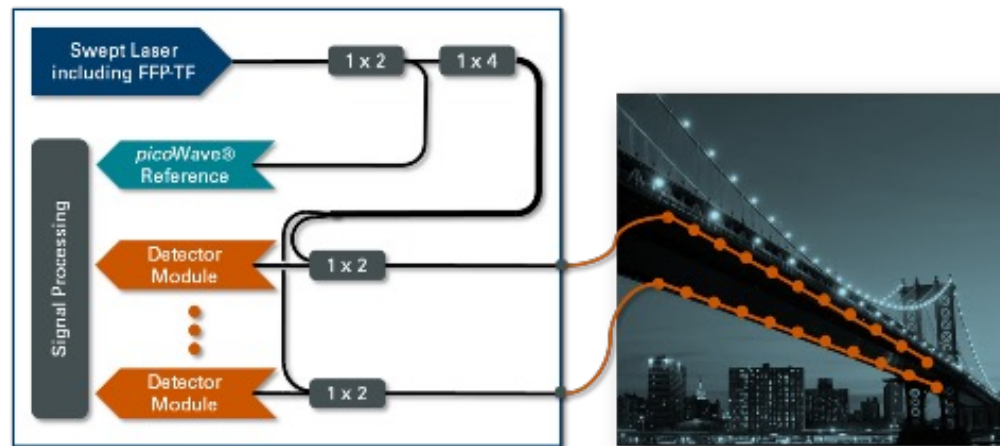


# Tecnica di Interrogazione

## Swept Laser + Tunable Filter

46

- Based on a wavelength swept laser and a tunable optical filter



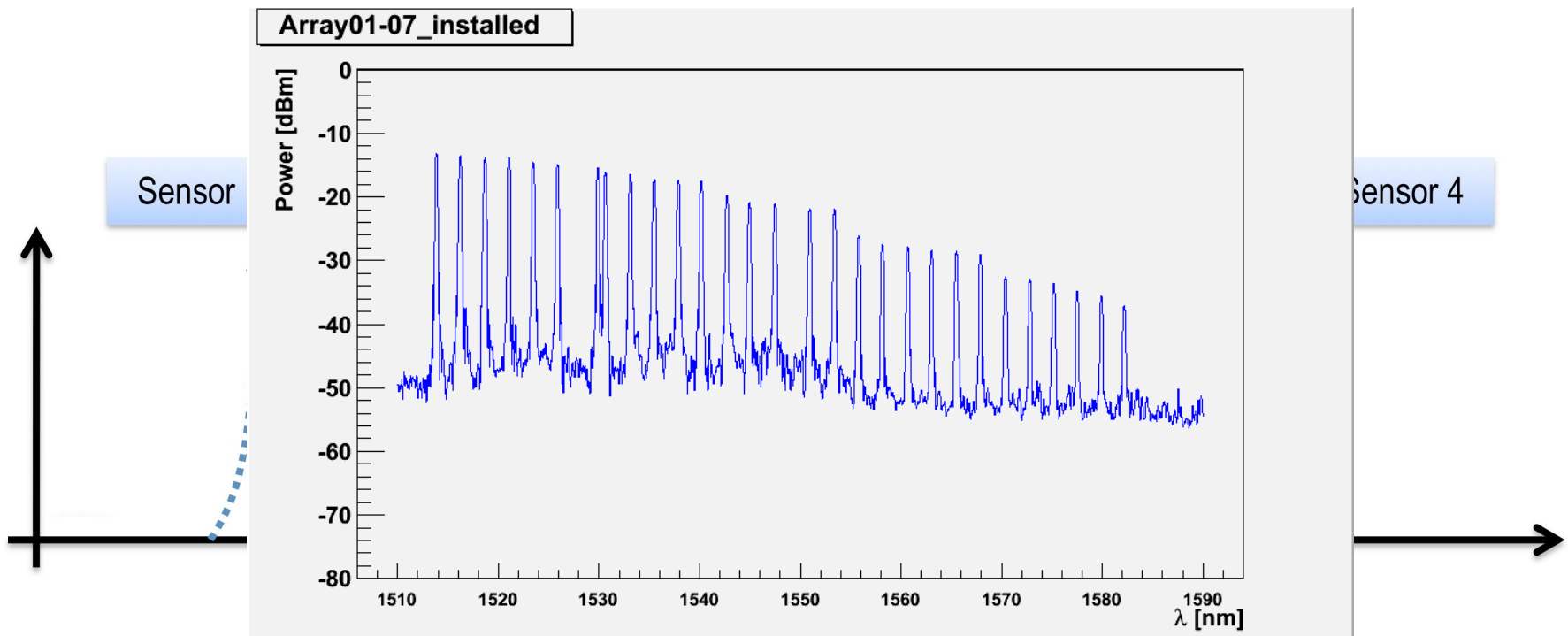
- Advantages:
  - ▣ Real-time measurements
  - ▣ low cost, low weight and ease of handling
  - ▣ from 4 to 8 optical channels (x 4 virtual)
  - ▣ post processing: peak detection, etc.



# Multiplexing di FBG

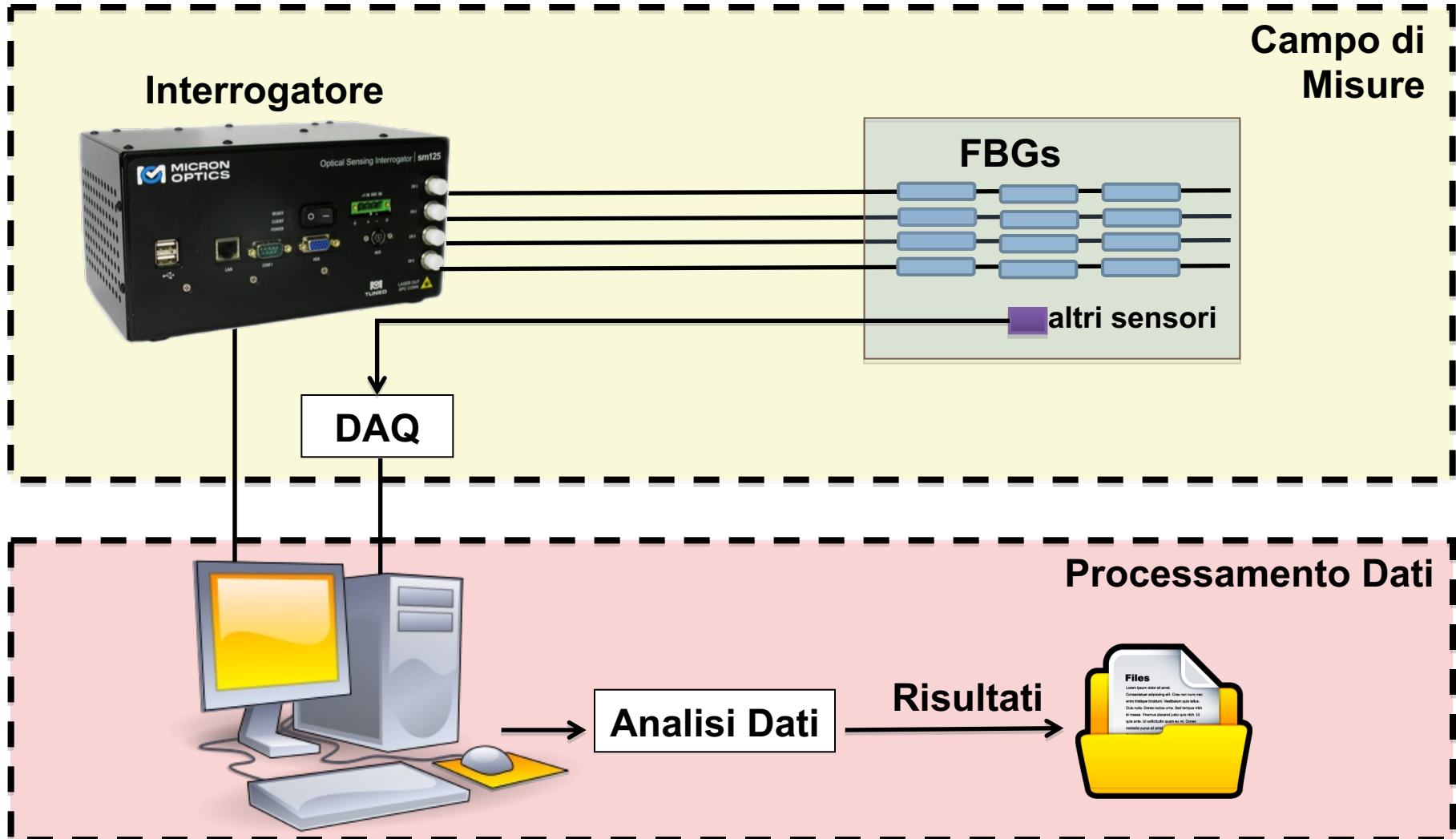
47

- Wavelength Division Multiplexing technique (WDM):
  - ▣ Possibilità di più di 100 punti sensibili per canale (fiber);



# Tipico schema di interrogazione a banda larga

48



# Alcuni esempi di sensori FBG

49

Sensore di Temperature con involucro ceramico



Sensore di Temperature con involucro plastico



Sensore di Strain con compensazione termica



Equivalente di Strain-gauge optoelettronico



Sensore di Pressione



Sensore Magnetico





# Alcuni esempi di sensori FBG

50

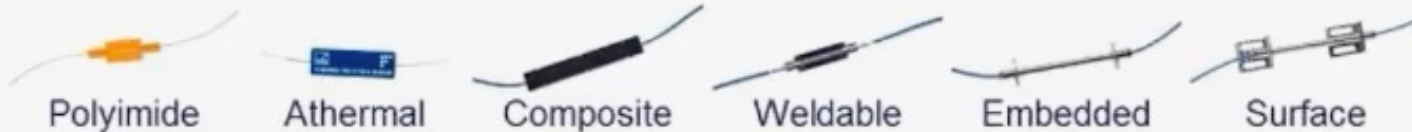
## Products



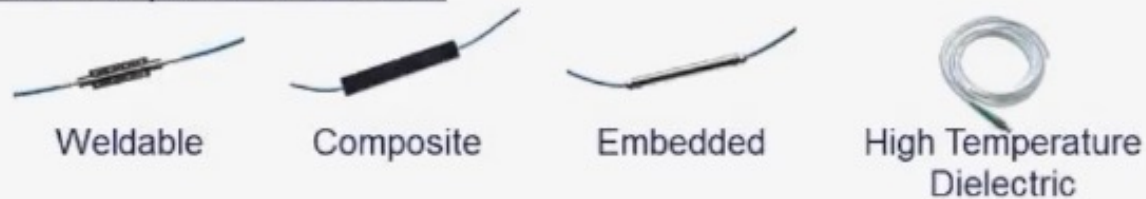
- Sensors

### FS Line

#### FS62 Strain Sensors



#### FS63 Temperature Sensors



#### FS64 Tilt Sensor



#### FS65 Accelerometer



# Esempio di monitoraggio Embedded

51

- **FBG network connections**

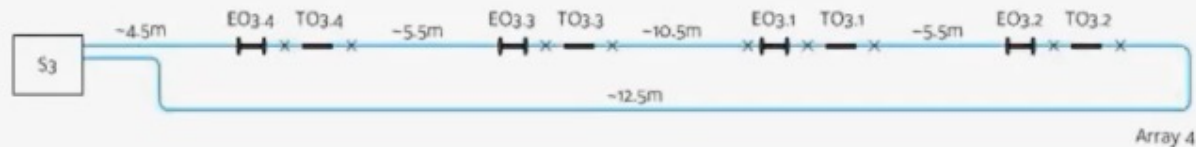
- Arrays

- Pre-connected sensors with protected splices

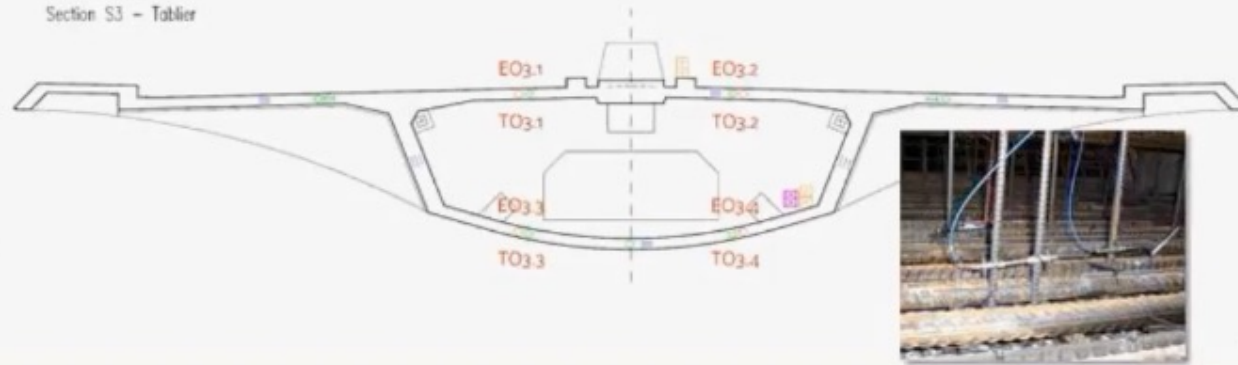
Get the most out of the permanent connection  
without the need of having special tools or  
perform delicate tasks on site

Array 4:

4 ESS + 4 ETS + 9 Splice  
~38.5m



Section S3 - Tablier



# Connettori per cavi in FO

52

- Connectors

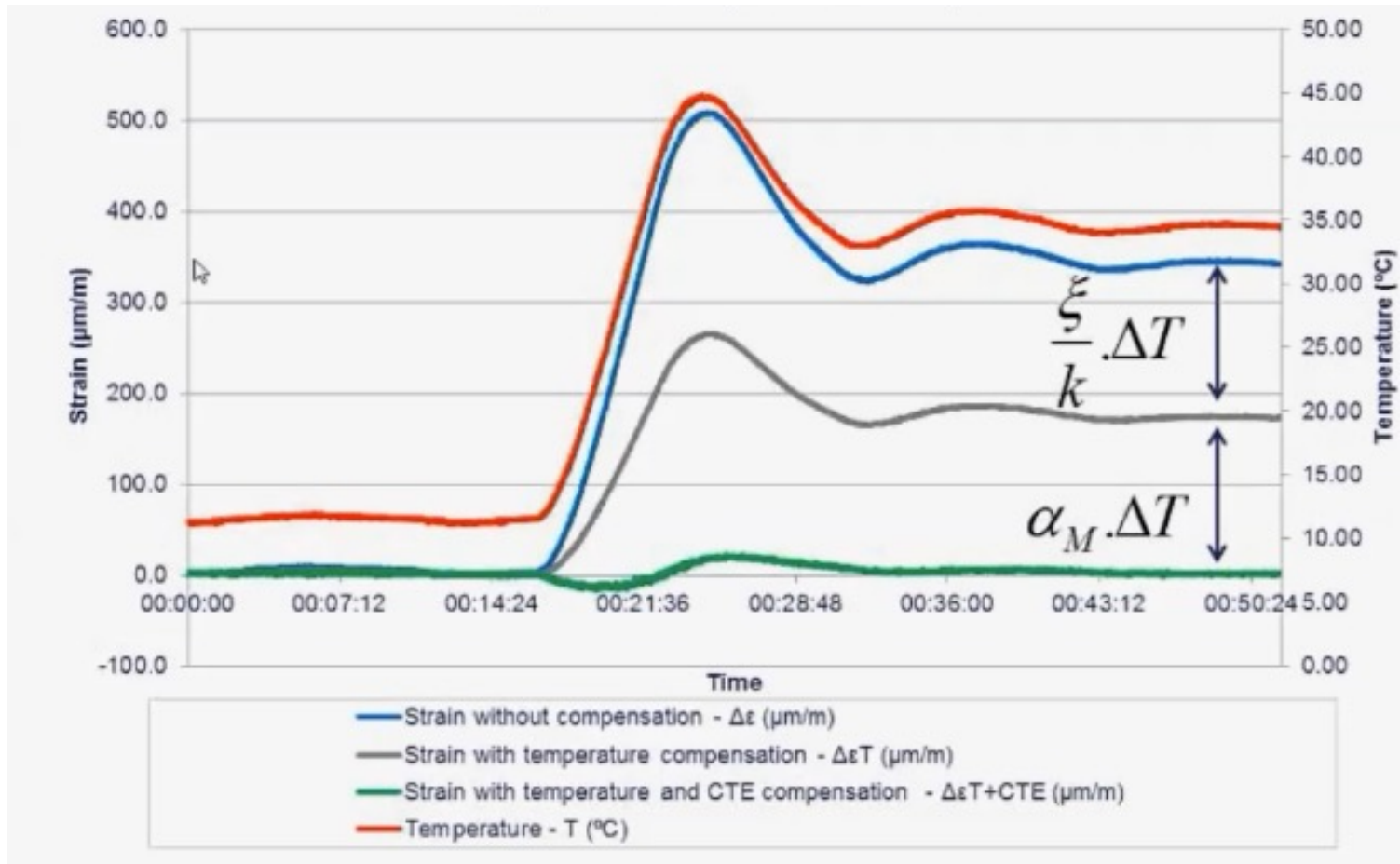
- Easy installation
- More optical losses -> Less sensors per optical channel
- More prone to degradation
- Need external protection





