

DESARROLLO DE UN MÉTODO DE CALIBRACIÓN DE INTERROGADORES DE REDES DE BRAGG EN FIBRA ÓPTICA

Pedro Salgado*, María Luisa Hernanz-Sanjuán, Sonia Martín López y Pedro Corredera
Instituto de Física Aplicada. (CSIC). C/ Serrano 144, 28006 Madrid (España)
Tel:+34 915 618 806, Fax:+34 914 117 651 e-mail: pedro.salgado@ifa.cetef.csic.es
* Instituto Mexicano del Petróleo (MP). México D.F. (México)

Resumen: Se presenta una técnica de calibración absoluta y relativa de la longitud de onda medida para interrogadores de redes de Bragg de aplicación en sensado óptico. La técnica de calibración se basa en la comparación directa de la longitud de onda reflejada por un filtro sintonizable y un espejo de fibra óptica con la medida por el interrogador de redes de Bragg. Para la aplicación de la técnica se ha calibrado en valor absoluto y relativo el filtro sintonizable unido al espejo. El artefacto diseñado se ha aplicado a la calibración de dos tipos diferentes de interrogadores de redes de Bragg: un interrogador estático, que mide la longitud de onda como el valor de pico de la señal reflejada por un láser sintonizable, y un interrogador dinámico que mide la longitud de onda como la diferencia entre las potencias medidas por dos detectores filtrados por un filtro de borde. Como resultados se han obtenidos que la técnica de calibración absoluta tiene una incertidumbre de ± 88 pm, debido fundamentalmente a la anchura espectral del filtro, mientras que la calibración relativa tiene una incertidumbre de ± 3 pm, dominada por la incertidumbre en la calibración del interferómetro de referencia del Departamento de Metrología del Instituto de Física Aplicada del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (DM-IFA-CSIC).

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la fotónica y la optoelectrónica en los últimos años ha conducido a un espectacular mejora de la calidad, sensibilidad y margen dinámico de los sensores de fibra óptica, convirtiéndolos en unos sustitutivos ideales de los sensores tradicionales utilizados en medidas de rotación, aceleración, campos eléctricos y magnéticos, temperatura, presión, vibración acústica, posición, humedad, sustancias químicas, etc. Las principales ventajas de los sensores de fibra óptica radican en que se trata de técnicas de medida que requieren de un espacio mínimo, suelen ser no invasivas y se controlan de forma remota, pueden trabajar en entornos hostiles, y los dispositivos son de bajo peso, flexibles y son inmunes a las interferencias electromagnéticas.

De entre los sensores de fibra óptica desarrollados en los últimos años las redes de Bragg son uno de los más utilizados y de uso más prometedor, por su facilidad de integrar en la propia fibra y la posibilidad de multiplexar en longitud de onda decenas de sensores en una única fibra [1].

Una red de Bragg (en adelante FBG-Fibre Bragg Grating) es un trozo de la propia fibra óptica que en

su núcleo se ha grabado una variación de índice periódica que actúa como una red de difracción, de forma que refleja hacia atrás una única longitud de onda (λ_B). Esta longitud de onda reflejada se relaciona con la condición de Bragg como: $\lambda_B = 2n_e \Lambda$, donde n_e es el índice de refracción efectivo núcleo/revestimiento de la fibra y Λ es el periodo de la red (ver *Fig. 1*). Las redes de Bragg se fabrican de diversos tipos dependiendo de la aplicación específica que se les vaya a dar. De forma general se clasifican en redes de periodo largo y corto, y pueden fabricarse en fibras estándar de telecomunicaciones, en fibras mantenedoras de polarización y en fibras de cristal fotónico. La longitud de la parte de fibra óptica donde se graba la red de Bragg para uso en sensores suele ser de entre 5 a 10 mm [1] y [2].

La longitud de onda reflejada por la red de Bragg cambia en una magnitud ($\Delta\lambda_B$) linealmente con el "strain" y la temperatura (en un cierto rango de medida). FBG actúan como sensores haciendo que la magnitud física a sensar actúa sobre la red de Bragg provocando un alargamiento de ésta y corrigiendo el efecto de la temperatura.

