



Sensori ottici per l'analisi dell'interazione pantografo-catenaria

Optical sensors for the analysis of pantograph-catenary interaction

Prof. Ing. Marco BOCCIOLONE^(*)

Dott. Ing. Giuseppe BUCCA^(*)

Prof. Ing. Andrea COLLINA^(*)

Dott. Ing. Lorenzo COMOLLI^(*)

Sommario - In questa memoria si presentano i vantaggi dell'utilizzo di sensori ottici, in particolare sensori basati su FBG (Fibre Bragg Grating), per l'analisi dell'interazione dinamica tra pantografo e catenaria e, a titolo d'esempio, si discute l'esperienza dell'applicazione di tali sensori su un pantografo di un rotabile per servizio su linea metropolitana e i relativi risultati della sperimentazione. I sensori ottici, nel caso dell'applicazione su un pantografo, presentano il vantaggio di essere intrinsecamente isolati dal punto di vista elettrico, di non richiedere alimentazione elettrica e di essere insensibili ad eventuali disturbi elettromagnetici, semplificando così tutto il sistema di misura. Scopo del presente lavoro è di presentare le principali caratteristiche dei sensori FBG, di confrontare le loro prestazioni con quelle di sensori elettrici tradizionali attraverso i risultati di prove eseguite su una linea metropolitana per l'analisi dell'interazione pantografo-catenaria e di mettere in evidenza come, nel caso dell'utilizzo dei sensori FBG per l'applicazione presa in esame, il sistema di misura con sensori ottici porta ad una importante semplificazione del sistema di misura rispetto ad un approccio basato su strumenti standard.

1. Introduzione

Il contatto strisciante tra pantografo e catenaria permette l'adduzione, o captazione, della corrente elettrica necessaria per il regolare esercizio del veicolo ferroviario. È chiaro che se non viene garantita una buona qualità di captazione senza eccessivi distacchi tra strisciante e filo di contatto non è possibile una trasmissione continua della potenza elettrica all'azionamento del veicolo. Nel momento in cui si ha il distacco tra lo strisciante del pantografo e il filo di contatto, si osserva la nascita di archi elettrici che sono causa di disturbi elettromagnetici [1, 2]

Summary - In the present paper, the advantages of the use of optical sensors, and in particular sensors based on FBG (Fibre Bragg Grating), for the analysis of dynamical interaction between pantograph and catenary are discussed. The experience of a real application where FBG sensors were used on a pantograph of underground vehicle is presented and the related experimental results are discussed. Optical sensors are very suitable for the analysis of pantograph-catenary interaction because they are intrinsically electrically insulated and insensitive to the electromagnetic disturbances and they do not need electrical power supply: these features make the optical measurement setup very simple with respect to the electrical measurement setup for the particular application. This paper aims at presenting the main features of FBG sensors and at comparing performances of optical sensor and traditional electrical sensors by means of results of experimental tests performed to analyse the interaction between pantograph and catenary for an underground line. The experience discussed in this paper shows that the use of an optical measurement setup for the analysis of pantograph-catenary interaction takes to an important simplification with respect to the traditional measurement setup with electrical sensors.

1. Introduction

The sliding contact between pantograph and catenary allows the collection of the electrical current needed for the railway vehicle's operation. Obviously, if a good current collection quality is not assured without excessive contact losses between contact strip and contact wire, the continuous transfer of the electrical power to the vehicle's electrical drive is not possible. When a contact loss between contact strip and contact wire occurs, elec-

^(*) Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano – Milano.

^(*) Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano – Milano.

SCIENZA E TECNICA

e di elevato degrado dei corpi a contatto per effetto di uno scintillio persistente [3, 4, 5] che comporta, quindi, un incremento dei costi di manutenzione.

Una delle cause principali del deterioramento della qualità della captazione, anche a velocità di esercizio non elevate in assoluto (nel campo tra 60 e 160 km/h), come nel caso delle linee regionali o della metropolitana, è la presenza di difetti della linea aerea riconducibili generalmente ad anomalie di posa del filo di contatto in termini di posizionamento laterale (poligonazione del filo), di variazione di altezza lungo la linea e criticità su punti singolari (punti fissi, punti sotto-sospensione, ecc.).

La qualità della geometria della linea è generalmente tenuta sotto controllo mediante veicoli specializzati che percorrono la linea fuori dal servizio. Le informazioni che si possono trarre sono solo di carattere geometrico da confrontarsi con valori limite ed intervalli ammissibili stabiliti in base a normative o ad esperienze pregresse.

In associazione alla verifica con veicoli di ispezione, il monitoraggio diretto dell'interazione pantografo-catenaria può essere un ulteriore metodo per identificare i difetti distribuiti e localizzati lungo la linea aerea, al fine di fornire informazioni per l'ottimizzazione della manutenzione, riducendo la probabilità di interruzione del servizio e contribuendo all'ottimizzazione della manutenzione. A tale scopo è necessario utilizzare un pantografo appositamente strumentato che sia in grado di fornire indicazioni sulla qualità di captazione.

Le grandezze direttamente legate alla qualità della captazione sono la forza di contatto e l'accelerazione verticale dell'archetto, che quindi sono indicatori dell'eventuale deterioramento delle prestazioni della captazione.

Per rendere efficace il monitoraggio a scopo diagnostico si può pensare di strumentare il pantografo di rotabili che svolgono il normale servizio, o in modo permanente o saltuariamente, prevedendo comunque un impegno ridotto.

Strumentare un pantografo è però piuttosto oneroso considerando che esso è un sistema che lavora al potenziale della linea elettrica aerea, per cui è necessario prevedere, nel caso di utilizzo di sensori tradizionali montati sul pantografo, sia l'alimentazione sia l'isolamento elettrico degli stessi rispetto alla tensione di linea.

Il punto critico del monitoraggio è quindi l'installazione della strumentazione ed il suo mantenimento in un ambiente ostile. Da questo punto di vista l'utilizzo dei set-up strumentali tradizionali previsti dalla EN50317 [6] per l'omologazione è molto oneroso da applicare nella pratica. L'utilizzo di tipologie di strumenti che consentano set-up di installazione compatibili con un veicolo in normali condizioni operative diventa, quindi, fortemente auspicabile.

A questo proposito, negli ultimi anni, si è avuto un importante sviluppo dei sensori di tipo ottico e, tra questi, i sensori basati sull'utilizzo di estensimetri ottici del tipo FBG (Fibre Bragg Grating). Questa tipologia di sen-

trical arcs arise, producing electromagnetic disturbances [1, 2] and high degradation of contacting bodies due to a persistent sparkling [3, 4, 5] which causes an increase of maintenance costs.

One of the most important causes of the current collection degradation, even at not high speeds (in the range between 60 and 160 km/h), as for the regional railway lines or underground lines, is the presence of defects along the overhead line typically due to wrong laying of contact wire in terms of lateral positioning (stagger), change of contact wire height along the line and critical conditions related to singular points (fixed points, under-suspension points, etc.).

The quality of the overhead line geometry is generally checked by means of dedicated vehicles that go through the line off duty. Information provided by these checks are geometrical values to be compared with limit values and tolerable ranges established by standards or previous experiences.

The direct monitoring of pantograph-catenary interaction, together with the check of the overhead line by means of the inspection vehicles, can be a further method to identify distributed and concentrated defects along the overhead line in order to provide information for the maintenance optimization, reducing the probability of out of services. For this aim, a pantograph, instrumented on purpose, able to provide information about the current collection quality has to be used.

The parameters directly related to the current collection quality are the contact force and the vertical acceleration of contact strip, which, then, can be used to obtain indices of degradation of current collection performances.

In order to make effective the monitoring for diagnostic aims, it is possible to use, permanently or occasionally, instrumented pantographs on vehicles for the normal service.

The installation of sensors on pantograph is rather expensive because it works at high voltage and, for this reason, if traditional electrical sensors are used, it is necessary to consider suitable solutions for the power supply and for the electrical insulation of sensors. Therefore, the installation of sensors and their maintenance in a hard environment is the critical point for the monitoring of pantograph-catenary interaction. In particular, the use of traditional electrical measurement setup, according to the standard EN50317 [6] for the analysis of pantograph-catenary system, is very expensive. The use of different sensors able to provide a simpler measurement setup and with a low impact on the system should be desirable.

For this aim, in the last years, the optical sensors have been interested by an important development, and among them, the sensors based on the use of optical strain gauges, i.e. the FBG (Fibre Bragg Grating) sensors

SCIENZA E TECNICA

sori ha il vantaggio di essere intrinsecamente isolata dal punto di vista elettrico e di essere insensibile ai disturbi elettromagnetici. Inoltre tali sensori non necessitano di essere alimentati localmente. Queste caratteristiche rendono particolarmente adatti i trasduttori ottici per strumentare un pantografo, rendendo tutto il set-up di misura molto più semplice e gestibile rispetto ad una configurazione tradizionale [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

Scopo di questo lavoro è presentare le principali caratteristiche dei sensori FBG che li rendono vantaggiosi rispetto ai sensori tradizionali per l'applicazione in oggetto e confrontare le prestazioni delle due tipologie di sensori tramite risultati ottenuti durante alcune prove in laboratorio e lungo una linea metropolitana con un pantografo appositamente strumentato con le due tipologie di sensori. I due diversi sistemi di misura vengono confrontati dal punto di vista dell'installazione a bordo. Inoltre, si mostra come le misure ottenute possano essere utilizzate per evidenziare i difetti localizzati lungo la linea aerea a fini diagnostici.

2. I sistemi di misura per l'analisi dell'interazione pantografo-catenaria

Lo scopo dell'utilizzo di un pantografo strumentato è quello di ottenere informazioni sulla qualità del contatto con la catenaria. Una delle grandezze direttamente legate alla qualità della captazione, è la forza di contatto, misurata come forza ai supporti che collegano gli archetti al quadro del pantografo depurata dal contributo delle azioni di inerzia agenti sugli archetti (a tale scopo si utilizzano sia celle di carico che accelerometri) e depurata anche dal contributo aerodinamico, da ottenere con prove apposite con striscianti legati da fili che impediscano il contatto con la catenaria (tale contributo diventa importante solo per velocità maggiori di 150 km/h e quindi sarà trascurato nell'applicazione riportata nel presente lavoro relativa ad un rotabile di una linea metropolitana). Un pantografo strumentato deve, quindi, essere equipaggiato con sensori in grado di fornire una misura di queste grandezze. Nei paragrafi che seguono, si riporta una descrizione del sistema di misura tradizionale e di quello con sensori ottici.