# Compensazione dell'effetto della temperatura per sensori di Strain

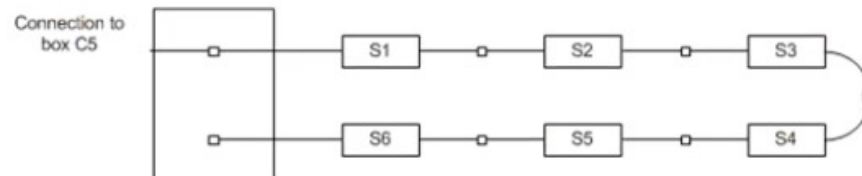
53



# Configurazioni di Connessione: serie

54

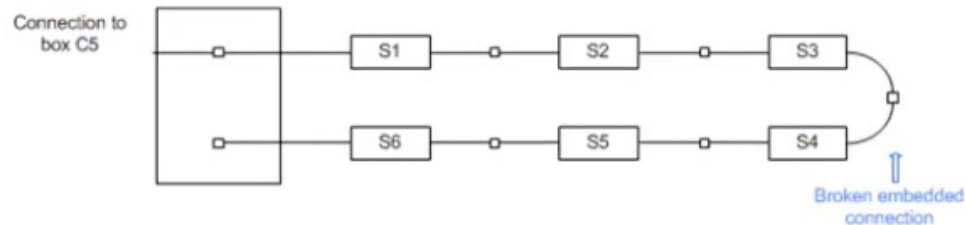
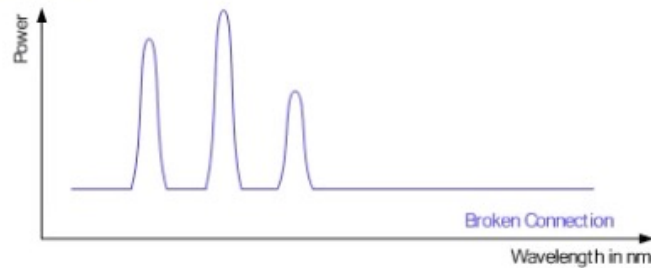
- Keep both ends of the sensor chain accessible and guaranty return connection access



# Configurazioni di Connessione: serie

55

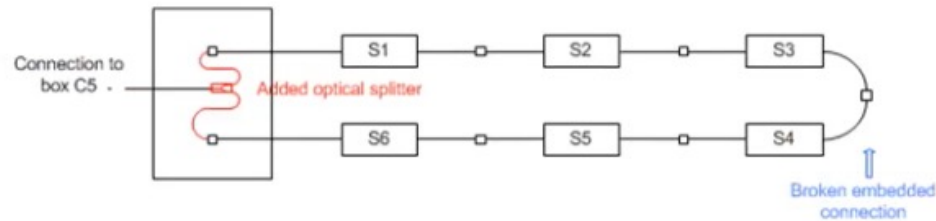
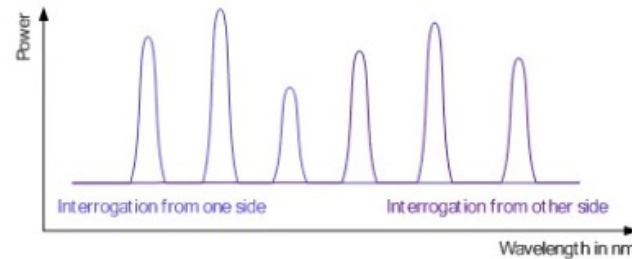
- Keep both ends of the sensor chain accessible and guaranty return connection access



# Configurazioni di Connessione: serie

56

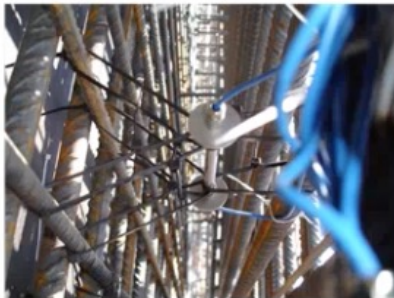
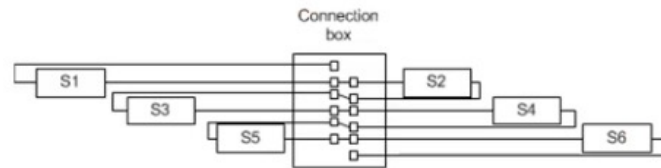
- Keep both ends of the sensor chain accessible and guaranty return connection access
- Possibility to interrogate from both ends
- Possibility to use splitters



# Configurazioni di Connessione: a stella

57

- Keep connections between sensors accessible

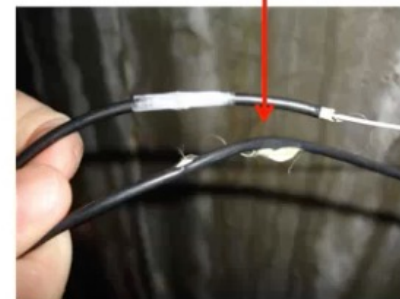
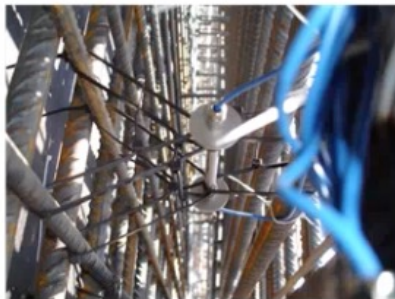
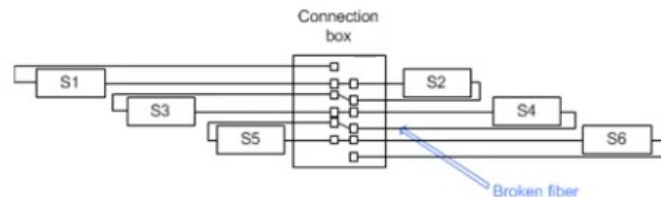
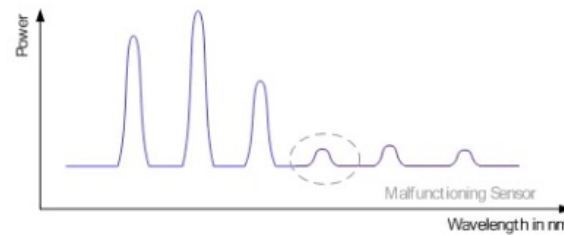




# Configurazioni di Connessione: a stella

58

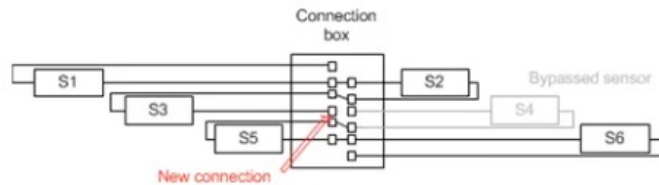
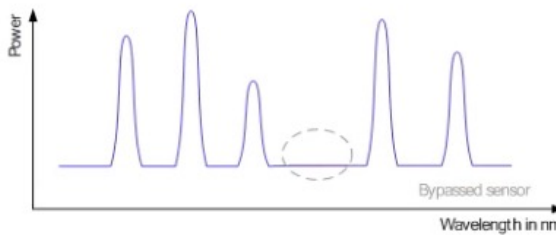
- Keep connections between sensors accessible



# Configurazioni di Connessione: a stella

59

- Keep connections between sensors accessible



# PROGETTO INSTALLAZIONE E MONITORAGGIO PONTE SUL POLCEVERA A GENOVA



# Un ponte di svolta?

61

- *“Un cedimento è sempre istantaneo ma **un monitoraggio sul ponte Morandi avrebbe sicuramente potuto fornire informazioni utili a identificare non il giorno e l'ora del crollo, ma le variazioni del comportamento della struttura nel tempo.**”*

# «Genova» il primo “smart bridge” d'Europa

62

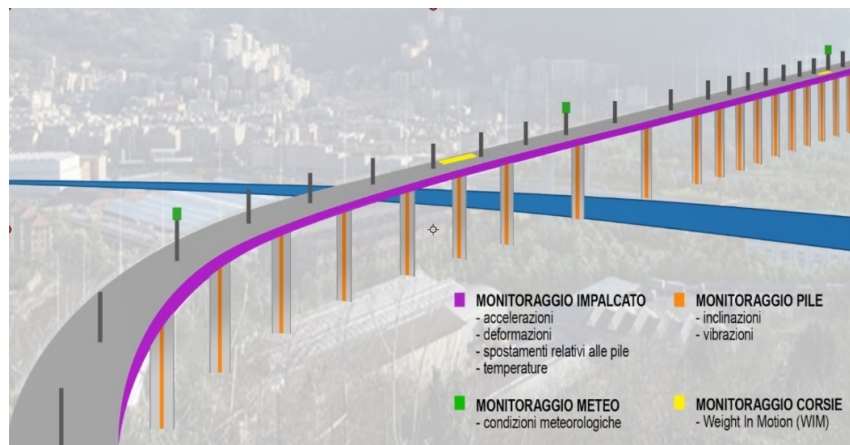
- “Quello di Genova è il primo ponte di nuova costruzione che in Italia si è deciso di strumentare fin dall'inizio con un ampio sistema di sensoristica di questo tipo”,



# Il Monitoraggio è centrale

63

- “ Lo scopo del monitoraggio è di tenere sotto controllo, confrontare con il comportamento atteso, verificare la conformità e fornire al gestore dell'infrastruttura dati su cui poter basare adeguate logiche di manutenzione”.



# La Configurazione dei sensori

64

- **154 sensori**, suddivisi in **55 accelerometri**, **48 estensimetri**, **15 sensori di temperatura** e **36 inclinometri**;
- **2 unità di interrogazione** (a 10Hz e a 1kHz) specificatamente realizzate per acquisire separatamente le misure in regime statico e dinamico.
- In particolare, i sensori sono dislocati nei punti maggiormente significativi della struttura stessa in modo da poter **fornire, in tempo reale ed in modalità operativa, un'accurata e completa analisi strutturale del manufatto.**
- Infatti, lo stato tensionale del ponte, costituito da 18 pile e 19 tratti di impalcato, verrà monitorato attraverso i **sensori di deformazione posti in corrispondenza dei punti di appoggio delle pile**, mentre gli accelerometri e gli inclinometri saranno posizionati sia sulle teste sia sulle basi di pila.

Completano la rete di sensori una serie di **accelerometri posti nel punto mediano di campata**, principalmente con funzioni di velocimetri.

Un team altamente specializzato, composto da ingegneri progettisti provenienti da diverse discipline tecniche, costantemente in contatto con il committente per **affrontare e risolvere le criticità che si presentavano sia durante i test preliminari della rete di sensori, sia nell'installazione in campo del sistema di monitoraggio**

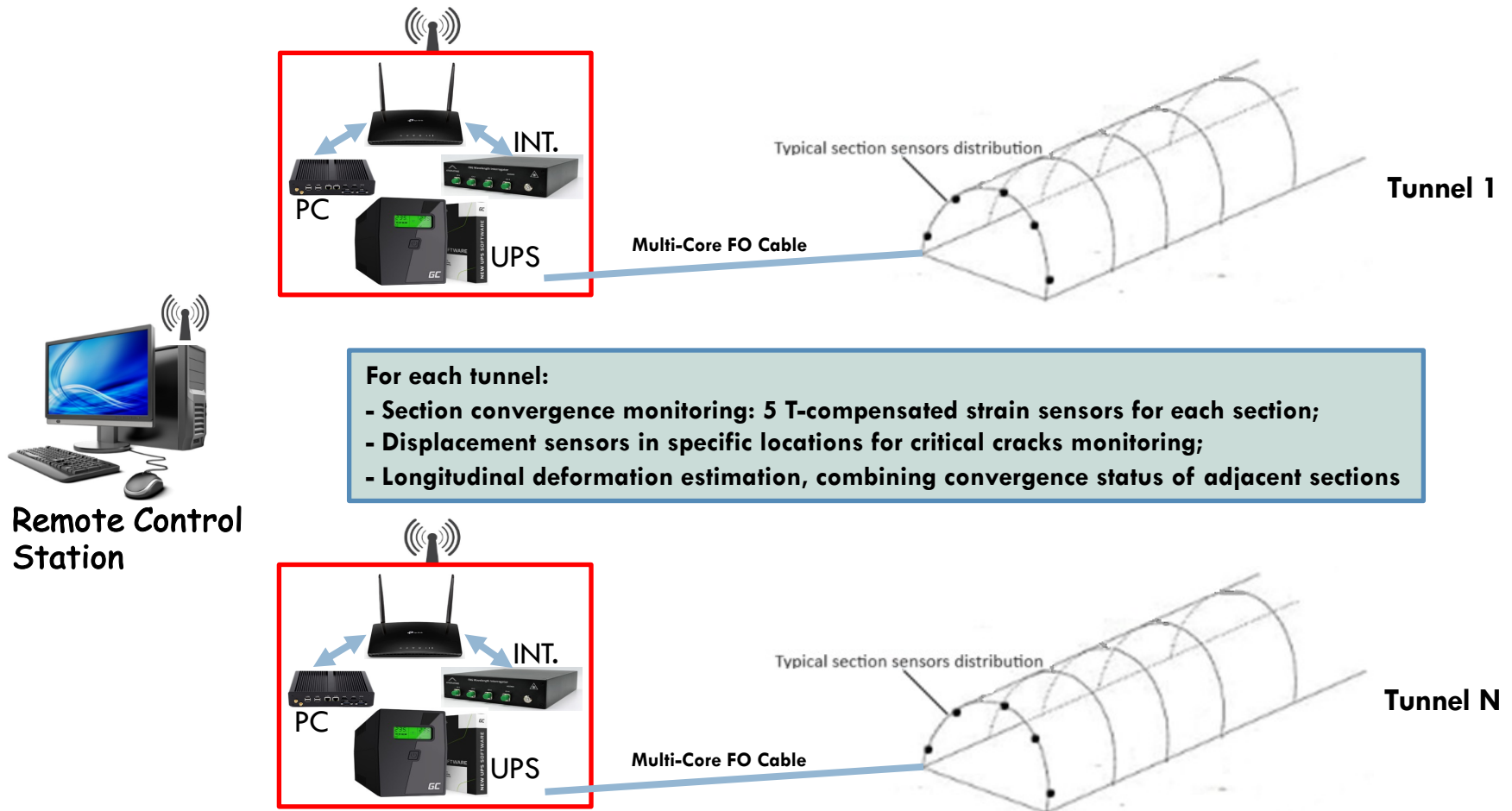


# MONITORAGGIO DELLA VOLTA DI GALLERIE

# Schema di Configurazione

67

## Railway or Road Tunnels Monitoring System General Architecture





# Alcuni esempi di ancoraggi

68





# Tipici segnali acquisiti: convergenze

69



# I segnali dai Fessurimetri

70



Completano la rete di sensori una serie di **accelerometri posti nel punto mediano di campata**, principalmente con funzioni di velocimetri.

Un team altamente specializzato, composto da ingegneri progettisti provenienti da diverse discipline tecniche, costantemente in contatto con il committente per **affrontare e risolvere le criticità che si presentavano sia durante i test preliminari della rete di sensori, sia nell'installazione in campo del sistema di monitoraggio**



# INSTALLAZIONE SUL PONTE ARSENAL

(ROCK ISLAND, ILLINOIS, USA)

# Caratteristiche Generali del Arsenal Bridge



Costruito nel 1896, struttura in combinata autostrada-ferrovia a due corsie a 8 campate

Lunghezza: rotaia (campate 1-8) 1.848 piedi, veicolo (campate 2-6) 1.556 piedi

360° Portata ruotante 2: 336 piedi, 2.000 tonnellate

Durata media della rotazione: 12 min

Traffico: Ferrovia 1.881/anno, Veicolo 10.297/giorno,

Chiatte/Barche 18.568/2.884/anno

# Sistema di Structural Monitoring

## Overview

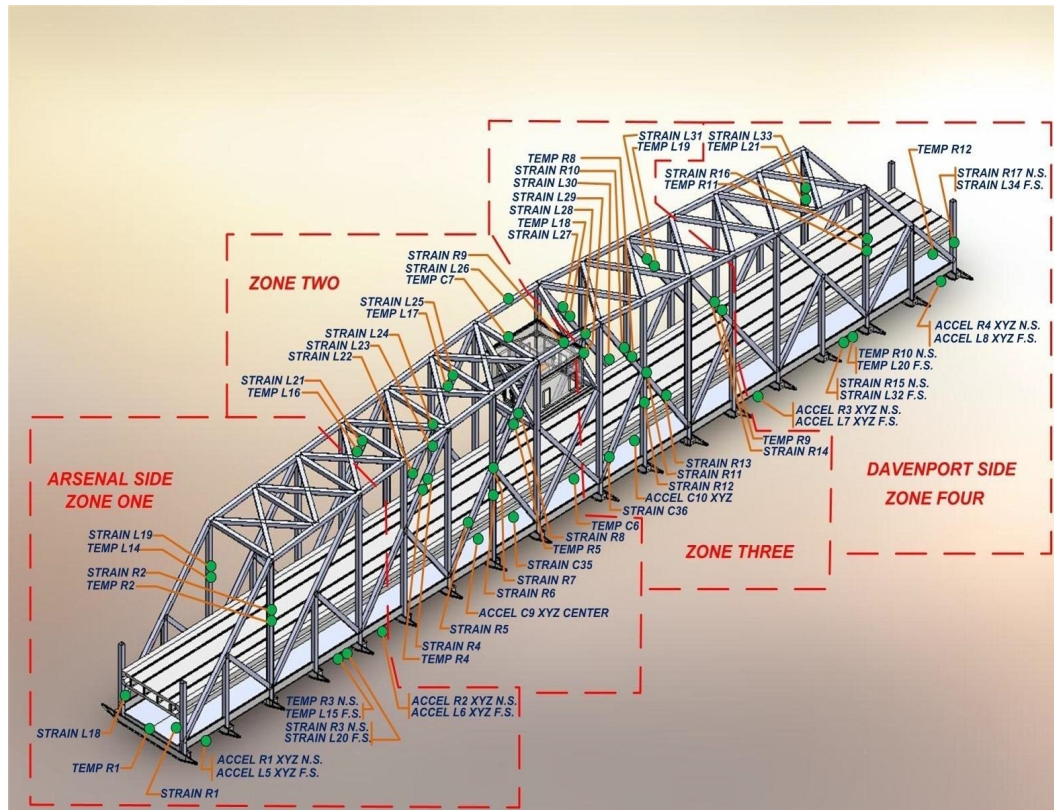
<b>Scopo</b>	Per monitorare l'integrità e il comportamento della struttura del ponte e gli effetti dovuti al traffico intenso e ai carichi pesanti di autocarri che potrebbero causare possibili danni e fatica.
<b>Luogo</b>	Rock Island, IL
<b>Integratore di Sistema</b>	Chandler Monitoring Systems, Inc. <a href="http://www.chandlermonitoring.net">http://www.chandlermonitoring.net</a>
<b>Customer</b>	Concurrent Technologies Corporations
<b>Strumentazione</b>	(1) Luna sm130-500 Optical Sensing Interrogator (1) Luna sm041-416 Optical Channel Switch Extension
<b>Sensori</b>	(36) Luna os3100 Strain Sensors (21) Luna os4300 Temperature Sensors (10) Luna 3D Accelerometers (1) Fiber Optic Tilt Meter Conventional AE, weather and corrosion sensors
<b>Motivazioni del Progetto</b>	<p>Impiegare un sistema sul ponte per ridurre notevolmente il rischio di guasti catastrofici fornendo un preavviso di crescenti problemi strutturali causati dalla corrosione/degrado dei materiali.</p> <p>Dimostrare e convalidare approcci tecnologici innovativi allo stato dell'arte ed emergenti per il monitoraggio remoto della salute strutturale e del degrado della corrosione dei ponti in acciaio.</p>





# Arsenal Bridge

## Descrizione del sistema SM di singola campata



I sensori sono stati installati lungo l'intera struttura, compreso l'impalcato ferroviario (sopra) e l'impalcato stradale (sotto).