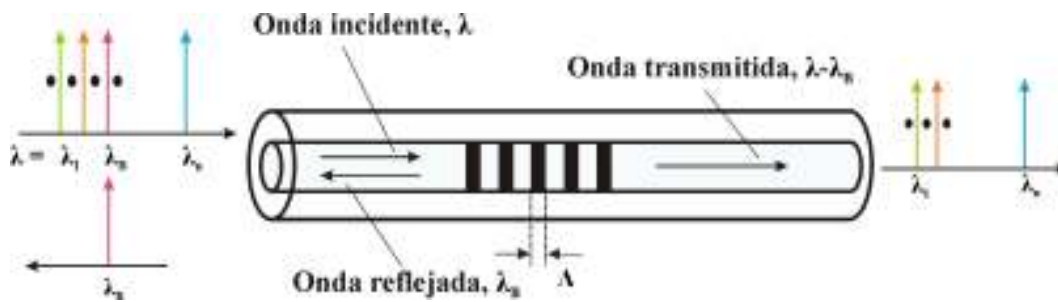


Fig. 1 Representación esquemática del funcionamiento de una red de Bragg

Aplicando este principio de funcionamiento se han desarrollado numerosos dispositivos sensores como hidrófonos, magnetómetros, giróscopos, acelerómetros, extensómetros, etc... En todos ellos la técnica de detección que se usa para la monitorización con redes de Bragg es la medida del desplazamiento de la longitud de onda que se produce cuando actúa la magnitud física a medir.

Los instrumentos de medida de las FBG, también llamados interrogadores, en esencia constan de una fuente de iluminación, un detector, un sistema de discriminación de la longitud de onda y un conjunto de funciones para el procesado de la señal. Dependiendo de las necesidades del dispositivo de sensado que se pretende interrogar (extensómetro o acelerómetro, por ejemplo) el interrogador será de respuesta rápida (> 1 muestra/s, en adelante denominaremos como interrogadores dinámicos) o de respuesta lenta (< 1 muestra/s, en adelante estático). Como norma general los interrogadores que realizan barridos de longitud de onda tendrán una respuesta dinámica pobre y no superarán la tasa de muestreo de 1000 muestras/s (son los usados por ejemplo para la medida de tensiones y deformaciones de materiales), sin embargo los instrumentos que fijan la banda de longitudes de onda del interrogador y disponen de detectores rápidos (de ancho de banda superior a 1 MHz) que son capaces de tener respuestas dinámicas de varios kHz (estos interrogadores se utilizan por ejemplo en los acelerómetros o en hidrófonos).

En esta contribución se presenta el desarrollo de una técnica de calibración útil para una gran mayoría de estos interrogadores comerciales

2. TIPOS DE INTERROGADORES DE REDES DE BRAGG

Además de diferenciarse por la frecuencia de muestreo, los interrogadores de redes de Bragg se diferencian por la forma de interrogar los sensores.

Todos ellos en esencia constan de una fuente de iluminación, un detector, un sistema de discriminación de la longitud de onda y un sistema de procesado adecuado de la señal. De forma general son de tres tipos [3]: los basados en un láser de emisión monocromática y sintonizable que se refleja en la FBG y que se detecta en un detector de espectro ancho; los basados en una fuente de espectro ancho (LED superluminiscente –ELED o emisión espontánea de un amplificador de Er –ASE) y la potencia reflejada por la FBG se detecta con un detector con selección de longitud de onda (analizador de espectros ópticos- OSA, detector con filtro de espectro estrecho sintonizable, Fabry Perot, o filtro interferencial, o por varios detectores filtrados con filtros de borde); finalmente los que detectan la reflexión en la FBG mediante la interferencia de la señal emitida por una fuente y la reflejada en la propia FBG.

Para la calibración de los interrogadores los fabricantes ajustan sus equipos mediante la comparación con un OSA calibrado [4], sobre una FBG similar a la usada como sensor. Este tipo de calibración tiene dos problemas: la dificultad de calibrar cuando el interrogador usa un láser sintonizable o un interferómetro que barren la FBG a velocidades superiores a los OSA, y por otra parte, en el caso de los basados en la medida de la potencia óptica reflejada mediante un filtro y detector, no se evalúan las posibles variaciones de la forma de la FBG y su influencia en la longitud de onda medida.

3. DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE CALIBRACIÓN

La técnica de calibración diseñada pretende su aplicación extensiva a todos los posibles interrogadores de FBG tanto en la medida absoluta de la longitud de onda como en la medida de las variaciones de la longitud de onda respecto de una inicial (medida relativa).

