

Sistema de interrogación híbrido basado en correlación de pulsos y FBG para sensores de deformación distribuidos y sensores puntuales de temperatura

Autor: Antonio Bueno Martínez

Director: Dr. Salvador Sales Maicas

Resumen

En este trabajo se propone y se demuestra la viabilidad de un esquema de interrogación híbrido para sensores distribuidos de deformación y sensores puntuales de temperatura. Este sistema explota las ventajas que ofrecen los sensores distribuidos y los sensores puntuales de manera simultánea. El esquema de interrogación propuesto utiliza una fuente óptica pulsada sintonizable en longitud de onda, así como reflectores dependientes con la longitud de onda para el sensado selectivo de regiones. Los resultados experimentales confirman la respuesta lineal del sistema y una resolución del 0.02% del rango dinámico total, que en este experimento fue de más de 2000 microstrains para sensado de regiones de alrededor de 0,5 metros de longitud. La estabilidad de las medidas está por encima del 99,8%. Finalmente, la alta potencia de entrada de la fuente óptica y las pérdidas limitadas de los reflectores permiten el uso de un gran número de sensores en una única fibra.

Abstract

A hybrid interrogation scheme for distributed strain sensors and point temperature sensors is proposed and its feasibility is demonstrated. It exploits the advantages of distributed sensors and point sensors simultaneously. The proposed interrogation scheme uses a wavelength tunable pulse source and wavelength dependent reflectors for region selective sensing. Experimental results confirm its linear response and a resolution of 0.02% of the total dynamic range, which in this experiment it is over 2000 microstrains for sensing regions of around 0.5 meter length. The stability of the measurements is over 99.8%. Finally, the high input power from the signal source and the limited losses from the reflectors allow the usage of a large number of sensors in a fiber.

Autor: Bueno Martínez, Antonio; email: anbuemar@iteam.upv.es

Director: Sales Maicas, Salvador; email: ssales@dcom.upv.es

Fecha de entrega: 24-03-10

ÍNDICE

I. Introducción	3
I.1. Tipos de sensores ópticos	4
I.2. Estado del arte.....	6
I.3 Sistema de monitorización real con sensores puntuales: Problemática.....	9
II. Principio de funcionamiento	13
II.1 Principio básico	13
II.2 Separación en regiones mediante reflectores parciales	14
II.3 Separación en regiones: FBG como reflectores parciales	16
III. Montaje del experimento	17
IV. Resultados experimentales	24
V. Conclusiones	31
Agradecimientos	32
Referencias	33
Anexos	35

I. INTRODUCCIÓN

La monitorización de los daños sufridos por estructuras de ingeniería civil tales como puentes y edificios se está convirtiendo en un creciente campo de investigación en los últimos años para los ingenieros. Por monitorización se entiende a la observación mediante aparatos de varios parámetros físicos para detectar ciertas anomalías. La palabra “monitorización” se utiliza debido al término en inglés *Structural Health Monitoring* (SHM) que referencia a una rama de la ingeniería estructural dedicada al desarrollo de sistemas que proporcionen información sobre cualquier cambio significativo o daño que se produzca en una estructura [1].

El creciente interés en este campo se debe a que la monitorización de la salud estructural de construcciones civiles, tales como edificios de viviendas o puentes para tráfico vial o ferroviario, ha resultado ser una herramienta especialmente útil para los constructores de las mismas. Una supervisión de la salud estructural de un edificio puede evitar por ejemplo que se derrumbe de forma inesperada y permite la pronta actuación en la reparación del mismo.

Los dispositivos encargados de registrar los parámetros físicos se denominan “sensores”. El término sensor hace referencia a un dispositivo capaz de monitorizar de forma continua y reversible un parámetro físico o químico, convirtiéndolo en una señal que se puede medir o registrar. La tipología de estos sensores es muy variada ya que existe un extenso abanico de parámetros susceptibles de ser medido. Además, hay disponibles varias tecnologías para la fabricación de los mismos. Atendiendo a este último caso, se pueden encontrar actualmente sensores en tecnologías eléctrica y óptica.

Los sensores eléctricos han sido históricamente los más utilizados debido a la madurez de la tecnología y a que los avances en el campo de la óptica han sido mucho más recientes. Los dispositivos eléctricos más usados son las galgas extensiométricas para medir deformación y los termopares para medir temperatura (Fig.1) aunque actualmente existen en el mercado sensores eléctricos para medir presión, pH, humedad relativa, etc.

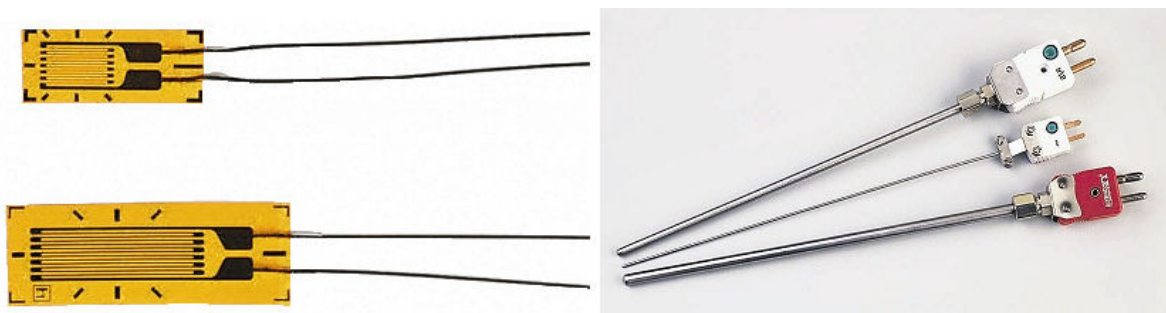


Fig.1. Sensores eléctricos. Izquierda: galgas extensiométricas. Derecha: termopares.

Por otro lado, los sensores ópticos se encuentran en un estado de madurez inferior a los sensores eléctricos, aunque desde hace unos años se encuentran disponibles sensores ópticos capaces de medir deformación y temperatura. Estas dos magnitudes suelen ser las de mayor importancia a la hora de monitorizar una estructura y es por ello por lo que nos centraremos en la medida de estas magnitudes en el presente trabajo.

El campo de la óptica aplicada a los sensores se encuentra actualmente en un continuo desarrollo e investigación que está llevando a la aparición de nuevos dispositivos ópticos capaces de medir magnitudes como inclinación, velocidad angular, aceleración o concentración de gases por poner algunos ejemplos.

El motivo del auge de los sensores ópticos se debe a que presentan una serie de ventajas respecto de los eléctricos que se enumeran a continuación:

- Son ligeros y de dimensiones reducidas, por lo que no interfieren de manera significativa en el comportamiento de las estructuras en las que se instalan.
- Son inmunes a interferencias electromagnéticas, y por lo tanto, especialmente indicados para ser instalados en entornos eléctricos como generadores o transformadores eléctricos.
- Presentan bajas pérdidas, por lo que son adecuados para aplicaciones remotas en los que se requieren largas distancias desde el emplazamiento de la estructura a monitorizar.
- Poseen alta sensibilidad.
- Presentan alta resistencia en entornos hostiles: son químicamente muy resistentes, lo que los hace apropiados para entornos corrosivos. Son también muy resistentes a las altas temperaturas, pudiendo trabajar incluso por encima de los 400 °C.
- Son inmunes a los daños producidos por iluminación, que pueden darse al colocar los sensores en zonas abiertas.
- Posibilitan la multiplexación permitiendo colocar varios sensores a lo largo de una misma fibra óptica.

I.1. TIPOS DE SENSORES ÓPTICOS

Dentro del campo de los sensores ópticos, existen diferentes tecnologías para conseguir medir magnitudes físicas con una fibra óptica. Tradicionalmente se han separado las diferentes técnicas ópticas en función del modo en que se obtienen las medidas. En ese sentido podemos diferenciar entre dos tipos de medidas: puntual y distribuida.

Las medidas puntuales, como su nombre indica, obtienen medidas en ciertos puntos mientras que en las zonas intermedias no disponen de información y lo que ocurre entre sensores se pierde. Es por ello que este tipo de sensor es utilizado en aplicaciones muy concretas, como por ejemplo el

incremento en la medida del tamaño de una grieta puntual, o la medida de la variación de temperatura en puntos específicamente seleccionados.

Los sensores puntuales pueden desarrollarse en multitud de tecnologías ópticas. Las más importantes son las redes de difracción de Bragg (*Fiber Bragg Grating*, FBG) [2] y los métodos interferómetros como los sensores basados en interferómetros Fabry-Perot extrínsecos (*Extrinsic Fabry-Perot Interferometers*, EFPI) [3] o el sistema SOFO propietario de la empresa Smartec S.A. [4].

Por el contrario, los sensores distribuidos miden en un mayor rango ya que obtienen las medidas de manera distribuida a lo largo de un enlace de fibra óptica. Esto es, toda la longitud de la fibra óptica es el sensor propiamente dicho. Dependiendo de la tecnología empleada puede conseguirse mayor o menor resolución espacial en la medida. En los comienzos del sensado óptico distribuido se tenían resoluciones de 100 m [5] pero actualmente con el desarrollo de nuevos métodos de medida, se obtienen resoluciones espaciales menores a los 10 cm [6].

Las tecnologías más importantes que existen actualmente en cuanto a sensado óptico distribuido son las basadas en la dispersión estimulada de Brillouin (*Stimulated Brillouin Scattering*, SBS) [5] y la dispersión estimulada de Raman (*Stimulated Raman Scattering*, SRS) [7]. Ambas técnicas se basan en reflectometría, es decir, en la potencia óptica que se refleja a la entrada en una fibra óptica cuando la luz viaja a través de ella. En la Fig. 2 se ve un ejemplo de la señal que se reflejaría a la entrada de dos fibras ópticas unidas por una transición. En el caso de SBS y SRS, este fenómeno es estimulado puesto que la señal que se refleja tiene muy poca potencia.

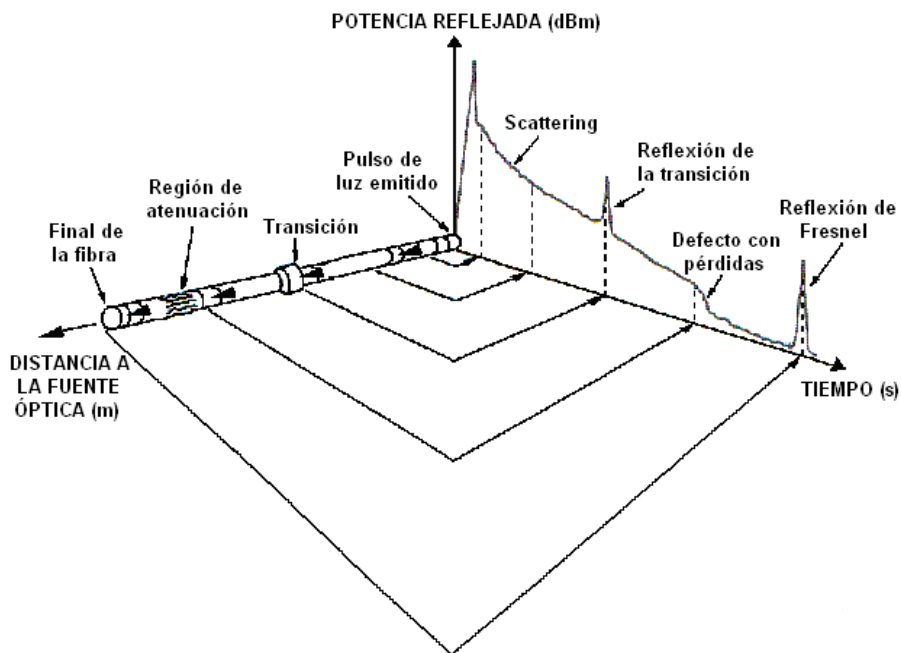


Fig.2. Principio en el que se basa la reflectometría, con un ejemplo de señal reflejada.

Como resumen, en la tabla 1 se presentan las principales características de todas las tecnologías descritas previamente.

		Ventajas	Desventajas
Sensores puntuales	FBG	<ul style="list-style-type: none"> - Velocidad de interrogación: velocidad de hasta varios KHz. - Fácil instalación. - Interpretación sencilla de datos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesidad de preparación de la fibra óptica.
	EFPI	<ul style="list-style-type: none"> - Tamaño y peso reducidos. - Relativamente fácil de fabricar. 	<ul style="list-style-type: none"> - Variación de la sensibilidad: necesidad de trabajar en el punto de cuadratura. - Fluctuación de corriente en la fuente provoca fluctuación en la medida.
Sensores distribuidos	SBS	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de fibra estándar sin necesidad de tratamiento. - Bajo coste y tamaño. 	<ul style="list-style-type: none"> - Manejo complejo de datos. - Baja velocidad de interrogación. - Baja resolución espacial.
	SRS	<ul style="list-style-type: none"> - Medición de temperatura auto referenciada. - Baja sensibilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Solo mide temperatura, no mide deformación. - Potencia de la señal reflejada muy baja.

Tabla 1: Comparativa de las diferentes tecnologías de sensado.

1.2. ESTADO DEL ARTE

En el apartado anterior se ha hecho una distinción entre sensores puntuales y sensores distribuidos, que a su vez se han dividido en las tecnologías más utilizadas en la actualidad. En este apartado vamos a mostrar el estado de estas tecnologías tanto en el ámbito científico como en el ámbito comercial.

1.2.1. Sensores tipo FBG

Desde que surgió la idea de utilizar una FBG como sensor de deformación y temperatura por parte de *G. Meltz* en 1988 [8], se han disparado los ensayos y publicaciones referentes al estudio de las FBG aplicadas al sensado. Los primeros ensayos se dirigieron hacia el sensado de temperatura y de deformaciones en estructuras aunque a día de hoy son muchas las aplicaciones para el sensado de las FBG tales como la medida de presión [9], inclinación [10], aceleración [11] o flujo de aire [12] entre muchas otras.

En el terreno comercial, existen en la actualidad multitud de compañías que ofrecen sensores basados en FBG así como instrumentos de medida de esos sensores e incluso software

específicamente creado para la monitorización de los sensores adquiridos. Las compañías más importantes en este terreno son la estadounidense *Micron Optics* [13], la suiza *Smartec S.A.* [4] y la portuguesa *Fiber Sensing* [14].

1.2.2 Sensores tipo EFPI

Fue en 1991 cuando *Kent A. Murphy* ideó un interferómetro extrínseco basado en una estructura *Fabry-Perot* [15]. En el artículo que publicó describía el funcionamiento de un sensor de este tipo. Básicamente se trataba de dos fibras enfrentadas y separadas una cierta distancia. La intensidad de la señal reflejada dependía del desfase entre las señales reflejadas al final de la primera fibra y al principio de la segunda fibra (Fig.3). Siendo este desfase dependiente de la distancia entre fibras, se obtiene una relación entre la distancia de separación de las fibras y la intensidad de la señal total reflejada. Acoplando esta estructura a una superficie seremos capaces de medir la deformación existente en esa superficie con solo monitorizar la variación de la intensidad de la señal reflejada.

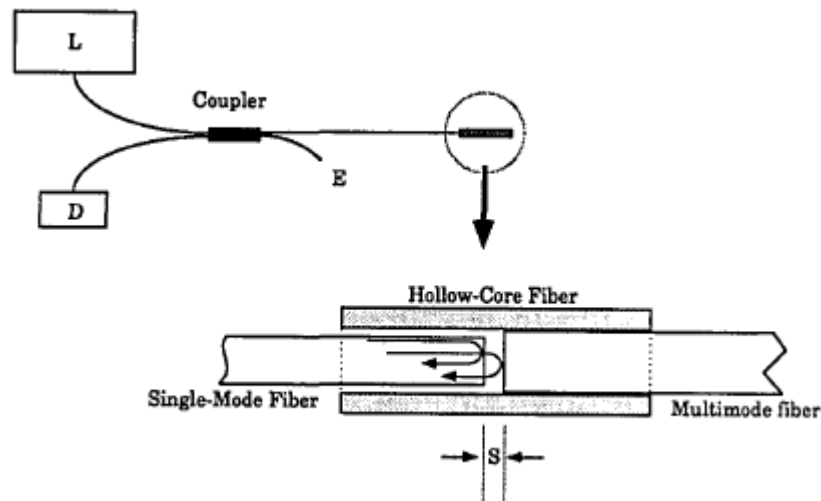


Fig.3. Esquema del sensor EFPI ideado por *Murphy*.

Actualmente, este tipo de sensor se encuentra bajo numerosos estudios y ensayos, como por ejemplo la evaluación del daño en láminas de material compuesto (fibra de carbono) [16] o la evaluación del embebido del sensor en dichos materiales mediante pruebas de fatiga [17].

En el apartado comercial, se pueden adquirir sensores de temperatura y deformación basados en tecnología *Fabry-Perot* de algunos fabricantes. Los más importantes son *FISO Technologies* [18] y *Luna Innovations* [19].

I.2.3 Sensores tipo SBS

T. Horiguchi, T. Kurashima y M. Tateda son considerados los padres de los sensores basados en el *scattering* estimulado de *Brillouin*. En 1990 propusieron un esquema (Fig. 4) para poder medir las deformaciones existentes en una fibra óptica de manera distribuida con una resolución espacial de 100 metros y una precisión de $20 \mu\epsilon$ [20]. Este mismo esquema servía para la medida distribuida de temperatura en un rango de -30 a 60 °C con una precisión de 3 °C y una misma resolución espacial de 100 metros en una fibra de 1,2 kilómetros [21].