Il ponte è suddiviso in quattro zone differenti.

# Arsenal Bridge: Lato Arsenal

## Posizionamento Sensori



Zona 1: un totale di 15 sensori copre i piani superiori ed inferiori.

I Sensori sono di:

(6) Strain

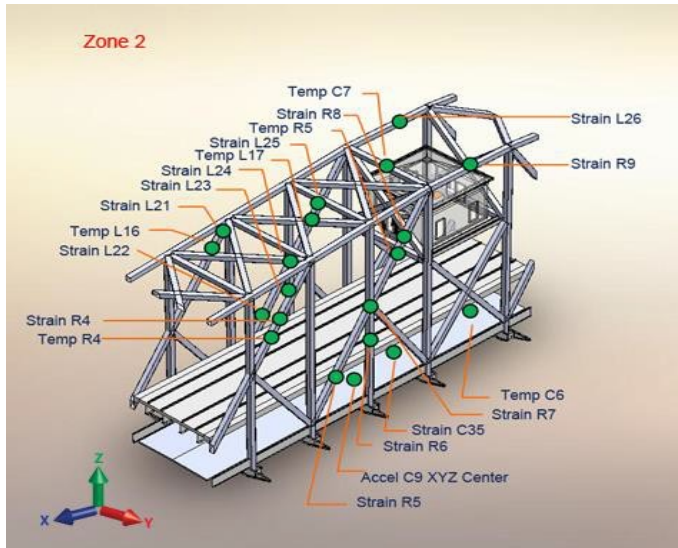
(5) Temperature

(4) 3D Accelerometri



# Arsenal Bridge

## Localizzazione Sensori nella 'sezioni oscillanti'

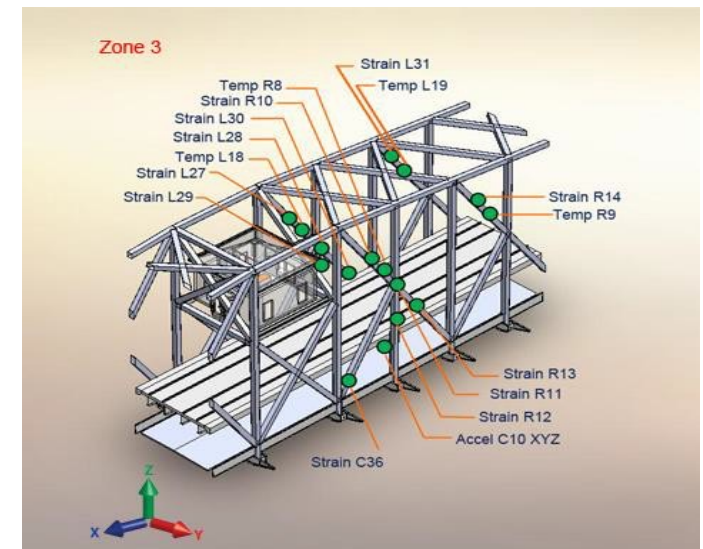


Zone 2 – Lato Arsenal della sezione ruotante.

- (13) Sensori di Strain
- (6) Sensori di Temperatura
- (1) 3D Accelerometri
- (1) Tilt Meter

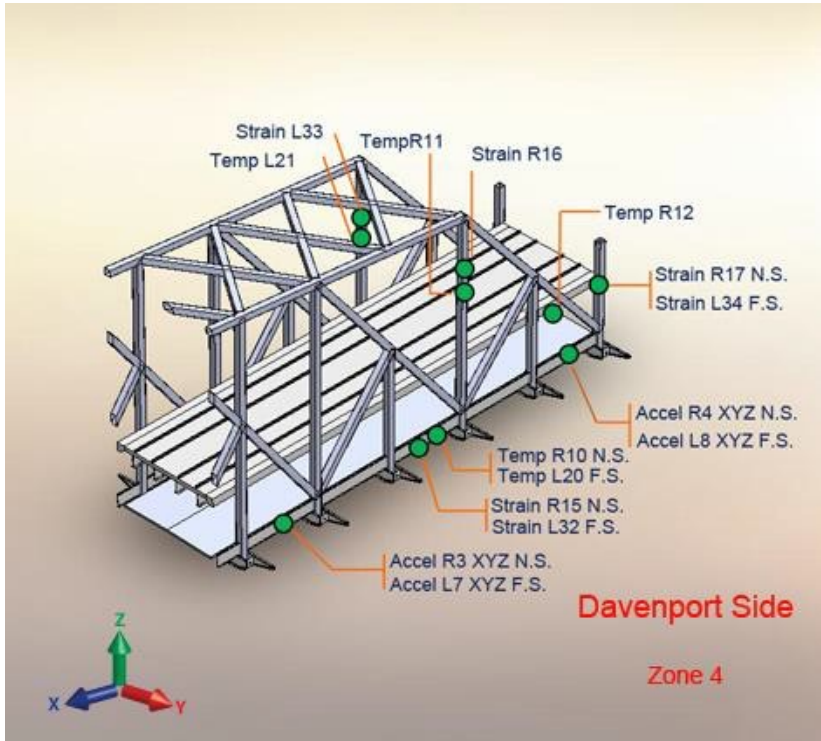
Zone 3 – Lato Davenport della sezione ruotante.

- (11) Sensori di Strain
- (4) Sensori di Temperatura
- (1) 3D Accelerometri



# Arsenal Bridge Lato Davenport

## Localizzazione Sensori



Zone 4: un totale di 15 sensori coprono la parte superiore ed inferiore.

I Sensors sono:

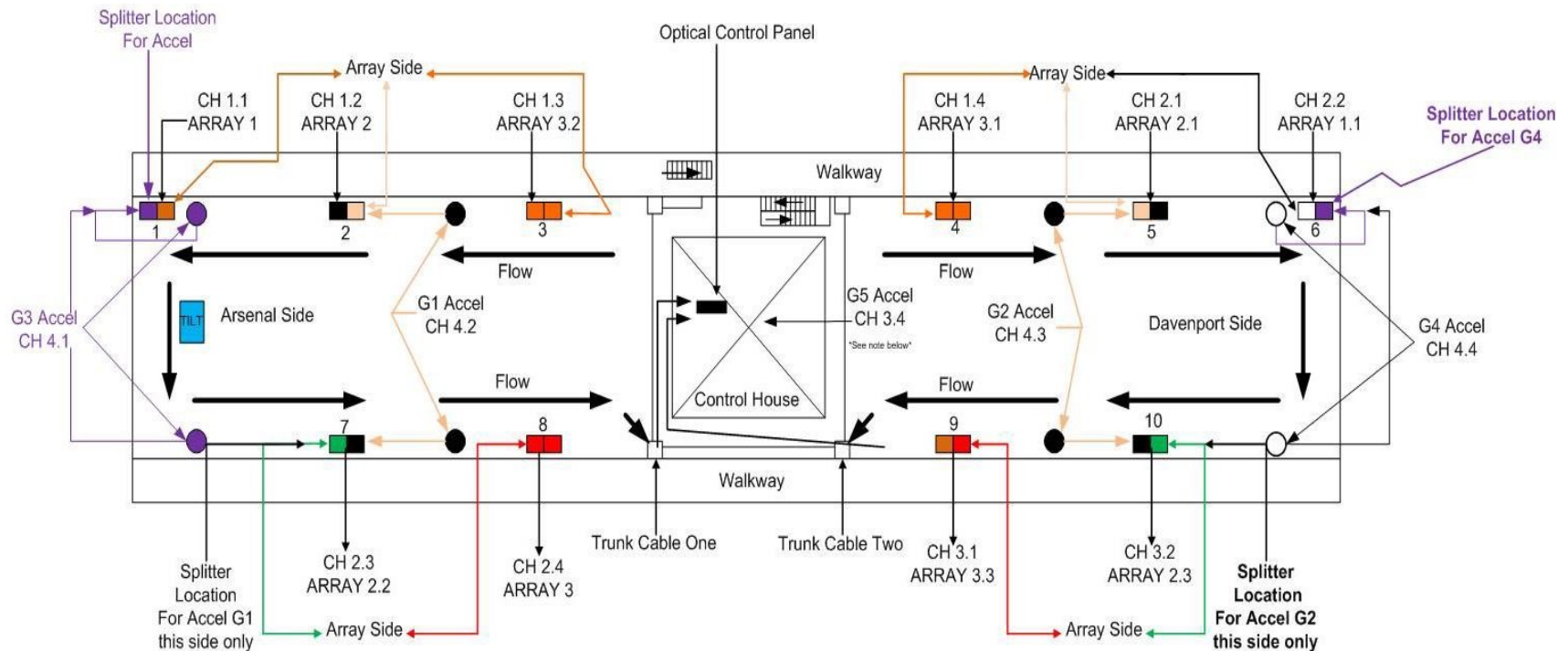
(6) Strain

(5) Temperatura

(4) 3D Accel

# Arsenal Bridge

## Configurazione del Network Sensori



Legenda a colori della distribuzione di cavi e giunzione

# Arsenal Bridge

## Configurazione del Sistema

La strumentazione del sistema di monitoraggio è composta da:

- Interrogatore ottico singolo (modello sm130-500), 1 KHz, 4 canali
- Multiplexer sensore 4x16 canali (modello sm041-416)
- controller sp130 e modulo di acquisizione dati

**Controller & Data Storage sp130**

**Sensor Interrogator  
sm130-500**

**Sensor Multiplexer  
sm041-416**



Strain



Temp



Acceleration



Temp



Tilt

# Arsenal Bridge – Installazione



Gli array di sensori FBG sono stati pre-assemblati alla lunghezza per ogni segmento del ponte.



# Arsenal Bridge

## Le installazioni



Una volta in loco, i sensori vengono disimballati e preparati per l'installazione.



Accesso tramite piattaforme mobili e ponteggi

# Arsenal Bridge

## Installazione sulla sezione ruotante

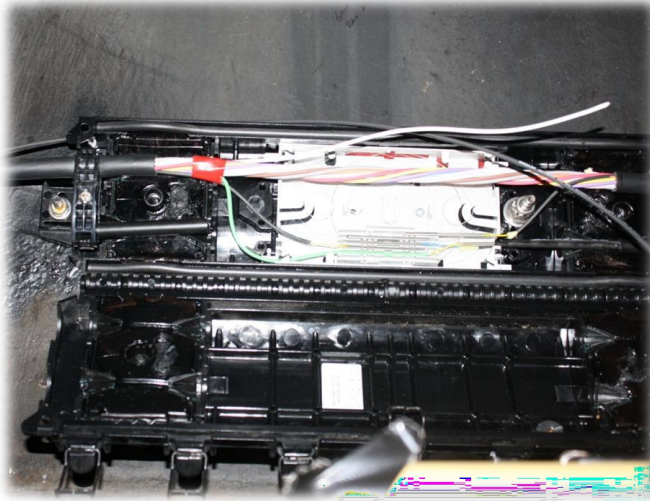


Accelerometro 3D installato sulla  
campata ruotante



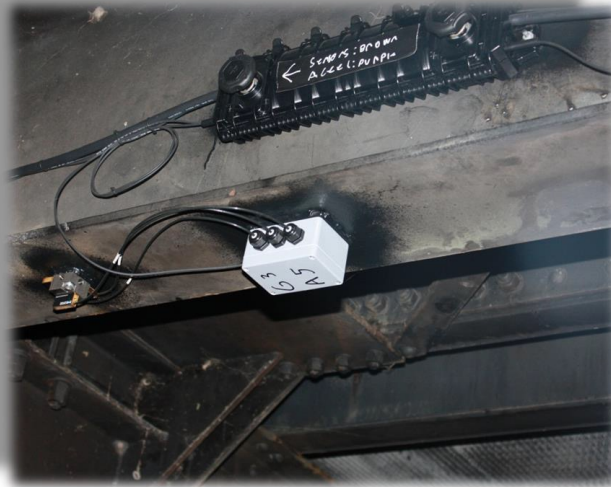
# Arsenal Bridge

## Installazione (Giunzione al cavo FO)



Punto di presa del cavo principale e  
vassoio di giunzione IP69 di grado  
industriale. (sotto)

Attingendo all'alimentazione  
del cavo principale in vari  
punti lungo il ponte. (sopra)

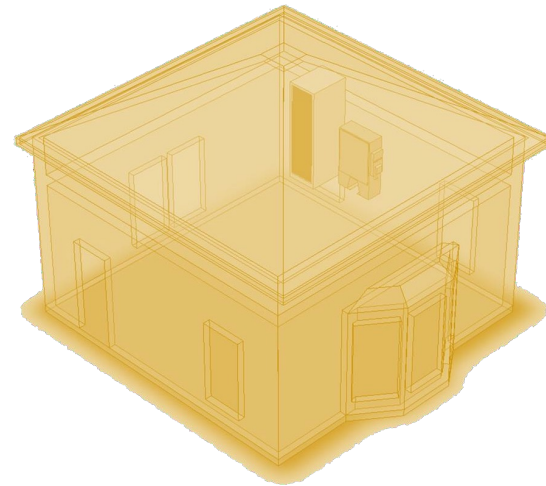
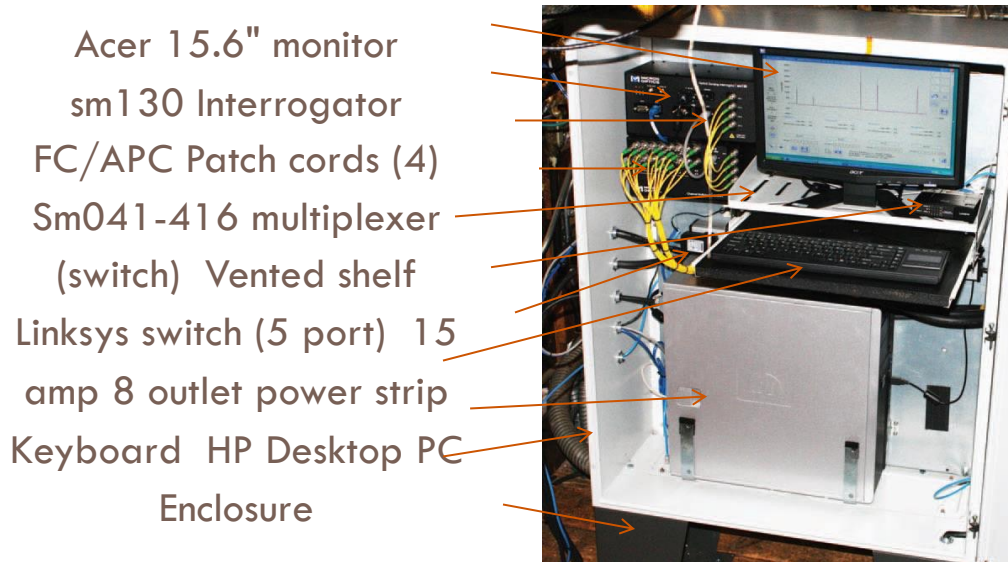




# Arsenal Bridge

## Il Rack della Strumentazione

Il sistema ottico è alloggiato all'interno di una scatola classificata NEMA con temperatura e umidità controllate.



Control House with optical panel in attic.

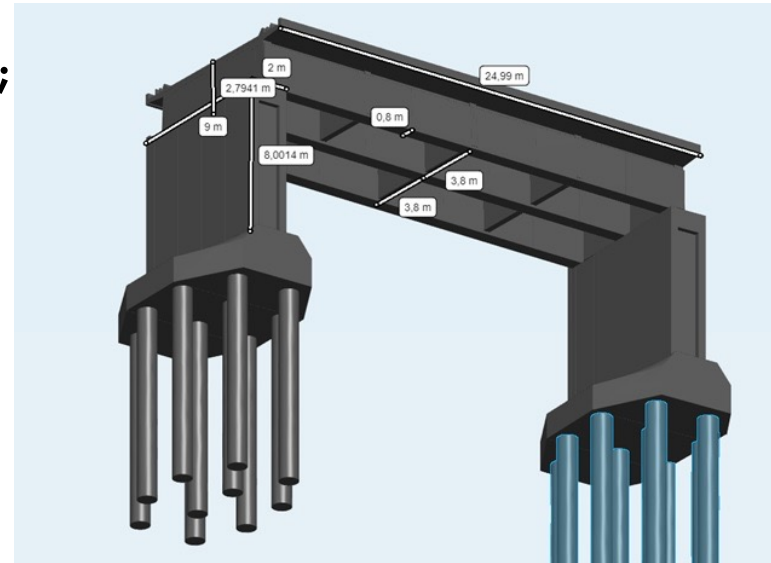
# PROPOSTA DI SISTEMA SHM BASATO SU SENSORI IN FIBRA OTTICA

# Attuale sistema di Monitoraggio

## □ Sistema basato su sensori elettronici

Configurazione attrezzaggio completo singola campata (luce 25 m in semplice appoggio):

- 9 x Accelerometro triassiale asincrono;
- 7 x Accelerometro triassiale sincronizzato;
- 6 x Fessurimetro con corsa 2.5cm;
- 6 x Fessurimetro con corsa 20 cm;
- 5 x Flessimetro dinamico;
- 15 x Inclinometro;
- 2 x Sensore di temperatura;
- 1 x Sensore di umidità.