El patrón utilizado está compuesto por un filtro sintonizable (JDSU MAPF+1GGP01FA) unido a un espejo de fibra óptica que simulan una red de Bragg de 0,175 nm de anchura espectral (FWHM: Full Width at Half Maximum), similar a las FBG usadas habitualmente como sensores. La anchura espectral del filtro sintonizable usado es de 0,250 nm, sin embargo al usarse en reflexión mediante el espejo, el valor de la anchura espectral a mitad de altura se afina pasando a ser de 0,175 nm. Este artefacto de calibración puede ser sintonizado pm a pm en todas las longitudes de onda desde 1420 a 1630 nm (Fig. 2).

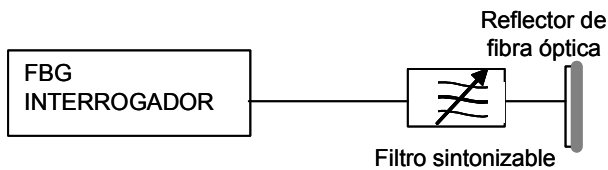


Fig. 2.- Dibujo esquemático de la técnica de calibración usada

Las ventajas del esquema de calibración propuesto son: la red de Bragg que forma el filtro sintonizable mas el espejo tiene forma constante a lo largo de todo el espectro y no se deforma por torsión o tensión, como sucede a las redes de Bragg. La forma de la red de Bragg simulada por el artefacto puede verse en Fig. 3. Como puede verse la red simulada es simétrica respecto del centro, con forma gaussiana (que permite la determinación unívoca del pico), con una anchura espectral a mitad de altura de 0,175 nm y la influencia de los lóbulos laterales de la red de Bragg (ver figura insertada en Fig. 3) es inferior a 40 dB respecto del pico de la señal.

Distinguimos dos tipos de calibración para los interrogadores: *calibrado absoluto*, en el que se determina el error entre la longitud de onda indicada por el interrogador y la longitud de onda real, y *calibrado relativo* que determina la diferencia entre la variación de longitud de onda medida en el interrogador respecto de una longitud de onda inicial y las variaciones reales de ésta. El *calibrado relativo* es el que se precisa en los interrogadores FBG ya que la diferencia de longitud de onda es la que se relaciona con la magnitud física a sensar

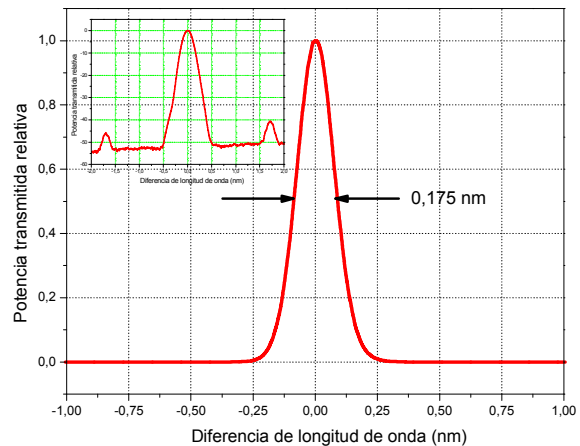


Fig. 3.- Forma y anchura espectral de la red formada por el filtro sintonizable y el espejo. En el dibujo insertado se muestra la misma en escala logarítmica resaltando la relación señal ruido de la red formada.

El método de calibración, en ambos casos (absoluto y relativo), consiste en comparar la longitud de onda de referencia λ_{REF} seleccionada con un filtro sintonizable calibrado, con la longitud de onda λ_{TEST} medida por el interrogador. El factor de calibración para cada longitud de onda será, en el caso de la calibración absoluta:

$$K_{\lambda} = \lambda_{TEST} - \lambda_{REF} \tag{1}$$

y, en el caso de la calibración relativa

$$\begin{aligned} \Delta K_{\lambda} &= \Delta \lambda_{TEST} - \Delta \lambda_{REF} = \\ &= (\lambda_{TEST} - \lambda_{0(TEST)}) - (\lambda_{REF} - \lambda_{0(REF)}) \end{aligned} \tag{2}$$

Hay que aclarar que las longitudes de onda definidas en las fórmulas (1) y (2) pueden ser medidas de diferente manera por los interrogadores dependiendo del fabricante. Por ejemplo, algunos de ellos usarán el valor de pico de la señal medida y otros usarán el valor medio de la distribución de potencias medida. Para nosotros la longitud de onda de referencia se obtendrá como el valor promedio de la distribución de potencia transmitida por nuestro filtro, que es simétrico y con forma gaussiana para eliminar este tipo de errores, todas las longitudes de onda medidas y tratadas en este documento son referidas a través de los patrones de calibración del Departamento de Metrología del Instituto de Física Aplicada del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (DM-IFA-CSIC).