2.1. Il sistema di misura tradizionale

Con il termine sistema di misura "tradizionale" si intende qui un set-up composto da sensori basati su segnali elettrici, i quali necessitano di essere alimentati localmente. Per la misura della forza di contatto tra pantografo e catenaria si impiegano abitualmente due celle di carico per ciascuno strisciante (o per la testa porta striscianti, nel caso questa porti due striscianti) e accelerometri per la compensazione delle azioni d'inerzia agenti sullo strisciante. Le celle di carico sono usualmente di tipo estensimetrico (in grado di misurare anche il valor medio della forza), e sono montate tra gli striscianti e il quadro del pantografo, sopra la sospensione (fig. 1). Le

show interesting features for the application discussed in this paper. This kind of sensors present the advantage to be intrinsically electrically insulated and insensitive to electromagnetic disturbances. Moreover, these sensors do not need power supply. These features make the optical sensors very suitable for the use on a pantograph and make the measurement setup very easy and with very low impact with respect to a traditional measurement setup [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

This paper aims at presenting the main features that make the FBG sensors favourable with respect to the traditional sensors for the application discussed in this work and at comparing the performances of both kinds of sensors by means of the results obtained during some laboratory tests and tests carried out in an underground line with a pantograph on purpose instrumented with the two kinds of sensors (electrical and optical). The two different measurement setups are compared in terms of impact on the real system. Moreover, it is shown as the results of the measurements can be used to point out concentrated defects along the overhead line, i.e. the instrumented pantograph can be used for diagnostics aims.

2. The measurement setup for the analysis of the pantograph-catenary interaction

The purpose of using an instrumented pantograph is to get information on the quality of the contact with the overhead line. One of the variables directly related to the quality of the current collection is the contact force. It is usually measured by means of the force between the contact strips and the pantograph head, subtracted from the contribution of the inertia acting on the strips (for this purpose both load cells and accelerometers are used) and subtracted also by the contribution of the aerodynamic force, to obtain with particular tests with contact strips connected to the train roof by means of insulating wires that prevent contact with the overhead line (this contribution becomes important only at speeds greater than 150 km/h and therefore will be neglected in the application shown in the present work on an underground train). An instrumented pantograph must, therefore, be equipped with sensors able to provide a measure of these quantities. In the following paragraphs, a description of both a traditional and an optical measurement system is given.

2.1. The traditional measurement setup

The term "traditional" measurement system here means a setup consisting of sensors based on electrical signals, which need to be locally powered. For the measurement of contact force between the pantograph and the overhead line, two load cells for each contact strip (or for the contact strip assembly, as in the example here shown, with two connected strips) and two accelerome-

SCIENZA E TECNICA

celle di carico misurano le forze agenti in corrispondenza dei supporti destro e sinistro tra la testa e il quadro del pantografo.

Per la misura dell'accelerazione verticale della testa del pantografo, utilizzabili sia per diagnostica e sia per la compensazione delle forze d'inerzia, si impiegano due accelerometri per striscianti opportunamente isolati elettricamente. Anche se generalmente basta misurare la sola componente verticale di accelerazione per ottenere informazioni sulla qualità della captazione, in alcuni casi si aggiunge un ulteriore accelerometro per ottenere informazioni sulla componente laterale di accelerazione della testa del pantografo. Inoltre spesso si utilizza anche un sensore di spostamento (di solito un potenziometro con filo avvolto su rocchetto), per misurare l'altezza del pantografo durante il funzionamento. Quest'ultima misura permette di verificare la presenza di variazioni improvvise di altezza del filo di contatto lungo la linea che possono provocare un deterioramento della qualità della captazione.

I sensori tradizionali di misura necessitano di alimentazione elettrica, e questo è uno dei primi problemi causati dall'applicazione di sensori elettrici ad un sistema che lavora in tensione, quale è il pantografo. Per garantire la sicurezza di tutto il sistema, la soluzione spesso più immediata è l'utilizzo di un pacco di batterie fissato in modo sicuro sull'imperiale del veicolo in prossimità del pantografo. Inoltre, al fine di garantire un completo isolamento elettrico, tutti i segnali elettrici dei sensori vengono convertiti in segnali ottici tramite degli appositi convertitori e trasferiti in prossimità del sistema di acquisizione all'interno del veicolo attraverso cavi in fibra ottica. Tali segnali poi possono essere acquisiti direttamente oppure riconvertiti da segnali ottici a segnali analogici elettrici con appositi convertitori e infine inviati ai tradizionali sistemi di acquisizione con segnali in tensione o corrente [14].

2.2. Il sistema di misura ottico

I sistemi di misura basati su sensori ottici hanno quale indubbio vantaggio l'isolamento elettrico intrinseco do-

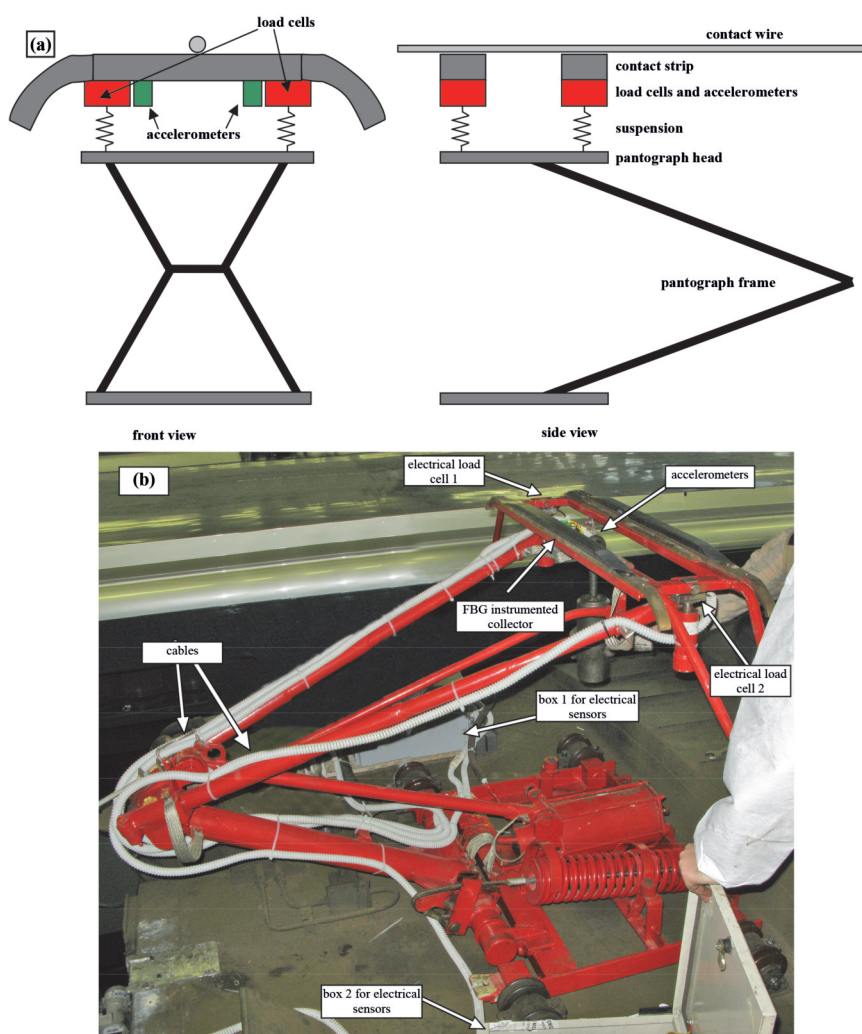


Fig. 1 - (a) Schema di un generico pantografo strumentato con celle di carico (rettangoli in rosso) e accelerometri (rettangoli in verde). (b) Pantografo strumentato montato sull'imperiale di un veicolo per linea metropolitana (a differenza dello schema in (a) qui i 2 striscianti sono collegati in un solo gruppo, sostenuti quindi da un totale di 2 celle di carico, che in ogni caso sono sopra sospensione).

Fig. 1 - (a) Sketch of a generic pantograph instrumented with load cells (red rectangles) and accelerometers (green rectangles). (b) An instrumented pantograph mounted on the roof of an underground train (unlike the sketch in (a), here the contact strips are connected into one group, and then supported by a total of two load cells, both above the suspension).

ters, for the compensation of inertia, are adopted. The load cells are usually strain gauge load cells (able to measure also the mean value of the force), and are mounted between the contact strips and the pantograph head, above the suspensions (fig. 1). The load cells measure the forces acting in correspondence of the left and right supports between the head and the framework of the pantograph.

For the measurement of the vertical acceleration of the pantograph head two accelerometers per strip are

SCIENZA E TECNICA

vuto all'uso di cavi in fibra ottica di tipo dielettrico. Inoltre, non necessitando di alimentazione elettrica, l'utilizzo di questa tipologia di sensori ottici permette di semplificare notevolmente il sistema di misura nell'applicazione in oggetto e consente di eseguire le misure in sicurezza anche per sistemi che lavorano a tensioni elevate. In tal modo si riducono sensibilmente sia i tempi di approntamento e montaggio che la quantità di materiale che deve essere posta sull'imperiale e su supporti isolanti.

Molte sono le tecnologie che sfruttano l'ottica per creare sensori. Ad esempio, esistono sensori ad intensità luminosa, che misurano la quantità di luce in grado di passare attraverso un ostacolo mobile [15]; oppure sensori interferometrici Fabry-Perot [16]; oppure ancora sensori a reticolo di Bragg (FBG, fiber Bragg grating) [17, 18, 19, 20].

Gli autori ritengono che, per sistemi di misura complessi, formati da molti sensori e con particolari requisiti metrologici, il miglior sistema attualmente a disposizione sia l'ultimo citato, ovvero quello che utilizza i sensori FBG. Ovviamente ci sono casi specifici dove altre tecnologie sono preferibili (per costi, prestazioni o semplicità). Tuttavia nel complesso i sensori FBG forniscono la maggiore flessibilità di adattamento ai casi più disparati.