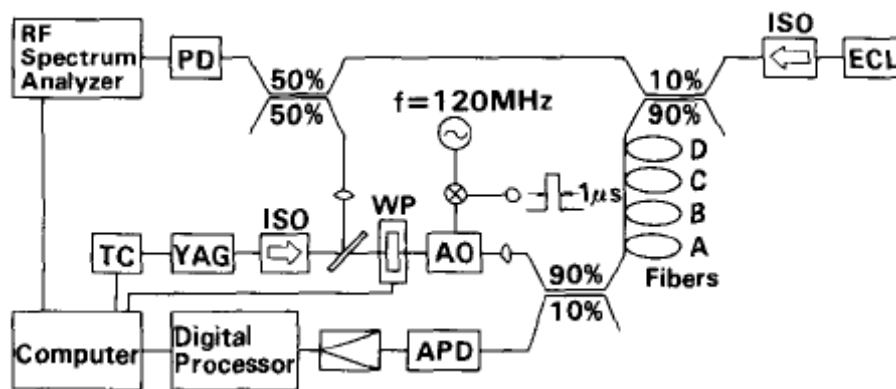


Fig.4. Esquema utilizado por *T. Horiguchi et al.* para la medida de deformación distribuida en una fibra óptica.

Los estudios actuales de la técnica de sensado distribuido basado en SBS se centran en la disminución de la resolución espacial, para detectar deformación o temperatura de forma más localizada, mediante diferentes métodos de inyección de pulsos en la fibra a medir. De este modo, el grupo de la universidad *EPFL* de Laussanne (Suiza) liderado por *Luc Thévenaz* ha ideado una técnica basada en SBS para conseguir resoluciones espaciales de 5 centímetros, con una precisión de $\pm 8,75 \mu\epsilon$ y $\pm 0,5$ °C [22].

En el terreno comercial, la compañía más importante en cuanto a sensores e instrumentos de medida para sensores distribuidos de *Brillouin* es *Smartec S.A.* [4]. Dentro de su serie *DiTeSt* (*Distributed Temperature and Strain*) se encuentran tanto cables de fibra óptica que se utilizan para el sensado de temperatura o deformación como equipos de medida específicamente diseñados para ellos.

I.2.4 Sensores tipo SRS

En cuanto al sensado distribuido basado en *Stimulated Raman Scattering*, hay que decir que es la tecnología menos utilizada de las comentadas en el presente trabajo. A nivel de aplicación, se puede destacar el uso de la tecnología SRS para la medida de temperatura en estructuras de la vida

real, como por ejemplo en líneas eléctricas de alta tensión [23]. Actualmente existen investigaciones que se están centrando en la unión de las tecnologías distribuidas SBS y SRS para la medida simultánea de deformación y temperatura [24]. En el terreno comercial, de nuevo la empresa *Smartec S.A.* se presenta como la opción más importante, contando con una serie propia basada en SRS para la medida distribuida de temperatura que denominan *DiTemp* [4].

I.3. SISTEMA DE MONITORIZACIÓN REAL CON SENSORES PUNTUALES: PROBLEMÁTICA

El autor del presente trabajo realizó una serie de campañas de medida en construcciones civiles en el ámbito del convenio firmado por la Universidad Politécnica de Valencia y la empresa constructora Sacyr – Vallehermoso.

En el convenio se contemplaban como tareas la creación de sensores de deformación y temperatura basados en FBG para instalación en superficies, así como el desarrollo de un sistema de monitorización de dichos sensores para la evaluación del estado de las estructuras en las que se instalaron los sensores. Dichas estructuras fueron:

- Una losa postensada perteneciente a una terminal del nuevo aeropuerto de Murcia.
- Un encepado para un pilar en un viaducto sobre el río Tajo a su paso por Talavera de la Reina.
- Las vigas del forjado de un edificio en rehabilitación en Madrid.
- La estructura de acero del cajón para un viaducto en Bilbao.

En concreto, la última estructura fue la más difícil en ejecución y de la que se extrajeron la mayor cantidad de resultados y de conclusiones. Como ya se ha dicho, se realizó la instalación de sensores ópticos en la estructura de acero del cajón para un viaducto en la Variante Sur Metropolitana sobre el Valle del Kadagua en Bilbao (Vizcaya). Concretamente, se instalaron sensores basados en FBG para la medida puntual de deformación y de temperatura.

Dicha estructura fue construida mediante la técnica del empujado sucesivo debido a la orografía del terreno. La construcción de un puente empujado consiste en salvar una distancia por medio de un puente construido desde uno de los extremos y empujarlo hacia el otro lado. Por supuesto, esto no es posible si no se colocan en mitad del camino unos pilares que sirvan de apoyo. Esta fue la técnica elegida por lo profundo del Valle del Kadagua y por lo complicado del acceso al mismo por parte de la maquinaria de obra. Comentar también que el empujado del puente se realizó de manera sucesiva a medida que se construían tramos de 50 metros, ya que ésta era la longitud

disponible en el extremo en el que se construyó y que se encontraba a la salida de un túnel que atravesaba la montaña.

La instalación de los sensores se realizó en los puntos indicados por la dirección de obra de modo que se pudiera controlar en tiempo real la deformación sufrida por la estructura de acero a medida que ésta era lanzada. La importancia de esta información reside en la peligrosidad de la maniobra: la estructura de acero quedaba en voladizo a medida que fue siendo empujada hasta que apoyaba en los pilares situados entre los dos extremos del valle.

Los sensores fueron instalados en las 5 secciones más críticas (las que sufrían más deformación) en el peor caso, es decir, justo antes de que la estructura llegase a apoyar en un pilar, existiendo en ese momento el máximo voladizo. La localización de los sensores instalados en una de las secciones se muestra en izquierda de la Fig. 5. A la derecha se muestra una fotografía real del interior de la estructura de acero.

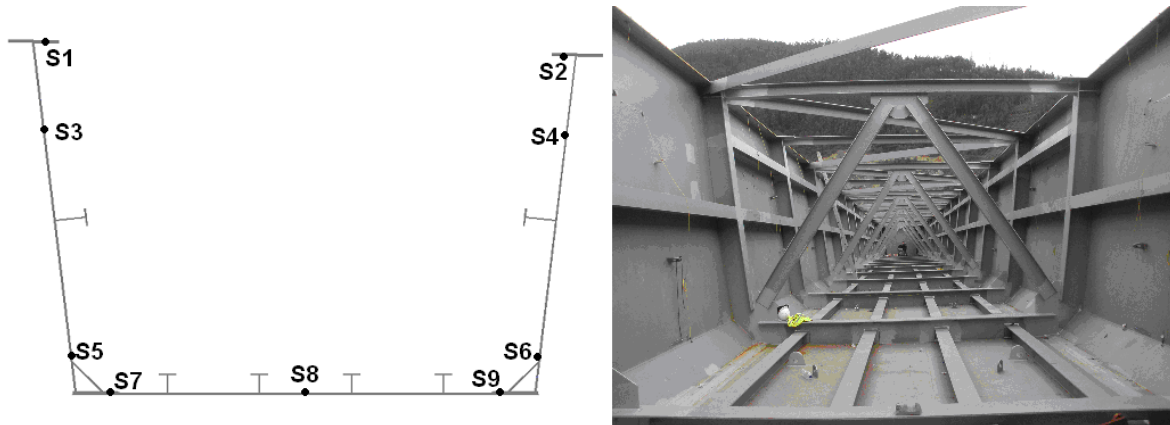


Fig. 5. Izquierda: Ubicación de los sensores instalados en cada sección. Derecha: fotografía del interior de la estructura de acero.

Aprovechando la posibilidad de multiplexación de los sensores ópticos basados en FBG, se conectaron en serie los 9 sensores en cada sección, instalando para ello sensores de diferente longitud de onda central evitando con ello el solape en el espectro. En la Fig. 6 se muestra el proceso de conectorización en serie de los sensores de una misma sección. También se instalaron sensores adicionales de temperatura basados en FBG para la compensación térmica de los sensores de deformación [25] y para conocer las variaciones de temperatura de la estructura metálica a lo largo de la maniobra de empuje.



Fig.6. Conectorización de los sensores de una misma sección.

Como se ha comentado anteriormente, se monitorizaron varios lanzamientos de la estructura de acero, concretamente aquellos que suponían un mayor riesgo de colapso debido al voladizo existente cuando dicha estructura estaba a punto de alcanzar cada uno de los pilares. Con ello se obtuvo en tiempo real la deformación de las secciones de la estructura a lo largo de toda la maniobra de empuje. En la Fig. 7 se muestran curvas de deformación respecto al tiempo de la primera sección monitorizada durante 2 maniobras de empuje.

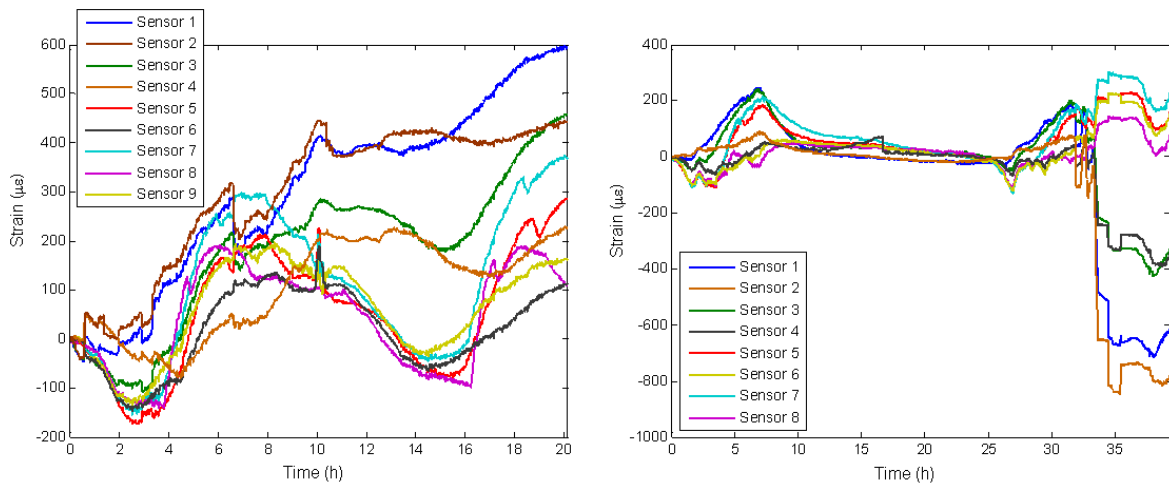


Fig.7. Curvas de deformación obtenidas para la sección 1 a lo largo de dos lanzamientos diferentes

También se obtuvieron curvas de temperatura por parte de los sensores de temperatura instalados a lo largo de la estructura para compensación térmica y para conocer la evolución de la temperatura de la estructura a lo largo del tiempo. Algunas curvas de temperatura se muestran en la Fig. 8.

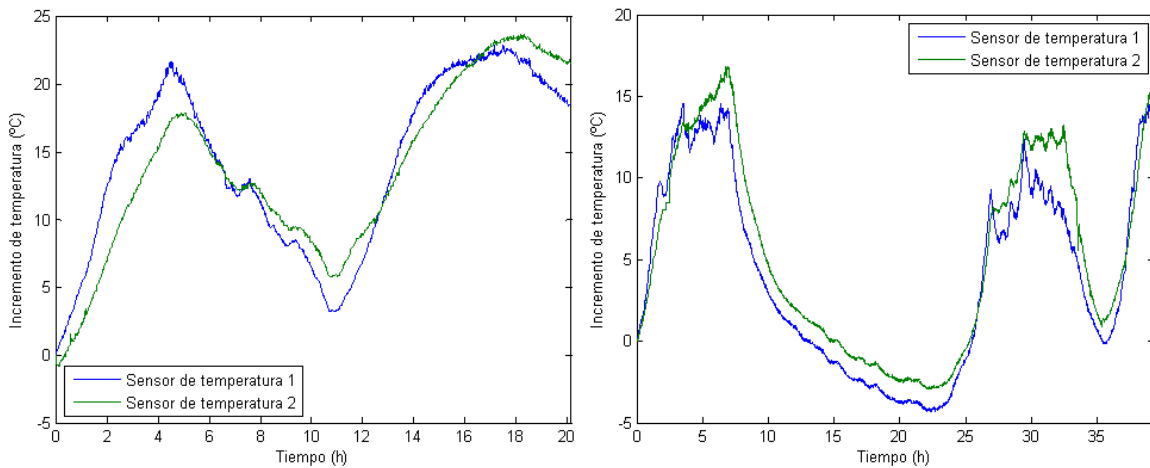


Fig.8. Curvas de temperatura obtenidas de algunos de los sensores de temperatura instalados a lo largo de dos lanzamientos diferentes.

Los datos obtenidos de estas monitorizaciones fueron realmente útiles para conocer las deformaciones sufridas por la estructura en los puntos donde se instalaron los sensores. Ahora bien, el problema de los sensores puntuales es que no podemos conocer la deformación completa de la sección transversal ya que la deformación entre sensores no la podemos obtener. Esta información es realmente vital para el estudio estructural ya que es necesario conocer la deformación de forma distribuida a lo largo de la superficie de una estructura.

Es por ello que en el presente trabajo se ha desarrollado un sistema de interrogación con sensores de deformación distribuidos manteniendo los sensores puntuales de temperatura para conocer la temperatura en los puntos deseados.

II. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

II.1. PRINCIPIO BÁSICO

En este apartado se procede a explicar el principio de funcionamiento básico del sistema de monitorización cuasi distribuido presentado en este trabajo. El funcionamiento del sistema se basa en la correlación de unos pulsos de monitorización con unos pulsos de referencia. Los pulsos ópticos de monitorización son inyectados en una zona que se quiere monitorizar mientras que los pulsos de referencia no sufren ningún efecto externo y son transmitidos por una fibra de referencia.

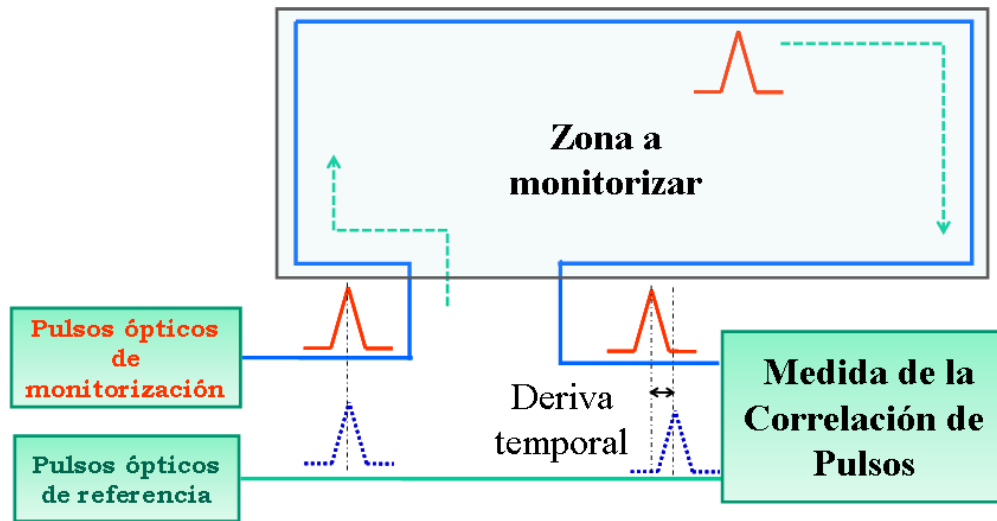


Fig.9. Principio básico de funcionamiento.

En concreto se quieren obtener las deformaciones de forma distribuida en una determinada zona a monitorizar. Para ello se ha de hacer un seguimiento a la variación de la deriva temporal existente entre los pulsos de monitorización y de referencia que se verá reflejada en la variación de la medida de la correlación.

De este modo, una deformación ϵ en la fibra instalada en la zona a monitorizar provocará un incremento en la longitud de la misma Δl que se verá reflejado en un incremento del tiempo Δt que tardan los pulsos en atravesar esa fibra, tal y como muestra la ecuación (1)

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{c/n} \quad (1)$$

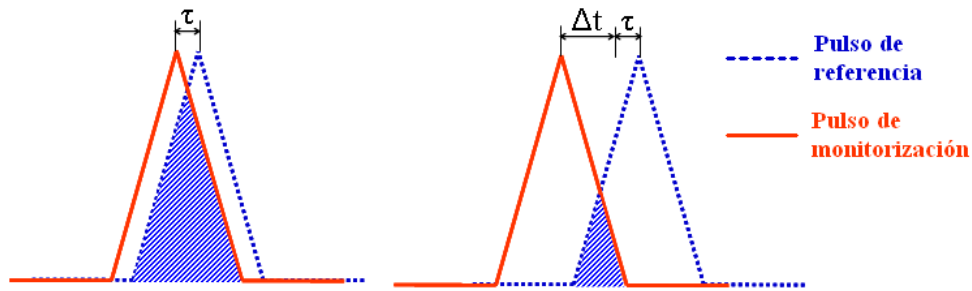


Fig.10. Efecto en la correlación por parte de la deriva temporal entre los pulsos de monitorización y referencia.

Tal y como puede verse en la Fig. 10, una variación en la deriva temporal entre los pulsos de monitorización y referencia conlleva un cambio en la medida de la correlación. En la izquierda se muestra la posición temporal de ambos pulsos con las fibras en reposo y a la derecha se puede ver la posición temporal cuando la fibra de monitorización sufre una deformación de tracción, de modo que el pulso de monitorización sufre un incremento temporal Δt en el paso de la fibra cuyo valor se presentó en la ecuación (1).

II.2. SEPARACIÓN EN REGIONES MEDIANTE REFLECTORES PARCIALES

Una vez explicado el principio básico de funcionamiento del sistema, se introducirá la idea de separación de la zona a monitorizar en regiones. El objetivo es el de poder diferenciar en qué región se está produciendo la deformación de la fibra además de saber cuándo ésta se produce.

Un ejemplo de aplicación de esta idea sería la instalación de fibra óptica para la monitorización de la salud estructural de un puente para tráfico de vehículos. En este caso, la longitud total del puente estaría compuesta por varias secciones de una cierta longitud que serían el objeto de la monitorización. Interesaría poder conocer si la deformación que sufre el puente en un determinado momento pertenece a una sección u otra.

Otro ejemplo de aplicación de la división en regiones sería la monitorización a lo largo de un gaseoducto, de modo que se pueda discernir en qué región de entre la gran longitud total aparece un problema de deformación excesiva que pudiera conducir a una grieta. En la Fig. 11 se muestran estas estructuras como ejemplo de aplicación real.

