

SENSOR ACÚSTICO DISTRIBUIDO BASADO EN OTDR SENSIBLE A LA FASE Y PULSOS CHIRPEADOS

JUAN PASTOR-GRAELLS¹, A. GARCIA-RUIZ¹, MARÍA R. FERNÁNDEZ-RUIZ¹,
HUGO F. MARTINS², SONIA MARTIN-LOPEZ¹ Y MIGUEL GONZALEZ-HERRAEZ¹
juan.pastorg@uah.es



Juan Pastor Graells obtuvo el título de Grado en Física por la Universidad de Valencia, Valencia, España, en 2013 y finalizó el máster en Sistemas Electrónicos Avanzados de la Universidad de Alcalá, Madrid, España en 2014. Desde 2013, ha estado trabajando en su tesis doctoral en el grupo de Ingeniería Fotónica (GRIFO) de la Universidad de Alcalá. Sus actuales intereses de investigación se centran en los sensores distribuidos de fibra óptica, particularmente en la reflectometría óptica en el dominio del tiempo.

Resumen: Los sensores distribuidos permiten la medición de diferentes parámetros físicos (temperatura, deformaciones, vibraciones, etc.) a lo largo de grandes distancias. Todos ellos emplean los fenómenos de scattering (Rayleigh, Brillouin, Raman) que sufre la luz al propagarse por una fibra óptica. En el presente artículo se profundizará en los sensores OTDR sensibles a la fase, ampliamente utilizados para la detección y caracterización de vibraciones. Este tipo de medidas, a lo largo de decenas de kilómetros, permiten el control de amenazas en grandes perímetros e infraestructuras civiles. Se introducirá el último avance en esta tecnología, el cual permite la realización de medidas acústicas empleando pulsos chirpeados.

Palabras clave: Sensores de fibra óptica, scattering Rayleigh, sensor acústico distribuido.

Abstract: Distributed sensors allow for the measurement of different physical parameters (temperature, deformations, vibrations, etc.) along large distances. All of them employ scattering phenomena (Rayleigh, Brillouin, Raman) produced during the light propagation along the optical fibers. The present work will focus on the phase-sensitive OTDR, commonly used for detection and characterization of vibrations. These measurements, realized along tens of kilometers, permit the surveillance of large perimeters and civil infrastructures. It will be introduced a recent progress in this technology, which allows for distributed acoustic measurements using chirped pulses.

Keywords: Fiber optic sensors, scattering Rayleigh, distributed acoustic sensor

¹ Dpto. Electrónica, Escuela Politécnica Superior. Universidad de Alcalá.

² FOCUS S.L.

1. INTRODUCCIÓN

Los sensores distribuidos de fibra óptica (DOFS, por sus siglas en inglés) permiten la monitorización de diferentes parámetros físicos (como temperatura o deformaciones) a lo largo de grandes distancias de fibra óptica. Los DOFS están basados principalmente en los fenómenos de scattering Rayleigh, Brillouin y Raman (Bao & Chen, 2012). Generalmente, los DOFS basados en scattering Raman y Brillouin están caracterizados por tiempos de medición grandes, llegando a requerir varios minutos para la realización de cada medida (Angulo-Vinuesa et al., 2012). Esto es debido a requerir la implementación de barridos de frecuencia y/o altos valores de promediado. Existen algunos esquemas recientes basados en scattering Brillouin capaces de realizar medidas dinámicas de deformaciones (Peled, Motil & Tur, 2012), en cambio el rango de deformación medible está limitado por el ancho espectral de la banda de ganancia Brillouin. En cambio, los DOFS basados en scattering Rayleigh requieren menos promediado que los basados en Raman y Brillouin. Por esta razón, el sensado basado en scattering Rayleigh es más adecuado para medidas dinámicas como vibraciones o intrusiones (Martins et al., 2013).

La reflectometría óptica en el dominio del tiempo sensible a la fase (Φ OTDR, por sus siglas en inglés) es uno de los sensores que se encuentran dentro del conjunto de sensores basados en scattering Rayleigh. Dicha técnica puede adaptarse para la medición de deformaciones con alta resolución (Koyamada et al., 2009), con resoluciones significativamente más bajas que $20\mu\epsilon$ (deformaciones relativas de $20\mu\text{m}$ por metro), valor típico de un sensor basado en scattering Brillouin. Sin embargo, en este caso, debido a la necesidad de realizar barridos de frecuencia, la complejidad del sistema y los tiempos de medida son mayores. Para evitar esto, existen sistemas basados en técnicas de recuperación de fase para la realización de medidas dinámicas de deformaciones (Wang et al., 2016). Pero en este caso, sin embargo, la complejidad del sistema se incrementa excesivamente y no se ha demostrado de forma clara el comportamiento de estos sistemas en aplicaciones donde sea necesario realizar medidas a lo largo de grandes distancias.

En el presente trabajo, se propone un método basado en un Φ OTDR que emplea pulsos linealmente *chirpeados* (Pastor-Graells et al., 2016), lo que permite la medida cuantitativa de cambios de deformación de forma distribuida a lo largo de la fibra óptica sin la necesidad de realizar barridos de frecuencia, manteniendo la simplicidad de un Φ OTDR tradicional. La resolución en deformación depende del *chirp* aplicado al pulso y la velocidad con la que se muestrea la traza obtenida con el Φ OTDR. El principio ha sido demostrado empleando pulsos ópticos que dan una resolución de 10 m a lo largo de 1 km de fibra óptica, alcanzando resoluciones en deformación de 4ne y velocidad de muestreo de 4 kHz (detectando por lo tanto frecuencias de hasta 2 kHz). Sin embargo, el sistema es capaz

de alcanzar características parecidas a las de un Φ OTDR tradicional en término de rango y resolución (por ejemplo rangos de decenas de kilómetros con resoluciones métricas).

