

Caracterización de errores sistemáticos inducidos en sistemas ϕ -OTDR de pulso chirpado

Characterization of induced systematic errors in Chirped Pulse ϕ -OTDR Systems

Miguel SORIANO-AMAT¹, Leonardo MARCON², Riccardo VERONESE²,
Andres GARCIA-RUIZ¹, Marco CALABRESE², Luis COSTA¹, Hugo F. MARTINS³,
Luca PALMIERI², Sonia MARTÍN-LÓPEZ¹, Miguel GONZÁLEZ-HERRÁEZ¹

1. Departamento de Electronica, Universidad de Alcalá, Edificio Politécnico, 28805, Alcalá de Henares, Madrid .
2. Department of Information Engineering, University of Padova, Italy
3. Instituto de Óptica “Daza de Valdés”, IO-CSIC, C/Serrano 121, 28006 Madrid.

Persona de contacto: Miguel Soriano Amat (miguel.soriano@uah.es).

RESUMEN:

Los sistemas ϕ -OTDR detectan y miden perturbaciones que experimenta la fibra óptica en cada uno de sus puntos de forma simultánea. Para ello, se sirven de la técnica OTDR y utilizan pulsos provenientes de una fuente con baja anchura de línea. Cuando un punto de la fibra óptica sufre una perturbación, ésta puede introducir pequeños retrasos en el tiempo de vuelo de la señal retrodispersada provenientes de puntos más alejados del inicio de la fibra que del punto perturbado. Debido al tipo de medida que realizan, y a la alta sensibilidad que presentan los sistemas ϕ -OTDR de pulso chirpado, dichos retrasos pueden generar errores sistemáticos que deriven en una pérdida de fidelidad a lo largo del proceso de medida. En este estudio, se propone un experimento en el que, mediante la aplicación de un gradiente de temperatura en una sección intermedia de fibra, se analiza la repercusión de esta perturbación en puntos más alejados del extremo en el que está ubicado el sistema interrogador. Estos errores, en todo caso, serán muy pequeños en la mayor parte de aplicaciones habituales de estos sistemas.

Palabras clave: OTDR, Sensor Distribuido en Fibra óptica, Pulso Chirpado, scattering Rayleigh, Sensor Acústico Distribuido, Temperatura.

ABSTRACT:

ϕ -OTDR systems detect and measure disturbances experienced by the optical fiber in each of its points simultaneously. To do this, they employ the OTDR technique and use pulses coming from a narrow bandwidth source. When a point in the fiber optic suffers a perturbation, this modification can introduce small delays in the time-of-flight of the backscattered signal which comes from points that are farther from the beginning of the fiber than the disturbed point. Due to type of measurement performed, and the high sensitivity that shows a ϕ -OTDR system, these delays can generate systematic errors that lead to a fidelity reduction throughout the measurement process. In this study, we propose an experiment where a temperature gradient is applied in an intermediate section of fiber and the response is analyzed in farther points form the end of the fiber where the interrogator system is located. In any case, these errors will be very small in the major part of the applications of this systems.

Key words: OTDR, Distributed Fiber Optic Sensor, Chirped Pulse, Rayleigh scattering, Distributed Acoustic Sensor, Temperature.

1.- Introducción

La fibra óptica, además de ser utilizada en telecomunicaciones para transmitir información a lo largo de decenas de kilómetros con la mínima atenuación y distorsión, presenta una serie de características que le permiten actuar como elemento transductor en sensores de muy diversos parámetros (temperatura, deformación, presión, ...) [1]. Entre las distintas configuraciones de sensor de fibra óptica, están los que se conocen como sensores distribuidos, los cuales ofrecen la posibilidad de realizar medidas de diferentes variables ambientales en todos los puntos de la fibra de forma simultánea. De este modo es posible conseguir la medida en hasta varios cientos de miles de puntos a lo largo del tendido de fibra transductora. Esta característica única de este tipo de sensores, ha hecho que en los últimos años se hayan abierto mercados como el de monitorización de estructuras civiles, líneas de transporte, líneas de distribución energética, transporte de agua, sismología, ... Todos estos sensores están basados en el análisis de algunos de los fenómenos de scattering que tienen lugar en las fibras ópticas estándar (Rayleigh, Raman y Brillouin), ofreciendo diferentes características en función del proceso concreto que lo sustente [2-8].