La aplicación al puente sobre el Valle del Kadagua en Bilbao presentado en la sección I.3 hubiera sido de gran importancia también, ya que se hubieran podido conocer de forma más precisa las deformaciones existentes a lo largo de cada una de las secciones monitorizadas pudiendo de este modo saber si por ejemplo el puente presentaba alguna torsión.



Fig.11. Ejemplos de aplicación a estructuras reales.

Para conseguir esta división de la longitud total de la fibra óptica en regiones hay que introducir elementos reflectores al final de la longitud de cada región para que los pulsos de monitorización atraviesen tan solo las regiones deseadas.

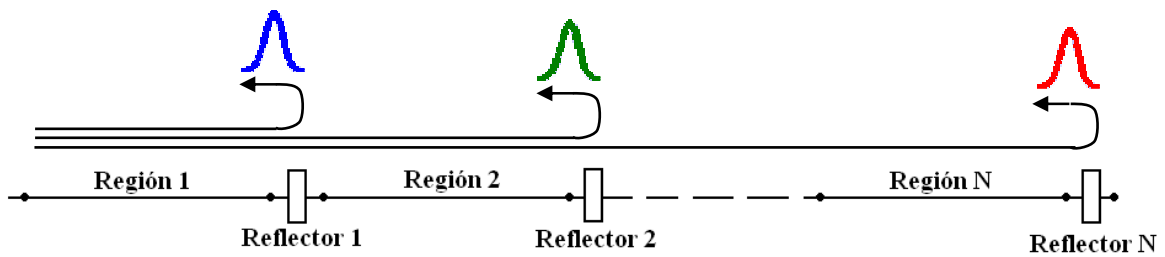


Fig.12. Principio de la separación en regiones.

En la Fig. 12 puede verse como el primer pulso atraviesa la región 1 y se refleja en el reflector 1. El segundo pulso es reflejado por el reflector 2, habiendo atravesado previamente las regiones 1 y 2, y así sucesivamente.

Por lo tanto hay que conseguir que la fuente óptica que genera los pulsos de monitorización sea capaz de seleccionar primero el reflector 1, luego el reflector 2 y así sucesivamente hasta el reflector N. Existen diferentes alternativas para la elección de los reflectores parciales, pero al final se ha optado por usar redes de difracción de *Bragg* (*Fiber Bragg Grating*, FBG) tal y como se explica en el siguiente apartado

II.3. *SEPARACIÓN EN REGIONES: FBG COMO REFLECTORES PARCIALES*

La elección de las FBG como reflectores parciales responde principalmente a algunas de sus características intrínsecas que son de gran utilidad como por ejemplo:

- Posibilidad de multiplexado en longitud de onda
- Sensibles a la temperatura.

La posibilidad de multiplexado en longitud de onda permite realizar la selección de todos los reflectores parciales y por tanto la interrogación de todas las regiones. Basta con introducir FBGs con diferentes longitudes de onda de Bragg, de modo que la fuente óptica que genera los pulsos de monitorización vaya sintonizándose en longitud de onda a las longitudes de onda de Bragg de las diferentes FBGs.

Además, al ser las FBG sensibles a la temperatura [2], podemos utilizarlas como sensores de temperatura puntual en aquellos sitios donde se instalen. La utilización de FBGs como sensores puntuales de temperatura es una técnica relativamente madura y que lleva varios años ya en aplicación.

III. MONTAJE DEL EXPERIMENTO

Una vez presentado en el apartado II el principio básico de funcionamiento, describiremos en este apartado el montaje experimental y en el apartado posterior los resultados extraídos de los ensayos realizados. El montaje experimental se presenta en la Fig. 13 y a continuación se explicarán cada uno de los componentes usados en él.

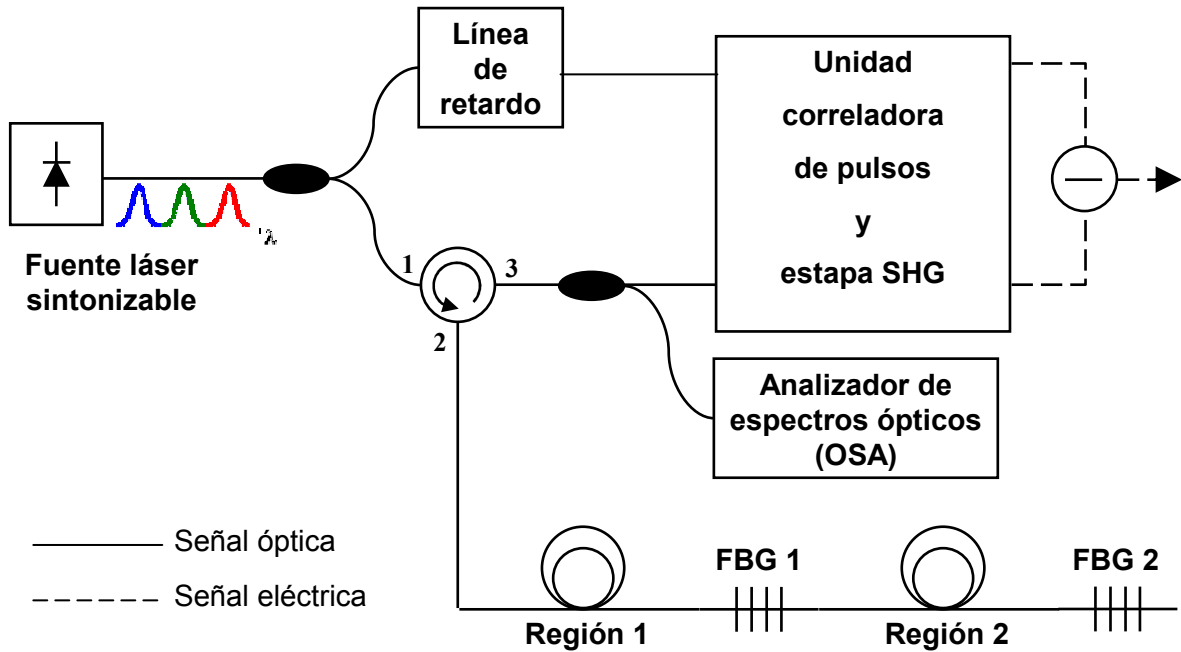


Fig.13. Montaje realizado para el experimento.

Se muestra en la Fig. 14 las imágenes reales del montaje realizado en el laboratorio del Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas (GCOC) perteneciente al Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) en donde se realizaron todos los ensayos que se presentarán a continuación.

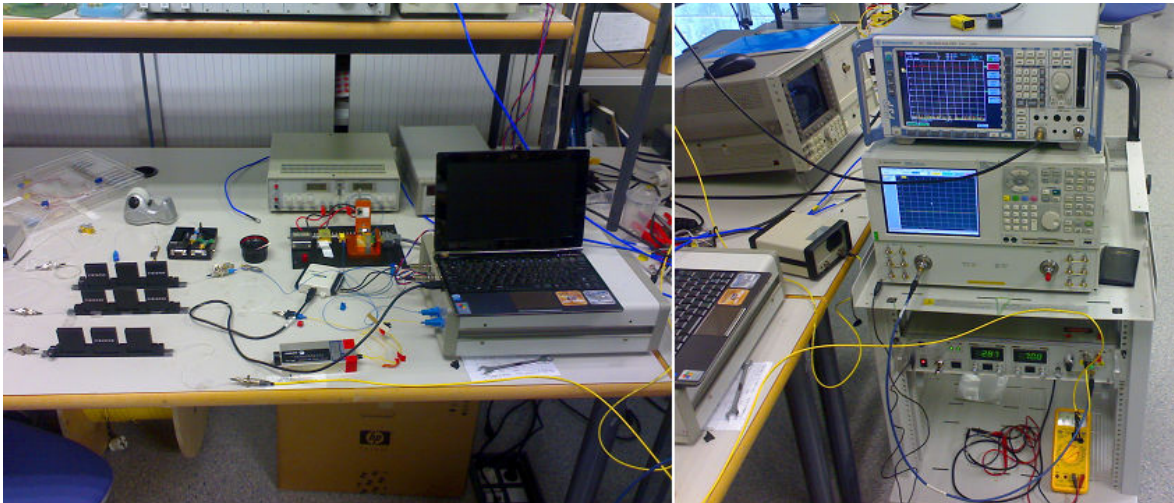


Fig.14. Foto del montaje experimental.

Como ya se comentó en el anterior apartado, se necesita una fuente láser sintonizable en longitud de onda para poder seleccionar la FBG deseada. Para este ensayo se utilizó una fuente de tipo *Mode-Locked Fiber Laser* de la marca *OPTCOM* modelo CALMAR PSL-10-TT (Fig. 15). Este láser tiene un rango sintonizable de 1530 a 1565 nm y un ancho de pulso ajustable de 1,5 a 10 ps. La tasa de repetición de pulsos viene determinada por la frecuencia de un oscilador externo que debe estar comprendida entre 5 y 11 GHz (200 ps y 90,91 ps de tasa de repetición sucesivamente).



Fig.15. Fuente óptica usada en el experimento

Después de la fuente láser se conectó un acoplador pasivo 1x2 de relación 10:90. Esto significa que el 10 % de la potencia óptica de la fuente iba dirigida a la rama superior y el 90 % a la inferior. El motivo de utilizar esta relación de potencias, en vez de utilizar una relación de 50:50 por ejemplo, es debido a que la rama inferior presenta mayores pérdidas. Esta situación se hace más patente en situaciones reales en las que se pretenda monitorizar distancias de kilómetros con múltiples regiones, conllevando un gran número de conexiones que presentan pérdidas.

En la rama superior se conectó una línea de retardo variable mostrado en la Fig. 16. El rango de retardo disponible es de 600 ps. Otras especificaciones de este dispositivo son 0,85 dB de pérdidas de inserción en los conectores y unas pérdidas de retorno de más de 50 dB.



Fig.16. Línea de retardo óptica.

La rama inferior se conecta a un circulador óptico de tres puertos cuyas especificaciones se muestran en la tabla 2.

Rango en longitud de onda		nm	1525 – 1575
Pérdidas de inserción (IL)	1 → 2	dB	0,69
	2 → 3		0,74
Aislamiento (I)	2 → 1	dB	54
	3 → 2		53
Directividad (D)	1 → 3	dB	60
	3 → 1		60
Pérdidas de retorno	1	dB	54
	2		55
	3		54
PDL	1 → 2	dB	0,05
	2 → 3		0,07
PMD		ps	< 0,07
Temperatura de operación	°C		0 a +70
Temperatura de almacenamiento	°C		-40 a +85

Tabla 2: Especificaciones del circulador óptico usado en el ensayo.

El puerto 2 del circulador óptico está conectado a la denominada zona de monitorización. En un caso práctico, esta zona sería la estructura que se desea monitorizar y estaría compuesto por varios enlaces de fibra óptica separados por FBG con longitudes de onda de *Bragg* diferentes unas de otras. Para el caso experimental en laboratorio, hemos utilizado dos tramos de fibra óptica monomodo estándar (SMF-28 de la casa *Corning*) de 48,5 cm y 54,8 cm de longitud (región 1 y región 2 respectivamente) y dos FBG centradas en 1548,9 nm (FBG 1) y 1545,8 nm (FBG 2). Los extremos de los tramos de fibra óptica se fijaron en un sistema de posicionamiento milimétrico para posibilitar el posterior estiramiento de dicha fibra en los ensayos de deformación que se llevaron a cabo. Una imagen de este montaje se muestra en la Fig. 17.

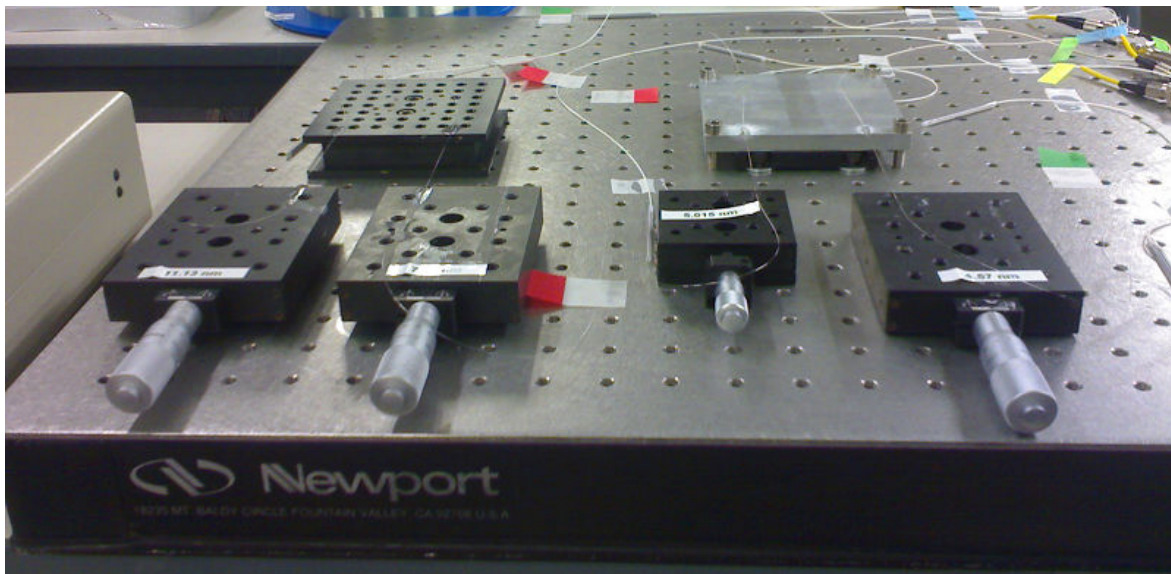


Fig.17. Fibras ópticas usadas como regiones de monitorización instaladas sobre un sistema de posicionamiento milimétrico

Los espectros de las FBG se muestran en la Fig. 18. Como puede verse, se utilizaron FBG con un perfil de apodización gaussiano. Otras características de las FBG utilizadas son: reflectividad del 80 % y un ancho de banda de FWHM= 0,28 y 0,26 para FBG 1 y FBG 2 respectivamente

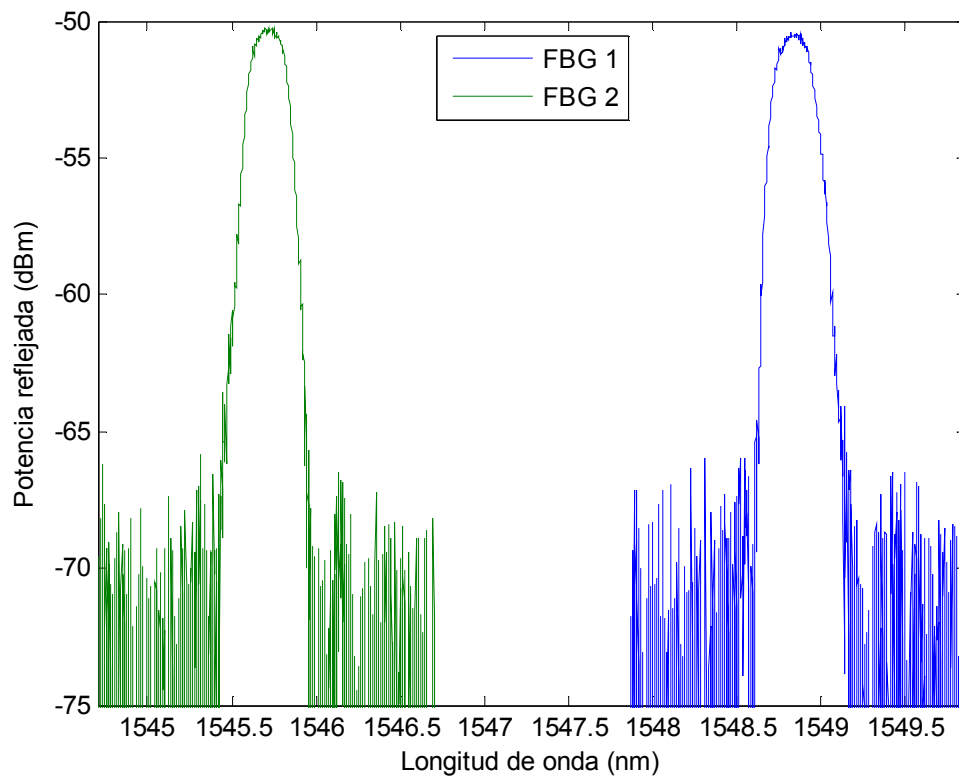


Fig.18. Espectro de las FBG utilizadas en el experimento.

Finalmente, el puerto 3 del circulator óptico se conecta a un acoplador pasivo 1x2 de modo que una de las salidas se conecta a un analizador de espectros ópticos (OSA) y la otra a la unidad de correlación de pulsos.

El OSA sirve para el seguimiento de la variación de la longitud de onda central de las FBG, ya que ésta está relacionada con la variación de temperatura a la que se vean sometida. Como se explicó en el apartado II.3, las FBG son sensibles a la temperatura variando su longitud de onda y esa es una de las características que vamos a explotar.