# Componenti Principali Sistema a Fibra Ottica



Data Processing Capabilities	
Interface	Ethernet
Software Features	For spectral analysis, peak detection, data logger, peak tracking, user can read out in temperature, pressure, or strain, etc, save data to excel document
Software support	Windows
Mechanical, Environmental, Electrical Properties	
Dimension	260mm*210mm*62mm
Operation Humidity	0%-80%RH
Operation Temperature	-5° to +50° C
Storage Temperature	-20° to +60° C
Input Voltage	DC 12V
Maximum Power	30W

## Specification Of FBG Wavelength Interrogator

Optical Properties	
Number of Optical channels	1, 2, 4, 8, 16, 24, 32 or 36
Scan Frequency	5000 Hz 500Hz
Wavelength Range	1510nm-1590nm
Wavelength Repeatability	+/-3pm
Wavelength Resolution	1 pm
Dynamic Range	>30 dB
Standard number of FBG Per Channel	40
Connector	FC/APC

Nel caso in esame la configurazione ottimale è quella da 8 canali con 500 Hz di frequenza di acquisizione: capacità dinamica sufficiente, ottima flessibilità per il cablaggio a gruppi della rete sensoriale, possibilità di aggiungere sensori successivamente.

# Componenti Principali Sistema a Fibra Ottica

LUNA



si155  
HYPERION Optical Sensing Instrument

Nel caso in esame la configurazione ottimale è quella da 4 canali da 160 nm con 1000 Hz di frequenza di acquisizione: capacità dinamica più che sufficiente, ampia capacità di multiplexing (molti sensori su singola linea ottica), possibilità di sensori aggiuntivi.

## Sistema di lettura «High Quality»

Costi naturalmente superiori, compensati da affidabilità comprovata, qualità della componentistica e dell'assemblaggio oggettivamente superiore, assistenza da parte di azienda leader di settore a livello mondiale.

### Performance Properties

Measurement option	Enhanced visibility, 10 Hz	Standard, 100 or 1000 Hz	High speed, 5000 Hz
Number of channels	1 or 4 parallel channels	1 or 4 parallel channels	1 or 4 parallel channels
Wavelength range	1500-1600 or 1460-1620 nm	1520-1580, 1500-1600 or 1460-1620 nm	1500-1580 or 1510-1590 nm
Wavelength accuracy/stability <sup>1</sup>	1 pm / 1 pm	1 pm / 1 pm	2 pm / 3 pm
Wavelength repeatability <sup>2</sup>	1 pm, 0.3 pm at 1 Hz	1 pm, 0.05 pm at 1 Hz	2 pm, 0.05 pm at 1 Hz
Dynamic range/continuous	35 dB peak / 45 dB FS	25 dB peak / 40 dB FS	17 dB peak / 40 dB FS
Full spectrum measurement <sup>3</sup>	Included, data rate at 10 Hz	Included, data rate at 10 Hz	Included, data rate at 10 Hz
Optical connectors	LC/APC		
Compatible sensors <sup>4</sup>	Fiber Bragg Gratings, Long Period Gratings, Fabry-Perot and Mach-Zehnder Interferometers		
Depolarizer Option Available <sup>5</sup>	Yes		

### Interfaces and Software

Interface	Ethernet
Software	Comprehensive API and example support for LabVIEW™, Python, Matlab, C++ and C#

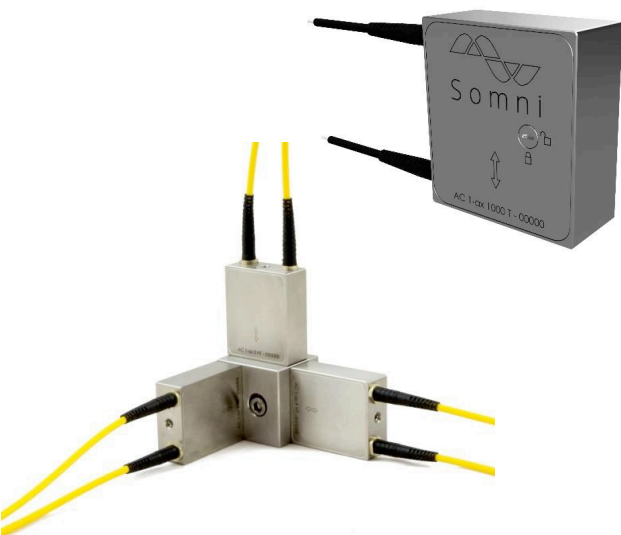
### Physical Properties

Dimensions/weight	206 mm x 274 mm x 79 mm / 3.0 kg
Operating/storage conditions	-20 to 60 C, < 80%RH non-condensing / -30 to 70 C, < 95%RH non-condensing
Input voltage	9 - 36 VDC, AC/DC converter included (100-240 VAC, 47-63 Hz)
Power consumption at 12 V	30 W typ, 4

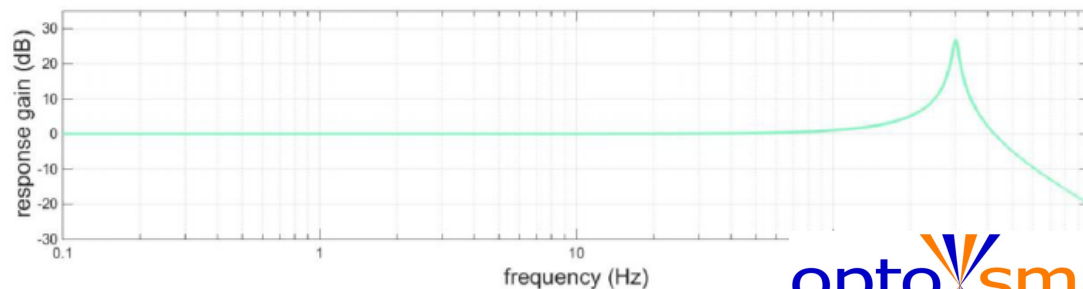
# Accelerometro tri-assiale

## Accelerometro tri-assiale

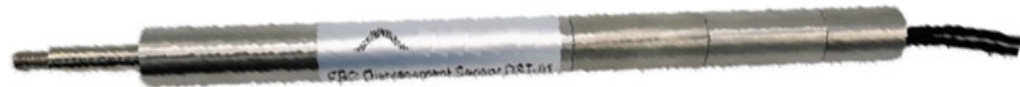
Ottenuto combinando, tramite apposito “mounting-block”, tre dispositivi mono-assiali: nella tabella adiacente le principali caratteristiche del singolo sensore.



Parameter	Performance
Sensitivity	1100 pm/g $\pm$ 100 pm/g
Noise level	0.15 $\mu$ g/V Hz
Precision <sup>1</sup>	4.7 $\mu$ g
Frequency range	0 - 160 Hz
Resonance frequency	> 240 Hz
Cross axis sensitivity	< -40 dB
Maximum acceleration	$\pm$ 20 m/s <sup>2</sup>
Maximum shock (unlocked/locked)	100 m/s <sup>2</sup> / 1000 m/s <sup>2</sup>
Weight	400 grams
Material	1.4462 (Duplex)
Operational temperature range <sup>2</sup>	-65 to +80 °C
Protection	IP 67
FWHM	< 0.5 nm
Reflectivity	> 50 %
Insertion loss	< 0.1 dB
FBGs	2
Connector options	FC/APC, LC/APC, open end <sup>3</sup>



# Sensore di spostamento



Sensore a montaggio superficiale, effettuato tramite appositi accessori, disponibili in differenti versioni, a seconda del materiale e delle caratteristiche della superficie.

In tabella le specifiche principali.

## Specifications

Parameter	Unit	Value
Center Wavelength	nm	1460 ~ 1610
Range	mm	10 ~ 150
Resolution	mm	0.05% F.S.
Accuracy	mm	0.5% F.S.
Temperature Compensation	--	Built-in
Material	--	Stainless steel
Dimension	mm	Φ22 x 234
Installation	--	Mechanical fixation
Pigtail Length	m	Φ3mm armored cable, 1m at single end, or customize
Optical Connector	--	FC/APC, or customize
Operating Temperature	°C	-20 ~ +80

# Sensore di deformazione



Sensore a montaggio superficiale effettuato tramite appositi accessori, disponibili in differenti versioni, a seconda del materiale e delle caratteristiche della superficie.

Range di misura molto ridotto rispetto al sensore di spostamento, ma accuratezza sotto il “micro-strain”.

In tabella le specifiche principali.

Specifications				
Parameter	Unit	MS-01	Value	MST-01
Center Wavelength	nm		1460 ~ 1610	
Range	$\mu\epsilon$		$\pm 1500$	
Resolution	$\mu\epsilon$		0.01% F.S.	
Accuracy	$\mu\epsilon$		0.1% F.S.	
Temperature Compensation	--	No		Yes
Material	--		Stainless steel	
Dimension	mm		$\Phi 12 \times 126$	
Installation	--		Welding	
Pigtail Length	m		$\Phi 3$ mm armored cable, 1m at both ends, or customize	
Optical Connector	--		FC/APC, or customize	
Operating Temperature	$^{\circ}\text{C}$		-20 ~ +80	



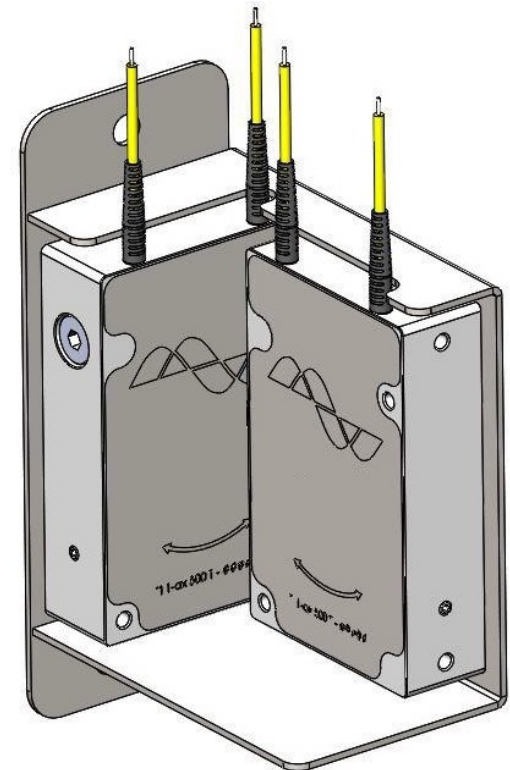
# Tiltmetro singolo angolo

Per monitorare in un punto variazioni di assetto rispetto a due angoli, è possibile combinare due dispositivi attraverso staffe di installazione dal design estremamente semplice, come nell'esempio riportato nella figura a destra.



## Specifications

Parameter	Unit	Value
Center Wavelength	nm	1460 ~ 1610
Range	°	±5
Resolution	°	≅ 0.01% F.S.
Accuracy	°	≅ 0.1% F.S.
Material	--	Aluminum alloy(case) Tungsten steel (sensor body)
Dimension	mm	97(L) x 32(W) x 106(H)
Installation	--	Bolted with installation plate
Pigtail Length	m	Φ3mm armored cable, 1m at both ends, or customize
Optical Connector	--	FC/APC, or customize
Operating Temperature	°C	-20 ~ +80



# Sensore di Temperatura



Corpo in materiale ceramico (allumina), sigillato e progettato per facilitare la manipolazione sicura ed una semplice e rapida installazione.

Si basa sulla tecnologia del reticolo di Bragg in fibra ottica (FBG) e poiché non ci sono collanti epossidici per vincolare la fibra all'involucro protettivo, la stabilità a lungo termine è garantita.

Properties			
Thermal Properties		Armored Cable, Flange Mount	
Operating Temperature Range <sup>1</sup>		-40 to 120°C	
Temperature Sensitivity		~10pm/°C (±1.7pm/ °C)	
Cable Temperature Range		-40 to 250° C (FC/APC Connectors: -40 to 80°C)	
Response Time		4.2 seconds	
Standard Callibration <sup>3</sup> (Included)		1.0°C Long Term Accuracy <sup>4</sup> 0.6°C Short-Term Accuracy, Typical <sup>5</sup>	
Premium Calibration <sup>3</sup> (Optional)		0.5°C Long Term Accuracy <sup>4</sup> 0.2°C Short-Term Accuracy, Typical <sup>5</sup>	
Physical Properties			
Dimensions (L x W x H)		31.5 x 15.0 x 7.6 mm	
Weight (Including Cable)		38g	
Housing Material		Anodized Aluminum	
Cable Length			
Filter Type			
Cable Bend Radius			
Cable Type		3mm Armored Cable	
FC/ACP Connector		Both Connetor and Protection Fittings Optional	
Fastening Methods		Self Drilling Screws or Epoxy	
Optical Properties			
Peak Reflectivity (Rmax)		> 70%	
FWHM (- 3 dB point)		0.25 nm (± .05 nm)	
Isolation		> 15 dB (@ ± 0.4 nm around center wavelength)	

# Termo-Igrometro



Sensore basato su mini-array composto da 2 FBG. Design interno ottimizzato per disaccoppiare la misura RH dall'influenza della T. Materiali di elevata qualità: corpo sensore in Ergal 7075 e coperchi forati in acciaio Inox.

## Technical specifications

Temperature range	5 ÷ 45°C (Non Condensing)
Relative humidity range	30 ÷ 90% RH
Dimensions	72 x 15 x 21 mm (l x h x d)
Weight (without cables)	Max 60 g
Body material	Aluminium (Al)
Cable length	Both ends customizable (up to 5m ± 20 cm)
Fiber type	SMF28e or equivalent
Cable type	3 mm armored with external PVC (LSZH, ROHS compliant)
Connectors	FC/APC or UT, other solution on request
Cable bend radius	≥ 25 mm
FBG Type	Apodized (SLSR > 10 dB)
(All values are customizable on request)	FWHM @ -3 dB > 0.7 nm (± 0.05 nm) Reflectivity > 70%
Central wavelengths range	1500 ÷ 1600 nm (customizable value ± 0.5 nm)

# Flessimetro

Relativamente al **Flessimetro**, è necessario verificare la modalità di installazione di quelli attualmente in uso per selezionare il sensore in fibra ottica più idoneo. In generale si tratta di sensori di spostamento posizionati in modo da avere un lato vincolato ad un punto, “esterno” alla struttura, supposto stabile rispetto alle sollecitazioni: è quindi una misura sicuramente fattibile con un sensore in fibra ottica, ma va scelto in funzione della corsa richiesta e dei vincoli installativi esistenti. In basso un esempio di sensore di spostamento in fibra, con link a filo, come possibile soluzione.



Properties	
Performance Properties	
Displacement Measurement Range <sup>1</sup>	150 mm, 300 mm, or 450 mm
Resolution <sup>2</sup>	0.02% F.S.
Linearity <sup>3</sup>	< 0.4% F.S.
Repeatability <sup>4</sup>	± 0.05% F.S.
Operating Temperature Range	-40 to 80°C
Environmental Ingress	IP65
Fatigue Life (Tested to)	16x 10 <sup>6</sup> cycles at 63 mm stroke
Temperature Dependence	0.006%/ °C F.S.
Physical Properties	
Dimensions (mm)	190 L x 175 W x 90 H
Weight	< 3.1 kg
Material	Hardcoat anodized aluminum
Wire Pull-Cable Length	2 m with 6 mm loop termination
Fiber Optic Connection	Internal to gage, accepts cables between 3 to 7 mm diameter
Fastening Method	Bolt-on, two 8.8 mm dia. holes
Optical Properties	
Peak Reflectivity (Rmax)	> 70%
FWHM (- 3 dB point)	0.25 nm (± .05 nm; apodized grating)
Isolation	> 15 dB (@ ± 0.4 nm around c

# UN APPROCCIO ALTERNATIVO PER MONITORAGGIO CON FIBRE OTTICHE

# Monitoraggio con Sistemi distribuiti alla Brillouin

98

## Fibra ottica come sensore

attraverso la tecnologia dello Scattering di Brillouin è possibile misurare sia la deformazione che la temperatura con una risoluzione spaziale molto elevata.

Se opportunamente collegata all'elemento monitorato, una singola fibra può captare deformazioni o variazioni di temperatura ogni 10 centimetri su tutta la lunghezza strumentata, fino ad una distanza di alcune decine di chilometri.

Il principale vantaggio del monitoraggio distribuito risiede nella capacità di registrare la deformazione o la temperatura del soggetto in ogni punto dell'elemento da monitorare, con una frequenza di acquisizione anche di alcune volte al secondo.

Ciò consente di evitare di selezionare a priori la parte, considerata critica, da monitorare come nell'approccio più tradizionale.

# Rilevamento distribuito per il monitoraggio

99

Un sistema di monitoraggio distribuito in fibra ottica costituisce una soluzione all'avanguardia per quanto riguarda il monitoraggio strutturale.

Con un'unica fibra ottica incollata lungo la struttura da monitorare, un tale sistema può fornire un SHM continuo a lungo termine, in grado di realizzare ottimi sistemi di early warning.