Un caso particular de los sensores basados en scattering Rayleigh son los que realizan el análisis de la señal retrodispersada en el dominio del tiempo (OTDR). Los sistemas OTDR son capaces de detectar pérdidas y reflexiones que pueden indicar la existencia de curvaturas excesivas o roturas en una fibra [9]. Para ello, se introduce en ella un pulso de luz y, a continuación, se detecta la luz retrodispersada por efecto Rayleigh. A partir del análisis de la traza temporal de dicha luz retrodispersada, pueden detectarse y cuantificarse los eventos que están aconteciendo en las inmediaciones de la fibra, los cuales introducen variaciones en la posición de los puntos de scattering de la misma.

Los sistemas OTDR convencionales emplean luz incoherente. Si se sustituye la fuente de luz incoherente por otra de luz coherente, el

rendimiento mejora, dando lugar a la técnica Phase-sensitive OTDR (ϕ -OTDR) [10]. En esta técnica, la suma de las diferentes componentes retrodispersadas da lugar a un patrón interferencial aleatorio conocido como traza [11,12]. Cualquier modificación del camino óptico producirá una modificación en la fase y, por tanto, una modificación de la traza.

Partiendo del sistema ϕ -OTDR, la técnica *Chirped Pulse* ϕ -OTDR (CP ϕ -OTDR) emplea un pulso con un chirp lineal [13]. Es decir, el láser va cambiando linealmente su frecuencia durante el proceso de emisión del pulso. Con la incorporación de un pulso chirpado, el sistema incrementa notablemente su sensibilidad. En el caso de una medida de temperatura, la sensibilidad presenta un orden de magnitud de 1 mK en fibras de 1 km, con muestreo de 10 kHz y una resolución espacial de 10 m [13]. En el caso de medidas de strain la sensibilidad se sitúa en $p\epsilon / \sqrt{Hz}$ para perturbaciones del orden del kHz en una fibra de aproximadamente 1200 m y un muestreo de 10 kHz [14]. Para recuperar la información, basta con realizar una correlación entre una traza de referencia y una traza adquirida en un instante en el que se ha perturbado la fibra. La diferencia entre ambas trazas radica en un desplazamiento temporal de la región de la misma asociada al tramo perturbado de la fibra. Sin embargo, una modificación puntual del índice de refracción en un punto intermedio de la fibra puede introducir una contribución adicional en la lectura extraída de una sección de la traza asociada a puntos más lejanos al interrogador. Por ello, el propósito de este trabajo es determinar y cuantificar el error sistemático introducido en las medidas finales cuando un punto previo de la fibra es perturbado.

2.- Sección Teórica

Cuando una fibra es perturbada por un proceso de calentamiento o deformación, se produce un cambio en el camino óptico. Dicho cambio puede ser debido, bien a un cambio en el índice de refracción (Δn) o bien a un cambio en la longitud de la fibra (ΔL). Ambos parámetros, longitud e índice de refrac-

ción, dependen de la temperatura. Las variaciones de longitud e índice de refracción pueden calcularse a partir de las expresiones (1) y (2), teniendo en cuenta que el coeficiente de expansión térmica de primer orden $\alpha = 0.55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [15] y el coeficiente termo-óptico en fibra dopada con germanio es $\xi = \left(\frac{1}{n}\right) \left(\frac{\delta n}{\delta T}\right) \approx 6.92 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [4].