Una vez llegados a este punto pasaremos a explicar el funcionamiento de la unidad correladora de pulsos. Este dispositivo fue desarrollado por *H. B. Song et al.* en el año 2006 [26]. El interior de esta unidad cuenta con un divisor de pulsos (*pulse splitter*, PS), un espejo (*half mirror*, HM) y un separador de polarización (*polarization beam splitter*, PBS). Además, la unidad dispone de un par de generadores de segundo armónico (*second harmonic generator*, SHG) y dos fotodiodos de avalancha (*avalanche photo diode*, APD) para la conversión de señal óptica a señal eléctrica. El esquema interno se muestra en la Fig. 19:

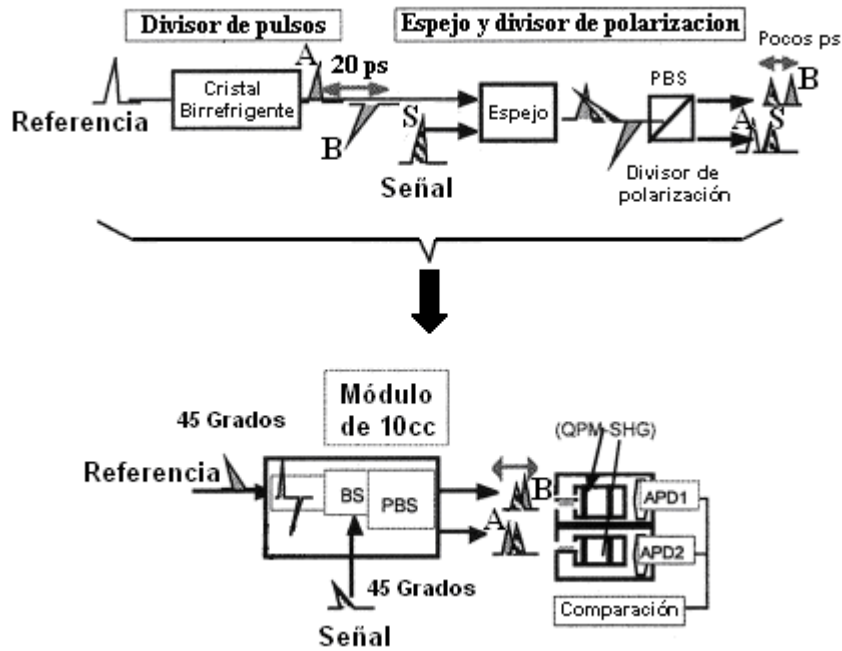


Fig.19. Esquema interno de la unidad correladora de pulsos.

En la parte superior de la Fig. 19 se muestra como el pulso de referencia entra a un cristal birrefringente hecho de rutilo (TiO_2), de modo que las polarizaciones ortogonales lo atraviesan a diferente velocidad. Como resultado, se produce una separación temporal de 20 ps entre ambas polarizaciones (pulsos A y B). Posteriormente se introduce el pulso de señal de monitorización

(pulso S) mediante un espejo, de modo que se combina con los pulsos de referencia quedando en una posición temporal intermedia y con un ángulo de 45° . En la última etapa se divide la señal en dos puertos: uno con la combinación del pulso B con la proyección perpendicular (\perp) de S y otro con el pulso A y la proyección paralela (\parallel) de S.

En la parte inferior de la Fig. 19 se puede apreciar la integración de los bloques comentados anteriormente con la etapa SHG/APD. La generación de segundo armónico (SHG) se ha conseguido mediante unos cristales de niobato de litio (LiNbO). Después de cada cristal hay un fotodiodo de avalancha (APD) de banda estrecha para la conversión de la señal de óptico a eléctrico. Esta integración completa se ha llevado a cabo en un módulo de tan solo 10 centímetros cúbicos y se puede apreciar una imagen real del interior del módulo en la Fig. 20.

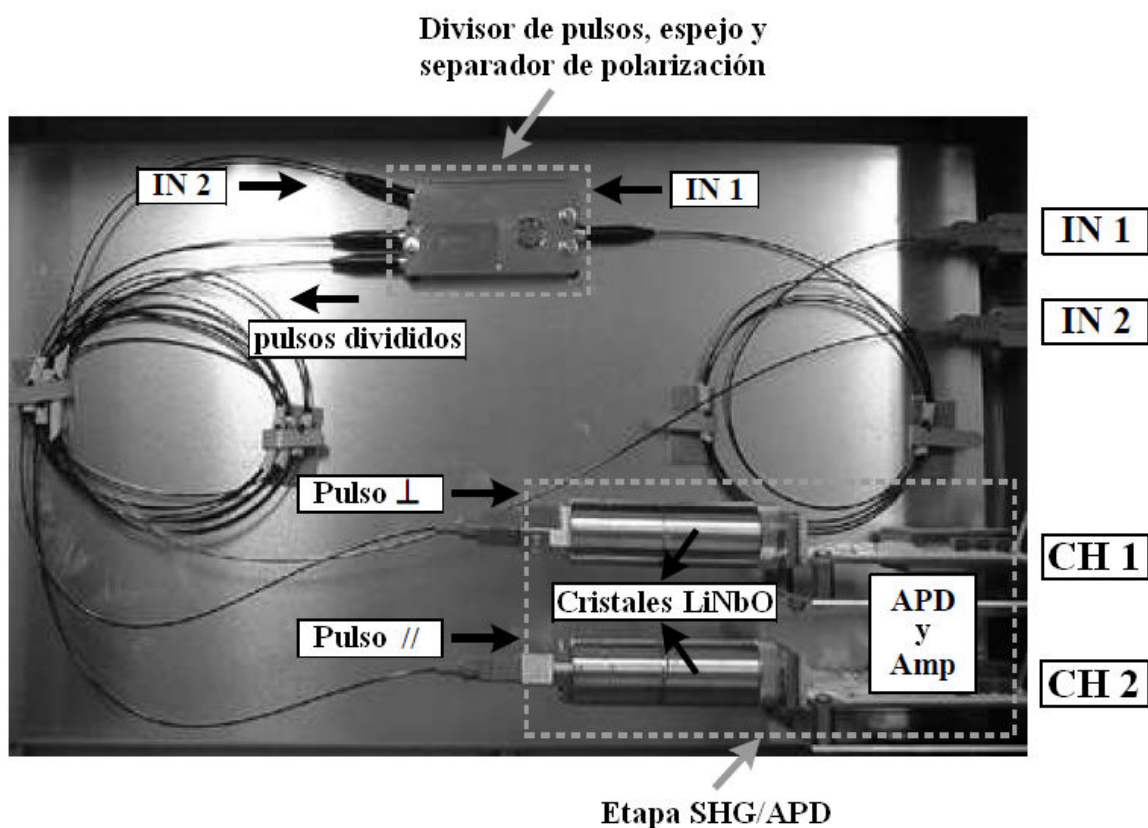


Fig.20. Imagen del interior de la unidad correladora de pulsos.

Finalmente, se conectó un módulo de adquisición de datos situado después de la detección de las señales ópticas provenientes de las salidas de la unidad de correlación de pulsos por el puerto de salida 1 (CH 1) y el puerto de salida 2 (CH 2). El módulo utilizado en estos experimentos es el *National Instruments* USB-6008 que se muestra en la Fig. 21. Este módulo dispone de 8 entradas (o 4 diferenciales) analógicas a 12 bits con una frecuencia de muestreo de hasta 10 KS/s, con un rango de la señal de entrada desde $\pm 1V$ hasta $\pm 20 V$.



Fig.21. Módulo de adquisición de datos NI USB-6008.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una vez que se ha explicado el montaje del experimento así como los diferentes dispositivos que lo componen, se procede en este apartado a comentar la configuración de los dispositivos y los resultados experimentales que se obtuvieron en los diferentes ensayos que se realizaron.

En este punto hay que mencionar que para la captura y manejo de los datos provenientes del módulo de adquisición de datos se desarrolló un software en el lenguaje de programación *LabVIEW* versión 8.5 cuyo panel frontal se muestra en la Fig. 22. Por medio de este software se podían visualizar y guardar en disco los valores de voltaje de salida provenientes del canal 1 (CH1) y canal 2 (CH2) de la unidad correladora de pulsos.

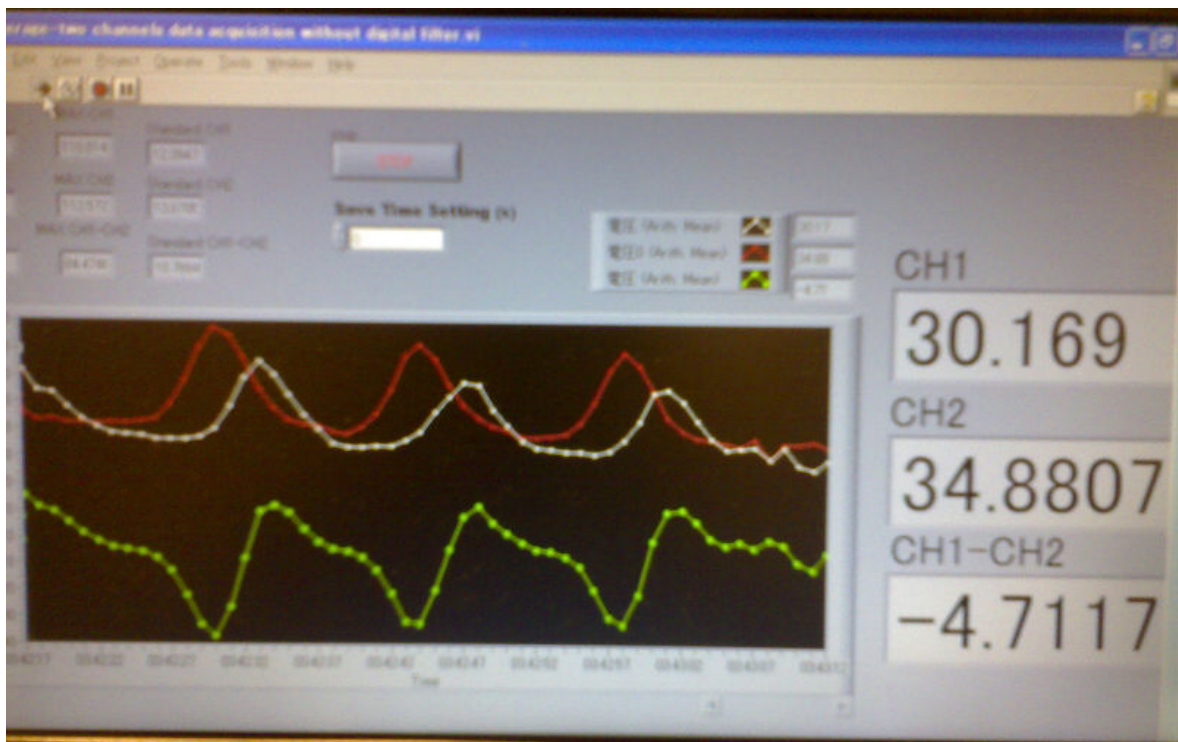


Fig.22. Panel frontal del software desarrollado para la captura de datos.

Para los experimentos realizados en este trabajo se conectó a la fuente óptica un oscilador externo sintonizado a 9,956104 GHz, lo que supone una tasa de repetición de pulsos de 100,4 ps. La anchura de los pulsos a -3 dB era de 12,9 ps tal y como muestra una captura tomada por el osciloscopio que se muestra en la Fig. 23. Cabe recordar que el osciloscopio introduce una desviación en la medida de $\sigma_{dev} = 7,7$ ps por lo que la medida de la anchura de pulso ha de ser corregida según la ecuación (2):

$$\sigma_{opt} = \sqrt{\sigma_{meas}^2 - \sigma_{dev}^2} \quad (2)$$

siendo σ_{meas} la anchura medida directamente por el osciloscopio, y σ_{opt} la anchura real del pulso óptico. Finalmente, la potencia óptica de salida medida fue de 3,4 dBm.

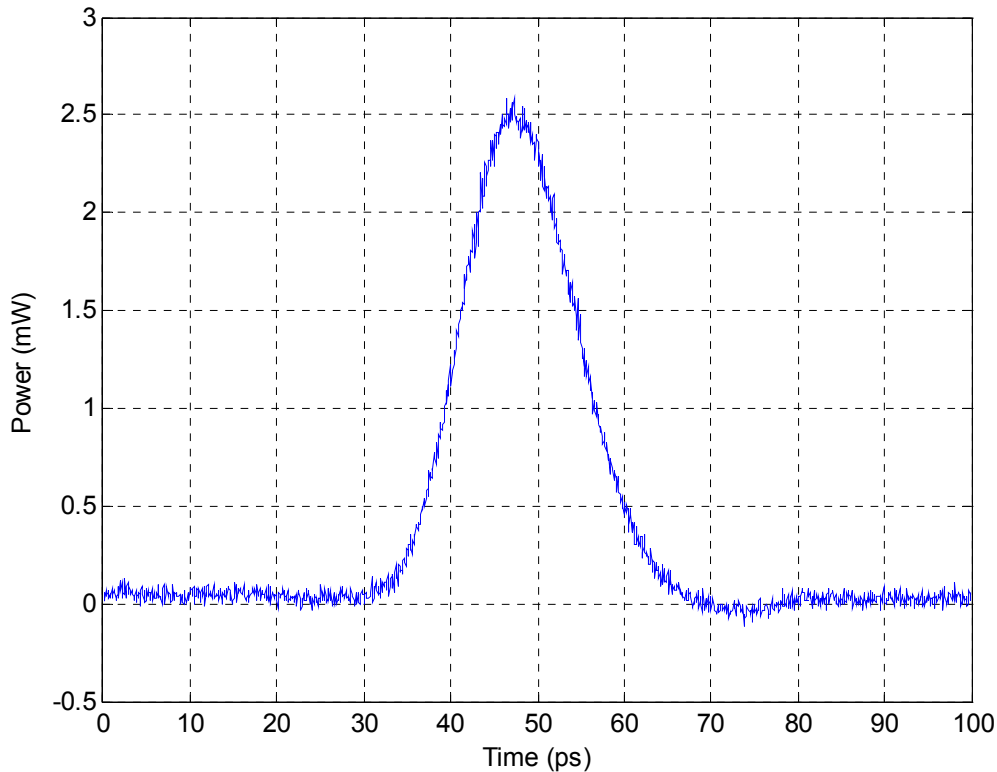


Fig.23. Pulso óptico a la salida de la fuente láser.

El espectro de la fuente láser se muestra en la Fig. 24. Se aprecia el espectro típico de una fuente láser de tipo *Mode-Locked* cuando está en estado de oscilación. La fuente estaba sintonizada a una longitud de onda central de 1548,9 nm, la misma longitud de onda central que la FBG 1. Al hacer esto estamos seleccionando para monitorizar tan solo la región 1.

En esta configuración, si movemos la línea de retardo variable haremos que la posición temporal del pulso de referencia cambie. De este modo, el solape con el pulso de monitorización cambiará y a la salida tendremos un valor diferente. En concreto, y teniendo como referencia la Fig. 19 (esquema interno de la unidad correladora de pulsos), si aumentamos el retardo del pulso de referencia el solape del pulso B con S disminuirá, pero el solape de A con S aumentará, por lo que a la salida tendremos un voltaje menor. Si por el contrario disminuimos el retardo, el solape de B con S crecerá y el solape de A con S decrecerá y por lo tanto, tendremos a la salida un voltaje mayor. Como puede observarse, el hecho de implementar detección diferencial hace que la sensibilidad del sistema sea doble.

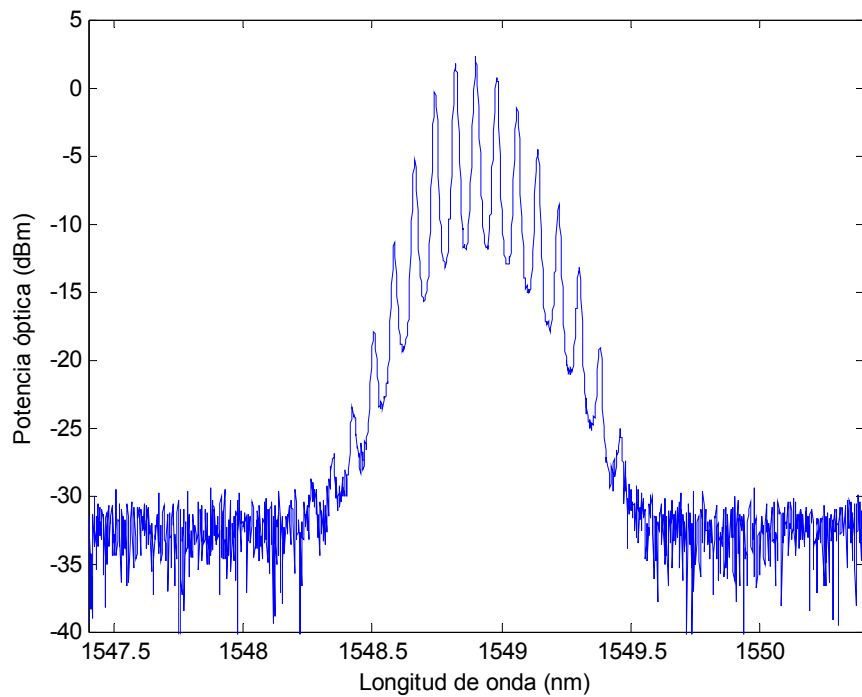


Fig.24. Espectro de la fuente óptica sintonizada en 1548,9 nm para seleccionar la FBG 1.

Si hacemos un barrido con la línea de retardo variable con retardos desde los 0 hasta los 220 ps aproximadamente, obtenemos una curva como la mostrada en la Fig. 25. En el eje de abcisas se representa el valor de la línea de retardo, mientras que en el eje de ordenadas se representa el voltaje diferencial de salida del circuito.

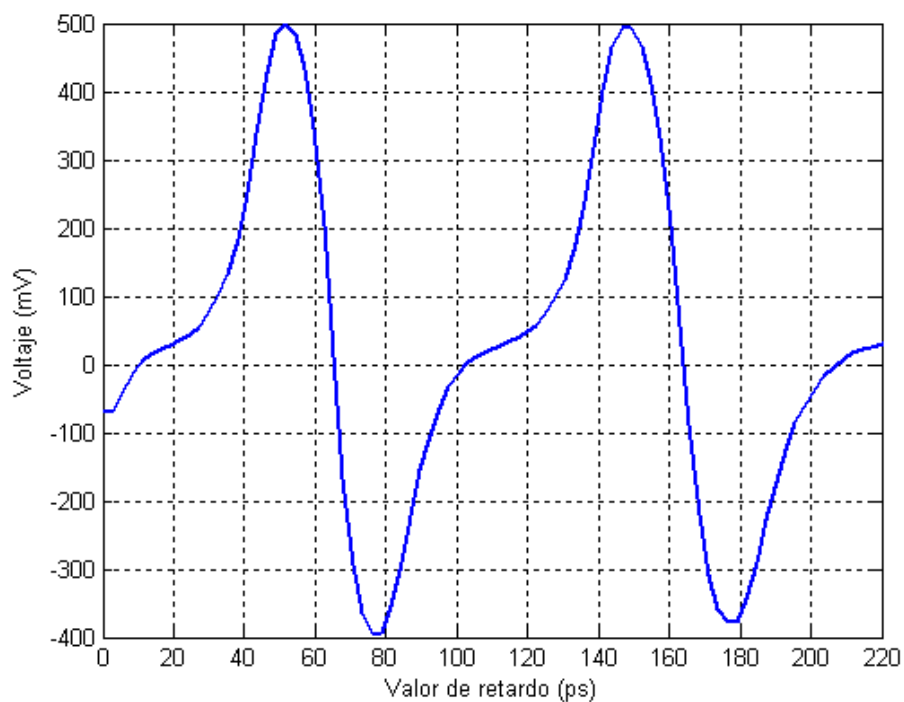


Fig.25. Forma característica de la señal eléctrica diferencial a la salida del sistema.