L'analisi del profilo di deformazione longitudinale consente di:

- - rilevare la formazione di eventuali crepe da trazione lungo il ponte;
- - monitorare la distribuzione dei carichi lungo il ponte;
- - monitorare lo stress e la tensione locale nei punti caldi;
- - monitorare lo spostamento articolare;

# Ponte sulla A3

100

Questo lavoro riporta il risultato di una prova di carico eseguita su un ponte stradale in cemento armato sito a Lauria (Pz) sull'Autostrada A3 SA-RC

La fibra impiegata per le misure era una fibra ottica standard per telecomunicazioni standard da 900 $\mu$  rivestita in PVC, a singolo modo, incollata direttamente con resina epossidica lungo il lato dell'impalcato superiore in cemento.

Le misure sono state eseguite utilizzando un'unità di interrogazione Brillouin Optical Time-Domain Analysis (BOTDA) sviluppata dal gruppo.





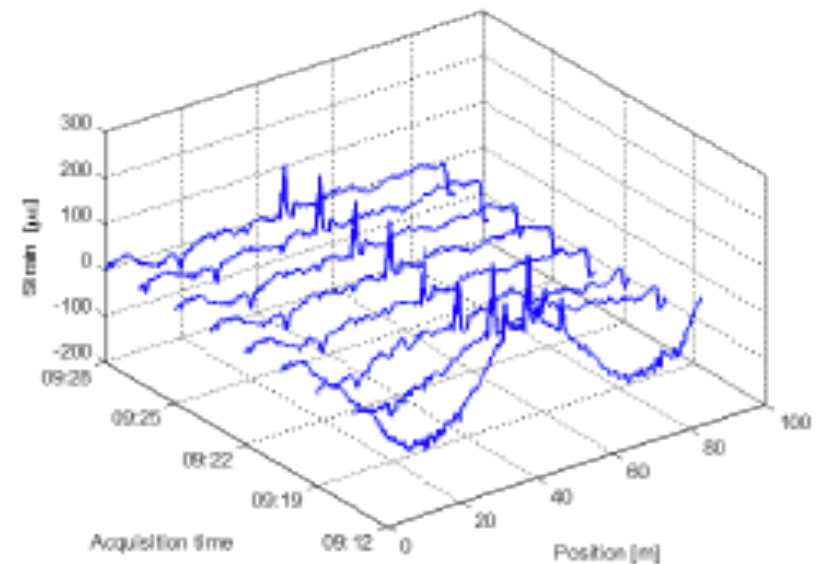
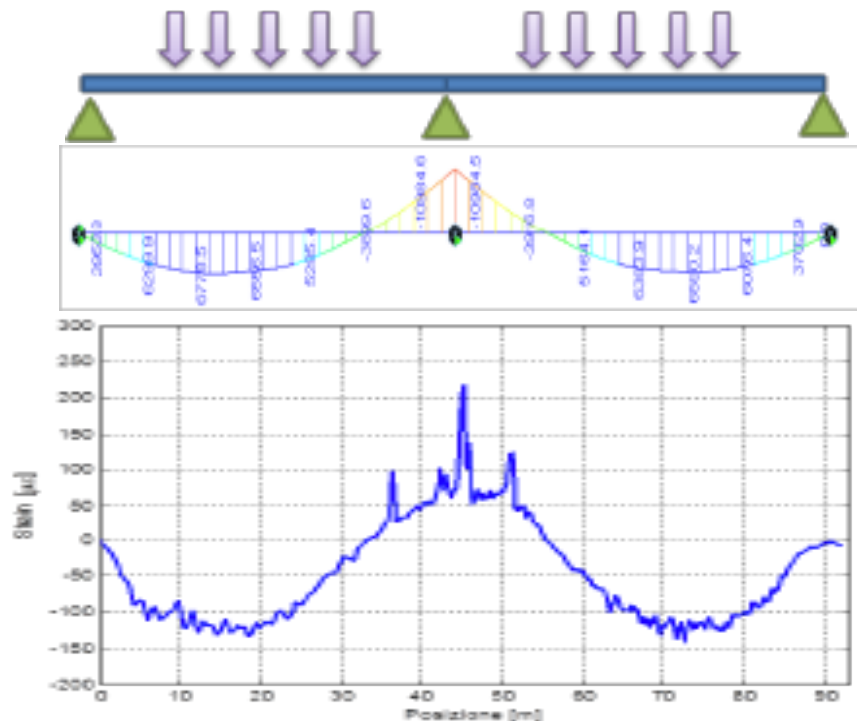
# Alcuni Risultati

101

Le figure riportano il profilo di deformazione longitudinale:

presenta una forma simmetrica in buon accordo con il comportamento teorico; in particolare è stata osservata una deformazione compressiva nella sezione mediana delle due campate mentre sono state misurate deformazioni a trazione sul palo centrale.

Le letture hanno suggerito la formazione di alcune fessure di trazione il cui sviluppo è stato confermato da ispezioni visive.



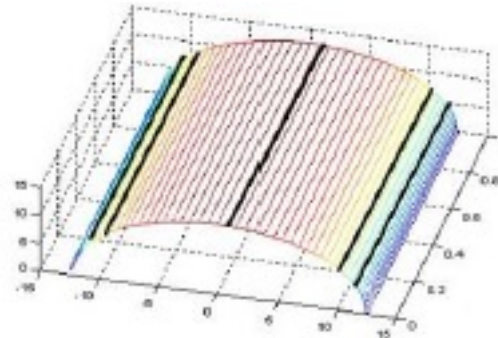
# Monitoraggio di Galleria

102

Si descrive l'applicazione di un sensore distribuito in fibra ottica basato sullo scattering Brillouin stimolato, come sistema integrato per il monitoraggio della sicurezza delle gallerie.

Le misurazioni sono state eseguite utilizzando un'unità di interrogazione Brillouin Optical Time-Domain Analysis (BOTDA) sviluppato da Optosensing.

Le prove sono state eseguite nella Galleria Renazza (A3 SA-RC Alta ay - Lagonegro (PZ) - Italia).

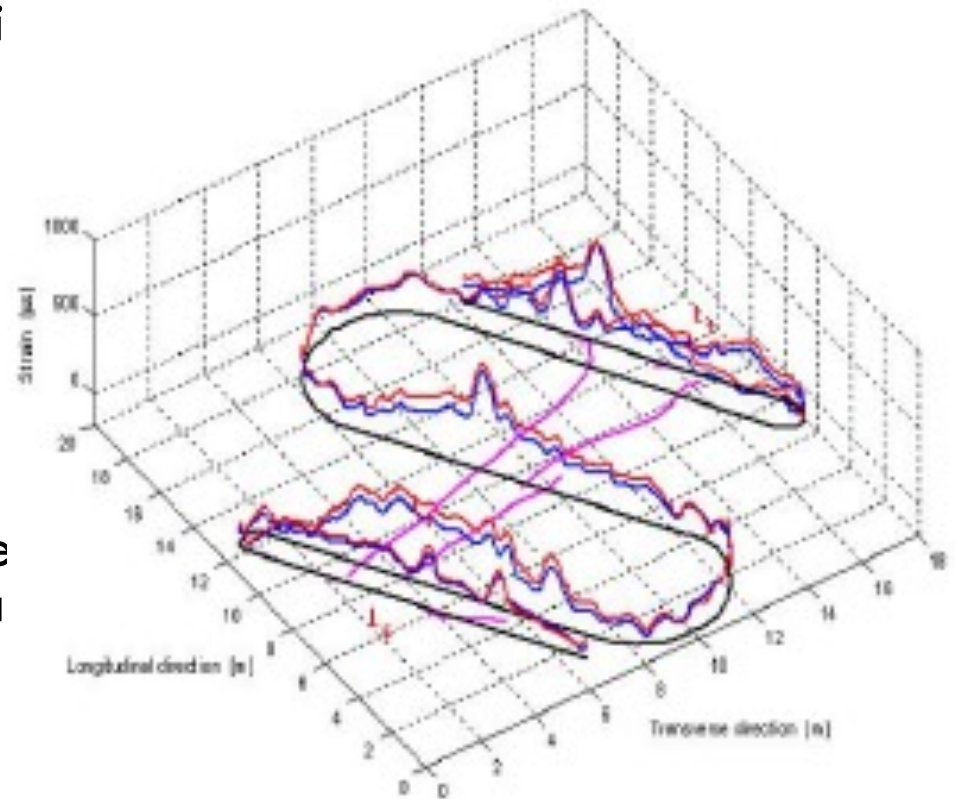


# Monitoraggio di Galleria

103

I risultati di alcune letture sono mostrati in Figura, qui i picchi di deformazione suggeriscono la presenza di cricche da tensione nel rivestimento, che vengono rilevate sistematicamente dall'ispezione visiva.

Nell'immagine, la linea nera tratteggiata indica il percorso della fibra; le linee blu e rosse indicano profili di deformazione ottenuti in date diverse; la linea magenta indica la posizione della crepa argomentata.



# Alcuni esempi di attività di ricerca presso Optolab

104

- FBG sensors applied to SHM in aeronautic field
  - ▣ Project SiHM: a monitored Landing Gear
- FBG sensors for High Energy Physic
  - ▣ Project iPIPE: strain and temperature monitoring at CMS the CERN experiment
- Railways FBG sensing
  - ▣ WIM and WILD systems: from lab to the market
- FBG sensors applied Minimally Invasive Surgery
  - ▣ Project MUSHA: MUltifunctional Smart Hands; new technological insight for mini-invasive surgical tools



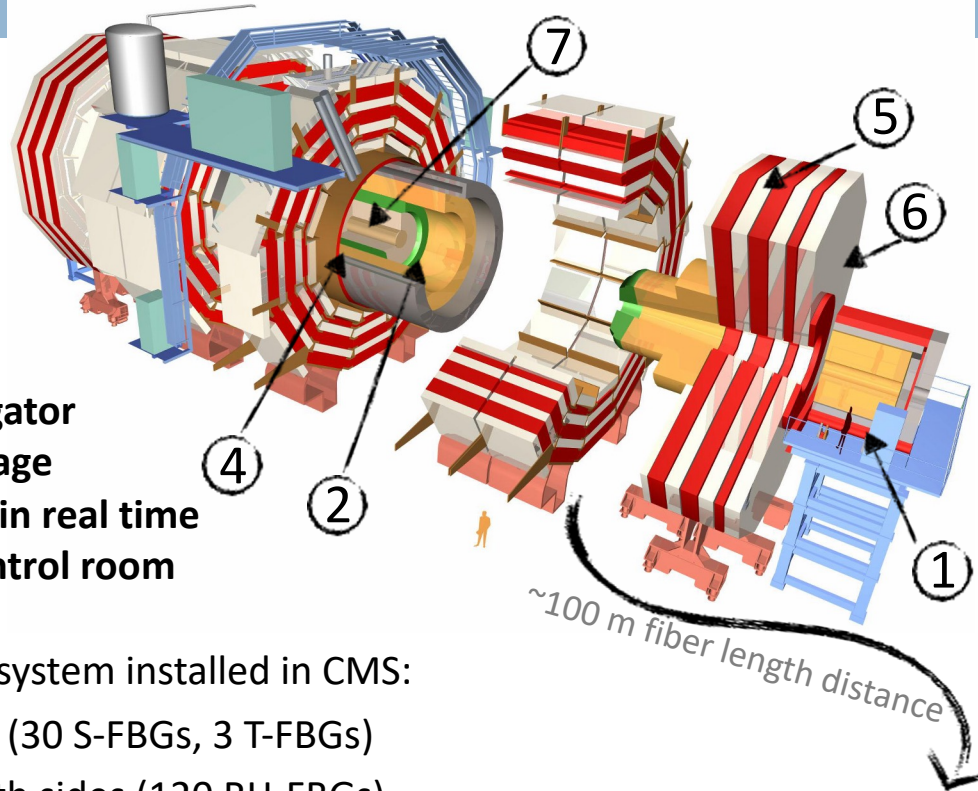
# MONITORAGGIO DELLA TEMPERATURA E DELLA DEFORMAZIONE SULLA PIPE CENTRALE DI CMS @ CERN





# SENSORI FBG A CMS

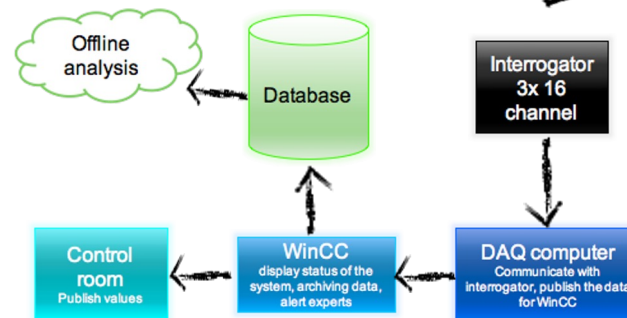
106



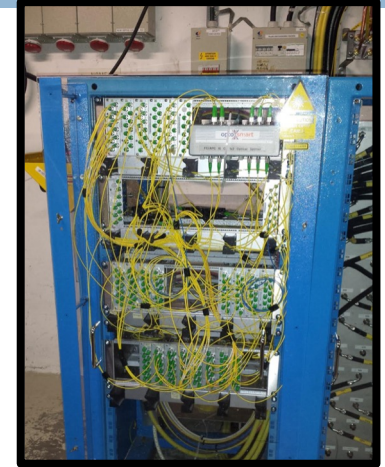
**24/7 data taking**  
**3x16 channel interrogator**  
**Oracle data base storage**  
**Display/provide data in real time**  
**Integrated in CMS control room**

FBG based monitoring system installed in CMS:

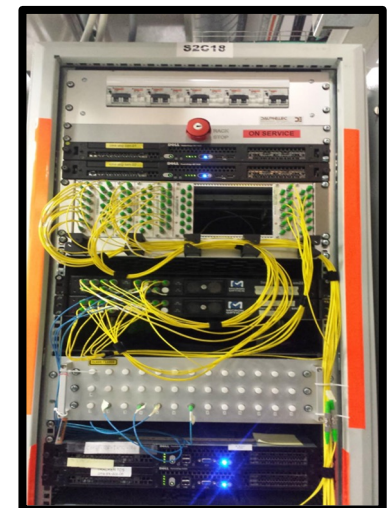
1. HF region both sides (30 S-FBGs, 3 T-FBGs)
2. Tracker bulkhead both sides (120 RH-FBGs)
3. Experimental Cavern (60 T-FBGs)
4. PLT T-sensors (60 T-FBG)
5. RPC disks (432 T-FBGs)
6. YE4 both sides (15 T-FBGs, 35 S-FBGs)
7. **Central beam pipe (36 T-FBGs, 28 S-FBGs)**



Rack in Detector Cavern  
(UXC) 100 m underground



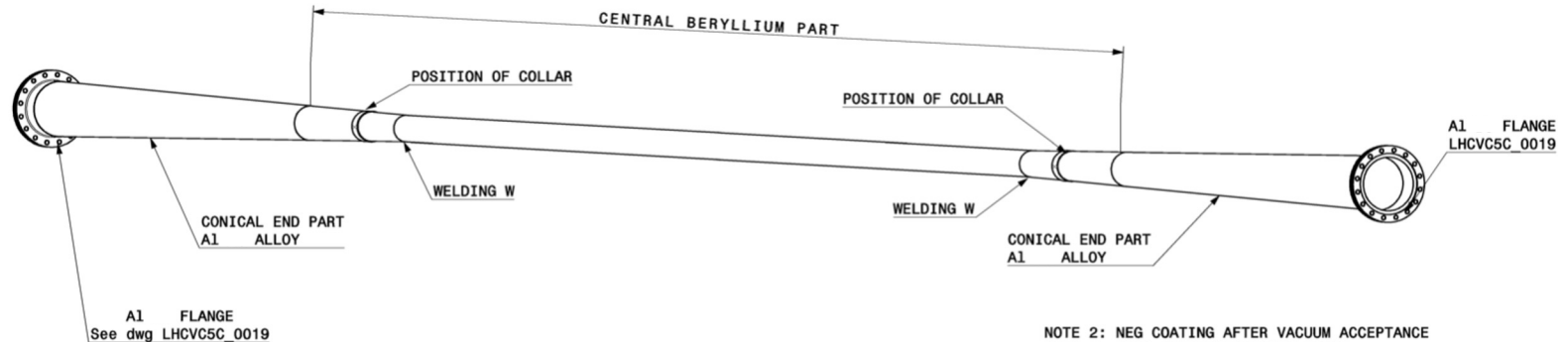
Rack in Service Cavern  
(USC) 70 m underground



# CMS CENTRAL BEAM PIPE

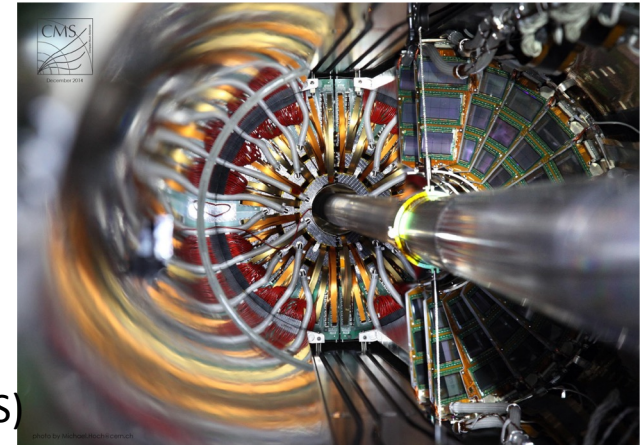
107

part of the CMS beam pipe where the particle collisions took place



NOTE 2: NEG COATING AFTER VACUUM ACCEPTANCE  
NOTE 3: BAKE OUT TEMPERATURE 250°C  
NOTE 4: MS-POSITION OF SUPPORTS FOR METROLOGICAL CONTROLS  
NOTE 5: IN CASE OF USE OF COLLARS LHCVC5C\_0029, BE AWARE THAT THEY HAVE TO BE INSERTED BEFORE WELDING "W"