I sensori FBG sono in ultima analisi equivalenti a degli estensimetri elettrici a resistenza e con essi è possibile costruire sensori basati sulla misura della deformazione di elementi flessibili. In particolare, per l'applicazione ferroviaria è possibile realizzare celle di carico e accelerometri da posizionare sulla testa del pantografo. Tali trasduttori possono essere sviluppati in proprio oppure si possono reperire in commercio, dove tuttavia non sempre si trovano con le caratteristiche desiderate.

2.2.1. I sensori FBG

I sensori FBG sono estensimetri ottici in grado di misurare la deformazione a cui sono soggetti. Le caratteristiche metrologiche di questi sensori non sono molto differenti dagli estensimetri elettrici comunemente impiegati. La grande differenza risiede invece nel sistema di lettura dei segnali, che impiega centraline, dette interrogatori, solitamente molto costose e dal funzionamento complesso. In uscita a tali interrogatori si hanno segnali in termini di lunghezza d'onda della luce riflessa. La deformazione meccanica ϵ_m si può calcolare dalla lunghezza d'onda riflessa λ con $\epsilon_m = (\Delta\lambda/\lambda_0)/G_f$, dove G_f è il gauge factor del sensore FBG.

Le caratteristiche di un sistema di sensori FBG e interrogatore possono essere tipicamente di questo genere:

- risoluzione 1 $\mu\text{m/m}$;
- massima deformazione 5000 $\mu\text{m/m}$;
- sensibilità (gauge factor) 0.78;
- sensibilità alla temperatura 11 $\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$;

necessary, electrically insulated. They can be used only for the inertia compensation, but also for diagnostic purposes. Although usually only the vertical component of acceleration is necessary for evaluating the current collection quality, for the application presented in this paper an additional accelerometer for measuring the lateral component of acceleration of the pantograph head was added. Also often the measurement system is completed with a displacement sensor (usually a potentiometer with a wire wound on a spool), for measuring the height of the pantograph head during operation. The latter measure can show any sudden change in height of the contact wire along the line that can cause a deterioration in the quality of the current collection.

These electrical sensors require a power supply, and this is the first problem connected to the application of electrical sensors to a system which works under high voltage, i.e. the pantograph. To guarantee the safety of the whole system, the most adopted solution is the use of a pack of batteries safely secured on the roof of the vehicle, nearby the pantograph.

In addition a second problem arises: in order to ensure full electrical insulation, all the electrical signals outputted by the sensors must be converted into optical signals by means of converters and transferred in proximity of the data acquisition system within the coach using fibre optic cables. These signals then can be gathered directly or converted back from optical to electrical signals with other converters, and finally gathered by an acquisition board [14].

2.2. The optical measurement setup

One of the main advantages of the optical measurement systems is the intrinsic electrical insulation due to the use of dielectric optical fibre cables. Moreover, since the optical sensors do not need electrical power supply, the use of this kind of sensors considerably simplifies the measurement setup for the monitoring of pantograph-catenary interaction and enables to carry out measurements in safety conditions also for systems that work at high voltage. This allows also to reduce both setup times and the amount of instrumentation to be positioned on insulating supports on the train roof.

Many are the technologies that exploit optics to produce sensors. For example, light intensity sensors that measure the light passing through a mobile target [15]; Fabry-Perot interferometric sensors [16]; FBG, Fiber Bragg Grating sensors [17, 18, 19, 20].

The authors believe that, for complex measurement systems, composed of many sensors and with good metrological requirements, the best technology currently available is the latter, i.e. FBG sensors. Obviously there are specific situations where the other technologies are preferable (for cost, performance or simplicity). However, overall, the FBG sensors provide better flexibility for a

SCIENZA E TECNICA

- frequenza di campionamento 1 kHz;
- molti sensori per singola fibra (fino a 80) con possibilità di lettura di 4 fibre per centralina
- cavi di collegamento in fibra monomodale con lunghezze anche di parecchi chilometri
- isolamento elettrico, insensibilità ai disturbi elettromagnetici;
- sensori passivi che non necessitano di alimentazione.

Gli FBG vengono solitamente incollati sul sistema in corrispondenza del punto di misura in maniera analoga agli estensimetri elettrici; talvolta però possono essere usati liberi in aria e pretensionati alle estremità (fig. 2).

I sensori FBG sono contenuti all'interno di una fibra ottica standard di tipo monomodale (fig. 2a), ovvero con diametro del nucleo (core) di 10 μm , mantello (cladding) di 125 μm e protezione in materiale plastico (buffer) di 200-250 μm . Il sensore consiste in una piccola variazione periodica di indice di rifrazione all'interno del nucleo; questa variazione di indice di rifrazione viene prodotta tramite esposizione a raggi ultravioletti ed è possibile incidere il reticolo sia durante la produzione della fibra che dopo, tramite rimozione locale del buffer, incisione e

large spectrum of applications.

FBG sensors are in many aspects equivalent to electrical resistance strain gauges and with them it is possible to build sensors based on the measurement of the strain of flexible elements. In particular, for railway applications it is possible to design load cells and accelerometers to be placed on the pantograph head. These transducers can be developed in-house or can be found on the market; however in this case it is difficult to find the desired characteristics.

2.2.1. FBG sensors

FBG sensors are optical strain gauges able to measure the strain applied to them. The metrological characteristics of these sensors are quite similar to the electrical strain gauges. The main difference consists in the conditioning system, named interrogator, usually quite expensive and complex. The output of the interrogator is a wavelength of the peak of the reflected light from the FBG sensor. The mechanical strain ϵ_m can be computed from the reflected wavelength λ with $\epsilon_m = (\Delta\lambda/\lambda_0)/G_f$, where G_f is the gauge factor of the FBG sensor.

The characteristics of a typical system composed of FBG sensors and an interrogator are:

- resolution 1 $\mu\text{m}/\text{m}$;
- maximum strain 5000 $\mu\text{m}/\text{m}$;
- sensibility (gauge factor) 0.78;
- temperature sensibility 11 $\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$;
- sampling frequency 1 kHz;
- many sensors on a single fibre (up to 80) and 4 fibres per interrogator;
- single-mode fibre cables with lengths of up to several kilometres;
- electrical insulation, insensitivity to electromagnetic interference;
- passive sensors, no electrical power required.

FBG sensors are usually glued in a location of the system similarly to electrical strain gauges; sometimes, however, they can be used in free air and tensioned across the fibre wire (fig. 2).

FBG sensors are embedded within a standard type single-mode optical fibre (fig. 2a), i.e. a fibre with a core diameter of 10 μm , a cladding diameter of 125 μm and plastic protective

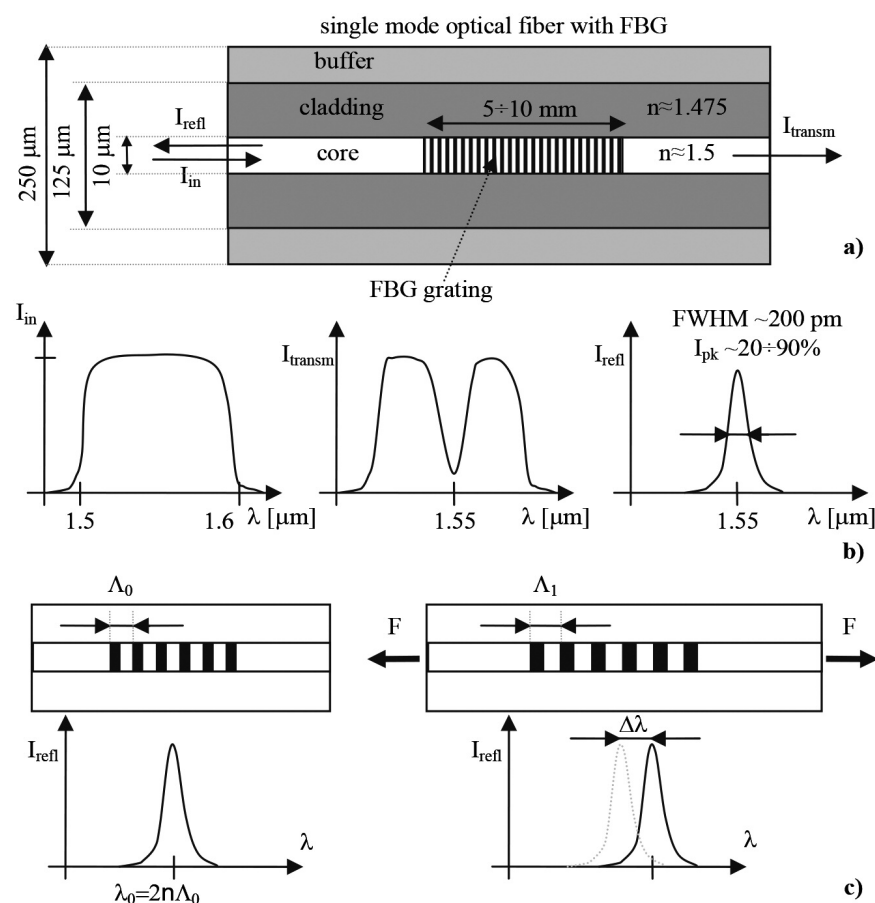


Fig. 2 - Principio di funzionamento dei sensori a reticolo di Bragg FBG.

Fig. 2 - Working principle of FBG sensors.

SCIENZA E TECNICA

successiva ricopertura. Da un punto di vista di resistenza meccanica conviene scegliere la prima soluzione in quanto la seconda può indebolire la fibra ottica, rendendola più fragile di quanto già è. Tuttavia lo svantaggio della prima soluzione è una minore riflessione, perché l'incisione va fatta velocemente durante la produzione della fibra.