Como la tasa de repetición de pulsos de la fuente láser es de aproximadamente 100,4 ps, éste será el periodo de la forma de onda de la anterior figura. El máximo de esta curva corresponde al retardo necesario para que el solape entre el pulso S y el pulso B sea total, de manera que no hay solape del pulso S con el pulso A. Por el contrario, el mínimo de la curva corresponde al retardo que hace que el solape del pulso S con el pulso A sea total, mientras que el solape del pulso con el pulso S con el pulso B es nulo.

Los cruces de la curva por la línea de abcisas pertenecen al retardo que hace que el solape entre los pulsos S y A, y los pulsos S y B son iguales, por lo que al hacer detección diferencial, se obtienen 0 mV a la salida. Si se quiere aprovechar el máximo rango dinámico lineal de esta curva se ha de trabajar en un punto donde el voltaje sea 0 mV y además tengamos una región lineal, tal y como ocurre por ejemplo en el valor de retardo 65,4 ps.

Para comprobar que efectivamente estamos seleccionando la FBG 1, si le aplicamos tensión a la fibra de la región 2, el sistema no debería registrar ninguna variación. Así lo muestra la Fig. 26. En esta figura el eje de abcisas representa el tiempo de medida (en este caso 125 segundos), mientras que en el eje de ordenadas se muestra el voltaje de salida diferencial.

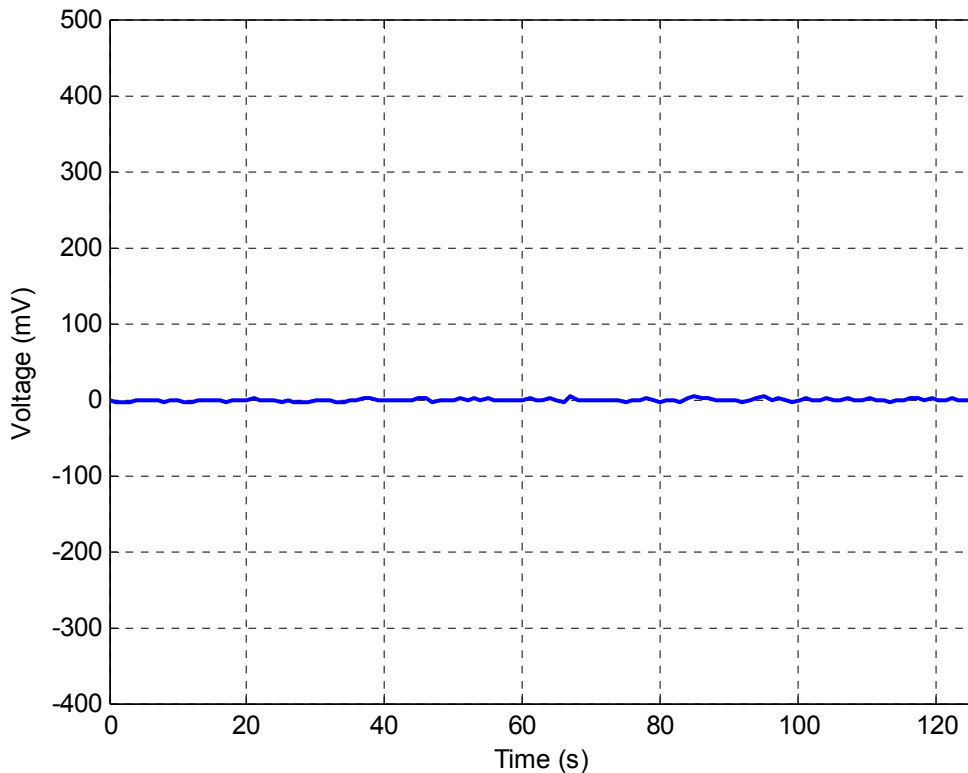


Fig.26. Señal eléctrica diferencial de salida nula cuando aplicamos tensión a una región no seleccionada.

Durante el tiempo de medida se le aplicó a la fibra de la región un estiramiento de 1,2 mm, (lo que supone más de $2000 \mu\epsilon$) durante 30 segundos en dos ciclos. El voltaje de salida diferencial fue prácticamente nulo durante todo el intervalo de medida.

Posteriormente se sintonizó la fuente láser a 1545,8 nm para seleccionar la FBG 2 tal y como puede verse en el espectro de la Fig. 27.

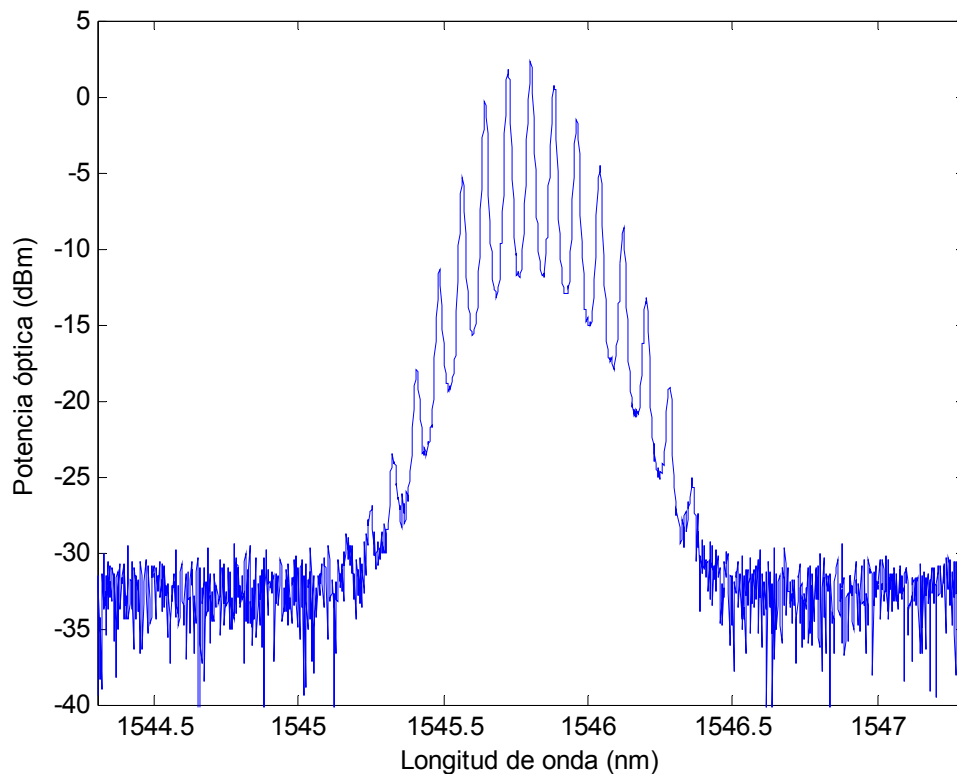


Fig.27. Espectro de la fuente óptica sintonizada en 1545,8 nm para seleccionar la FBG 2.

Una vez que hemos seleccionado la FBG 2 seremos capaces de detectar cualquier deformación existente tanto en la región 1 como en la región 2. Para demostrarlo, le aplicaremos a la fibra óptica de la región 2 el mismo estiramiento de 1,2 mm que se aplicó a la región 1 en el caso anterior. El resultado se muestra en la Fig. 28. En este caso se aprecia claramente cuando se aplica tensión (rampa ascendente), cuando mantenemos esa tensión (valor constante en el máximo de la curva) y cuando liberamos esa tensión a la fibra (rampa descendente), volviendo ésta a su situación original de reposo. Esta operación se le aplicó a la fibra óptica de la región 2 en dos ciclos tal y como se observa en dicha figura.

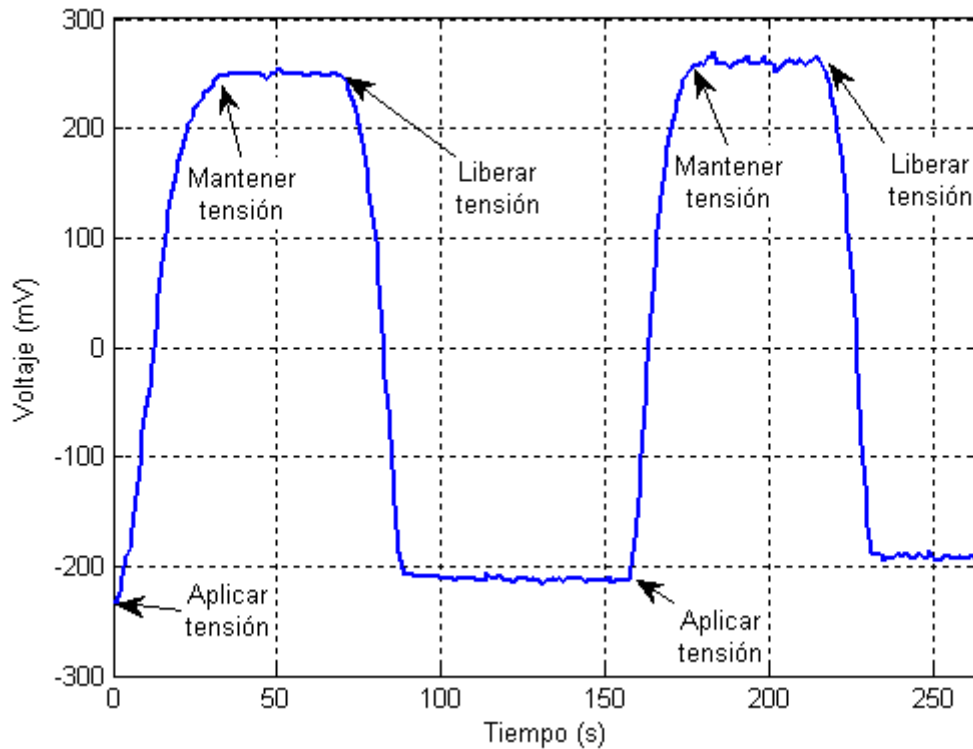


Fig.28. Señal eléctrica diferencial de salida cuando aplicamos tensión a una región seleccionada.

Habiendo demostrado la posibilidad de seleccionar cada una de las FBG de manera independiente para monitorizar la deformación en una región determinada, cobra especial importancia la demostración de la linealidad y repetibilidad del sistema.

Para ello se mantuvo la configuración del anterior experimento, es decir, con la fuente óptica sintonizada a 1545,8 nm para seleccionar la FBG 2 y posteriormente se le aplicó deformación a la fibra óptica de la región 2 en pasos de 0,1 mm (que corresponde con 182,5 $\mu\epsilon$ para una longitud de 54,8 cm) hasta aplicar una deformación total de 1,2 mm. La forma de hacerlo fue aplicar tensión a la fibra cada 0,1 mm y anotar el valor de voltaje de salida y así sucesivamente hasta 1,2 mm (2190 $\mu\epsilon$). Posteriormente se liberó la tensión de nuevo en pasos de 0,1 mm anotando el voltaje de salida hasta llegar al punto de reposo inicial de la fibra en la que no se encuentra sometida a ninguna deformación.

Estos ciclos se repitieron varias decenas de veces dando como resultado una nube de puntos para cada deformación. Con estos valores se ajustó una recta de regresión lineal que se muestra en la Fig. 29.

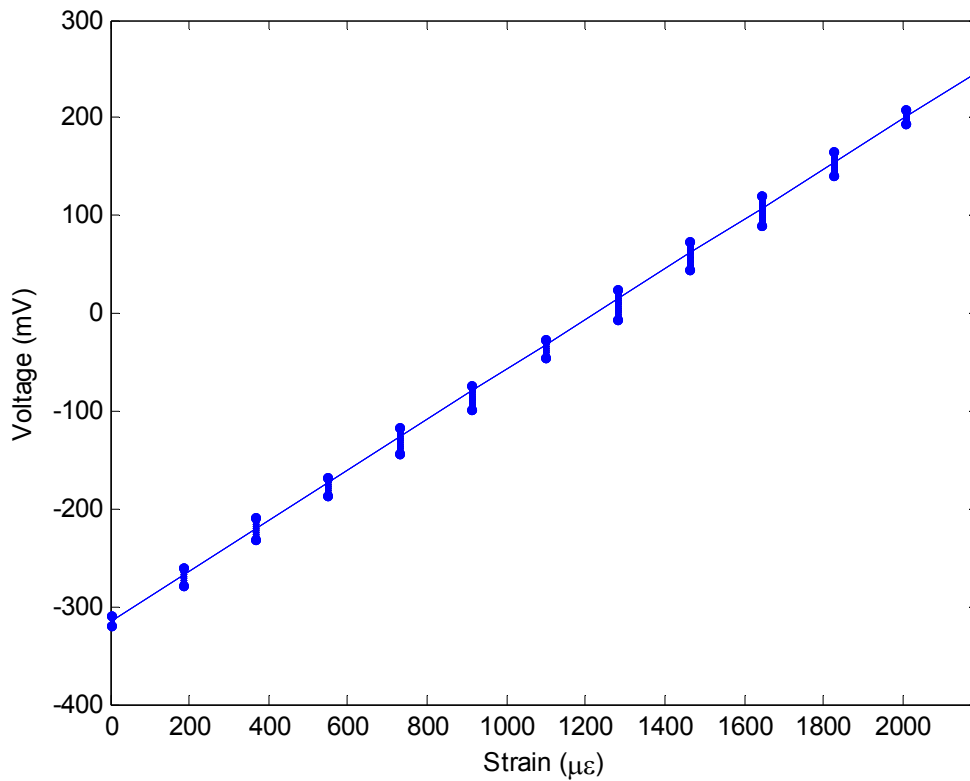


Fig.29. Respuesta lineal del sistema.

Como puede observarse, existe una buena linealidad del sistema, siendo la pendiente de la recta de regresión de $0,2568 \text{ mV}/\mu\epsilon$. El coeficiente de correlación de la recta de regresión es de $0,9988$, lo que supone una correlación prácticamente lineal para las medidas que se tomaron.

La resolución del sistema depende del módulo de adquisición de datos situado después de la detección de las señales ópticas provenientes de la unidad de correlación de pulsos y su posterior resta para obtener una señal eléctrica diferencial. El módulo utilizado en estos experimentos es el *National Instruments* USB-6008, cuya resolución es del $0,02\%$ del rango dinámico de medida total, que en nuestro caso es de $2190 \mu\epsilon$, lo que nos da una resolución de $0,44 \mu\epsilon$.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado y demostrado la viabilidad de un sistema de interrogación híbrido para la monitorización al mismo tiempo de áreas extensas y de ciertos puntos seleccionados. Este sistema de interrogación permite la monitorización de sensores puntuales y distribuidos con una sola fuente óptica sintonizable en longitud de onda. Gracias a esto podemos solventar el problema que se nos planteaba para poder conseguir un sistema más completo para monitorización de la salud estructural de una construcción en el ámbito civil. Con esta técnica ya podemos conocer con mayor precisión el comportamiento de dicha estructura tanto en la fase de construcción como en la fase de vida útil.

La técnica empleada es muy robusta ya que las medidas están basadas en desplazamientos de longitud de onda y en derivas temporales entre trenes de pulsos ópticos. Además, el sistema permite la interrogación de regiones específicas mediante el uso de reflectores parciales selectivos en longitud de onda. El número de sensores que pueden instalarse en una única fibra es muy alto puesto que para la separación de regiones el sistema utiliza una fuente óptica sintonizable y varias FBG, las cuales tienen pocas pérdidas.

Los resultados experimentales confirman la respuesta lineal de la técnica propuesta. La resolución obtenida es del 0,02 % del rango dinámico total, que en nuestro experimento está en 2190 $\mu\epsilon$ para la medida de deformación en regiones de alrededor de 50 centímetros. La estabilidad de las medidas está por encima del 99,8 %. El máximo rango de deformación que se puede obtener está limitado por la tasa de repetición de pulsos y por el ancho de pulso de la fuente óptica. Estos parámetros pueden ser diseñados para detectar un desplazamiento temporal máximo de la mitad del periodo de repetición de pulsos.

AGRADECIMIENTOS

Primero de todo, agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto del Plan Nacional I+D TEC2007-68065-C03-01, al proyecto de la *Japan Society for the Promotion of Science* (JSPS B21360182), a la *Japan Science and Technology agency* (JST), al *High-Tech Research Center* de Japón y a la Unión Europea a través del *COST Action 299*.

Me gustaría agradecer en particular al Dr. Salvador Sales la oportunidad que me brindó para poder formar parte del instituto de telecomunicación y aplicaciones multimedia (iTEAM) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) hace ahora ya dos años. Gracias a él pude realizar mi proyecto fin de carrera bajo su dirección al igual que esta vez lo ha hecho con esta tesina de fin de master que supone un logro más en mi carrera científica. Es mucho lo que le debo y espero poder corresponderle en los años venideros de trabajo en común que nos esperan.

Por supuesto también me gustaría dar las gracias al profesor Koji Nonaka de la *Kochi University of Technology* (KUT) de Japón. Nunca imaginé poder trabajar con alguien venido de tan lejos y a pesar del impacto inicial hubo un gran entendimiento y la experiencia ha sido tremendamente enriquecedora. Espero que en un futuro surja de nuevo una posible colaboración entre ambas universidades KUT y UPV.