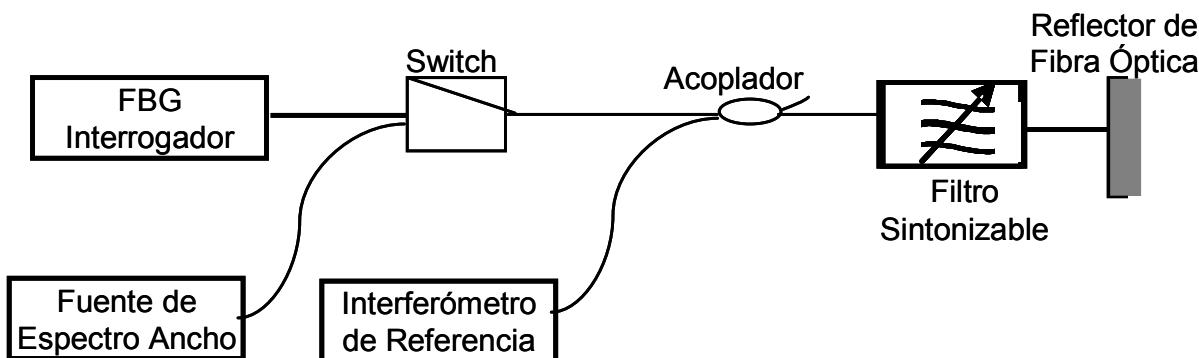


Fig. 4.- Dibujo esquemático de la técnica de calibración con referencia absoluta

El artefacto de calibración (filtro sintonizable y espejo) se calibra con el procedimiento de calibración de analizadores de espectros ópticos y medidores de longitud de onda del Dpto. de Metrología del Instituto de Física Aplicada del CSIC (DM-IFA-CSIC) [4, 5]. La calibración de este artefacto puede hacerse simultáneamente a la calibración del equipo a medir, introduciendo el esquema de la Fig. 4. En este esquema se introduce una fuente de espectro ancho (por ejemplo la señal espontánea de amplificadores EDFA de banda C y L, o un ELED) a través de un switch de fibra óptica, para que alternativamente podamos medir la longitud de onda del artefacto de calibración con nuestro OSA o interferómetro de referencia y con el equipo bajo test.

La incertidumbre en la determinación del factor de calibrado absoluto está afectada por:

- la resolución de muestreo del interrogador
- la resolución de lectura del filtro sintonizable
- la anchura a mitad de altura de la red medida (considerada como una distribución gaussiana)
- la incertidumbre en la calibración absoluta del filtro sintonizable.

La incertidumbre obtenida considerando estos factores para la calibración absoluta del filtro sintonizable es de $\pm 87,5$ pm [6], dominada por el ancho espectral óptico del mismo.

La incertidumbre en la determinación del factor de calibrado relativo está afectada por:

- la resolución de muestreo del interrogador
- la resolución de lectura del filtro sintonizable
- la incertidumbre en la calibración relativa del filtro sintonizable

La incertidumbre en la calibración relativa en las condiciones controladas de laboratorio es de ± 3.1 pm, debida fundamentalmente a la incertidumbre en la medida de la longitud de onda del DM-IFA-CSIC en la tercera ventana de comunicaciones (1550 nm).

La calibración absoluta del filtro sintonizable en el rango de longitudes de onda de aplicación para los interrogadores de redes de Bragg muestra en la Tabla 1.