Un esempio può aiutare a chiarire (fig. 2b). Un reticolo lungo 5 mm, con lunghezza d'onda del riflesso di 1550 nm, conterrà quasi 10000 periodi. Se una luce bianca (contenente tutte le lunghezze d'onda) transita nella fibra ottica e incontra il reticolo, una parte viene riflessa indietro e una parte passa attraverso. La parte riflessa avrà una lunghezza d'onda che dipende dal passo del reticolo, che dipende sia dal passo con cui è stato inciso, sia dalla temperatura, che soprattutto dalla deformazione a cui è sottoposta la fibra (fig. 2c). Lo spettro riflesso sarà sostanzialmente monocromatico, con un picco di riflessione a una lunghezza d'onda specifica. Considerando la sensibilità dell'estensimetro pari a 0.78, una deformazione di 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ produrrà uno spostamento del picco di riflessione di 1.2 pm, un valore davvero piccolo, ma che è possibile apprezzare con gli interrogatori più recenti.

Siccome la seconda parte della luce è passata attraverso il sensore, è possibile posizionare un altro sensore FBG a valle del primo, purché lo si costruisca con una lunghezza d'onda diversa (ad es. 1560 nm) e purché la sua lunghezza d'onda non vada mai a incrociarsi con quella del primo sensore. Per questa ragione è possibile mettere tanti sensori sulla stessa fibra ottica (array): considerando un interrogatore con campo di lavoro di 1510-1590 nm, e considerando una distanza tra i sensori di 5 nm, è possibile impiegare circa 40 sensori sulla stessa fibra ottica.

I sensori possono anche essere posti su canali diversi dell'interrogatore, che tipicamente ha 4 canali. Inoltre è possibile anche dividere i fasci di luce di ciascun canale tramite splitter ottici, al costo di una perdita di luce. Oppure è possibile suddividere la frequenza di campionamento su più canali tramite multiplexer ottici.

Gli interrogatori più evoluti sono in grado di misurare variazioni di lunghezza d'onda dei picchi di riflessione con risoluzione di 1 pm, e accuratezza del valor medio di circa 2 pm, grazie all'impiego di celle a gas per il riferimento assoluto di lunghezza d'onda. Sono disponibili interrogatori "statici" o "dinamici" che possono campionare a frequenze rispettivamente dell'ordine di 10 Hz e 1000 Hz. Ovviamente per una applicazione sui pantografi ferroviari sarà da preferire la versione dinamica. I costi di tali interrogatori sono molto diminuiti nel corso degli anni, ed ora sono dell'ordine di circa 10-20 k€, valori comunque non trascurabili e che ne frenano ancora l'impiego su vasta scala. Il costo dei sensori è più limitato, dell'ordine di 100 € per un singolo FBG, e di 500 € per un array di 10 FBG (molte variabili entrano in gioco nella definizione del costo dei sensori, e quindi tali valori sono solo indicativi).

buffer of 200-250 μm . The sensor consists of a small periodic variation of refractive index within the core; this variation in refractive index is produced by exposure to ultraviolet light and it is possible to engrave the grating both during the production of the fibre, or later through local removal of the buffer, etching and subsequent re-coating. From a point of view of mechanical strength the first solution is much better because the latter weakens the optical fibre, making it even more fragile than it already is. However the drawback of the first solution is a lower reflection, because the incision must be made quickly during production of the fibre.

An example may help to clarify (fig. 2b). A 5 mm grating, with a wavelength of the reflection of 1550 nm, will contain nearly 10000 periods. If a white light (containing all the wavelengths) enters into the optical fibre and traverse the grating, a part is reflected back and the remaining part passes through. The reflected part will have a wavelength that depends on the period of the grating, which depends both on the period at which it was recorded, both by the temperature, both mainly by the strain to which the fibre is subjected (fig. 2c). The reflection spectrum will be substantially monochromatic, with a reflection peak at a specific wavelength. Considering the sensitivity of the strain gauge of 0.78, a strain of 1 $\mu\text{m}/\text{m}$ will produce a shift of the reflection peak of 1.2 pm, a value really small, but appreciable with the most recent interrogators.

Since the latter part of the light is passed through the sensor, it is possible to place another FBG sensor downstream of the first, as long as it has a different wavelength (e.g. 1560 nm) and as long as its wavelength peak never happens to cross with that of the first sensor. For this reason it is possible to put many sensors on the same optical fibre (array). Considering an interrogator with a working range from 1510 nm to 1590 nm, and considering a 5 nm distance between the sensors, about 40 sensors on the same optical fibre can be used.

The sensors can also be placed on different channels of the interrogator, which typically has 4 channels. Furthermore it is possible to divide the beams of light of each channel through optical splitters, at the cost of a light loss. Or the sampling frequency can be divided on multiple channels through an optical multiplexer.

The best interrogators are capable of appreciate changes in the wavelength of the reflection peaks with a resolution of 1 pm, and accuracy of the mean value of about 2 pm, thanks to the use of gas cells for the absolute reference of wavelength. "Static" or "dynamic" interrogators are available, with sampling frequencies respectively of the order of 10 Hz and 1000 Hz. Of course, for an application on railway pantographs the dynamic version must be preferred. The cost of these interrogators have dropped significantly over the years, and are now in the range of about 10-20 k€, values still not negligible and that still prevent a wide spreading of the technology. The cost of sensors is in the order of 100 € for a single

SCIENZA E TECNICA

Per una introduzione più approfondita ai sensori e agli interrogatori si rimanda a [17].

2.2.2. Sincronizzazione temporale tra segnali elettrici ed ottici

In un sistema di misura complesso, come quello per il monitoraggio di un pantografo, è necessario acquisire molte grandezze di varia natura. Oltre a quelle provenienti dalla testa del pantografo, è normale acquisire i segnali di velocità del treno e di molte altre grandezze ausiliarie. I sistemi di acquisizione di segnali ottici ed elettrici richiedono naturalmente schede di acquisizione differenti e quindi si presenta il problema della sincronizzazione temporale dei segnali acquisiti.

Le soluzioni possono essere molteplici. Di seguito si riportano due soluzioni impiegate dagli autori durante le loro attività sperimentali.

Un primo metodo consiste nell'acquisire separatamente i segnali con due sistemi diversi e di provvedere a posteriori alla loro sincronizzazione. Al fine di confrontare i dati ottenuti con le due tipologie di sensori, è necessario creare un sistema di sincronizzazione dei segnali elettrici e ottici. Per eseguire tale sincronizzazione gli autori hanno realizzato un semplice sistema composto da una trave flessibile strumentata sia con un estensimetro elettrico e sia con un sensore FBG. Durante le prove, ad intervalli prefissati, si è provveduto ad applicare alla trave una deformazione impulsiva e i segnali ottenuti attraverso l'estensimetro elettrico e il sensore FBG sono stati acquisiti con i due diversi sistemi di acquisizione (fig. 3). L'analisi dei due segnali con la funzione di cross-correlazione ha permesso di ottenere una sincronizzazione temporale con un errore inferiore a 0.01 s, sufficiente per eseguire il confronto tra i segnali elettrici e i segnali ottici ottenuti durante le prove in linea.

Un secondo metodo consiste nel convertire i segnali ottici in segnali elettrici. A questo scopo gli autori hanno realizzato un sistema composto da PC di acquisizione ottica, condizionamento dei segnali, software di output e scheda con uscite analogiche. In questo modo è possibile rendere disponibile ad altri sistemi di acquisizione tradizionali dei segnali analogici in tensione. Il ritardo introdotto dal sistema, denominato O2E (Optical to Electrical), è identificabile con accuratezza elevata. Per le applicazioni prese in esame dagli autori è stato fissato un ritardo di 1 s, misurato costante con deviazione standard inferiore a 1 ms.

3. Un esempio di sistema di misura ottico per treno di metropolitana

Per rendere più chiaro al lettore l'impiego di sistemi ottici nell'applicazione specifica, riportiamo di seguito un'esperienza condotta su un convoglio di treno metropolitano. Lo scopo di tale esperienza è stato di confrontare la tecnologia tradizionale a quella ottica. Pur essendo

FBG, and of 500 € for an array of 10 FBG (many variables determine the definition of the cost of the sensors, and so these values are only indicative).

For a more thorough introduction to FBG sensors and interrogators, please refer to [17].

2.2.2. Synchronisation of electrical and optical signals in the time

For a complex measurement setup, as the one used in this work for the pantograph-catenary monitoring, it is necessary to acquire many signals related to variables of various kinds. Besides signals from the pantograph head, it is usual to acquire the train speed signal and signals related to other supplementary variables. Of course, the optical and electrical acquisition systems require different acquisition boards and this means that a method for time synchronization of optical and electrical signals has to be introduced.

Different solutions can be adopted. In this section two solutions introduced by authors in their experimental activities are presented.

The first method consists in acquiring independently with two different acquisition systems the optical and electrical signals and in providing at the end of tests to their synchronisation. In order to compare the data obtained with the two kinds of sensors, it is necessary to create a synchronisation system. To this aim, authors built a simple device composed of a flexible beam instru-

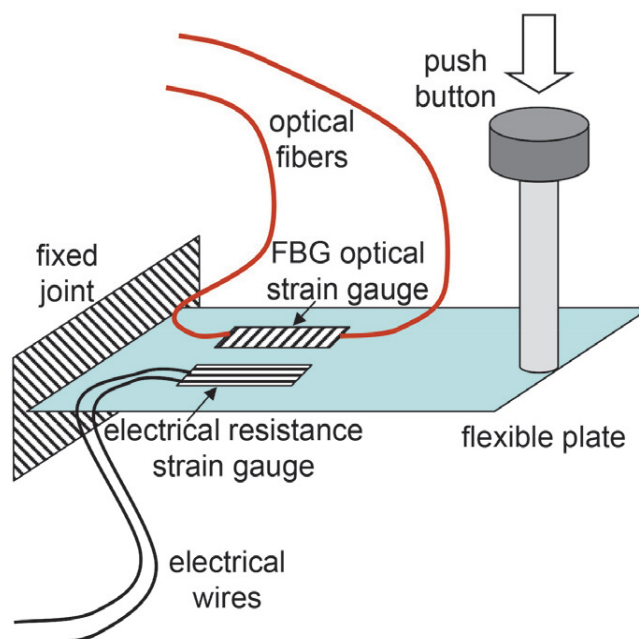


Fig. 3 - Sincronizzazione dei segnali elettrici e ottici: schema di funzionamento del dispositivo.

Fig. 3 - Synchronisation of electrical and optical signals: sketch of the device.

SCIENZA E TECNICA

il pantografo diverso rispetto a treni convenzionali o ad alta velocità, il sistema di misura non è molto differente.