También me gustaría nombrar la ayuda y el apoyo que he recibido por parte de mis compañeros de trabajo. Con ellos convivo día a día y hacen que el trabajo diario sea más ameno y enriquecedor. En especial me gustaría nombrar a David Barrera y a Raimundo García-Olcina por la ayuda prestada en los comienzos.

Por último, pero más importante, quisiera dar las gracias a mi familia y amigos, que son los que me ayudan a seguir mejorando y a no rendirme cuando las cosas no van tan bien como uno quisiera. En especial, quiero dedicarle este trabajo a mi padres, Antonio y María del Carmen, que se sienten tan orgullosos de mí tal y como me demuestran cada día y sin cuyo cariño y apoyo no hubiera podido llegar a donde me encuentro.

Y por supuesto gracias a todas las personas que de un modo u otro han colaborado en formar la persona en la que me he convertido y a conseguir los logros profesionales y académicos de los que me siento realmente orgulloso.

「千里の道も一歩から」

Hasta el camino más largo se empieza con un paso.

REFERENCIAS

- [1] www.ishmii.org: International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure
- [2] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, "Fiber grating sensors", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [3] V. Bhatia *et al.* "Recent development in optical-fiber based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensing technology", *Smart Mater. Struct.*, no. 4, pp. 246-251, 1995.
- [4] www.smartec.ch Smartec S.A.
- [5] T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda, "A technique to measure distributed strain in optical fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, no. 5, pp. 352-354, May. 1990.
- [6] L. Thévenaz, S. Foaleng, "Distributed fiber sensing using Brillouin echoes", *19th International Conference on Optical Fibre Sensors*, edited by David Sampson, Stephen Collins, Kyunghwan Oh, Ryozi Yamauchi, Proc. of SPIE Vol. 7004, 70043N, (2008)
- [7] D.G. Lancaster, J.M. Dawes, "A pulsed laser source using stimulated Raman scattering and difference frequency mixing: remote sensing of methane in air", *Optics Communications*, no. 120, pp. 307-310, 1995.
- [8] Meltz, G., Morey, W. W., Glenn, W. H., Farina, J.D., "In-fiber Bragg-grating sensors", Proc. OFS'89, London, England, 163-166 (1989).
- [9] George T. Kanellos, et al., "Two dimensional polymer-embedded quasidistributed FBG pressure sensor for biomedical applications", *Optics Express*, Vol. 18, No. 1, 179-186 (2010).
- [10] Yong Zhao, et al., "Experimental research on a novel fiber-optic cantilever-type inclinometer", *Optics & Laser Technology*, Volume 37, Issue 7, 555-559 (2005).
- [11] Wenjun Zhou, et al., "Temperature-insensitive accelerometer based on a strain-chirped FBG" *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 157, Issue 1, 15-18 (2010).
- [12] Lucas J. Cashdollar, Kevin P. Chen, "Fiber Bragg Grating Flow Sensors Powered by In-Fiber Light", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 5, No. 6, 1327-1331 (2005).
- [13] www.micronoptics.com Micron Optics, Inc.
- [14] www.fibersensing.com Fiber Sensing - Sistemas Avançados de Monitorização, S.A.
- [15] Kent A. Murphy, et al., "Quadrature phase-shifted, extrinsic Fabry-Perot optical fiber sensors", *Optics Letters*, Vol. 16, No. 4 (1991).
- [16] G. Zhou, L. M. Sim, "Evaluating damage in smart composite laminates using embedded EFPI strain sensors.", *Optics and Lasers in Engineering*, No. 47, 1063-1068 (2009).
- [17] J. A. Etches, G. F. Ferrando, "Evaluation of embedded optical fiber sensors in composites: EFPI sensor response to fatigue loading.", *Polymer Composites*, 284-291 (2010).
- [18] www.fiso.com, FISO Technologies Inc.
- [19] www.lunainnovations.com, Luna Innovations Inc.
- [20] T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda, "A technique to measure distributed strain in optical fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 2, No. 5, 352-354 (1990).
- [21] T. Kurashima, T. Horiguchi, M. Tateda, "Distributed-temperature sensing using stimulated Brillouin scattering in optical silica fibers", *Optics Letters*, Vol. 15, No. 18, 1038-1040 (1990).

- [22] S. Foaleng-Mafang, J.-C. Beugnot, L. Thévenaz, “Optimized configuration for high resolution distributed sensing using Brillouin echoes”, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, 75032C (2009).
- [23] M. Cirigliano, G. Cattaneo, et al., “Overhead power lines temperature measurements by a fiber optic Raman sensor”, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, 75034P (2009).
- [24] M. A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale, “Use of Fabry-Pérot lasers for simultaneous distributed strain and temperature sensing based on hybrid Raman and Brillouin scattering”, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, 750328 (2009).
- [25] M. Kreuzer, “Strain measurement with fiber Bragg grating sensors”, HBM, Darmstadt, Germany.
http://www.hbm.com/hbm_doc/start.htm
- [26] H. B. Song, T. Suzuki, M. Sako, K. Nonaka, “High time resolution fibre optic sensing system based on correlation and differential technique”, Meas. Sci. Technol., 17, 631-634 (2006).

PUBLICACIONES DEL AUTOR

- [1] A. Bueno, K. Nonaka, S. Sales, “Hybrid interrogation system for distributed fiber strain sensors and point temperature sensors based on pulse correlation and FBGs”, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21, No 22, pp. 1671-1673, 2009.
- [2] A. Bueno, K. Nonaka, S. Sales, “Novel system to interrogate distributed fiber strain sensors and point temperature sensors based on pulse correlation and FBGs”, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, Proc of SPIE Vol. 7503, 75032L (2009).
- [3] A. Bueno, B. Torres, D. Barrera, P. Calderón, S. Sales, “Monitoring of a steel launched bridge construction with strain and temperature FBG sensors”, SPIE Photonics Europe, Brussels (2010).
Pendiente de publicación.

Hybrid Interrogation System for Distributed Fiber Strain Sensors and Point Temperature Sensors Based on Pulse Correlation and FBGs

Antonio Bueno, Koji Nonaka and Salvador Sales, *Senior Member, IEEE*

Abstract— A hybrid interrogation scheme for distributed strain sensors and point temperature sensors is proposed and its feasibility is demonstrated. It exploits the advantages of distributed sensors and point sensors simultaneously. The proposed interrogation scheme uses a wavelength tunable pulse source and wavelength dependent reflectors for region selective sensing. Experimental results confirm its linear response and a resolution of 0.02% of the total dynamic range, which in our experiment it is over 2000 microstrains for sensing regions of around 0.5 meter length. The stability of the measurements is over 99.8%. Finally, the high input power from the signal source and the limited losses from the reflectors allow the usage of a large number of sensors in a fiber.

Index Terms— optical fiber sensors, strain and temperature sensors, pulse correlation, FBG.

I. INTRODUCTION

The monitoring of the possible damage on the civil structures is becoming a growing research field for civil engineers. Optical fiber sensors have shown a good performance for the health monitoring of these structures. Quite a number of sensing techniques have been proposed. These techniques can be sorted into two types depending on the way to measure the physical magnitude: the point and the distributed sensing techniques. The point sensing technique consists in the point measurement of a physical magnitude in a large number of locations with a large number of sensors, whereas distributed sensing technique consists of the measurement along a fibre link that can be as long as several meters or more. The most popular point sensing techniques are the Fiber Bragg Gratings (FBGs) [1] and the Extrinsic Fabry Perot interferometers (EFPI) [2]. Their main drawback is that they miss the degradation measurement between each sensor. On the other hand, the most common distributed sensing techniques are based on Stimulated Brillouin Scattering (SBS) [3], Stimulated Raman Scattering (SRS) [4], Optical Time

Domain Reflectometer [5]. These techniques have the advantage of fewer requirements for fiber preparation, a higher dynamic range in the detectable strain and the possibility of taking measurements in any section of the fiber. However, they require more complex information handling, and they have a slower time response and typically higher optical power input requirement due to the low efficiency of the signal magnitude returns.

Recent quasi-distributed techniques propose to avoid the disadvantages of the previous techniques [6]. Presented in this paper is a simple technique that combines the advantages of the point and distributed sensing techniques using the correlation of a pulse train [7] with the addition of Wavelength Selective Reflectors (WSRs). Distributed strain measurements are obtained in multiple regions by using standard fiber links [7]. Fiber Bragg Gratings (FBGs) are used as WSRs. They permit the separation of the sensing strain regions and also provide an effective sensor to measure the temperature at the desired points [1]. Also, this novel technique does not require expensive components and a high performance has been obtained in terms of signal-to-noise ratio, linearity, resolution and stability.

II. PRINCIPLE OF OPERATION

The interrogation system scheme for point temperature sensors and multi-region distributed strain measurements based on the pulse correlation technique [7] is shown in Fig. 1. The light source is a wavelength tunable laser that generates a pulse train. The pulse repetition rate is determined by the modulation frequency. The pulse train is coupled into two different ports named “*reference port*” and “*measuring port*”. In the measuring port, the pulses pass through an optical circulator and then enter in a cascade of Strain Sensing Regions (SSRs) separated by the Wavelength Selective Reflectors (WSRs). The SSRs are fixed along the structure to monitor the strain changes induced in the structure. The WSRs are released free from the fixed structure. The WSRs change their resonance with variations in temperature acting as a point temperature sensor [1]. The scanning of the wavelength of the pulse source allows the temperature point sensors to be interrogated, also to monitor the different SSRs. In essence, if the pulse is reflected in the WSR1, the pulse round-trip is until it reaches the region SSR1 and it only contains information about the strain changes

Manuscript received June 1, 2009; revised August 20, 2009. This work was supported by the Spanish MICINN through Plan Nacional I+D TEC2007-68065-C03-01, JSPS (B21360182), JST, the High-Tech Research Center of Japan and the European Union through COST Action 299.

A. Bueno and S. Sales are with the ITEAM Research Institute, Universidad Politécnica de Valencia, 46022 Valencia, Spain.

K. Nonaka is with Kochi University of Technology, Tosayamada, Kami-shi, Kochi. 782-8502 Japan.

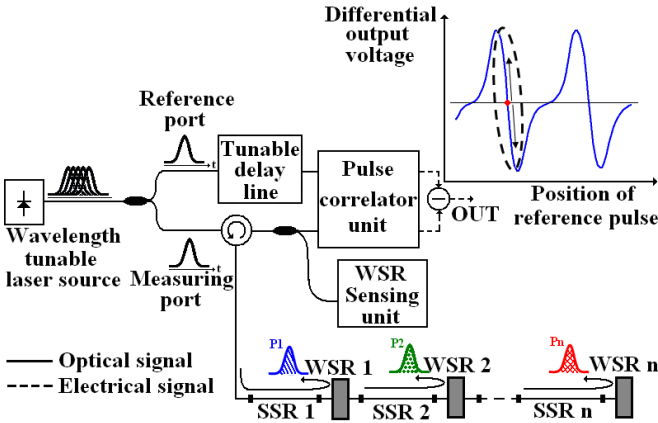


Fig. 1: Scheme of point temperature and distributed strain measurement based on pulse correlation and differential detection technique.

in this region, whereas the reflected pulse in the WSR 2 crosses both SSR1 and SSR2 regions. Using the reflected signals from WSR1 and WSR2, the information of the strain changes in SSR 2 can be retrieved. This scheme can be easily upgraded to the SSR_n region.

The reflected pulses return to reach one input port of the pulse correlator unit. The other input of the correlator unit is fed with the pulses that traverse the reference port. The reference pulses and the measuring pulses arrive at different time position due to the different lengths of the optical paths. A tunable delay line is placed in the reference arm to allow a partial overlap of both train pulses. The tunability range of the tunable delay line has to be half of the inverse of the frequency repetition rate. If the strain in a sensing region is changed, the optical path in the measuring branch produces a time drift between reference and measuring pulse trains and there is a change in the overlapped energy between both train pulses. This change can be monitored by the optical pulse correlation unit [7]. Differential detection technique is used after the pulse correlation unit. The differential detection technique has been chosen because it provides several advantages: it indicates not only the time drift value, but also the drift direction to distinguish compression and elongation. Its resolution is nearly double that of a single channel detection. The differential detection suppresses the impact of the average power fluctuations of the light source. Two Second Harmonic (SH) crystals and two low cost and narrow bandwidth avalanche photodiodes are employed in the pulse correlation unit to efficiently convert the pulses time delays in voltage changes [7]. Thus, low cost electronics can be employed in the receiver unit.

The relationship of the typical differential output voltage is shown in an inset graph in Fig. 1. It has the same rate of the pulse train from the laser source. The most important area of the differential output voltage curve, which is used for sensing, is highlighted inside a dashed oval (Fig. 1). The dot indicates the central position (also known as “decision point”) in order to perform highest excursion and to detect fiber compression and elongation. It is very important to mention that the output

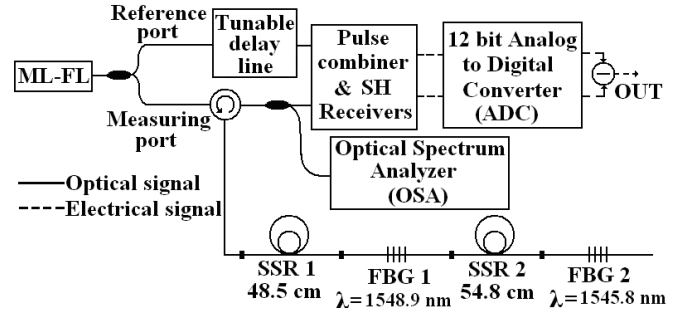


Fig. 2: Experimental setup of pulse correlation and differential technique with wavelength sensing region separation

relationship is linear in this region and it is very useful for sensing applications. Each SSR is adjusted to have its initial value at the central position. This is done by adjusting the tunable delay line for each regions response. The initial values of the tunable delay lines are recorded and used as references. Then, any strain applied is transformed in a change of the output voltage value.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental setup is shown in Fig.2. A Mode-Locked Fiber Laser (ML-FL) has been used as a laser source. The laser source is wavelength tunable and its pulse width can be adjusted between 10 ps and 20 ps. In the experimental setup, a pulse width of 12.9 ps has been used, 3.4 dBm of output power and a frequency of 9.956104 GHz, that implies a 100.4 picosecond pulse repetition rate. To divide the train pulses into reference and measuring ports, a 90/10 ratio optical coupler has been employed.

In the reference port, a delay line has been placed that can be manually adjusted. On the other port, an optical circulator is used to route the pulses to the sensing region and to the correlation unit. Two Fiber Bragg Gratings (FBGs) have been used as a demonstration of WSRs. FBGs central wavelengths are 1548.86 nm for FBG 1 and 1545.81 nm for FBG 2, with 0.26 nm of Full Width at Half Maximum (FWHM) and 80 % of reflectivity in both FBGs. The SSRs have been implemented with two standard single mode fibers of 48.5 cm and 54.8 cm length, respectively. The pulse correlation unit and the dual SH Receivers (SHR) have been connected to a 12-bit Analog to Digital Converter (ADC) to obtain the voltage values of the two single channels. SH-detector’s signal level fluctuations were within the quantized steps, so the resolution of this experimental setup belongs to the ADC, which provides a resolution of 0.02% of the total dynamic range. Finally, the output differential signal of these channels is stored in a Personal Computer. The temperature variations have been sensed by the FBGs using an Optical Spectrum Analyzer (OSA). The OSA can be replaced by a power meter. It only requires the synchronization of the tunable laser source and the power meter.

The interrogation system has been characterized by checking its linearity, stability and resolution. In the first experiment, the

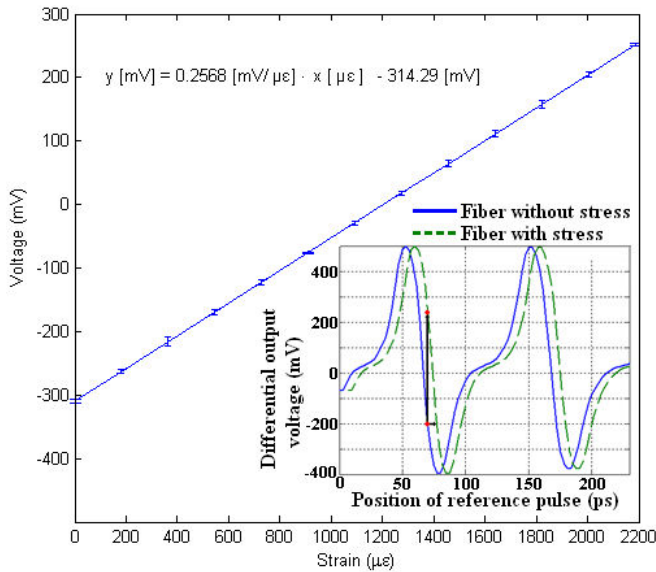


Fig. 3: Differential output voltage when stress is applied to SSR2 with laser source tuned at 1545.8 nm. Subplot shows differential curves of relaxed fiber and 1,2 mm stressed fiber so that a time shift is observed.

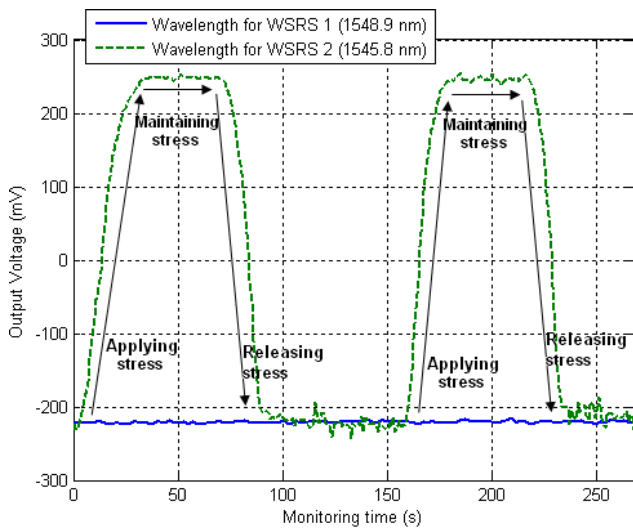


Fig. 4: Output differential voltage with stress applied to the SSR2 using different wavelengths

laser source has been tuned at 1545.8 nm.