Tabla 1.- Resultados de la calibración absoluta del filtro sintonizable

| λ_{TEST} (nm) | λ_{REF} (nm) | K_λ (nm) | Incertidumbre (nm) |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|
| 1511,000 | 1510,970 | 0,030 | 0,088 |
| 1520,000 | 1519,964 | 0,036 | 0,088 |
| 1530,000 | 1529,950 | 0,050 | 0,088 |
| 1540,000 | 1539,946 | 0,054 | 0,088 |
| 1550,000 | 1549,942 | 0,058 | 0,088 |
| 1560,000 | 1559,941 | 0,059 | 0,088 |
| 1570,000 | 1569,938 | 0,062 | 0,088 |
| 1580,000 | 1579,923 | 0,077 | 0,088 |
| 1589,000 | 1588,922 | 0,078 | 0,088 |

La calibración relativa en intervalos de hasta ± 5000 pm se ha realizado a diferentes longitudes de onda (1530 nm, 1550 nm y 1580 nm) obteniéndose que las diferencias entre inferiores a la incertidumbre, establecida en $\pm 3,1$ pm (ver Tabla 2)

Tabla 2.- Resultados de la calibración relativa del filtro sintonizable para la longitud de onda de 1530 nm

| $\Delta\lambda_{TEST}$ (nm) | $\Delta\lambda_{REF}$ (nm) | ΔK_λ (nm) | Incertidumbre (nm) |
|--------------------------------|-------------------------------|----------------------------|-----------------------|
| -5,000 | -5,000 | 0,000 | 0,003 |
| -4,502 | -4,500 | -0,002 | 0,003 |
| -4,000 | -4,000 | 0,000 | 0,003 |
| -3,501 | -3,500 | -0,001 | 0,003 |
| -3,000 | -3,000 | 0,000 | 0,003 |
| -2,498 | -2,500 | 0,002 | 0,003 |
| -2,000 | -2,00 | 0,000 | 0,003 |
| -1,499 | -1,500 | 0,001 | 0,003 |
| -0,998 | -1,000 | 0,002 | 0,003 |
| -0,499 | -0,500 | 0,001 | 0,003 |
| 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,003 |
| 0,503 | 0,500 | 0,003 | 0,003 |
| 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,003 |
| 1,501 | 1,500 | 0,001 | 0,003 |
| 1,999 | 2,000 | -0,001 | 0,003 |
| 2,499 | 2,500 | -0,001 | 0,003 |
| 3,000 | 3,000 | 0,000 | 0,003 |
| 3,499 | 3,500 | -0,001 | 0,003 |
| 4,001 | 4,000 | 0,001 | 0,003 |
| 4,503 | 4,500 | 0,003 | 0,003 |
| 5,000 | 5,000 | 0,000 | 0,003 |

4. APLICACIÓN A INTERROGADORES

Se ha aplicado la técnica descrita a dos tipos de interrogadores: un BraggMeter (fabricado por FIBERSENSING) que mide las variaciones de longitud de onda en las FBG mediante el barrido de un láser sintonizable, calibrado con un filtro Fabry Perot y detectando la señal con un detector síncrono, (este equipo realiza un barrido cada segundo, y tiene una resolución de lectura de 1 pm); y un interrogador dinámico BraggScope (del mismo fabricante) constituido por una fuente de espectro ancho y ocho filtros de borde y sendos detectores centrados en cuatro longitudes de onda fijas para las que está diseñado. Este tipo de interrogador no realiza ningún barrido mecánico y la diferencia de longitud de onda se calcula a través de parejas de señales detectadas por los conjuntos detectores-filtros de borde. Como en el caso anterior, la resolución de lectura del equipo es de 1 pm, y detecta a velocidades de hasta 4000 muestras/s.

Se ha procedido a la calibración absoluta y relativa de ambos equipos. La calibración absoluta del BraggMeter se ha realizado a longitudes de onda entre 1510 nm y 1590 nm que son las que permite el equipo. Los resultados encontrados se muestran en la Tabla 3. El error de medida del equipo es siempre menor de 5 pm, y dentro de la incertidumbre de calibración (88 pm).

Tabla 3.- Resultados de la calibración absoluta del interrogador BraggMeter

| λ_{TEST} (nm) | λ_{REF} (nm) | K_λ (nm) | Incertidumbre (nm) |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|
| 1524,911 | 1524,915 | -0,004 | 0,088 |
| 1534,932 | 1534,932 | 0,000 | 0,088 |
| 1544,918 | 1544,923 | -0,005 | 0,088 |
| 1554,915 | 1554,915 | 0,000 | 0,088 |
| 1564,925 | 1564,926 | -0,001 | 0,088 |
| 1574,913 | 1574,913 | 0,000 | 0,088 |
| 1584,913 | 1584,914 | -0,001 | 0,088 |

La calibración absoluta del BraggScope se ha realizado sólo a las longitudes de onda de las redes de Bragg que el equipo puede interrogar (1541,7; 1547,6; 1554,7 y 1561,4 nm). Los resultados de la calibración se muestran en la Tabla 4. En el caso de este equipo el error de medida de la longitud de onda en valor absoluto oscila entre 150 pm y 800 pm.