Le prove descritte nel seguito si riferiscono all'uso diretto di sensori FBG incollati sulla testa del pantografo. Esistono anche sul mercato celle di carico in fibra ottica [21,22] il cui impiego può semplificare ulteriormente il sistema di misura e renderlo più affidabile.

3.1. Descrizione del sistema di misura

In fig. 4 si riporta uno schema del sistema di misura completo utilizzato, comprensivo di sensori ottici e di sensori tradizionali elettrici. In particolare, i sensori elettrici utilizzati, come riportato anche nel paragrafo 2.1, sono due celle di carico che misurano le forze agenti in corrispondenza dei supporti destro e sinistro tra la testa e il quadro del pantografo e due accelerometri rispettivamente montati uno in direzione verticale (per diagnostica e per la compensazione delle azioni di inerzia [6]) e uno in direzione laterale (per diagnostica). L'utilizzo di tali sensori tradizionali per l'applicazione in oggetto prevede l'impiego di batterie montate sul tetto del treno, di condizionatori dei sensori e di disaccoppiatori ottici (fig. 4).

Per quanto riguarda i sensori ottici, per la misura della forza di contatto si sono utilizzati dei semplici sensori FBG incollati in posizioni selezionate sulla testa del pantografo, in modo che questi fossero sensibili alla deformazione della testa proporzionalmente alla forza di contatto. Il valore di forza è stato legato alla deformazione misurata dai sensori FBG attraverso una taratura eseguita in laboratorio. In particolare, sono stati utilizzati due sensori FBG: il primo, il sensore principale, per misurare la deformazione proporzionale alla forza di contatto, mentre il secondo, il sensore compensatore, per compensare l'effetto termico (fig. 5). Il sensore compensatore è essenziale in quanto i sensori FBG sono sensibili alla temperatura in maniera analoga agli estensimetri elettrici.

I sensori FBG utilizzati sono fibre ottiche monomodali, con banda di riflessione centrale a 1530 nm e picco di riflessione di circa 20%, lunghezza della griglia di 10 mm e massima deformazione misurabile di $\pm 5000 \mu\text{m/m}$. I sensori sono stati prodotti dall'azienda FBGS International.

L'uscita complessiva di un sensore FBG incollato su di un provino, in termini di variazione di lunghezza d'onda normalizzata $(\Delta\lambda/\lambda_0)_{TOT}$, può essere correlata alla deformazione meccanica applicata ϵ_m e alla temperatura T con la seguente relazione:

mented with an electrical strain gauge and with a FBG sensor. During tests, at predetermined time intervals, an impulsive strain to the beam was applied and signals obtained by the electrical strain gauge and by FBG sensor were acquired with the two different acquisition systems (fig. 3). For the application presented in this paper, the analysis of the two signals with the cross-correlation function provided the time synchronisation with an error lower than 0.01 s, enough to carry out the comparison between the electrical and optical signals acquired during the in line tests.

The second method consists in converting the optical signals in electrical signals. To this aim, the authors realized a system composed of a PC dedicated to the optical signal acquisition, a signal conditioner, a board with analogue outputs and a dedicated output software. This system enables to make available voltage analogue signals to traditional acquisition systems. The delay introduced by the system, named O2E (Optical to Electrical), for the conversion is known with high accuracy. For the experimental activities carried out by authors, a fixed delay of 1 s is typically adopted (analysis of this fixed delay pointed out that the standard deviation of this delay is less than 1 ms).

3. An example of optical measurement setup for an underground train

In order to clarify the use of optical measurement systems in the particular application, an experience carried out for an underground vehicle is described. The aim of this experience is to compare the traditional tech-

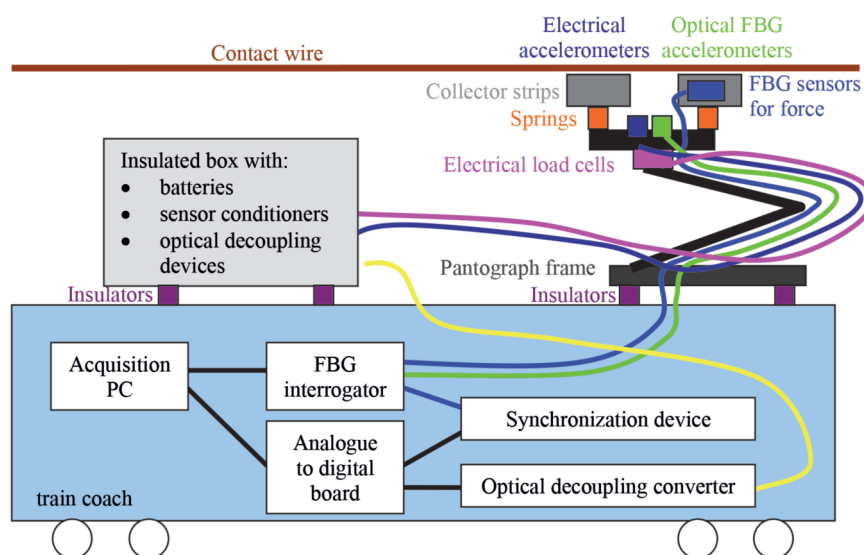


Fig. 4 - Schema elettrico e ottico completo del sistema di misura utilizzato per lo studio della qualità della captazione.

Fig. 4 - Sketch of the electrical and optical measurement setup used for the study of current collection quality.



Fig. 5 - Testa del pantografo con i sensori FBG: (a) vista completa; (b) dettaglio dei sensori, con il principale (1) e con quello per la compensazione termica (2).

Fig. 5 - Pantograph head with the FBG sensors: (a) overview; (b) detail of sensors: main sensor (sensor 1) and sensor for the thermal compensation (sensor 2).

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right)_{TOT} = G_f \varepsilon_m + [G_f \alpha_{sp} + \alpha_\delta] \Delta T \quad (1)$$

dove

- G_f è la sensibilità dei sensori FBG (tipicamente 0.78);
- α_{sp} è il coefficiente di dilatazione termica del provino (pari a circa $10.8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ per acciaio ferritico);
- α_δ è il coefficiente termo-ottico (tipicamente $8.6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ per fibra in silicio dopato con germanio).

Il secondo termine dell'equazione (1) rappresenta la risposta alla temperatura del sensore FBG incollato sul sistema. Tale risposta non può essere trascurata in quanto una variazione di temperatura di $1 \text{ }^\circ\text{C}$ produce una variazione di deformazione di $21.8 \text{ } \mu\text{m/m}$.

Questo conferma come i sensori FBG siano fortemente influenzati dalla temperatura e, analogamente agli estensimetri elettrici, per l'ottenimento di una misura di deformazione affidabile è necessario prevedere un'efficace compensazione. A tale scopo, la soluzione adottata, incollando due sensori in due posizioni appropriate, permette di ottenere una quantità indipendente dalla temperatura sottraendo le deformazioni misurate nei due punti.

Per individuare in modo ottimale la posizione dei due sensori è stata eseguita un'analisi ad elementi finiti. L'analisi mostra che i massimi valori di deformazione per una forza verticale applicata in corrispondenza della mezzzeria della testa del pantografo si ottengono sulle due ali verticali della sezione a C. Il sensore per la compensazione termica, per mancanza di spazio, è stato incollato sulla base della sezione a C dove la deformazione meccanica è trascurabile. Le posizioni dei due sensori sono distanti circa 20 cm e questo ha inevitabilmente comportato per l'applicazione in esame una non perfetta compensazione termica. I sensori FBG sono stati incollati alla

nology and the optical one. Even if the pantograph considered is different with respect the one of typical train or high-speed train, the measurement setup is not very different.

The tests described in the following sections refer to the use of FBG sensors directly glued on the pantograph head. FBG load cells can be found in the market [21, 22]: the use of these load cells can further simplify the measurement setup and make it more reliable.

3.1. Description of the measurement setup

A sketch of the complete measurement setup, composed of both optical and electrical sensors, is shown in fig. 4. In particular, the electrical sensors, as reported in section 2.1, are two load cells, which measure the forces acting on the left and right connection between the pantograph head and the pantograph frame, and two accelerometers, which measure the vertical acceleration of pantograph head (this measurement is used for diagnostics aims and to compensate the inertia forces [6]) and the lateral acceleration of pantograph head (this measurement is used for diagnostics aims). The use of these traditional sensors for the monitoring of pantograph-catenary interaction needs the use of batteries on the train's roof, sensor conditioners and optical decoupling devices (fig. 4).

As far as the optical sensors are concerned, FBG sensors directly glued in selected positions on the pantograph head were used to measure the contact force. The positions where FBG sensors were applied were chosen so that the strain in those points is proportional to the contact force. The value of the contact force was related to the strain measured by the FBG sensors by means of a calibration in laboratory. In particular, two FBG sensors were used: the first, the main sensor, was used to measure the strain proportional to the contact force, while the second, the compensator sensor, was used to compensate the thermal effect (fig. 5). The compensator sensor is essential because the FBG sensors are very sensitive to the temperature as the electrical strain gauges.

The FBG sensors used for the analysed application are single-mode optical fibres with central reflecting band at 1530 nm and reflection peak of about 20%, grating length of 10 mm and maximum measurable strain of $\pm 5000 \text{ } \mu\text{m/m}$. The sensor were produced by FBGS International.

The output of a FBG sensor glued on a sample, in terms of variation of normalised wave length $(\Delta\lambda/\lambda_0)_{TOT}$, can be related to the mechanical strain ε_m and to the temperature T as:

$$\left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} \right)_{TOT} = G_f \varepsilon_m + [G_f \alpha_{sp} + \alpha_\delta] \Delta T \quad (1)$$

where

- G_f is the sensitivity of FBG sensors (typically 0.78);

SCIENZA E TECNICA

struttura di metallo appositamente preparata utilizzando una specifica colla per estensimetri. Inoltre, dopo l'essiccazione della colla, i sensori sono stati ricoperti con uno strato protettivo di silicone per evitare possibili rotture dei sensori stessi durante le prove sperimentali.