Then, some strain has been applied to SSR2 in 0.1 mm steps (182.5 microstrains for a fiber of 54.8 centimeters length) and the differential output voltage values have been obtained. To calculate the strain applied, the first step is to adjust the decision point when SSR2 is relaxed (red point in solid blue line of Fig. 1). Then, any change in the applied strain (elongation or compression) is converted automatically in a change of the output differential voltage. The results are shown in Fig. 3. It can be seen that the sensor has a linear response. The vertical error-bars at each strain measurement point show the maximum range of deviations after dozens of cycles. The stability in the measurements is quite high, fluctuations of less than 0.2% have been observed even in the worst case. In the subplot, it can be observed the time shift in the differential output curve due to the stress applied to the SSR2 region (e.g.

1,2 mm of elongation). When the SSR2 is released, the differential output curve returns to its initial position. The main drawback of the proposed technique is the cumulative error for the SSRn. This can be overcome introducing some SSRs whose measurements do not fluctuate with time, acting as a reference to compensate the errors.

To demonstrate the absence of crosstalk between the two strain sensing regions, the laser source has been tuned to 1545.8 nm to select WSR 2. Then, a stress has been applied in the SSR2. The dashed line of Fig. 4 shows the changes in the output voltage. Later, the laser has been tuned to 1548.9 nm to select WSRS 1 and a similar stress has been applied to the same sensing region (SSR2). No change in the differential output voltage has been detected (solid line) showing the absence of crosstalk.

IV. CONCLUSIONS

A hybrid interrogation system has been presented and demonstrated its feasibility in wide region distributed and selected points monitoring. This interrogation system can be used to sense distributed sensors and point sensors simultaneously using a single wavelength tunable light source. This technique is quite robust because the measurements are based on wavelength shifts and time drifts between the train pulses. The system has the ability to interrogate different distributed sensors at specific regions using wavelength selective reflectors. The number of sensors that can be allocated in one fiber is very high because the proposed system uses a tunable light source with FBGs which have very few losses.

Experimental results confirm the linear response of the proposed technique. The resolution obtained is 0.02% of the total dynamic range, which in our experiment is over 2000 microstrains for sensing regions of around 0.5 meter length. The stability of the measurements is over 99.8%. The maximum strain range that can be observed is limited by the repetition pulse rate and the pulse width. They can be designed to detect a maximum time shift of half of the pulse repetition period.

REFERENCES

- [1] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, "Fiber grating sensors", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1442-1463, 1997.
- [2] V. Bhatia *et al.* "Recent development in optical-fiber based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensing technology", *Smart Mater. Struct.*, no. 4, pp. 246-251, 1995.
- [3] T. Horiguchi, T. Kurashima, M. Tateda, "A technique to measure distributed strain in optical fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 2, no. 5, pp. 352-354, May. 1990.
- [4] D.G. Lancaster, J.M. Dawes, "A pulsed laser source using stimulated Raman scattering and difference frequency mixing: remote sensing of methane in air", *Optics Communications*, no. 120, pp. 307-310, 1995.
- [5] Z. Zhang, X. Bao, "Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of Polarization-OTDR system", *Optics Express*, vol. 16, no. 14, 2008.
- [6] M. Pozzi, D. Zonta, H. Wu, D. Inaudi, "Development and laboratory validation of in-line multiplexed low-coherence interferometric sensors", *Optical Fiber Technology*, no. 14, pp. 281-293, 2008.
- [7] H. B. Song, T. Suzuki, M. Sako, K. Nonaka, "High time resolution fiber optic sensing system based on correlation and differential technique", *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, pp. 631-634, 2006.

Monitoring of a steel incrementally launched bridge construction with strain and temperature FBGs sensors

Antonio Bueno^{1,*}, Benjamín Torres², David Barrera¹, Pedro Calderón², Salvador Sales¹

¹: iTEAM, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia

²: ICITECH, Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022, Valencia.

* anbuemar@iteam.upv.es

ABSTRACT

We present in this paper the results of monitoring the construction process of a steel incrementally launched bridge located at the Kadagua Valley in Bilbao (Spain) with FBG sensors. The installation of FBG strain and temperature sensors was done in order to obtain deformation and temperature variations during the launching operation. The deflection recovery process was also monitored. The setup carried out in the sensors installation process consists of five optical channels (one for each cross section monitored) and a multiplexed structure of nine strain sensor in each optical channel. Temperature sensors were also installed in order to measure temperature variation of the steel structure but also for thermal compensation for the FBG strain sensors. The installation of the optical sensors is explained in detail including cleaning, bonding and connection of the almost fifty sensors installed in this structure. We also are going to explain the behaviour of the steel structure by presenting several figures showing the strain values for each sensor taken in real time during the launching of the bridge.

Keywords: FBG sensor, strain optical sensor, temperature optical sensor, incrementally launched bridge

I. INTRODUCTION

The monitoring of damage in civil structures has always been an interesting field for civil engineers. In fact, they created a new term called “Structural Health Monitoring” (SHM) to define a system that provides information on demand about any significant change or damage occurring in the structure. Such an interest is due to the high cost of the maintenance of a structure since monitoring methods used today are based on periodical visual inspections trying to detect cracks or physical degradations. Thus, a source of information is needed to achieve a real structural health monitoring system.

To obtain this information from the structure, sensor elements have to be installed all over the structure to collect the data that will be processed in order to obtain the information about the structure behavior. Traditionally, electrical sensors have been used for structural monitoring, but optical technology has playing an important role in the past two decades, particularly since fiber Bragg gratings (FBG) were firstly used as a strain and temperature sensor¹. Optical fiber sensor have many advantages compared with electrical sensors: they are light weight, immune to electromagnetic interference (EMI) and resistant to harsh environments. Specifically, FBG sensors have also some advantages from other optical fiber sensors like easy fabrication and installation and high speed of interrogation.

Recently, many structures have been successfully monitored with FBG sensors. Structures such as foundation piles of a building², railway bridges³ or even a nuclear reactor core⁴. In this paper, the authors are going to show the health monitoring system of a civil bridge with FBG sensors during the bridge construction process.

II. PROJECT DESCRIPTION

The structure monitored in this work is a steel incrementally launched bridge located at Kadagua Valley near the city of Bilbao in Spain. This bridge is placed above Kadagua river and some other existing roads and railways and it will be used for terrestrial vehicles to cross the valley. The construction of the bridge started in April of 2008 and the estimated total duration is 24 months.

Total length of the bridge will be 364,12 meters and it is going to be launched in phases due to the reduced working area that allows to construct only 50 meters at once. Monitoring phase was the bridge launch between piles P1-2 and P1-3. An additional structure, known as “nose” was constructed at the end of the bridge in order to help the bridge to lean on the piles as only 50 meters can be constructed at once and the distance between piles are higher than this. Initial and final launch situations are shown in figure 1.

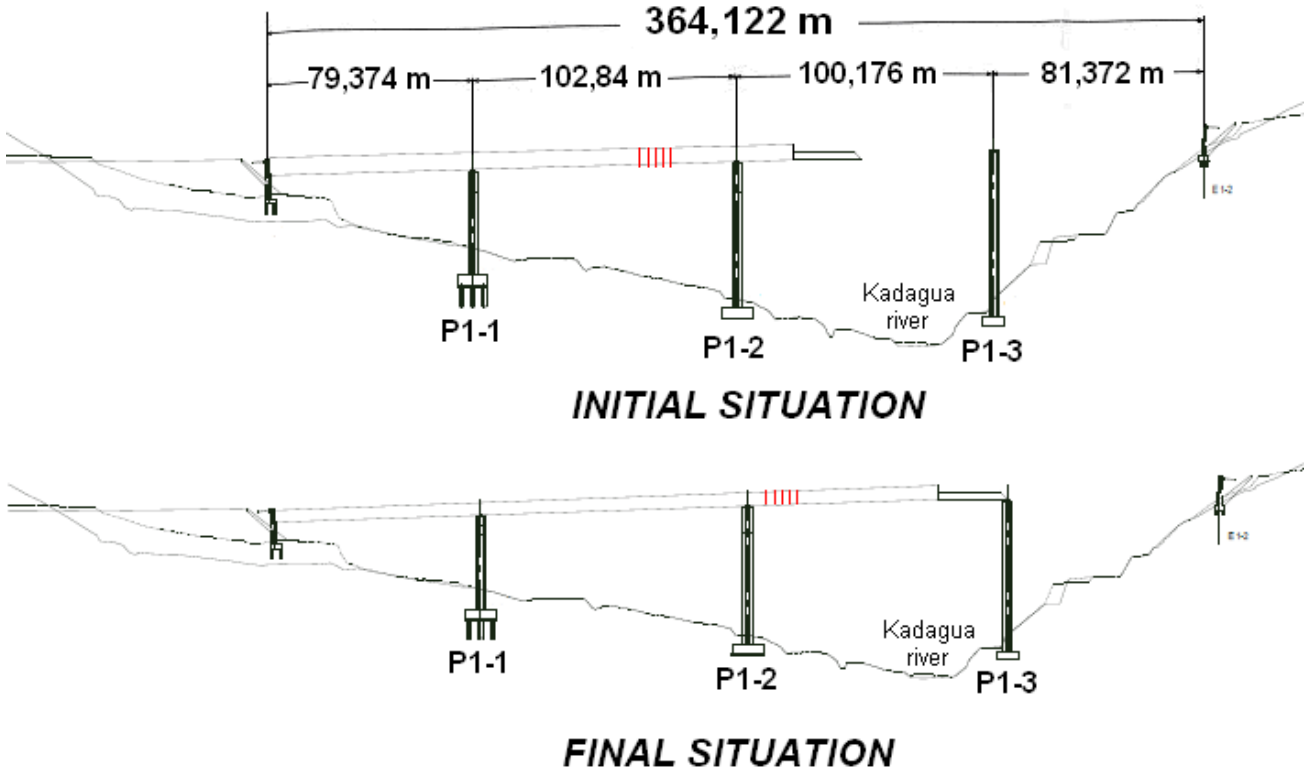


Figure 1: Initial and final situation for second and third bridge launch.

In the initial situation of this launch, the bridge nose lean on the pile P1-2 as it can be seen on the upper part in figure 1. The lower part of this figure shows the final situation, where the bridge is projected in a 100,176 meters long cantilever, including nose. Final situation in this launch is the worst case for the bridge in the whole launching operation. The main reason is that in this situation there is a 100,176 meters long cantilever and in addition the length of the constructed bridge before the support in the pile P1-2 is more than 180 meters. Once the bridge reaches the pile P1-3 it starts a deflection recovery process to compensate the existing cantilever and to lean the bridge on this pile.

The objective of this project is to monitor up to 5 cross-sections of the bridge during the launching operation. These sections can be seen depicted (vertical lines) in figure 1 for initial and final situations. They are the nearest sections to the pile P1-2 when the bridge is reaching pile P1-3. The main reason to monitor these sections is because the sections just over the pile P1-2 have more stiffness than the others ones. In each section 9 FBG strain sensors were installed in order to obtain strain values in those locations where the strain measurements allow us to understand the behavior of the bridge. In figure 2 it can be seen on the left the schematic cross-section of the bridge with the sensor locations and on the right a real picture of the bridge's cross-section.

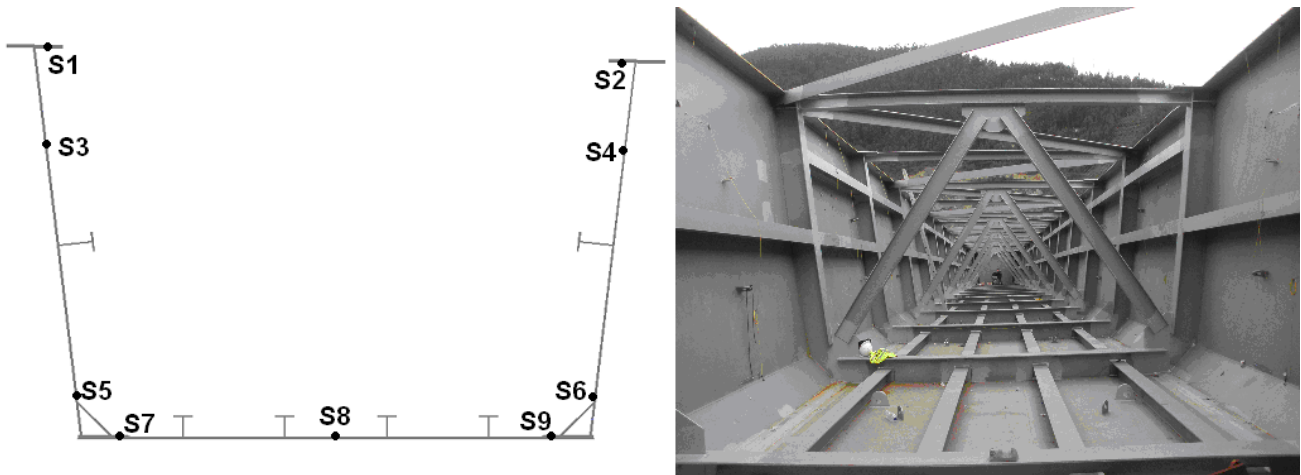


Figure 2: Cross-section of the bridge. Left: Schematic with sensor locations. Right: Real picture.

The sensors installed are supposed to measure strain values of compression and traction depending on the sensor location. For example, sensors 1 to 4 (see figure 2 on the left) will obtain traction strain values as the structure is supported on its base between piles P1-1 and P1-2 and the monitored sections are also located between these piles. On the other hand, sensors 5 to 9 will obtain compressive strain values. Once the structure reaches the pile P1-3, it starts a deflection recovery process that will compensate the cantilever, and so an inversion in the strain (compression to tensile and vice versa) will occur.

It is important to note that this is a steel structure, thus a maximum value of strain has not to be reached in order to keep safe the bridge construction process. Strain value for steel yield is around $2000 \mu\epsilon$ therefore strain values measured from the sensor monitoring system would not exceed this limit value. That's why it is a key factor to monitor in real time strain values from the bridge during launching operation in order to avoid the collapse of the structure and to assure physical integrity of the construction workers.

III. ENGINEERING DESCRIPTION

The sensors installed on the structure were based on Fiber Bragg Gratings (FBG). These FBG sensors were fabricated at iTEAM research institute with the phase mask technique⁵ with up to 12 different phase masks. A Gaussian apodization was applied in FBG fabrication process. The central wavelengths for the fabricated gratings were located between 1518 and 1573 nm inclusive, and spaced 5 nm one between each other. The first nine central wavelength sensors were fabricated as strain sensors, and the rest of them as temperature sensors.

Sensor installation strategy was to use a single optical fiber to connect sensors in each cross-section, taking advantage of FBG wavelength multiplexing possibility. Since up to 9 strain sensors were installed in each section, we installed one of each central wavelength FBG strain sensor and 3 temperature compensation sensors in key locations per section.

For sensor interrogation, we used a commercially available optical sensor interrogator. This device has up to 4 optical channels with a wavelength range of 1510 to 1590 nm. Since we needed to monitor 5 bridge sections and each section need an exclusive use of a single optical channel, we finally used a channel extender in order to obtain a total number of 16 optical channels.

Another important issue to take into account is that once the bridge launching operation starts, it is absolutely forbidden for any person to stay inside the bridge steel structure. That's why we connected the optical sensor interrogator to a wireless router to access sensors data from outside the bridge structure. Wireless coverage of the router was around 500 meters, long enough to access the sensor monitoring system information from a safe location. In addition, a personal

computer was wired to the router acting as a local data storage device. The final setup for the monitoring system is depicted in figure 3.

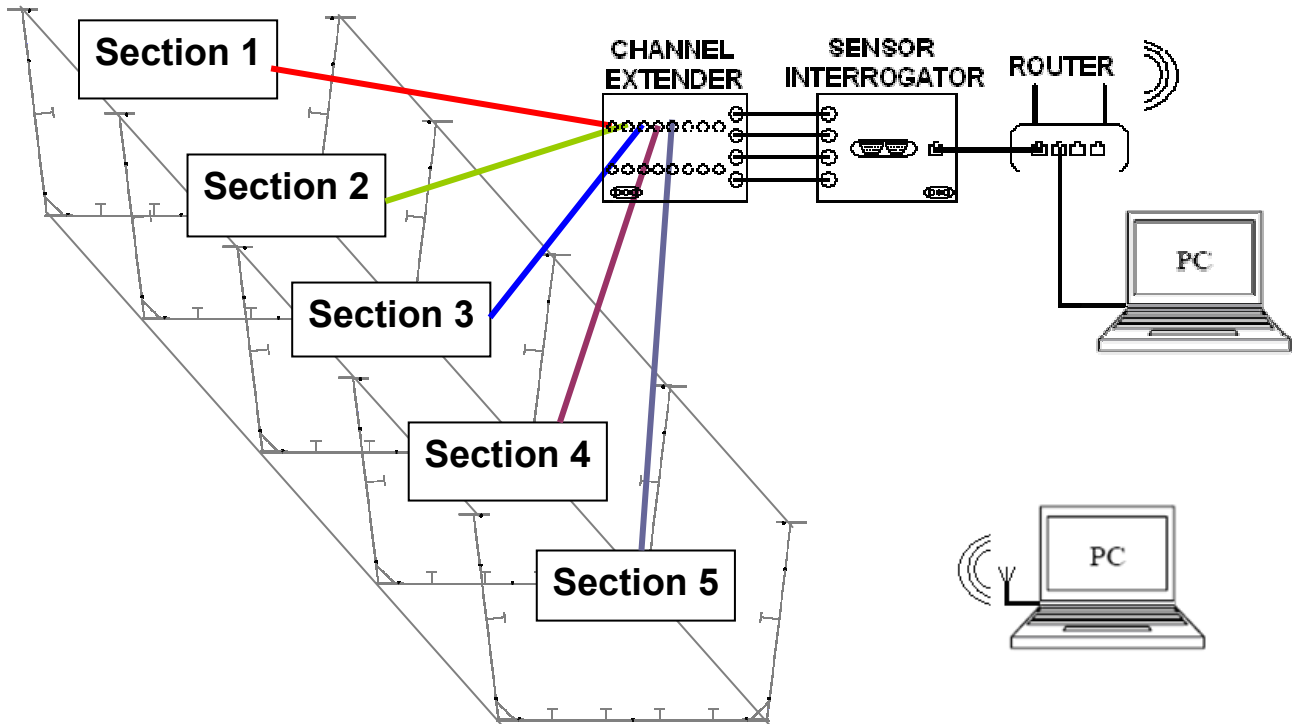


Figure 3: Final setup for structural health optical sensor monitoring system developed to monitor the bridge launch.