- 6 m di lunghezza, 0,8 mm di spessore
- Diametro esterno 45 [Be] - 65 [Al] mm
- Deve resistere all'ultra alto vuoto LHC 10-11 mbar
- Deve sopportare il tasso di collisioni LHC di 40 MHz
- Realizzato in berillio, per essere il più trasparente possibile alle particelle emanate dalle collisioni dell'LHC
- Distanza 35 mm tra la superficie esterna del tubo e i rivelatori circostanti -> 1,5 mm nella configurazione finale
- 1,3 milioni di dollari USA, pezzo unico realizzato da Materion (Ca-US)





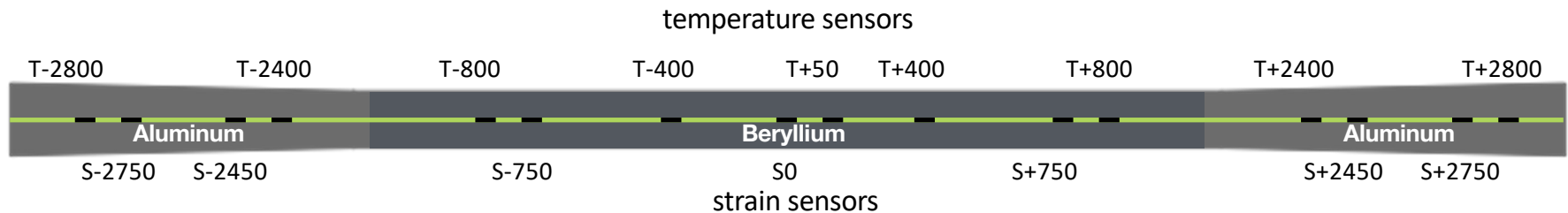
# DISTRIBUZIONE DEI SENSORI SULLA PIPE

108

Primo esempio di monitoraggio della Pipe centrale di un esperimento sull'acceleratore HEP

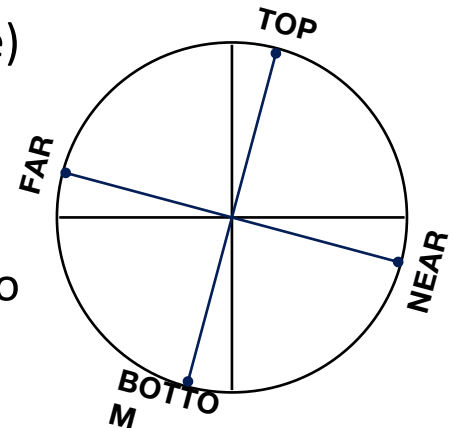
Obiettivo: Informazioni in tempo reale sul comportamento termico e strutturale

iPipe = tubo trave intelligente



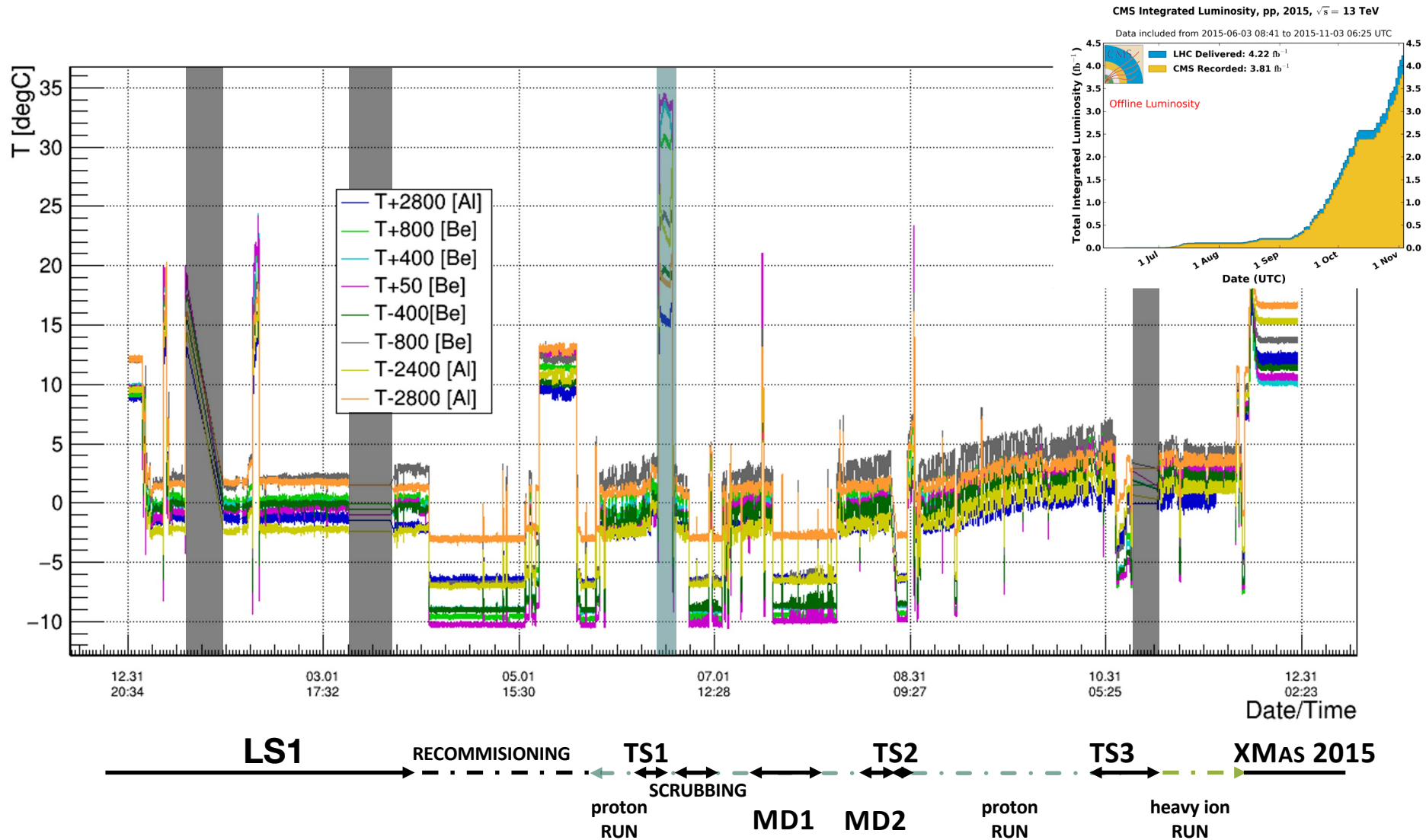
16 sensori su ogni fibra: 9 di temperature e 7 di strain (incollate)

4 fibre in posizioni cardinali sulla sezione trasversale del tubo trave con inclinazione di  $15^\circ$  per far fronte alla procedura di installazione del rivelatore CMS Pixel e alla struttura di supporto del tubo.



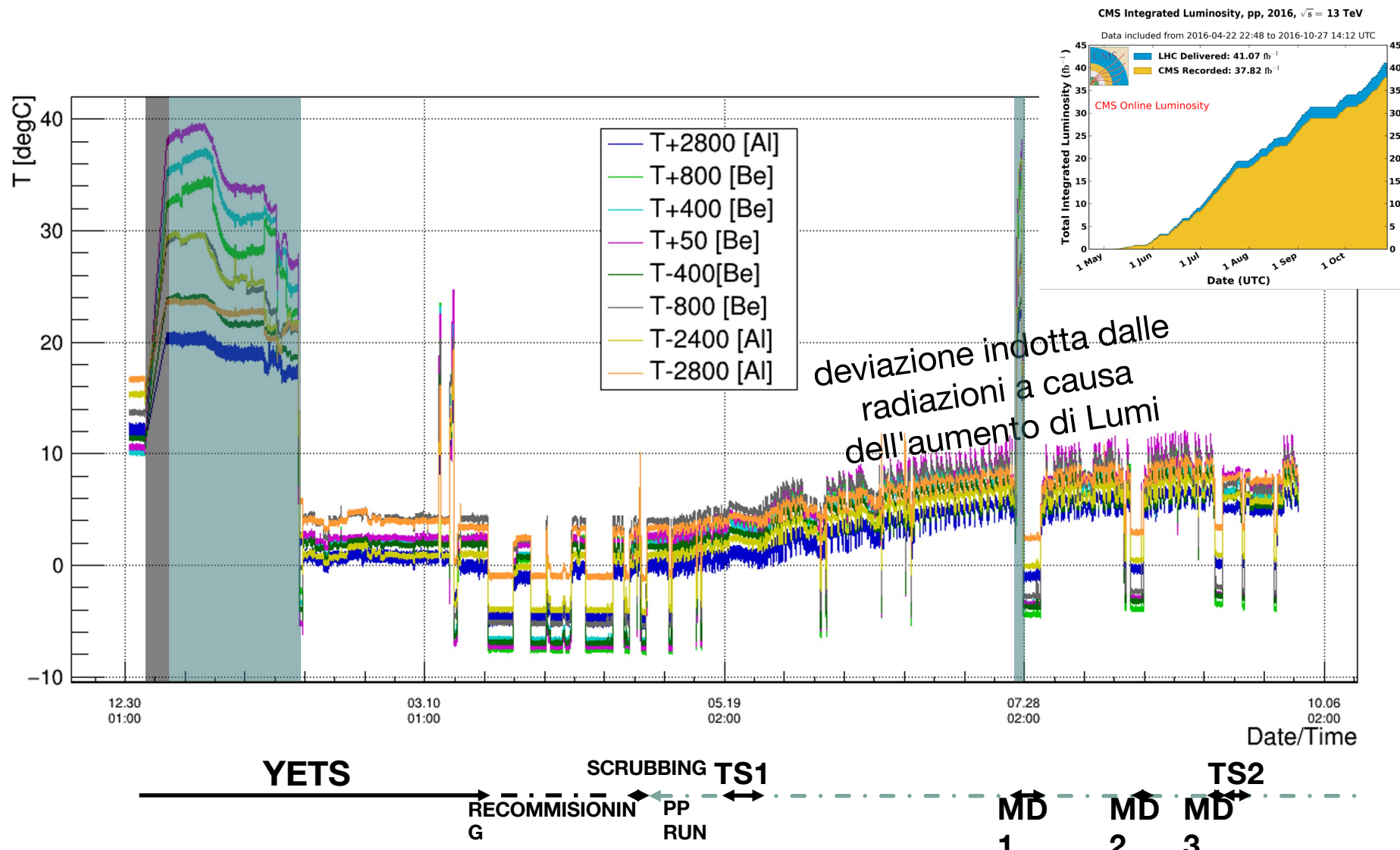
# 2015: RISULTATI DI TEMPERATURA

109



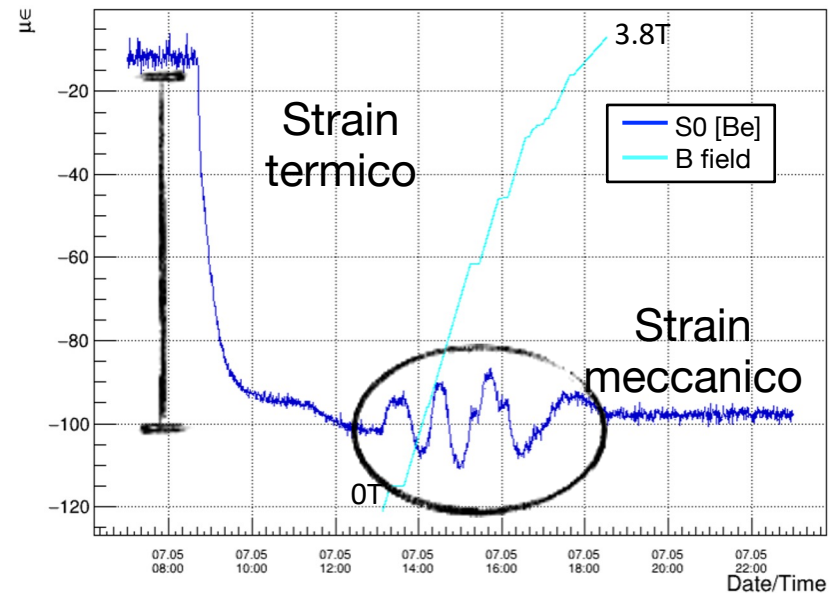
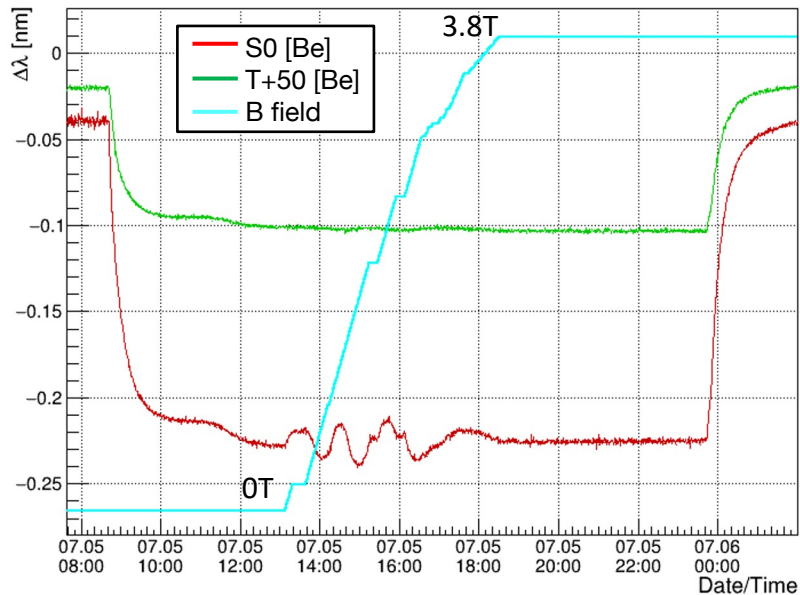
# 2016: RISULTATI DI TEMPERATURA

110



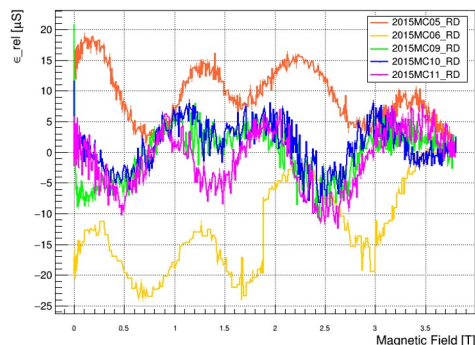
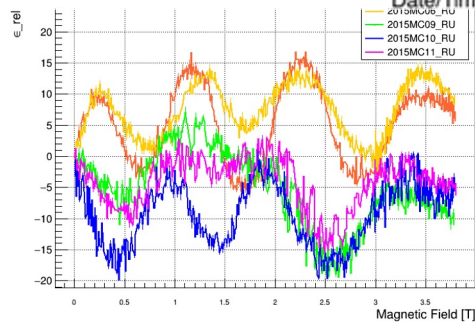
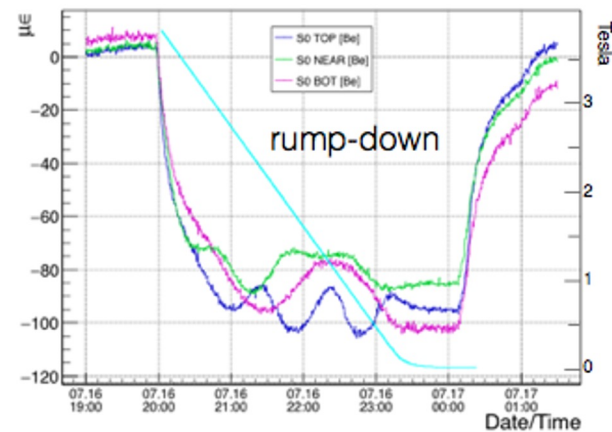
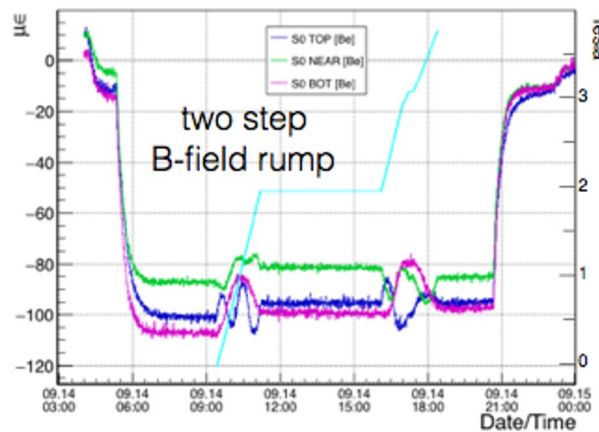
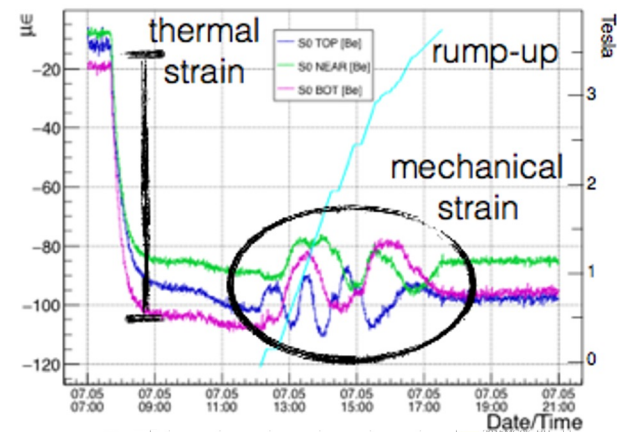
# STRAIN INDOTTO DA VARIAZIONE DI CAMPO MAGNETICO

111



- Al variare della temperatura si verifica un'espansione, o una contrazione, del tubo
- Rampe di campo B da 0 T a 3,8 T (circa 3 ore per ciascuna rampa)
- I movimenti durante le rampe del magnete sono dovuti a sollecitazioni meccaniche poiché la temperatura rimane costante.