Per permettere una rimozione comoda dei cavi di trasmissione dei segnali ottici, sono stati fissati dei connettori tra i due sensori e la parte interna della sezione a C della testa del pantografo. In tal modo è possibile eseguire tutte le operazioni di montaggio senza la presenza dei cavi di trasmissione e collegare questi solo prima delle prove sperimentali.

Per la misura di accelerazione della testa del pantografo è stato utilizzato un accelerometro FBG commerciale, montato in parallelo ad accelerometri capacitivi (fig. 6). Le prestazioni dinamiche dell'accelerometro FBG sono state valutate in laboratorio. Le dimensioni e la massa dell'accelerometro sono adatti all'applicazione in oggetto.

3.2. Prove di laboratorio

Per ottenere la misura di forza agente sulla testa del pantografo a partire dalla misura di deformazione fornita dalla combinazione delle uscite dei due sensori FBG, come discusso nel paragrafo precedente, è stato necessario eseguire delle prove di laboratorio al fine di tarare il sistema di misura. La sensibilità che lega forza di contatto applicata all'archetto e deformazione misurata è risultata pari a $0.32 \mu\text{m}/(\text{m N})$.

Prove di laboratorio sono state necessarie anche per verificare le prestazioni dinamiche dell'accelerometro FBG e la sua adeguatezza alle prove in linea. Tali prove, eseguite utilizzando un tavolo vibrante, hanno mostrato una risposta in frequenza costante fino a 200 Hz con un errore massimo sul modulo del 10% ed una linearità della risposta fino a 100 m/s^2 .

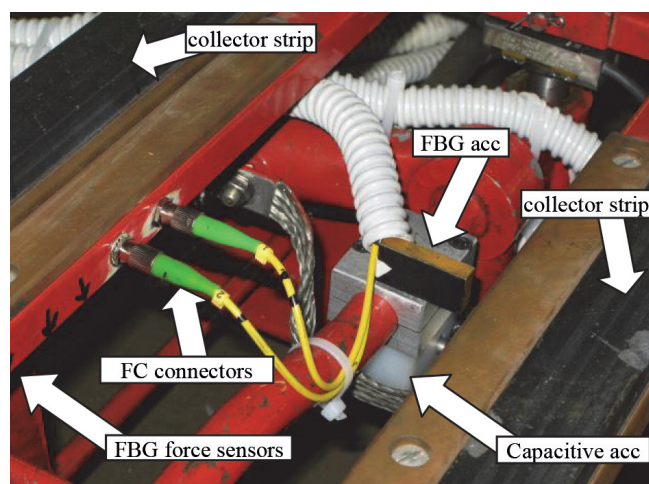


Fig. 6 - Posizione degli accelerometri sulla testa del pantografo.

Fig. 6 - Position of the accelerometers on the pantograph head.

- α_{sp} is the coefficient of thermal expansion of the sample (about $10.8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ for ferritic steel);
- α_s is the thermo-optical coefficient ($8.6 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ for a silicon fibre doped with germanium).

The second term of equation (1) represents the temperature response of FBG sensor glued on the system. This response cannot be neglected because, as an example, a temperature variation of $1 \text{ }^\circ\text{C}$ produces a strain variation of $21.8 \mu\text{m}/\text{m}$. This result confirms the high influence of temperature on FBG sensors and, as for the electrical strain gauges, in order to obtain reliable strain measurements an efficient thermal compensation is needed. The adopted solution in the present work, gluing two sensors in two suitable positions on the pantograph head, allows to obtain a strain measurement independent on the temperature (just subtracting the measurement of sensor 2 to the measurement of sensor 1).

The optimal positions for the two sensors were established by carrying out a finite element analysis. The analysis showed that the maximum values of strains when a vertical contact force is applied in the middle of pantograph head are in the two vertical sides of the C section of the pantograph head. The sensor for the thermal compensation, due to insufficient space, was glued on the base of C section, where the mechanical strain is negligible. The two positions of the sensors are at about 200 mm each other, causing for the application discussed in this paper a not perfect thermal compensation. The FBG sensors were glued on the metal structure prepared on purpose using a specific strain gauge glue. Moreover, after the glue drying, the sensors were covered with a silicone layer to protect the sensors and to avoid damages during the experimental tests.

In order to simplify the connection and disconnection of the cables for the optical signals, two connectors fixed with the C section of the pantograph head were mounted (fig. 6). In this way the installation procedures can be done without the presence of the cables, which can be connected just before the experimental tests.

A commercial FBG accelerometer was used for the acceleration of the pantograph head, mounted in parallel to the capacitive accelerometers (fig. 6). The dynamical performances of the FBG accelerometer were evaluated by means of laboratory tests. The size and the mass of the FBG accelerometer are suitable for the present application.

3.2. Laboratory tests

As discussed in the previous section, laboratory tests were carried out in order to calibrate the measurement system and to obtain the relationship between the strain measured by FBG sensors and the applied force on the pantograph head. The sensitivity coefficient obtained at the end of the calibration was $0.32 \mu\text{m}/(\text{m N})$.

Laboratory tests were carried out to verify the dynamical performances of the FBG accelerometer and its suitability

SCIENZA E TECNICA

3.3. Prove in linea

Una volta verificato in laboratorio il corretto funzionamento dei sensori elettrici e dei sensori ottici montati sul pantografo, si è proceduto al montaggio del pantografo strumentato sul veicolo di prova. Il veicolo metropolitano utilizzato per eseguire le prove in linea è stato scelto tra quelli utilizzati per l'esercizio commerciale. Esso è costituito da sei carrozze di cui quattro motrici, con quattro pantografi sempre in presa, e due rimorciate. Il pantografo strumentato è stato montato sulla motrice di testa in modo che, per tutte le prove eseguite, l'interazione tra il pantografo strumentato e la catenaria non fosse influenzata dall'interazione tra gli altri tre pantografi e la catenaria stessa.

I risultati ottenuti durante le prove in linea, che presenta un tratto all'aperto e un tratto in galleria, sono stati analizzati per validare e valutare l'affidabilità delle misure dei sensori ottici usando come riferimento le misure dei sensori elettrici. A tale scopo è stato eseguito un confronto tra la forza misurata tramite le due celle di carico e la forza misurata tramite i due sensori FBG. In questa prima esperienza la compensazione termica è risultata non adeguata a causa della distanza tra sensore di misura e sensore compensatore (si veda il paragrafo 3.1). Infatti nei tratti in cui la temperatura è all'incirca costante, ovvero nei tratti all'aperto e nei tratti in galleria, la compensazione ha prodotto i risultati attesi. Al contrario, in corrispondenza della transizione tra galleria e tratta all'aperto si è verificata una non perfetta compensazione termica.

Al fine di evitare nel confronto tra le misure di forza eseguite con sensori FBG e sensori elettrici l'effetto della non perfetta compensazione termica dei sensori ottici, i due segnali sono stati filtrati nel campo di frequenza 0.1 Hz – 20 Hz, ovvero non è stato considerato il valore medio. Il limite superiore della frequenza di analisi, 20 Hz, è quello previsto dalla EN 50317 [6]. Il motivo è che fino a 20 Hz è possibile ipotizzare che l'archetto si comporta come un corpo rigido e l'operazione di compensazione delle azioni d'inerzia per ottenere il valore della forza di contatto può ritenersi corretta. Oltre tale frequenza, infatti, la dinamica dell'archetto è influenzata dai contributi dovuti alla deformabilità del corpo e la compensazione delle azioni d'inerzia tramite due accelerometri per archetto (fig. 1) non risulta più corretta.

Come mostrato in fig. 7, i due sistemi di misura sono in buon accordo, dimostrando la validità del sistema di misura ottico. La fig. 7 riporta inoltre la storia temporale della forza priva di valor medio in corrispondenza di un difetto della linea aerea, riconoscibile dal picco di forza misurato. Questo risultato permette di affermare che il sistema di misura ottico presentato in tale lavoro è in grado di mettere in evidenza i difetti della catenaria lungo la linea. La semplicità del sistema di misura ottico e la sua capacità di misura lo rendono quindi un possibile mezzo da utilizzare per il monitoraggio della linea aerea senza grosse complicazioni tecniche.

Nella fig. 8 è inoltre possibile verificare la presenza di altri difetti come quello appena descritto. Il maggiore, a

for the in line tests. The tests, carried out by using an electromagnetic shaker, showed a constant frequency response function up to 200 Hz with maximum modulus error of 10% and with linearity of the response up to 100 m/s².

3.3. In line tests

Once verified in laboratory the correct work of electrical and optical sensors mounted on the pantograph, it was installed on the test vehicle. The underground vehicle used to carry out the in line tests was chosen among the vehicle typically used for the normal service. It is composed of six coaches (two trailing coaches and four motorised coaches), with four pantographs in contact. The instrumented pantograph was mounted on the first motorised coach: in this way, for all the performed tests, the interaction between pantograph and catenary was not influenced by the interaction between the others pantographs and the catenary.

The results obtained during the in line tests (the line is composed of an open-air section and a tunnel section) were analysed to validate and evaluate the reliability of optical sensor measurements using as reference the electrical sensor measurements. To this aim, the contact force measured by the two load cells and the force measured by the two FBG sensors were compared. In this first experience the thermal compensation was not appropriate due to the distance between the main sensor and the compensator sensor (refer to section 3.1). Indeed in the section where the temperature is about constant, i.e. in the section in open air and in the section in tunnel, the thermal compensation worked very well, but, during the transition from open air section to tunnel section or vice-versa, the thermal compensation was not perfect.

In order to avoid the effect of the not perfect thermal compensation during the comparison between the measurements of force obtained with the two kinds of sensors, the signals were filtered in the frequency range 0.1 Hz – 20 Hz, i.e. the mean value was not considered. The upper limit of the frequency range (20 Hz) is the one imposed by EN 50317 [6]. The reason is that the collector strip can be considered as a rigid body up to 20 Hz and the compensation of inertial forces to obtain the value of contact force can be considered correct. For higher frequency values the collector strip dynamics is influenced by the contributions due to deformability of the body and the compensation of the inertial forces by means of two accelerometers for each collector strip is not more correct.