$$\Delta L(t) = \alpha \Delta T(t) L \quad (1)$$

$$\Delta n(t) = \xi \Delta T(t) n \quad (2)$$

donde L y n , hacen referencia a la longitud e índice de refracción de la fibra, cuando no existe perturbación alguna. Cuando la fibra se perturba como consecuencia de una modificación de su temperatura, su longitud pasa a ser $\tilde{L} = L + \Delta L$ y su índice de refracción $\tilde{n} = n + \Delta n$. Considerando la velocidad de propagación de la luz en la fibra, la diferencia en el tiempo de vuelo a lo largo de una fibra perturbada y sin perturbar es:

$$\Delta \tau(t) = 2 \left[\int_0^{\tilde{L}(t)} \frac{\tilde{n}(t)}{c_0} dz - \int_0^L \frac{n}{c_0} dz \right] = \frac{2}{c_0} [\tilde{n}(t)\tilde{L}(t) - nL] \approx \frac{2}{c_0} [\Delta L(t)n + \Delta n(t)L] \quad (3)$$

donde se desprecian los términos superiores a orden 1 (dependientes de $\Delta n \Delta L$) por ser varios órdenes de magnitud inferiores a los términos mostrados en (3).

Teniendo en cuenta el perfil temporal del chirp, el retraso temporal visto en (3) se traduce en un cambio relativo de frecuencia:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{1}{\nu_0} \frac{\delta \nu}{\tau_p} \Delta \tau(t) \quad (4)$$

Esta variación en frecuencias, afecta a todos los puntos de medida posteriores al punto en el que se lleva a cabo la perturbación. Dado que un cambio relativo de frecuencia puede ser entendido como una variación de temperatura, el cambio de temperatura “virtual” δT que experimentarán los puntos de medida posteriores a la perturbación local es:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \xi \delta T \quad (5)$$

Sustituyendo (1), (2), (3) y (4) en (5):

$$\delta T(t) = \frac{k}{\xi} \frac{1}{\nu_0} \frac{\delta \nu}{\tau_p} \frac{2}{c_0} [\Delta n(t) L + n \Delta L(t)] = \frac{1}{\xi} \frac{1}{\nu_0} \frac{\delta \nu}{\tau_p} \frac{2}{c_0} [\alpha n L + \xi n L] \Delta T(t) \quad (6)$$

donde el primer término de la suma se corresponde con el efecto de expansión térmica de la fibra, mientras que el segundo se asocia al efecto termo-óptico. Además, se ha introducido una constante de normalización k , considerada 1 por defecto. En la Fig.1 se muestra la evolución de ambos términos en función de un cambio de la temperatura.

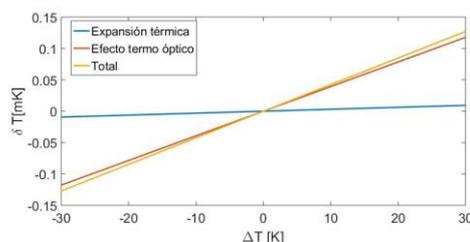


Fig. 1: Evolución de la temperatura virtual en función del cambio de temperatura aplicada.

Como puede observarse, el efecto termo-óptico es el principal responsable de inducir un cambio virtual de la temperatura, puesto que es un orden de magnitud superior al efecto asociado a la expansión térmica. Además, esta gráfica permite estimar la variación de temperatura virtual en función de la variación de temperatura aplicada sobre la fibra de referencia. Exactamente, la temperatura virtual crece a un ritmo de 4.2 mK por cada grado Kelvin aplicado a la fibra que experimenta el cambio de temperatura.

3.- Montaje experimental

Para realizar este experimento, se dispone de un sistema de medida CP ϕ -OTDR típico [13,16], que será el encargado de introducir y analizar la luz retrodispersada. El pulso es enviado a una fibra óptica enrollada en tres bobinas como se muestra en la Fig.2. La primera de ellas presenta una longitud $L_1 = 0.83$ km, la segunda consta de $L_2 = 16.3$ km y la tercera cuenta con $L_3 = 1.4$ km de longitud. La conexión entre ellas se ha realizado mediante conectores FC/APC. El último conector está sumergido en agua con el fin de minimizar la reflexión en ese punto, al minimizar el salto de índice.