# STRAIN INDOTTO DA VARIAZIONE DI CAMPO MAGNETICO



< 30  $\mu\epsilon$  deformazione massima

non meccanicamente rilevante

elevata riproducibilità, anche in rampe a più gradini

movimento meccanico complesso su base di poche ore

solida prova di affidabilità delle misure di deformazione iPipe





# SISTEMA FERROVIARIO DI MONITORAGGIO MULTIFUNZIONALE BASATO SU FBG

# Sistema WIM – WILD

## Doppia Funzionalità in un Sistema

114

### WEIGHING IN MOTION (WIM)



Early warning for overloads and imbalances

- ✓ Reduce tracks damaging
- ✓ Reduce on board failures
- ✓ Improve Security Levels



### DEFECTED WHEEL IDENTIFICATION



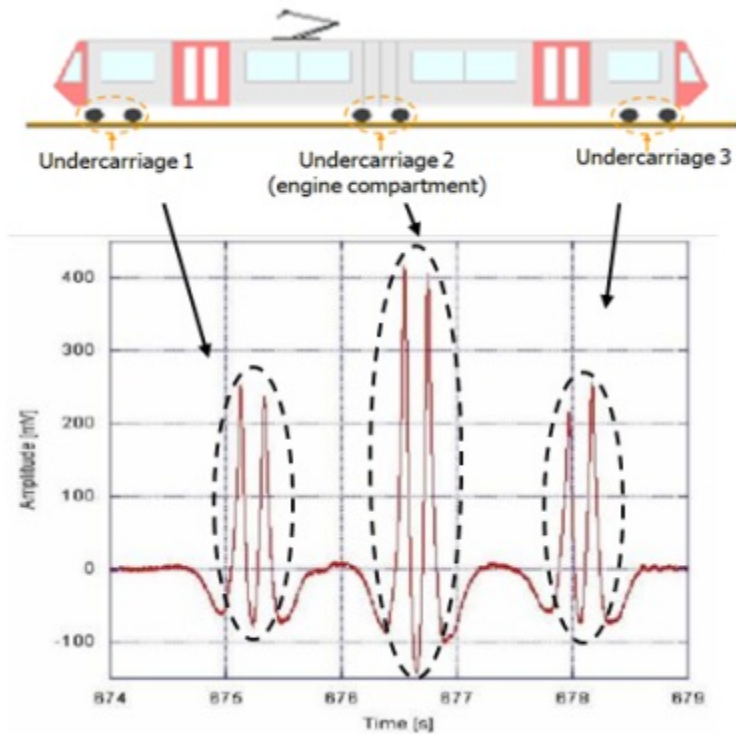
Early Warning of Defected Wheels

- ✓ Towards on condition maintenance
- ✓ Improved Safety levels
- ✓ Reduction of infrastructure damaging





# Principio di Funzionamento

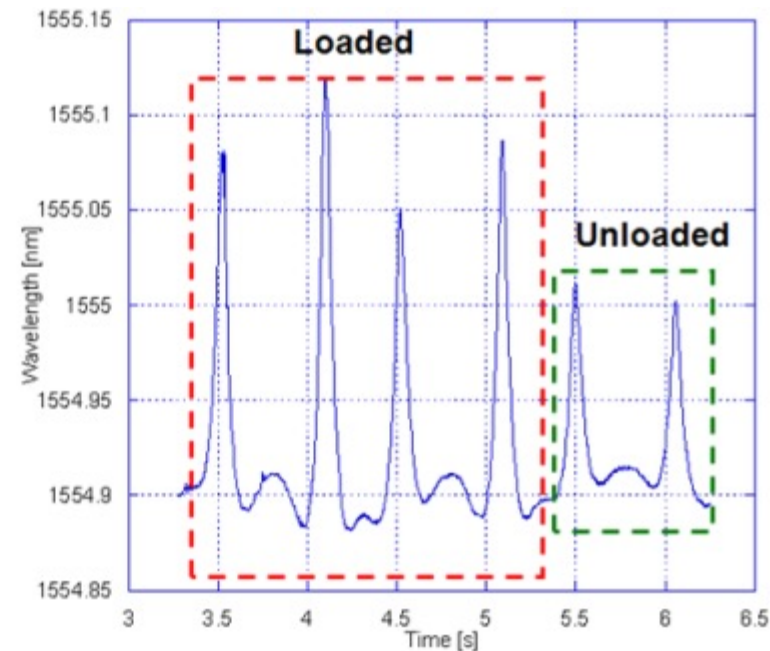


L'ampiezza di ciascun picco contiene le informazioni sul peso della ruota del treno associato



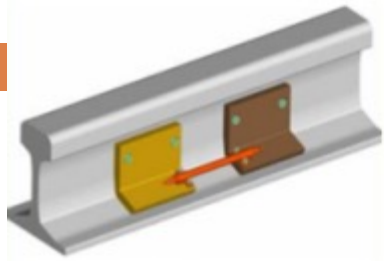
Un singolo elemento FBG fissato ai binari fornisce un segnale di uscita nel dominio del tempo costituito da più picchi

Ogni picco è correlato a una singola ruota che passa sopra la regione di rilevamento

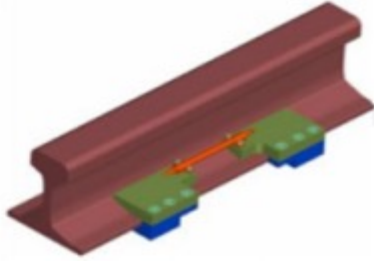


# Sperimentazioni di Kit Sensore

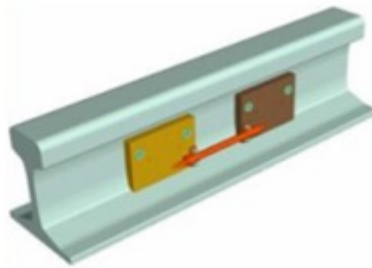
Anchor solution A



Anchor solution B

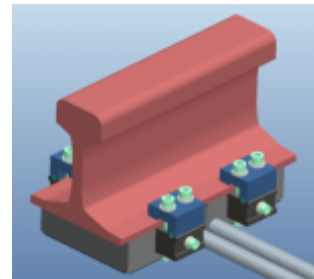
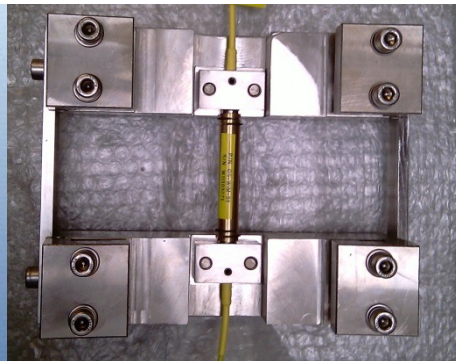
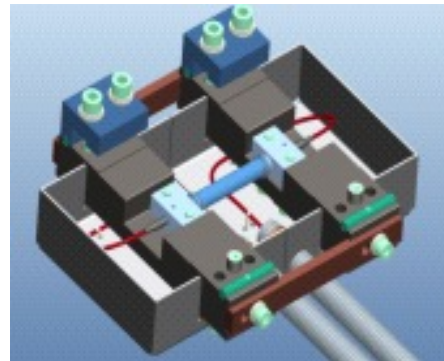


Anchor solution C



- Noninvasive
- No drilling of the rail
- Reduced installation time
- Easily removable

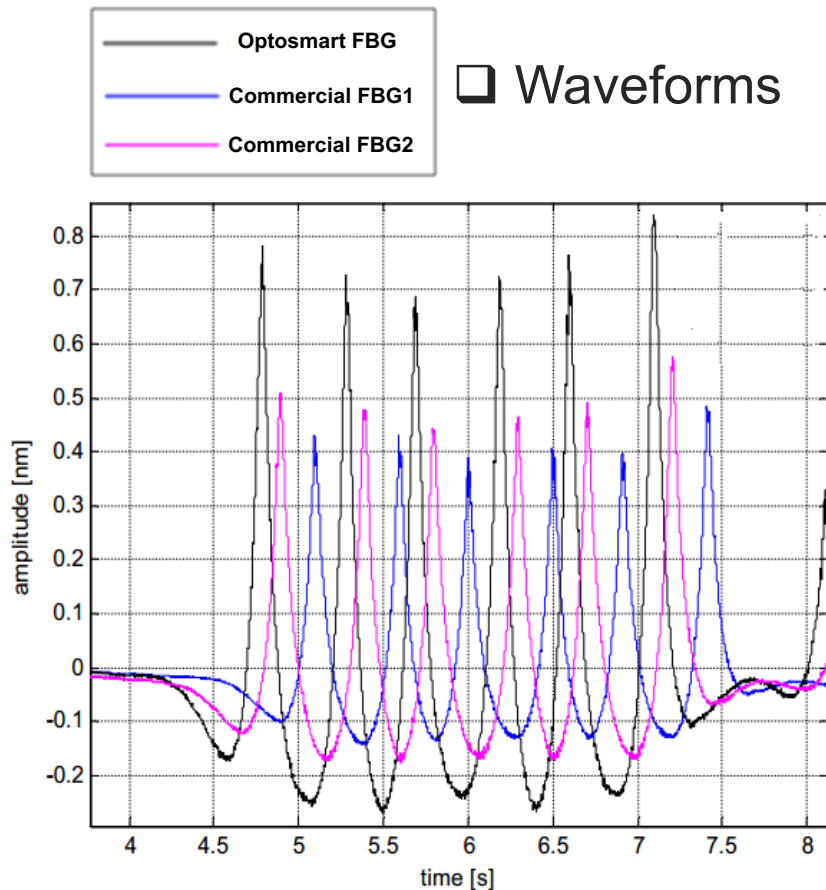
Il SENSOR KIT ottimizzato



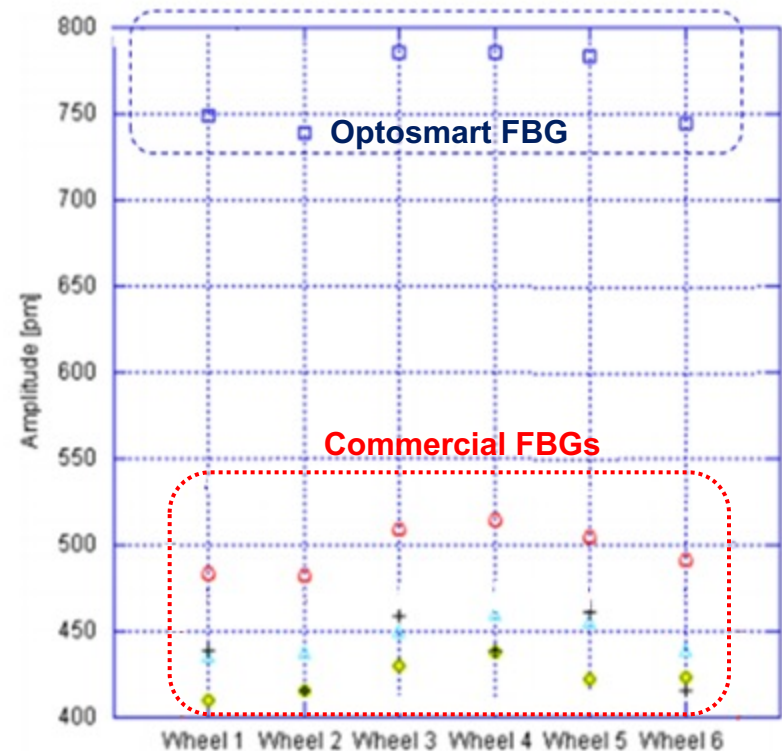
# Test Funzionali

One packaged FBG manufactured by Optosmart has been installed along the rails and the results has been compared with those returned by others commercial packaged FBG sensors

## Waveforms

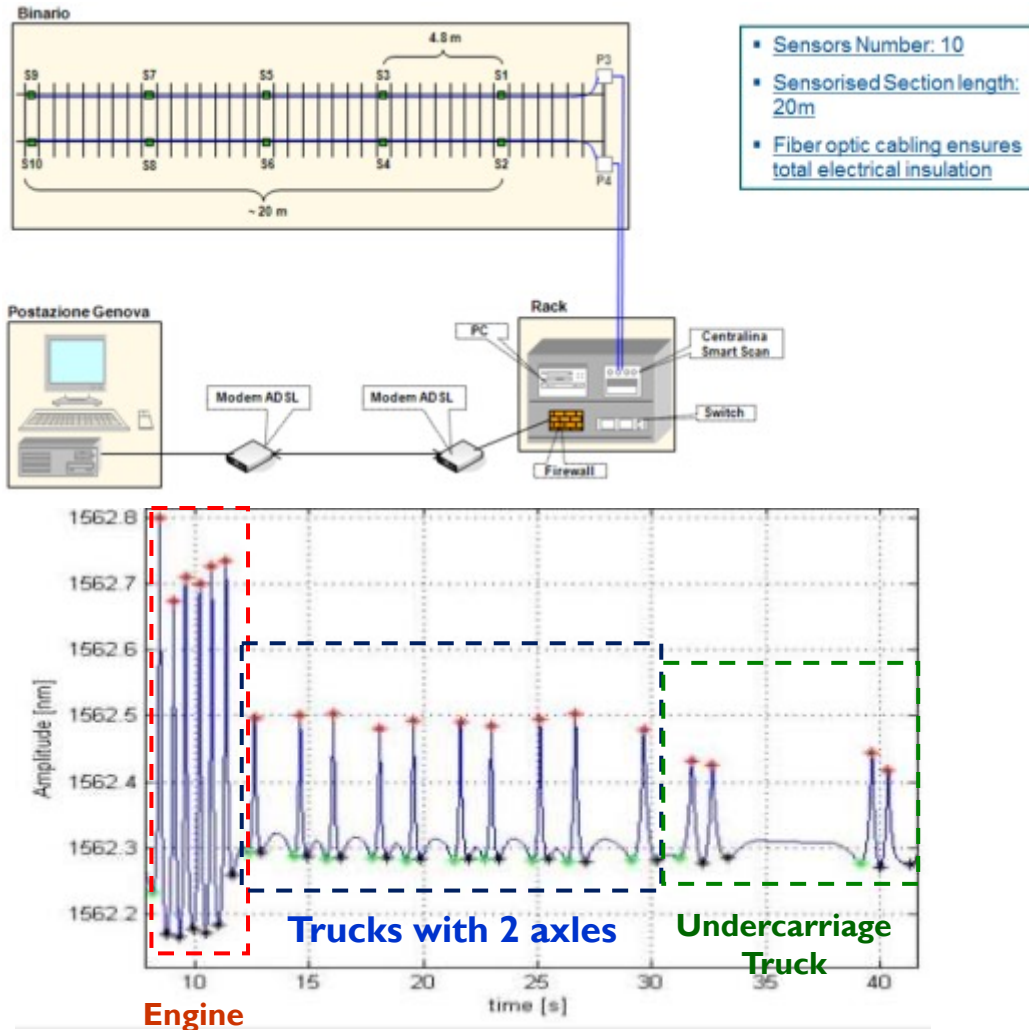


## Amplitude of pulses





# WIM Funzionalità: Tests di Validazione



## Marcianise – Maddaloni Site

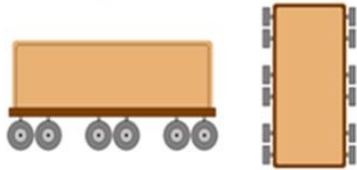


**RFI**  
RETE FERROVIARIA ITALIANA  
GRUPPO FERROVIE DELLO STATO

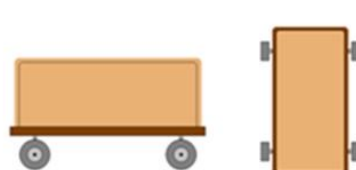


# funzionalità WIM

Engines Trucks



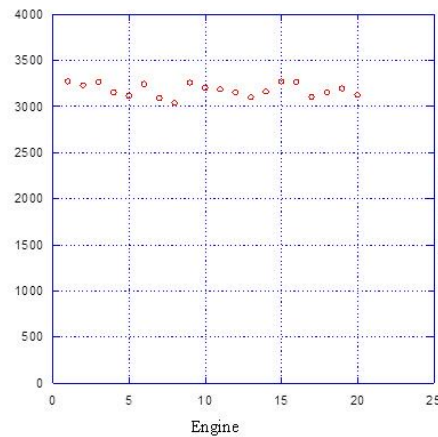
Trucks with two axles



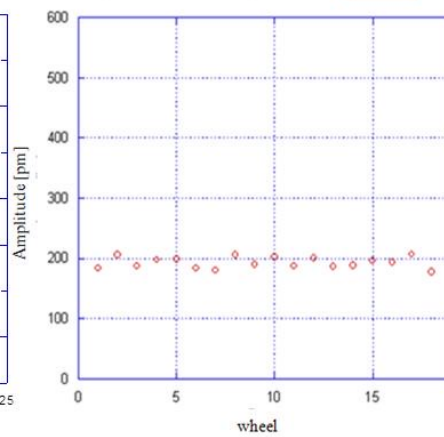
Undercarriage Trucks



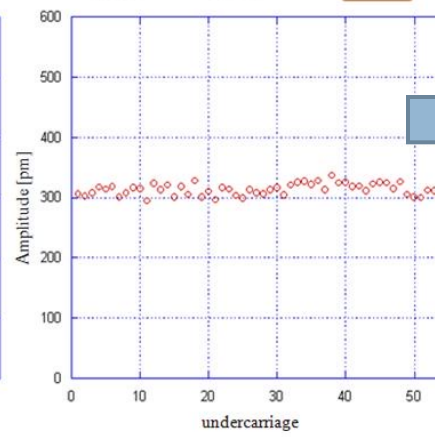
## Linearity Tests



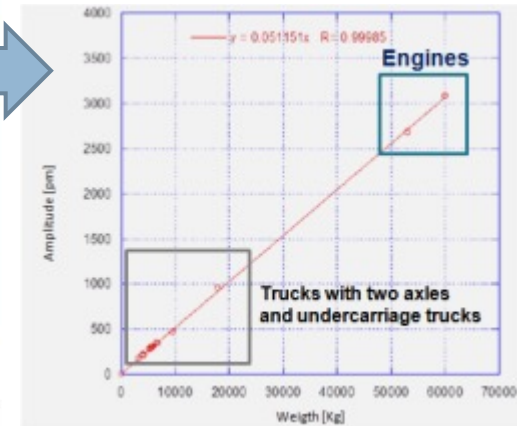
Nominal Weight [kg]	120 tons (60 tons per side)
Standard Deviation %	2