Tabla 4.- Resultados de la calibración absoluta del interrogador BraggScope

| λ_{TEST} (nm) | λ_{REF} (nm) | K_λ (nm) | Incertidumbre. (nm) |
|--------------------------|-------------------------|---------------------|------------------------|
| 1541,100 | 1541,661 | -0,561 | 0,088 |
| 1546,870 | 1547,661 | -0,791 | 0,088 |
| 1554,490 | 1554,656 | -0,166 | 0,088 |
| 1560,630 | 1561,433 | -0,803 | 0,088 |

Desde el punto de vista de la interrogación de los sensores Bragg es la calibración relativa la que requieren los interrogadores, ya que con ella se van a relacionar con las variaciones de la magnitud física a medir.

La calibración relativa se ha realizado a las longitudes de onda propias del interrogador BraggScope. Para su realización se han variado respecto de la longitud de onda nominal del interrogador la longitud de onda de reflexión de nuestro artefacto de calibración en valores de 250

pm hasta barrer todas las longitudes de onda próximas. El interrogador BraggScope está diseñado para la interrogación de redes de Bragg en intervalos próximos a la longitud de referencia de

± 1600 pm. Los resultados se muestran en las Fig. 5 y Fig. 6.

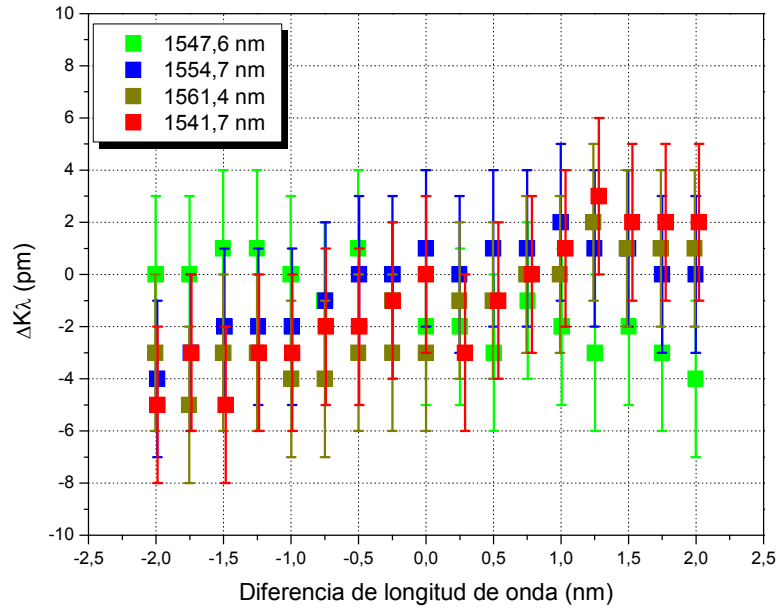


Fig. 5.- Variación del factor de calibración relativo del BraggMeter

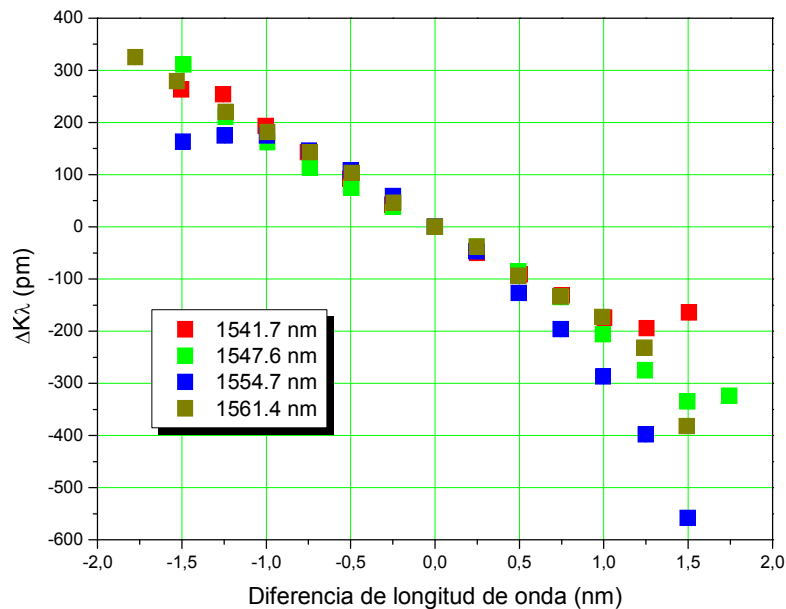


Fig. 6.- Variación del factor de calibración relativo del BraggScope

4. DISCUSIÓN

Con la presente discusión queremos poner en evidencia las ventajas del artefacto de calibración usado frente a otras opciones de calibración como el uso de una red de Bragg deformada mecánicamente.

Las ventajas del artefacto de calibración son:

- Es aplicable a todas las longitudes de onda desde 1420 nm a 1630 nm.
- Simula una red simétrica y puede usarse tanto en los interrogadores que determinan la longitud de onda como el valor de pico del espectro reflejado por la red como para los interrogadores que determinan la longitud de onda de reflexión de la red como el valor promedio de la potencia óptica reflejada.
- El espectro de la luz reflejada en el artefacto de calibración no se deforma cuando se cambia de longitudes de onda, por lo que no genera problemas en la calibración de equipos de gran rango de medida ($> \pm 5000$ pm)

5. CONCLUSIONES

Se presenta una técnica de calibración absoluta y relativa de la longitud de onda medida para interrogadores de redes de Bragg de aplicación en sensado óptico. La técnica de calibración se basa en la comparación directa de la longitud de onda reflejada por un filtro sintonizable y un espejo con la medida por el interrogador de redes de Bragg.