La primera bobina de fibra se usa para compensar el ruido de fase del láser, la segunda bobina se emplea para forzar los cambios controlados de temperatura, mientras que la

tercera bobina actúa de referencia para comprobar el efecto del cambio de temperatura en la segunda bobina. Los cambios de temperatura en la segunda bobina son inducidos por baños térmicos en agua a diferente temperatura. En el centro de la segunda bobina se instala una sonda termopar para tener una referencia adicional de la temperatura a la cual está siendo sometida la fibra.

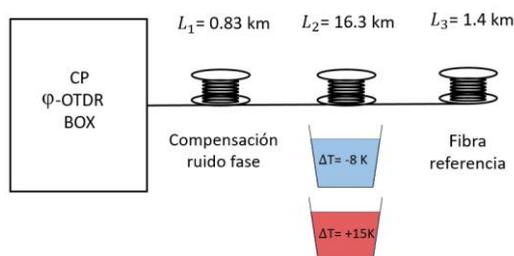


Fig. 2: Esquema del sistema experimental empleado en este estudio.

En primer lugar, se sumerge la segunda bobina en un baño térmico a una temperatura 15 K superior a la temperatura ambiente. Posteriormente, la bobina es extraída y sumergida en agua 8 K inferior a la temperatura de la sala. Esta bobina permanece 10 minutos, aproximadamente, en cada baño térmico con el fin de que la bobina establezca su temperatura y sea lo más uniforme posible.

Por otra parte, la primera y tercera bobina de fibra permanecen sumergidas en agua a temperatura ambiente, con el fin de minimizar las derivas de la temperatura ambiental y conseguir una temperatura estable. Además, dichas bobinas se encuentran en una habitación diferente a donde se encuentra la segunda bobina, con el fin de minimizar posibles transferencias de energía en forma de calor.

4.- Resultados experimentales

Las capas más externas de una bobina se encuentran expuestas a los factores ambientales tales como cambios de temperatura, golpes o vibraciones. Teniendo esto en cuenta, será necesario determinar cómo se produce el proceso de calentamiento de la segunda bobina, para entender la variación de la temperatura virtual en una sección de fibra correspondiente a la tercera bobina. Para ello, se escoge una región de unos 500 m de largo, entre el kilómetro 17.9 y el 18.4 del total de la fibra testada. Este tramo de fibra se en-

cuentra en la tercera bobina. Como se observa en la Fig.3, la distribución de la temperatura virtual a lo largo del tramo de fibra es bastante homogénea durante el proceso de enfriado y calentamiento. Sin embargo, aparecen variaciones (franjas verticales) que rompen con la homogeneidad de la medición, especialmente en el proceso de enfriado. Dichas franjas pueden ser debidas a un cambio significativo de la polarización causado por un cambio brusco de temperatura. Con el fin de comparar los resultados teóricos y experimentales, se realiza un promedio espacial de los datos recogidos con el sistema CP φ-OTDR. Dicha temperatura promedio se muestra mediante una línea azul en la Fig. 4.

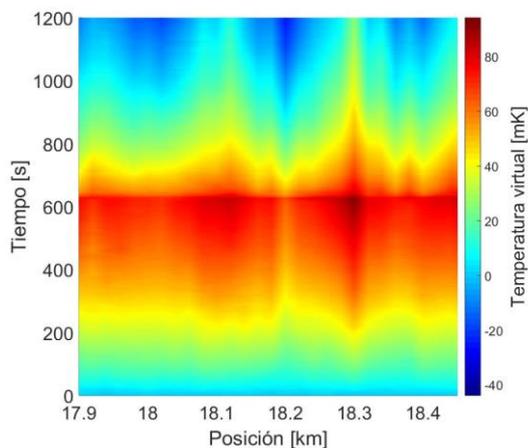


Fig. 3: Evolución de la temperatura en función de la posición y tiempo para el tramo de fibra estudiado.