Nominal Weight [kg]	17 tons (4.25 tons per wheel)
Standard Deviation %	2



Nominal Weight [kg]	26 tons (6.5 tons per under carriage)
Standard Deviation %	2



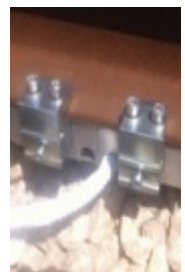
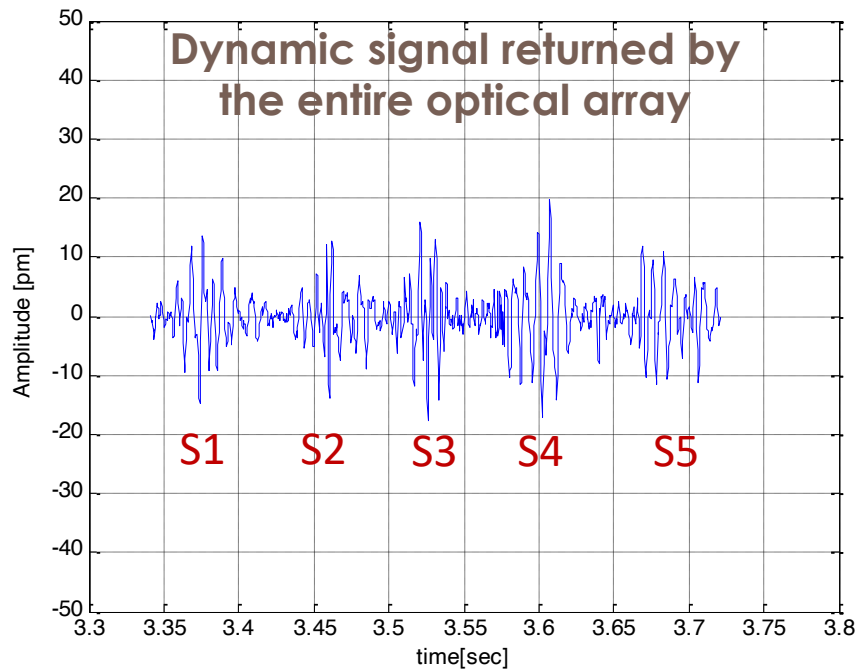
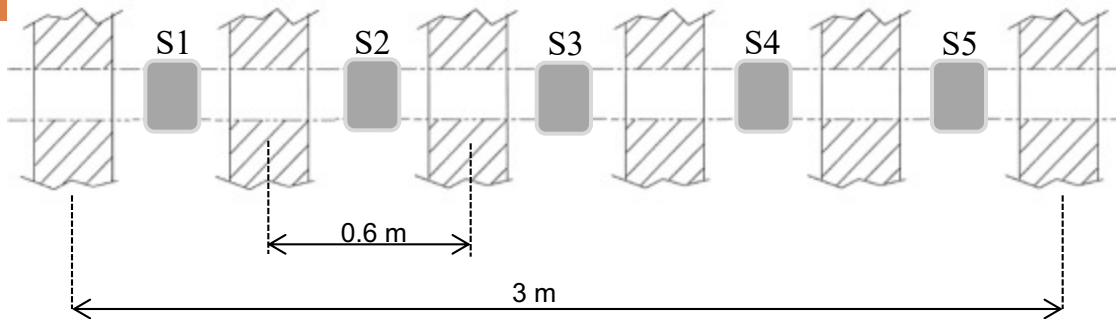
❑ **Taratura veloce e affidabile utilizzando esclusivamente locomotive, nessuna necessità di treni di taratura ad hoc**

❑ **Autocalibrazione e ricalibrazione in linea senza interrompere il funzionamento dell'infrastruttura**

Tested 22 trains	WIM Accuracy %	
Tested systems	Optical WIM System	Commercial System
Engine Truck	1	8
Undercarriages Truck	2	4
Truck with 2 axles	2	7

# Implementazione WILD

Marcianise – Maddaloni Site



- ✓ The reconstruction of the entire profile of each wheel is obtained by "merging" the five responses returned by the sensors in their respective regions of influence
- ✓ The number of sensor can be extended to cover different wheel envelopes

# Forza di Impatto

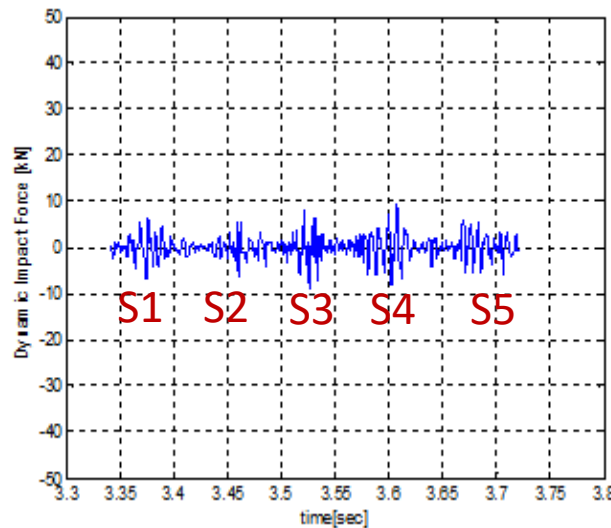
121



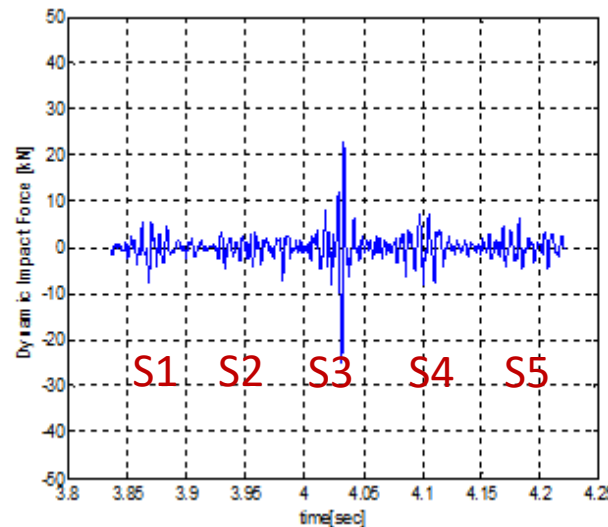
Transits of a test car with two axles in the following configurations:

1. New Wheels without defect
2. Wheels with 39 mm long defects
3. Wheel with 76 mm long defects

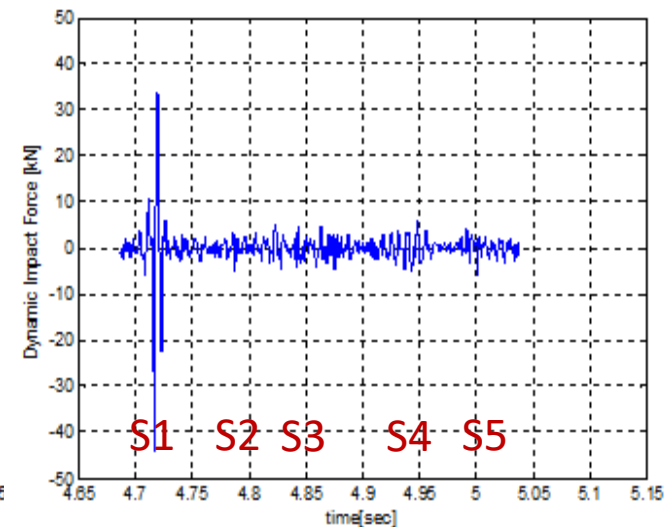
New Wheel



Flat Wheel L=39 mm



Flat Wheel L=76 mm



Dynamic **IMPACT FORCE** as function of the defect length  
for a train speed of 30 km/h



# Indicatore di Difetto “Defect Indicator (DI)”

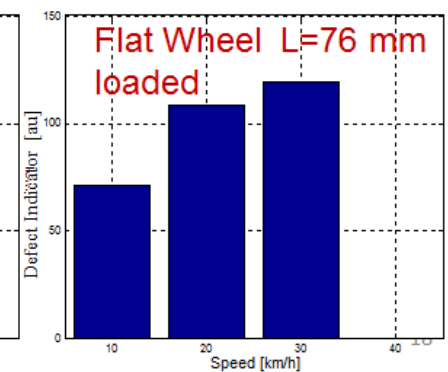
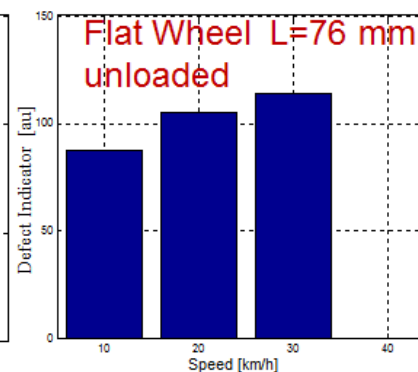
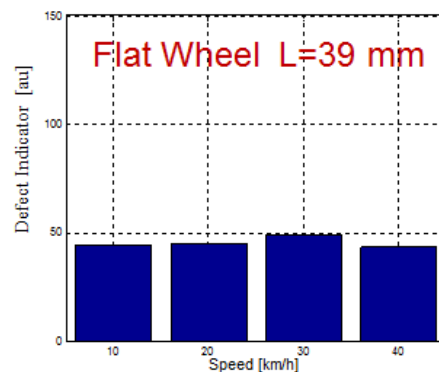
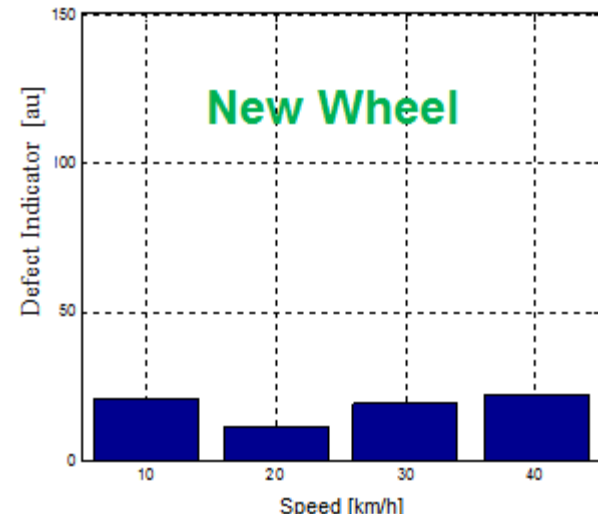
❑ The Dynamic impact force exerted by a given wheel also depends on wheel weight and train speed

❑ To provide an observable output able to identify defected wheels taking into account both weight and speed, a **Defect Indicator** was introduced by normalizing the dynamic impact force:

Defect Indicator  
(DI)

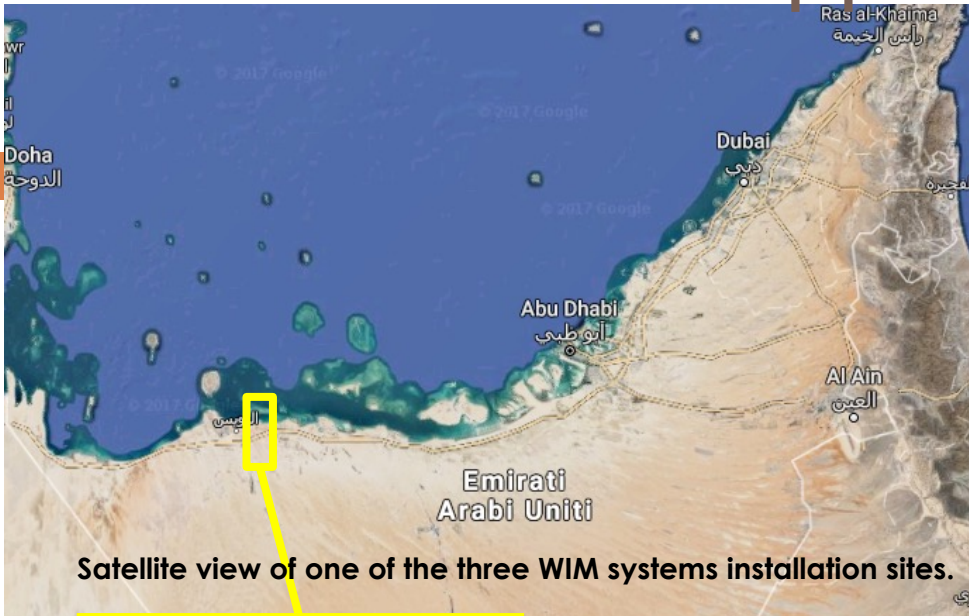


$$D_N = \frac{D}{f(P, v)}$$



The unloaded car has a weight of approximately 13 tons.  
The loaded car has a weight of approximately 23 tons.

# Dalla Ricerca all'applicazione in Campo

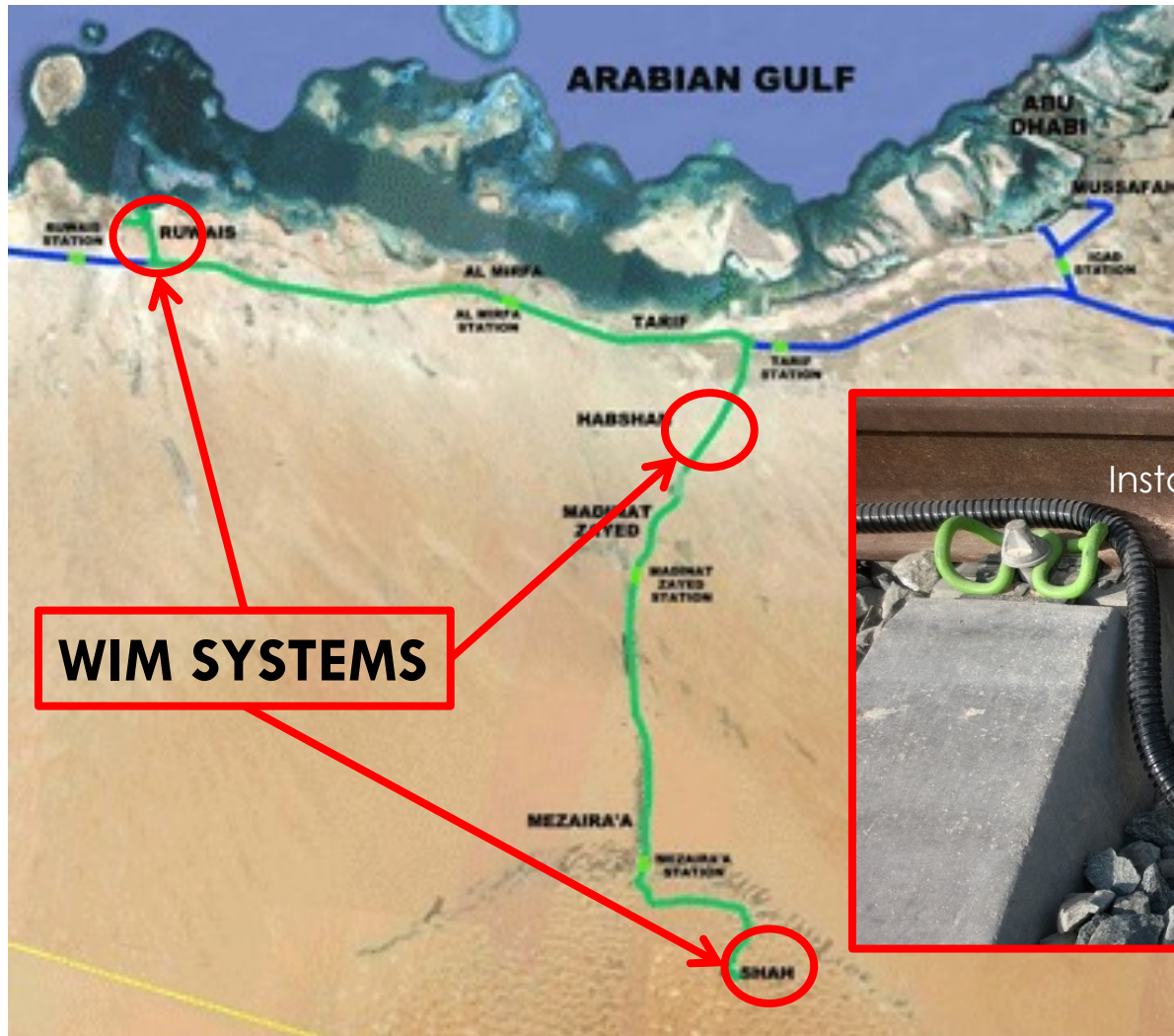


In collaborazione con AnsaldoSTS (oggi HITACHI Rails) Optosmart ha partecipato all'installazione di un sistema WIM basato su sensori basati su Optosmart FBG. In particolare, negli Emirati Arabi Uniti sono stati installati tre sistemi in prossimità dei varchi di accesso delle tre anse ferroviarie che assicurano il trasporto dello zolfo dai siti di estrazione agli impianti di granulazione (Etihad Rail).





# Dalla Ricerca all'applicazione in Campo





IL SISTEMA FUNZIONA 24 ORE SU 24,  
7 GIORNI SU 7 IN AMBIENTE  
ESTREMAMENTE DIFFICILI  
DAL 2015