As shown in fig. 7, the two measurement setups are in good agreement, proving the effectiveness of the optical measurement setup. The fig. 7 shows the time history of the force without its mean value for a section where a concentrated defect of the overhead line is present, recognizable by the peak of the contact force. This result allow to affirm that the optical measurement setup presented in this paper is able to point out overhead line defects along the line. The ease of the optical measurement setup and its measurement performances

SCIENZA E TECNICA

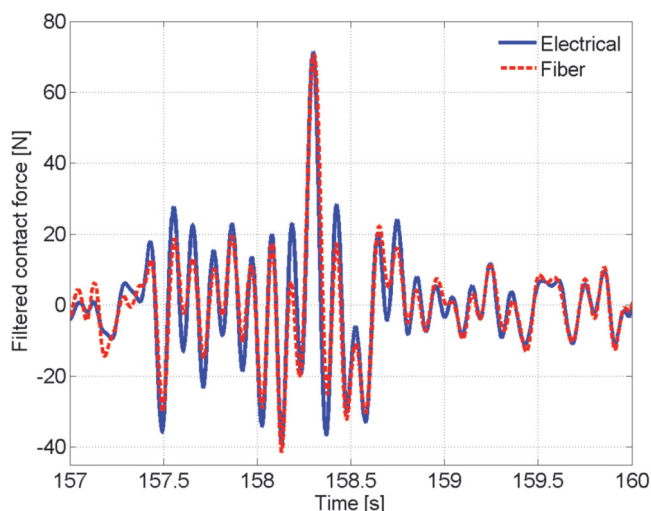


Fig. 7 - Confronto tra misure di forza di contatto, filtrate nel campo di frequenza 0.1 Hz – 20 Hz ottenute simultaneamente dal sistema elettrico e da quello ottico. Oltre a notare il buon accordo tra le misure, ottenute in modalità molto diverse, è osservabile un picco di forza dovuto a un difetto presente sulla linea: entrambi i sistemi sono in grado di identificarlo chiaramente.

Fig. 7 - Comparison between the measurements of contact forces, filtered in the frequency range 0.1 Hz – 20 Hz, obtained simultaneously by the electrical measurement setup and by the optical one. Besides showing a good agreement between the measurements, obtained with very different ways, the presence of a peak of contact force related to an overhead defect can be observed.: both the measurement setups are able to clearly identify it.

158 s, è lo stesso della fig. 7. Tutte queste singolarità indicano la presenza di difetti della linea aerea, legati ad esempio ad anomalie di posa del filo, variazioni di altezza, o punti sotto sospensione. La possibilità di fare queste misure su un convoglio standard in servizio rende il monitoraggio molto più semplice, economico ed efficace.

Nella fig. 9 è rappresentato lo spettrogramma della forza misurata dal sistema in fibra ottica, in una intera corsa prova. Lo spettrogramma permette di analizzare in modo immediato e semplice come varia lo spettro del segnale misurato in funzione del tempo. È possibile notare come nella prima metà della prova (fuori galleria), dove l'altezza del filo di contatto è maggiore rispetto a quella del tratto in galleria, siano presenti maggiori vibrazioni soprattutto nel campo di frequenze attorno ai 9 Hz. Tale vibrazione, che da analisi di caratterizzazione dinamica del pantografo in laboratorio corrisponde al modo flessor-torsionale del pantografo, sparisce nel tratto in galleria in quanto il pantografo si trova a lavorare in posizione molto più chiusa e il modo di vibrare è meno eccitato. Questa figura, e la successiva, sono state limitate a 15 Hz perché al di sopra di tale valore ci sono differenze nello spettro imputabili alla diversa posizione dei sensori (ottici al centro, elettrici ai lati degli striscianti).

make it a favourable mean to be used for the monitoring of the overhead line without serious technical difficulties.

The analysis of Figure 8 allows to verify the presence of overhead line defect similar to the one presented in fig. 7. The highest peak reported in fig. 8 (at 158 s) is the one reported in fig. 7. All these singularities reveal the presence of defect in the overhead line, correlated as an example to anomalies in the laying of contact wire, height variations of contact wire or points under suspensions. The possibility to carry out these measurements by using a standard vehicle during its regular service makes the monitoring of the overhead line easier, cheaper and more effective.

Fig. 9 shows the spectrogram of the force measured during a complete in line test by the optical measurement setup. The spectrogram allows to immediately and easily analyse how the signal spectrum varies as a function of time. The Figure 9 shows in the first part of the test (open air section), where the height of the contact wire is greater than the one in the tunnel section, the presence of high vibration at about 9 Hz. This vibration, which from laboratory analysis of pantograph dynamical characterisation is related to a flexural-torsional vibration mode of the pantograph frame, disappears in the tunnel section because the pantograph works at lower height and the vibration mode is less excited. Figg 9 and 10 show the spectra of force and accelerations up to 15 Hz because for higher frequencies there are differences in the spectrum electrical and optical signals due to the different position of sensors (the optical sensors are in the middle of the pantograph head while the electrical sensors are in the far end of it).

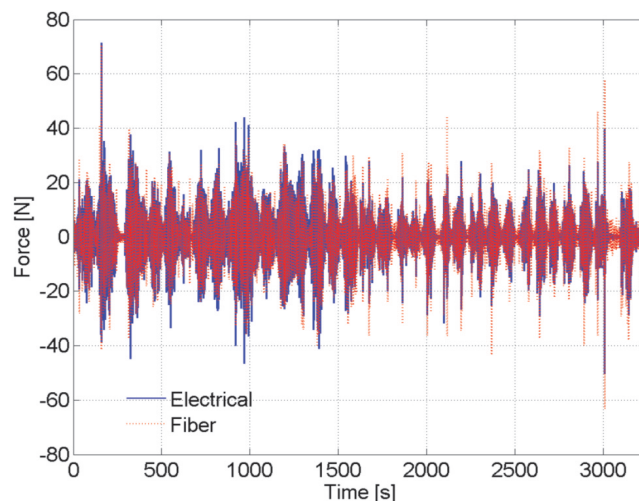


Fig. 8 - Confronto tra misure di forza di contatto, filtrate nel campo di frequenza 0.1 Hz – 20 Hz: intera storia temporale di una corsa prova. Il grafico mostra come sia possibile individuare i picchi di forza più importanti durante l'intera corsa prova.

Fig. 8 - Comparison between the measurements of contact forces, filtered in the frequency range 0.1 Hz – 20 Hz: complete time history of contact force related to a complete in line test. The figure shows as it is possible to identify the most important peaks of force during the complete in line test.

SCIENZA E TECNICA

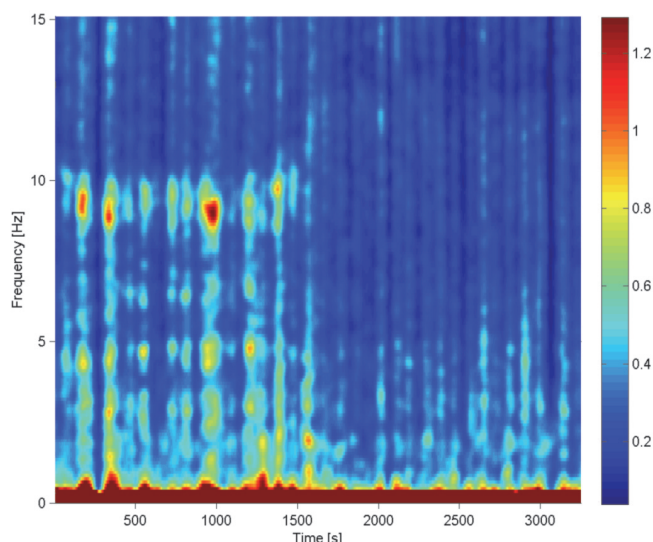


Fig. 9 - Spettrogramma della forza misurata con il sistema in fibra ottica, nel corso di una intera corsa prova, e nella banda 0 Hz–15 Hz. La scala di colori rappresenta la forza in newton.

Fig. 9 - Spectrogram of force measured by the optical measurement setup, for a complete in line test, in the frequency range 0 Hz – 15 Hz. The colour scale represents the force in newton.

In fig. 10 è infine mostrato un confronto tra gli spettri ottenuti dall'accelerometro elettrico e in fibra ottica, che mostra l'accordo molto buono tra i due tranne sotto 1.5 Hz a causa del fatto che questo tipo di accelerometro in fibra ottica risente dell'effetto della variazione di temperatura. Il grafico quindi conferma la validità dei risultati che si possono ottenere con la fibra ottica nell'applicazione ferroviaria del monitoraggio del pantografo.

4. Conclusioni

Nel presente lavoro si è presentata la possibilità dell'utilizzo dei sensori FBG in sostituzione dei sensori tradizionali elettrici per il monitoraggio dell'interazione pantografo-catenaria. Si è mostrato, attraverso un confronto durante delle prove eseguite in una linea metropolitana con un pantografo strumentato sia con sensori elettrici e sia con sensori ottici, il buon funzionamento del sistema di misura ottico e la notevole semplicità di installazione di tale sistema rispetto al tradizionale sistema di misura con sensori elettrici per l'applicazione esaminata nel presente lavoro. Nell'esempio applicativo considerato, i sensori ottici, di tipo FBG, posizionati direttamente sotto la testa del pantografo, si sono rivelati essere in grado di identificare i difetti localizzati della catenaria. Questo lavoro ha mostrato come l'applicazione di sensori ottici nello studio dell'interazione pantografo-catenaria sia molto promettente. Gli autori stanno continuando lo studio di tale applicazione per migliorare il sistema di misura ed applicarlo anche nel campo dell'alta velocità.

In fig. 10 a comparison between the spectra of accelerations obtained by the electrical and the optical accelerometers is shown. The two spectra are in good agreement except for frequencies below 1.5 Hz due to the influence of temperature (the commercial FBG accelerometer used does not compensate the thermal effect: for this reason the measurement of acceleration is not reliable at very low frequencies). These results confirm the effectiveness of measurements obtained by means of the optical sensors in the railway application of pantograph monitoring.