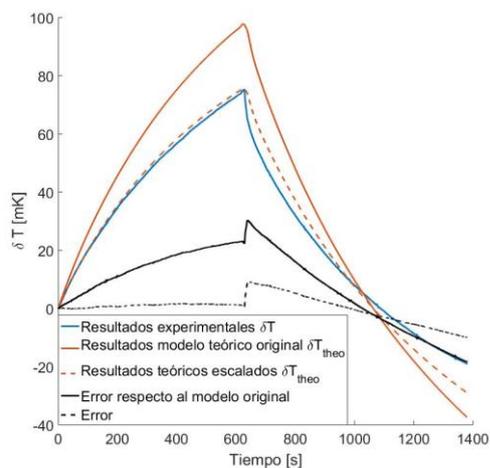


Fig.4: Evolución de la temperatura virtual teórica y experimental durante el proceso de calentado y enfriado con sus correspondientes líneas de error.

En la misma figura se reportan los valores teóricos esperados a partir de la temperatura proporcionada por la sonda termopar (línea naranja). Como puede observarse, ambas curvas no concuerdan, aunque sus perfiles son semejantes. La falta de concordancia puede ser debida, bien a una discrepancia entre los valores teóricos y reales del pulso chirpado enviado a la fibra (duración del pulso, pendiente del chirp, etc.), o bien debido a la actualización de la traza de referencia con la que se calcula la correlación. Con el fin de minimizar la discrepancia entre valores teóricos y experimentales, se realiza una normalización de la curva teórica (constante k Ec.6), mostrada en línea discontinua naranja en la Fig. 4. Además, en dicha figura, se muestran dos líneas negras, una continua y otra punteada. La primera representa la diferencia entre la curva obtenida de forma experimental y la curva esperada sin normalizar. Por el contrario, para el cálculo de la línea negra punteada se ha tenido en cuenta la curva teórica esperada con la correspondiente normalización. Como puede verse, la línea negra discontinua muestra unos valores más cercanos a cero, lo que significa que reproduce con mayor fidelidad los resultados obtenidos de forma experimental.

Sin embargo, a partir del momento en el que empieza el proceso de enfriado, el valor absoluto del error crece linealmente a un ritmo de 1.57 mK/minuto. Esto es fruto del error acumulativo asociado al proceso de actualización de la traza de referencia.

5.- Conclusión

A lo largo de este estudio, se ha realizado un modelo teórico para determinar cómo afecta la aplicación de un gradiente de temperatura en un punto concreto de una fibra óptica, en la medición de eventos que ocurren en puntos más lejanos al interrogador que el lugar en el que se está aplicando dicho gradiente. Para contrastar dicho modelo teórico, se ha montado un experimento en el que se ha enfriado y calentado un tramo intermedio de fibra y, utilizando un sistema CP ϕ -OTDR, se ha analizado la señal proveniente de secciones posteriores al tramo perturbado térmicamente. Los datos experimentales y teóricos concuerdan, lo que permite concluir que en

nuestro experimento un incremento en un grado Kelvin en la sección de fibra intermedia, repercute en un aumento de la temperatura virtual del orden de cinco mili-Kelvin en tramos posteriores de la fibra. Además, se han identificado los diferentes elementos causantes de las distorsiones vistas en los resultados obtenidos.