In figure 3, the section 5 is the nearest section to the end of the structure and section 1 is the nearest section to the pile P1-2 in the launch final situation. That is the reason why section 1 is expected to measure higher strain values than the other ones.

Strain and temperature optical sensors were installed in two different days due to the high number of sensor required for the entire monitoring system. Procedure of sensor installation was as follows:

- Preparation of the bonding surface: Steel surface of the bridge was painted during its construction to avoid metal oxidation. It was necessary to remove the huge paint layer with a radial saw to assure the maximum strain transfer from the steel structure to the optical sensor⁶. In addition, a flat surface is obtained from the metal erosion and thus we achieve an improvement in the later bonding process.
- Adhesive and sensor preparation: Once the surface is ready, the next step is to prepare the sensor. Firstly the sensor is transferred to a 15 cm length tape with the bonding to the steel structure side up. Adhesive preparation requires mixing two compounds vigorously for a couple of minutes, and then it is ready to apply to the sensor surface. It is important to apply enough adhesive to provide sufficient coverage once the sensor is bonded for proper adhesion. Insufficient adhesive will lead to an incorrect strain measurement but on the other hand, too much adhesive will decrease the strain transfer form the steel structure to the sensor. Right quantity of adhesive was obtained from several trial and error iterations in laboratory tests.
- Sensor bonding to the surface: The final step is to bond the prepared sensor to the steel surface. The sensor has to be placed in the desired point very smoothly and gently. Once the sensor is in contact with the surface, it must be applied firm and steady pressure in the whole sensor length for 10 seconds until the sensor is well consolidated. Later, pressing the tape surrounding the sensor helps to fix it during the

adhesive curing. This adhesive curing depends on the environmental conditions (temperature mainly) but entire process takes no longer than 12 of hours. The slow curing time of this adhesive avoid residual stress that usually led to an optical spectrum deformation⁷.

When all the sensors are properly bonding, they can be connected as mentioned before. Taking advantage of wavelength multiplexing, it is possible to connect sensors serially in the same section. As a result, five optical channels coming from five structure cross-sections carrying information of more than 50 sensors were available. Optical spectrum of every single sensor is shown in figure 4.

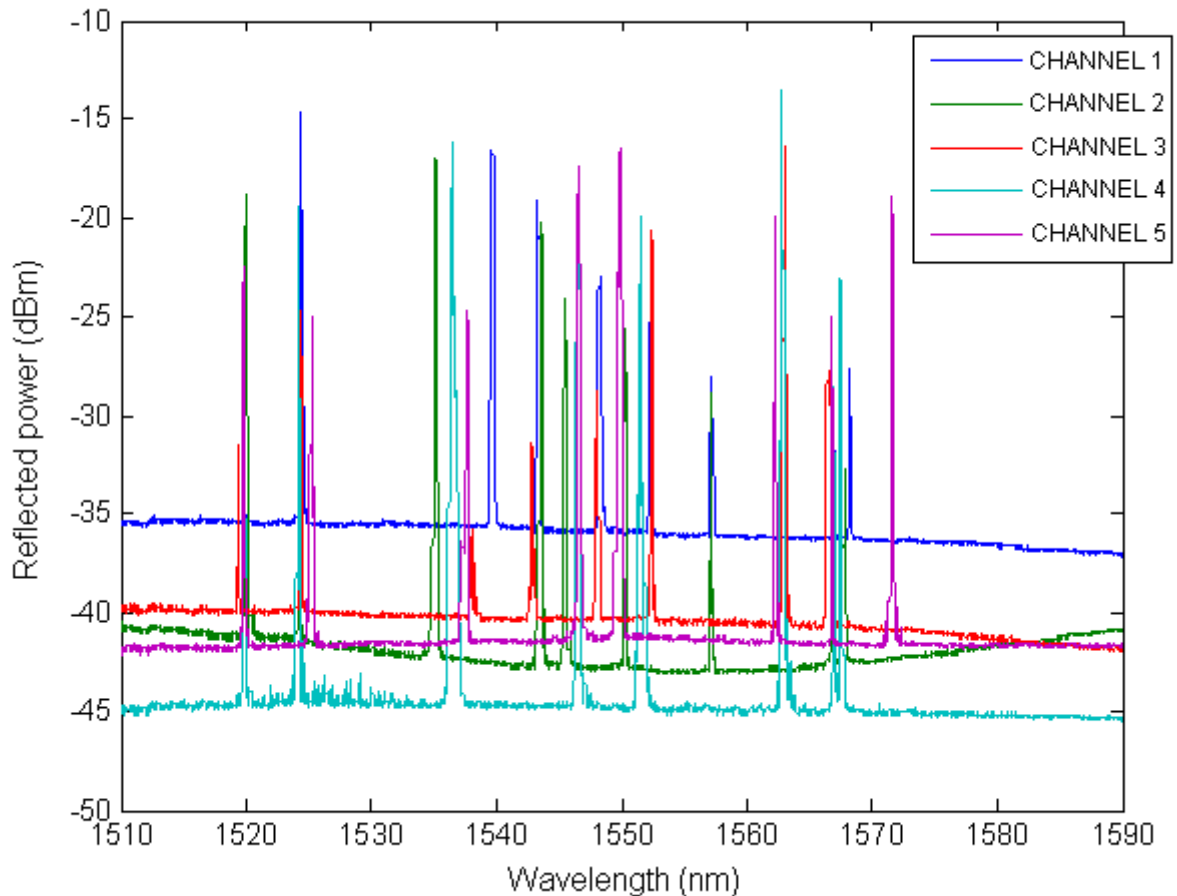


Figure 4: Optical spectrum of every single sensor installed in the steel bridge.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

The data collected from launching operation was extremely big, as information from more than 50 sensors was retrieved for more than 46 hours. Data save interval was set to 1 minute, time enough to detect substantial strain changes in the structure because launching speed was around 5 meters per hour due to the delicate nature of the operation. We are going to show only the results coming from sections 1 and 5 of the bridge since results obtained from the rest of the sections are similar.

It can be seen in figure 5 the strain curves obtained from the sensors installed in section 1. Sensor numeration is based in the schematic of the cross-section of the structure shown in figure 1 on the left. Thus, sensors numbers 1 and 2 are installed in the upper part of the structure, sensors 3 and 4 are the sensors installed at a medium structure height and sensors 5 to 9 were installed at the bottom of the structure. The monitoring system was continuously collecting data, night

included. Night monitoring periods are clearly identifiable because strain values remain constant for several hours. In particular these night periods are between hours 8,5 and 21,8 for the first night and between hours 32,3 and 46,2. It can be proved that the sensors are working properly as no strain change has been recorded when the launching operation was stopped.

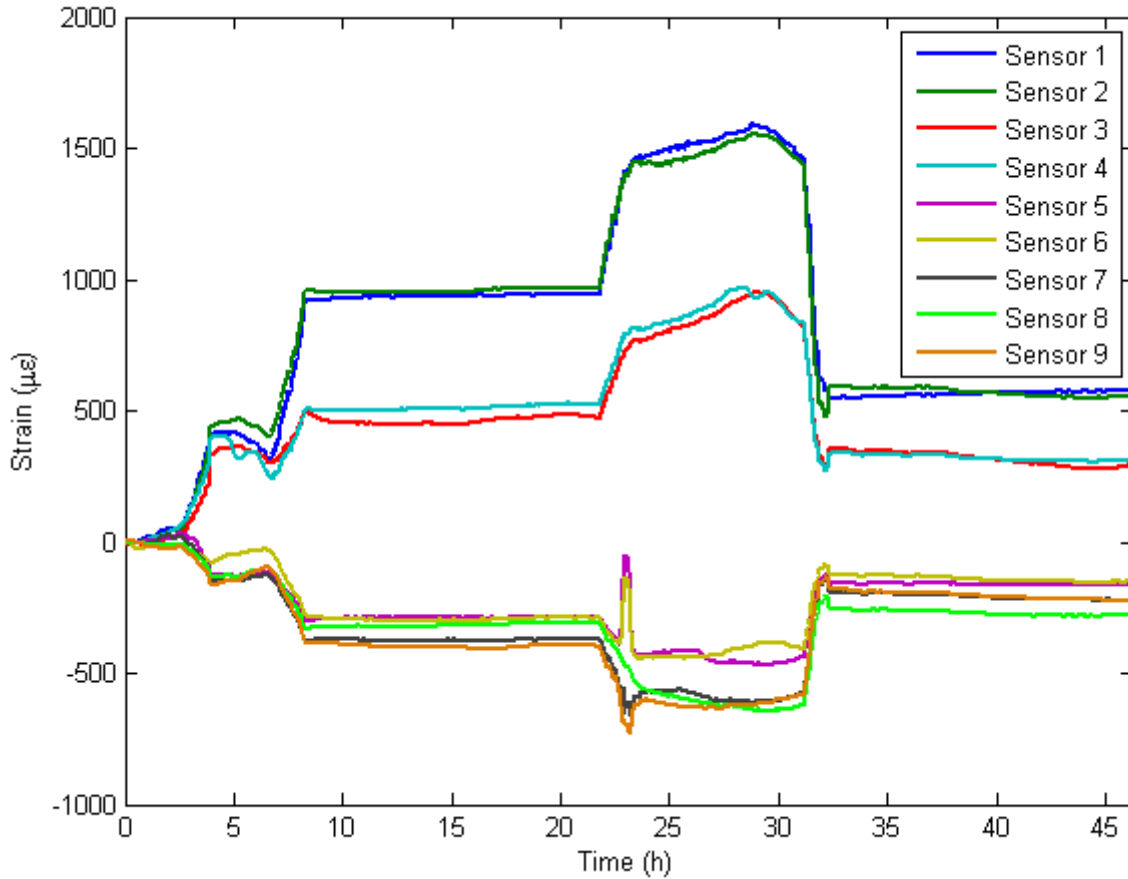


Figure 5: Strain curves obtained for the sensors installed in section 1 during the bridge launch (nights included)

Sensors 1 to 4 obtained tensile strain values and the sensors that registered the maximum strain values were sensors 1 and 2 as expected. Maximum strain value for sensor 1 was 1594,3 $\mu\epsilon$ and for sensor 2 was 1556 $\mu\epsilon$. These two sensors registered the maximum strain due to their location because the upper part of the structure has the maximum deflection when the structure is projected in a cantilever over the pile P1-2, as the structure is leaned on its base in this pile. Sensors 3 and 4 also registered high strain values but lower than sensors 1 and 2. Maximum strain value for sensor 3 was 954,1 $\mu\epsilon$ and for sensor 4 was 970,3 $\mu\epsilon$.

Regarding the sensors 5 to 9, it can be seen compressive strain values and the sensors that registered the maximum compressive strain values were sensors 7,8 and 9 because they were installed at the bottom of the structure. Maximum compressive strain value for sensors 7,8 and 9 were 658,5 $\mu\epsilon$, 645,9 $\mu\epsilon$ and 728,1 $\mu\epsilon$ respectively. Sensors 5 and 6 recorded a maximum compressive strain value of 467,9 $\mu\epsilon$ and 448,3 $\mu\epsilon$ respectively. Concerning sensors installed at the bottom of the structure, it can be seen in figure 4, anomaly behaviour around hour 23. Sensors 5 and 6 experienced a traction strain peak whereas sensors 7 and 9 experienced a compression peak. It is due to the support of the base of this monitored section on the hydraulic jacks located on the pile P1-2.

Finally, figure 5 shows around hour 31 the result of the deflection recovery process. In such a process the structure is raised up in order to be leaned on the pile P1-3. The previous deformation of the structure is compensated by recovering the initial deflection. Upper sensors (1 to 4) get compressed whereas lower sensors (5 to 9) get tensiled. Not all the strain is compensated as the structure is now supported on piles P1-2 and P1-3 and the structure is deformed due to its own weight.

As a remark, it is important to notice that the maximum strain value registered by any sensor is less than $2000 \mu\epsilon$. Maximum strain value was $1594,3 \mu\epsilon$ and it was obtained by sensor 1 in section 1. This strain value is the 79,7 % of the steel yield strain, and that means that in fact this bridge launch phase was a delicate maneuver.

Depicted in figure 6 are the strain curves for the sensors installed in section 5, which is the first monitored section from the end of the structure. The shapes of the curves are quite similar to the curves shown in figure 5 although maximum strain values of compression and tensile are lower.

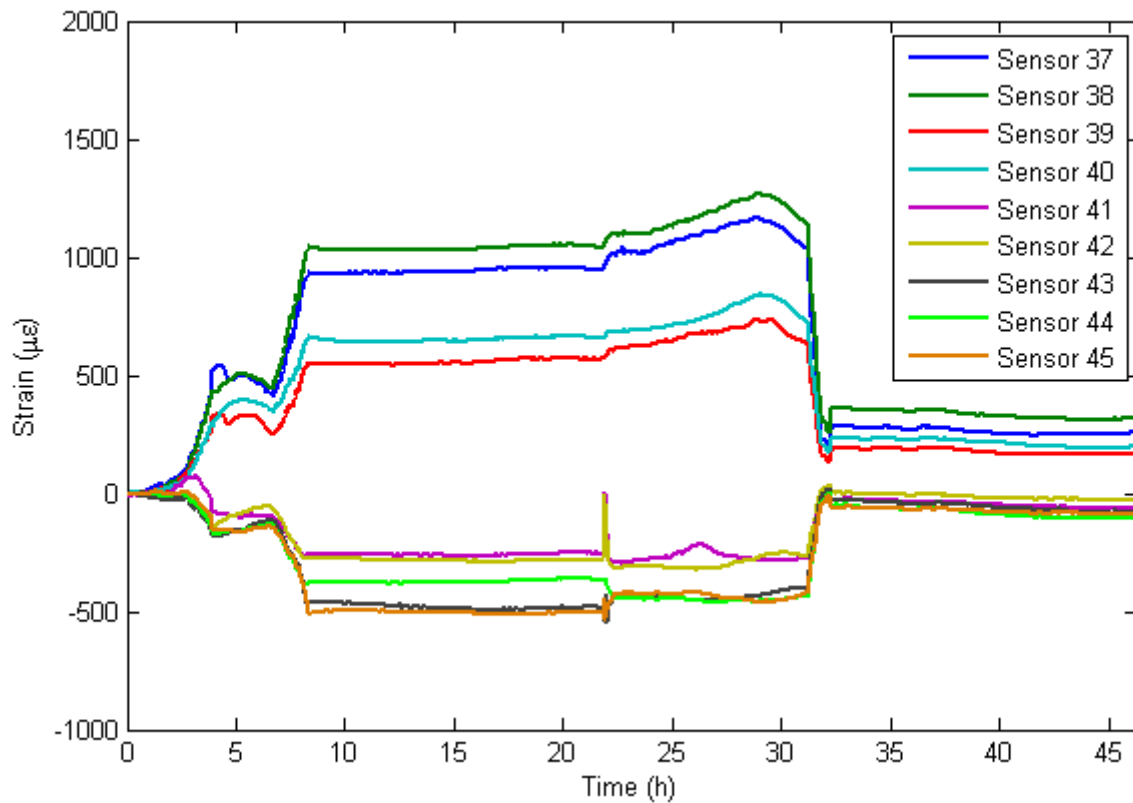


Figure 6: Strain curves obtained for the sensors installed in section 5 during the bridge launch (nights included)

V. CONCLUSIONS

A large number of FBG sensors were successfully installed in the surface of a steel structure. Sensor preparation and bonding were first tested in laboratory in order to make them controllable and repeatable for sensor installation in a real construction. The FBG wavelength multiplexing is very suitable to save tenths of meters of optical fiber cable, allowing a simple connection setup. Optical interrogator and channel extender are simple handling instruments because they only need a personal computer connected to them in order to collect de data. An additional feature was added to the monitoring system consisting in the wireless connection with a personal computer to enable real time data consulting from outside the structure.

As a result of the data extracted from the strain monitoring system and compared with theoretical assumptions we can conclude that the FBG optical sensors installed in the steel structure worked properly. The results show a good agreement with the theoretic behavior of the cross-section of a steel structure during its launching. The sensor reliability was demonstrated by maintaining the data storage during the night since no strain changes were observed.

The structure health monitoring system resulted as a very useful tool to control the whole launching operation by taking real time data from the sensors installed. A really high number of strain values were recorded by the sensors net installed in the critical sections in order to avoid the structure collapse. Strain values were higher than expected but the structure integrity was always kept.

REFERENCES

- [1] Meltz, G., Morey, W. W., Glenn, W. H., Farina, J.D., "In-fiber Bragg-grating sensors", Proc. OFS'88, London, England, 163-166 (1988).
- [2] Kister, G., et al., "Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors", Engineering Structures 29, 2048-2055 (2007).
- [3] Kerrouche, A., et al., "Field tests of fibre Bragg grating sensors incorporated into CFRP for railway bridge strengthening condition monitoring", Sensors and Actuators A 148, 68-74 (2008).
- [4] Fernandez, A., et al., "Temperature monitoring of nuclear reactor cores with multiplexed fiber Bragg grating sensors", Opt. Eng. 41(6), 1246-1254 (2002).
- [5] Hill, K. O., "Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask," Appl. Phys. Lett., vol. 62, 1035-1037 (1993).
- [6] Wan, K. T., Leung, C., Olson, N., "Investigation of the strain transfer for surface-attached optical fiber strain sensors", Smart Mater. Struct. 17, 1-12 (2008).
- [7] Kuang, K.S., et al., "Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials", Composites Science and Technology 61, 1379-1387 (2001).