Para la aplicación de la técnica se ha calibrado el filtro sintonizable unido al espejo mediante la técnica de comparación usada en el DM-IFA-CSIC. Corregido por la calibración absoluta el filtro sintonizable tenemos una incertidumbre en la determinación de la longitud de onda de ± 88 pm debido a la anchura espectral del filtro. Calibrado el filtro sintonizable en valores relativos, (diferencia de la longitud de onda con respecto a una longitud de onda inicial) la incertidumbre residual en el conocimiento de la diferencia de longitud de onda tiene una incertidumbre de ± 3 pm, dominada por la incertidumbre en la calibración del interferómetro de referencia del DM-IFA-CSIC.

Se ha aplicado la técnica de calibración a dos tipos diferentes de interrogadores de redes de Bragg un

interrogador estático que mide la longitud de onda como el valor de pico de la señal reflejada por un láser sintonizable que barre el intervalo de medida del equipo, y un interrogador dinámico que mide la longitud de onda como la diferencia entre las potencias medidas por dos detectores filtrados por un filtro de borde (a una longitud de onda seleccionada).

Los resultados obtenidos muestran que los interrogadores que disponen de un patrón de calibración interno (BraggMeter) tienen una precisión acorde con las necesidades de sensado (1 pm), mientras que los otros equipos sin dispositivos de calibración interna (BraggScope) presentan unas altas diferencias de los valores medidos respecto de los valores reales.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ministerio de Educación y Ciencia por los proyectos Proyecto TEC2009-14423-C02-00, el apoyo del Comunidad Autónoma de Madrid a través del proyecto FACTOTEM2 S2009/ESP-1781, el apoyo de Ministerio de Fomento por el proyecto MIFFO (FOM-07/77).

Pedro Salgado Díaz desea agradecer al Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y al “Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Hidrocarburos”, por el apoyo recibido.

REFERENCIAS

- [1] J.M. López Higuera. Handbook of Optical Fibre Sensing Technology Ed. John Wiley & Sons, Ltd., (2005).
- [2] R. Kashyap. Fiber Bragg Gratings. Academic Press. Inc. (1999)
- [3] Yun-Jiang Rao. “In fibre Bragg grating sensors”. Meas. Sci. Technol. 8, 355–375, (1997)
- [4] IEC 62129: “Calibration of Optical Spectrum Analyzers”. Geneva (2007)
- [5] PTFO008 IFA-CSIC: “Procedimiento para la calibración de Analizadores de Espectro Óptico y medidores de longitud onda usando una fuente de emisión conocida” (2008).
- [6] Evaluation of measurement data - Guide Expression Uncertainty in measurements JCGM 100: (2008)