4. Conclusions

In this paper the possibility of the use of FBG sensors instead of traditional electrical sensors for the monitoring of the pantograph-catenary interaction is presented. A comparison between performances of the electrical measurement setup and of the optical measurement setup both installed on a pantograph used to carry out in line tests in an underground line is shown. In particular, the optical measurement setup showed very good performances, comparable to the electrical measurement setup, and considerable ease of installation on a pantograph with respect to electrical measurement setup. In the application described in this paper, the optical sensors (FBG sensors), directly glued on the pantograph head revealed the ability to identify concentrated defects on the overhead line. This paper showed as the use of optical sensors for the study of pantograph-catenary interaction is very promising. The authors are carrying on the study of this application to improve the measurement setup and to apply it also in the field of railway high-speed.

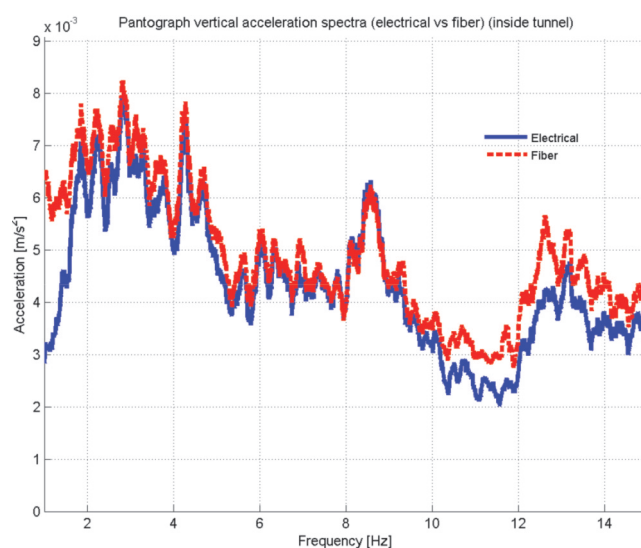


Fig. 10 - Confronto tra gli spettri delle accelerazioni verticali della testa del pantografo, ottenute con l'accelerometro elettrico e quello in fibra ottica.

Fig. 10 - Comparison between the spectra of vertical accelerations of pantograph head, obtained by using the electrical and the optical accelerometer.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] BUCCA G., COLLINA A., MANIGRASSO R., MAPELLI F., TARSITANO D., *"Una metodologia per correlare la qualità del contatto pantografo-catenaria al contenuto armonico della corrente captata. Il caso della captazione multipla / A methodology for correlating the quality of the pantograph-catenary contact with the harmonic content of the current collected. A case of multiple current collection"*, Ingegneria Ferroviaria, 2010, Vol. 65 (3), pp. 211-237.
- [2] MIDYA S., BORMANN D., LARSSON A., SCHÜTTE T., THOTTAPPILLIL R., *"Understanding pantograph arcing in electrified railways - Influence of various parameters"*, in Proceedings of the IEEE 2008 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Detroit, Michigan, USA, August 2008, pp. 18-22.
- [3] KUBO S., KATO K., *"Effect of arc discharge on wear rate of Cu-impregnated carbon strip in unlubricated sliding against Cu trolley under electric current"*, Wear, Vol. 216 (2), 1998, pp. 172-178.
- [4] BUCCA G., COLLINA A., *"A procedure for the wear prediction of collector strip and contact wire in pantograph-catenary system"*, Wear, Vol. 266, 2009, pp. 46-59.
- [5] CHEN G.X., YANG H.J., ZHANG W.H., WANG X., ZHANG S.D., ZHOU Z.R., *"Experimental study on arc ablation occurring in a contact strip rubbing against a contact wire with electrical current"*, Tribology International, Vol. 61, 2013, pp. 88-94.
- [6] CEI EN 50317: 2004-6 - Applicazioni ferroviarie, tranviarie, filoviarie e metropolitane. Sistemi di captazione della corrente. Requisiti e convalida delle misure dell'interazione dinamica tra pantografi e linea di contatto.
- [7] COMOLLI L., BUCCA G., BOCCIONE M., COLLINA A., *"First results from in line strain measurements with FBG sensors on the pantograph collector of underground trains"*, in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7726, art. no. 772605, 2010.
- [8] BOCCIONE M., BUCCA G., COLLINA A., COMOLLI L., *"Comparison of optical and electrical measurements of the pantograph-catenary contact force"*, in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7653, art. no. 765346, 2010.
- [9] BOCCIONE M., BUCCA G., COLLINA A., COMOLLI L., *"An approach to monitor railway pantograph-catenary interaction with fiber optic sensors"*, in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7653, art. no. 76533Q, 2010.
- [10] BOCCIONE M., BUCCA G., CIGADA A., COLLINA A., COMOLLI L., *"An application of FBG accelerometers for monitoring pantographs of underground trains"*, in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7653, art. no. 765341, 2010.
- [11] BOSSELMANN T., THEUNE N., *"Method for Measuring the Force of Contact on a Pantograph"*, Patent FR 2 846 415 A1, 2003.
- [12] BOSSELMANN T., THEUNE N., *"Force Measuring Device and Method for Determining a Contact Force"*, Patent EP 1 726 472 A1, 2006.
- [13] BOSSELMANN T., THEUNE N., *"Force Measuring Device and Method for Determining a Transversal Force"*, Patent EP 1 726 473 A1, 2006.
- [14] KIESSLING F., PUSCHMANN R., SCHMIEDER A., SCHNEIDER E., *"Contact Lines for Electric Railways: Planning, Design, Implementation, Maintenance"*, Publicis Corporate Publishing, 2009.
- [15] MICRONOR AG, *"Accelerometro in fibra ottica"*, www.micronor-ag.ch/
- [16] BOFFI P., CATTANEO G., AMORIELLO L., BARBERIS A., BUCCA G., BOCCIONE M., COLLINA A., MARTINELLI M., *"Optical fiber sensors to measure collector performance in the pantograph-catenary interaction"*, IEEE Sensors Journal Vol.9 (6), art. no. 4897231, pp. 635-640, 2009.
- [17] KREUZER M., *"Strain measurement with Fiber Bragg Grating sensors"*, HBM, 2006.
- [18] OTHONOS A., *"Fiber Bragg gratings"*, Review of Scientific Instruments Vol.68 (12), pp.4309-4341, 1997.
- [19] COMOLLI L., *"Analisi metrologica degli accelerometri in fibra ottica"*, in Congresso di Misure Meccaniche e Termiche, Roma, 2010.
- [20] COMOLLI L., MICIELI A., *"Numerical comparison of peak detection algorithms for the response of FBG in non-homogeneous strain fields"*, in Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 7753, art. no. 77538F, 2011.
- [21] DELTATECH, *"Cella di carico in fibra ottica"*, <http://www.deltatechitaly.com/>
- [22] BOCCIONE M., COMOLLI L., CROSIO P., *"A novel design of a compact S-shaped balance with FBG sensors for the pantograph-catenary contact force measurement"*, in OFS22 conference, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 8421, art. no. 84214Z, 2012.

SCIENZA E TECNICA

Sommaire

CAPTEURS OPTIQUES POUR L'ANALYSE DE L'INTERACTION ENTRE PANTOGRAPHE ET CATÉNAIRE

Ce mémoire présente les avantages de l'utilisation de capteurs optiques, en particulier ceux qui se base sur FBG (Fibre Bragg Grating), pour l'analyse de l'interaction dynamique entre pantographe et caténaire, et, à titre d'exemple, on discute de l'expérience dérivée de l'application de ces capteurs au pantographe d'un matériel roulant en service sur ligne de métro ainsi que des résultats relatifs à cette application. Les capteurs optiques, dans le cas de l'application au pantographe, présentent l'avantage d'être intrinsèquement isolés du point de vu électrique, de ne pas nécessiter d'un' alimentation électrique et d'être insensibles aux perturbations électromagnétiques éventuelles, simplifiant ainsi tout le système de mesure. Le but de ce travail est donc de présenter les caractéristiques principales des capteurs FBG, d'en comparer le performances avec celle des capteurs électriques traditionnels à travers les résultats d'essais effectués sur une ligne de métro pour l'analyse de l'interaction entre pantographe et caténaire, et enfin de mettre en relief comment, dans le cas de l'utilisation des capteurs FBG pour l'application prise en examen, le système de mesure par senseurs optiques amène à une importante simplification du système de mesure par rapport a une approche basée sur des instruments standards.

Zusammenfassung

OPTISCHE SENSOREN UND ANALYSE DER WECHSELWIRKUNG ZWISCHEN FAHRLEITUNG UND STROMABNEHMER

Vorteilen Beschreibung der Verwendung von optischen Sensoren des Typ FBG (Fiber Bragg's Grating) für die Analyse der am Titel genannten Wechselwirkung. Anhand von Beispielen werden die Erfahrungen und experimentellen Ergebnissen beschrieben, die aus solchen Sensoren, auf einem U-Bahn Stromabnehmer montiert, gewonnen wurden. Es ist zu merken daß die optische Sensor verschiedene eigenen Vorteile vorstellen: Unempfindlichkeit von äußern elektromagnetische Beeinflussungen und Isolierung, keine elektrische Energie-Speisung benötigt. Vereinfachung des Meßsystems es ist Zweck dieser Arbeit die Hauptmerkmalen der FBG Sensoren vorzustellen, so wie ihre Vorteile Gegenüber der elektrische Sensoren. Dieser Vergleich wird auf Grund von Experimenten, die in einer U-Bahn Linie geführt wurden. Die Resultaten bestätigen die obengenannten Vorteile.

AVVISO PER I SOCI

Rinnovo Quote Sociali – Anno 2016

Si comunica ai Signori lettori che intendono rinnovare le **Quote Associative** per l'anno 2016 che gli importi sono rimasti invariati.

Si ricorda inoltre che, a norma di Statuto, il versamento della quota annuale dovrà essere effettuato entro il 31 dicembre dell'anno precedente. In ogni caso, si prega di effettuare il pagamento entro il 31 gennaio 2016.

I versamenti potranno essere eseguiti con le seguenti modalità:

- CC/P n. 31569007 intestato al CIFI – Via G. Giolitti, 48 – 00185 Roma;
- bonifico bancario intestato al CIFI: Unicredit Banca – Ag. Roma Orlando - Via Vittorio Emanuele Orlando, 70 – 00185 Roma - IBAN: IT 29 U 02008 05203 00010 1180047 Codice BIC SWIFT: UNCRITM1704;
- mediante pagamento online collegandosi al sito www.cifi.it;
- tramite Carta Bancomat.