Agradecimientos:

European Research Council (ERC) (U-FINE, 307441); European Commission (EC) (H2020) and Spanish Ministerio de Economía y Competitividad (MINECO) (DOMINO, ERANET Cofund Water Works 2014 call); EC (FINESSE project, MSCA-ITN-ETN-722509); Comunidad de Madrid (CM) (SINFOTON2-CM: P2018/NMT-4326); University of Alcalá (FPI)

Referencias

- [1] X. BAO, L.CHEN, “Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors” Applied Optics, vol. 16, no.9, pp. 23755-23779,1977
- [2] V. SHATALIN, V. N. TRESCHIKOV, A.J. ROGERS, “Interferometric optical time-domain reflectometry for distributed optical-fiber sensing Appl. Opt., vol. 37, no. 24, p. 5600, 1998.
- [3] A.H. HARTOG, “An introduction to distributed fiber sensors”. Florida (USA): CRC Press: Boca Raton, 2017
- [4] Y.KOYAMADA, M. IMAHAMA, K. KUOTA, K. HOGARI, “Fiber-Optic Distributed Strain and Temperature Sensing With Very High Measurand Resolution Over Long Range Using Coherent OTDR”, Journal of Lightware Technology , Vol.27, no.9, pp.1142-1146, 2009
- [5] M.A. SOTO, L. THÉVENAZ, “Modeling and evaluating the performance of Brillouin distributed optical fiber sensors”, Opt. Express, vol. 21, no. 25, p. 31347, 2013
- [6] G. BOLOGNINI, J. PARK, M. A. SOTO, N. PARK, and F. DI PASQUALE, “Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification,” Meas. Sci. Technol., vol. 18, no. 10, pp. 3211–3218, 2007.
- [7] L. B. LIOKUMOVICH, N. A. USHAKOV, O. I. KOTOV, M. A. BISYARIN, and A. H.

- HARTOG, “*Fundamentals of Optical Fiber Sensing Schemes Based on Coherent Optical Time Domain Reflectometry: Signal Model under Static Fiber Conditions*,” J. Light. Technol., vol. 33, no. 17, pp. 3660–3671, 2015.
- [8] Y. MUANENDA, “*Recent Advances in Distributed Acoustic Sensing based on Phase-Sensitive Optical Time Domain Reflectometry*,” vol. 2017, pp. 1–19, 2017.].
- [9] M.K. BARNOSKI, M.D. ROURKE, S.M. JENSEN, R.T. MELVILLE, “*Optical time domain reflectometer*” Applied Optics, vol. 16, no.9, pp. 23755-23779,1977
- [10] J.C. JUAREZ, E.W. MAIER, K.N. CHOI, H.F. TAYLOR, “*Distributed fiber-optic intrusion sensor system*”, Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, no.6, pp.2081-2087, 2005.
- [11] Y. KOYOMADA, “*Novel Fiber-Optic Distributed Strain and temperature Sensor with Very High Resolution*”, IEICE Transactions on Communications, Vol. E89-B, no. 5, pp.1722-1725, 2006.
- [12] P. HEALEY, “*Fading in heterodyne OTDR*”, Electronics Letters, Vol. 20 , no. 1 , pp. 30-32, 1984.
- [13] J. PASTOR-GRAELLS, H.F. MARTINS, A. GARCIA-RUIZ, S. MARTIN-LOPEZ, M. GONZÁLEZ-HERRÁEZ, “*Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses*”, Optic Express, Vol. 24, no. 12, pp.13121-13133, 2016.
- [14] L. COSTA, H. F. MARTINS, S. MARTÍN-LÓPEZ, M. R. FERNÁNDEZ-RUIZ, M. GONZÁLEZ-HERRÁEZ, “*Reaching $p\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ sensitivity in a distributed optical fiber strain sensor*,” 26th International Conference on Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper TuD3.
- [15] G.K. WHITE, “*Thermal expansion of reference materials: cooper, silica and silicon*” Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 6 no.17, pp. 2070-2078, 1973.
- [16] M.R. FERNÁNDEZ-RUIZ, J. PASTOR-GRAELLS, H.F. MARTINS, A. GARCÍA-RUIZ, S. MARTÍN-LÓPEZ, M. GONZÁLEZ-HERRÁEZ, “*Laser Phase-Noise Cancellation in Chirped-Pulse Distributed Acoustic Sensors*”, Journal of Lightwave Technology, vol. 36, no. 4, pp. 979-985, 2018