2. FUNDAMENTOS DEL SENSOR

El sensor dinámico distribuido de deformaciones presentado está basado en la técnica Φ OTDR, en la cual un pulso óptico altamente coherente es introducido en una fibra óptica convencional. Durante la propagación del pulso este sufre scattering Rayleigh. La luz retrodispersada en cada uno de los centros de scattering interfiere consigo mismo generando la traza que posteriormente es detectada en el mismo extremo por el que se introduce el pulso. Teniendo en cuenta el tiempo de vuelo del pulso en la fibra, es posible asociar cada punto de la traza detectada temporalmente a una posición de la fibra óptica. Debido a que la posición de los centros de scattering es aleatoria, la traza detectada presenta variaciones aleatorias, las cuales permanecen constantes a lo largo de la fibra si esta no es perturbada. Comúnmente, un Φ OTDR funciona analizando los cambios en intensidad a lo largo de la traza, los cuales indican la presencia de una perturbación como vibraciones. Sin embargo, la dependencia entre estas variaciones de intensidad y las vibraciones es altamente no lineal. Por lo tanto, los sensores Φ OTDR convencionales no recuperan verdaderamente las deformaciones si no es realizando barridos de frecuencia (Koyamada et al., 2009) o detección coherente (Wang et al., 2016). En cambio, el sensor que se presenta aquí puede recuperar linealmente deformaciones sin la necesidad de incrementar la complejidad del sistema. Comparado con un Φ OTDR convencional, la necesidad de implementar un barrido en frecuencia es reemplazada por el uso de pulsos *chirpeados* linealmente y la computación de simples correlaciones temporales entre traza y traza.

En el sensor presentado, se emplea un pulso $P(t)$ linealmente *chirpeado*, en el cual la frecuencia instantánea varía de forma lineal como $\nu(t) = \nu_0 - \Delta\nu_p/2 + \Delta\nu_p \cdot [t/\tau_p]$. ν_0 es la frecuencia central del pulso y $\Delta\nu_p/\tau_p$ es la pendiente en frecuencia, donde $\Delta\nu_p$ y τ_p son el contenido espectral del pulso y la duración temporal del pulso, respectivamente. En este caso, se puede demostrar algebraicamente que si se genera un Δn (cambio de índice de refracción) en una cierta posición z de la fibra, el patrón local Φ OTDR, $E(t)$ sufrirá un desplazamiento temporal en tiempo Δt en dicha posición. Dicho desplazamiento temporal debido a un Δn puede compensarse con valor $\Delta\nu$ (relacionado a través del chirp inducido en el pulso). El cambio de índice de refracción Δn vendrá dado por (Pastor-Graells et al., 2016):

$$\Delta n = - \left(\frac{n}{v_0} \right) \cdot \left(\frac{\Delta v_p}{\tau_p} \right) \cdot \Delta t \quad (1)$$

donde Δt se mide mediante la correlación temporal de dos trazas consecutivas. Por lo tanto, la medida de Δn a lo largo de la fibra permite la medida distribuida de deformaciones $\Delta \varepsilon$, empleando la siguiente relación (Koyamada et al., 2009):

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta v}{v_0} \approx -0.78 \cdot \Delta \varepsilon \quad (2)$$

3. MONTAJE EXPERIMENTAL

El montaje experimental usado en la nueva técnica propuesta está representado en la Figura 1a. Está basado en un Φ OTDR tradicional (Martins et al., 2013) pero introduciendo un *chirp* lineal en el pulso simplemente actuando en el control de corriente del láser. La fuente de luz es un láser de diodo (LD) con un ancho de línea de 1.6 MHz emitiendo alrededor de 1556.6 nm y funcionando en emisión continua. El LD está controlado por un controlador estándar de corriente y temperatura para seleccionar la longitud de onda central del láser. Un control de corriente secundario aplica una señal eléctrica repetitiva con forma de rampa en el láser, lo cual introduce un *chirp* lineal en la luz láser emitida. Un amplificador de semiconductor (SOA, por sus siglas en inglés) se emplea para generar pulsos ópticos cuadrados de 100 ns. Nótese que la duración de dicho pulso implicará una resolución espacial en el sistema de 10 m. El contenido espectral inducido en el pulso es $\Delta v_p = 2.32$ GHz y el perfil de frecuencia instantánea del pulso $\omega_{\text{inst}}(t)$ se encuentra presentado en la Figura 1, donde se observa un perfil con una buena linealidad. El perfil de fase fue caracterizado empleando técnicas de diferenciación óptica ultrarrápida (PROUD, por sus siglas en inglés). Los detalles del método empleado se pueden encontrar en un trabajo previo realizado por los mismos autores en (Martins et al., 2015). La traza es detectada con un fotodetector con un ancho de banda de 13 GHz y un digitalizador con una tasa de muestreo de 40 GSps. Para más información del resto de elementos del montaje, el lector interesado está invitado a consultar (Martins et al., 2013). La fibra bajo test (FUT, por sus siglas en inglés) tenía una longitud de 1 km y sus últimos 10 metros fueron enrollados alrededor de un actuador piezoeléctrico (PZT, por sus siglas en inglés), el cual nos permitía aplicar deformaciones sobre la fibra de forma controlada.

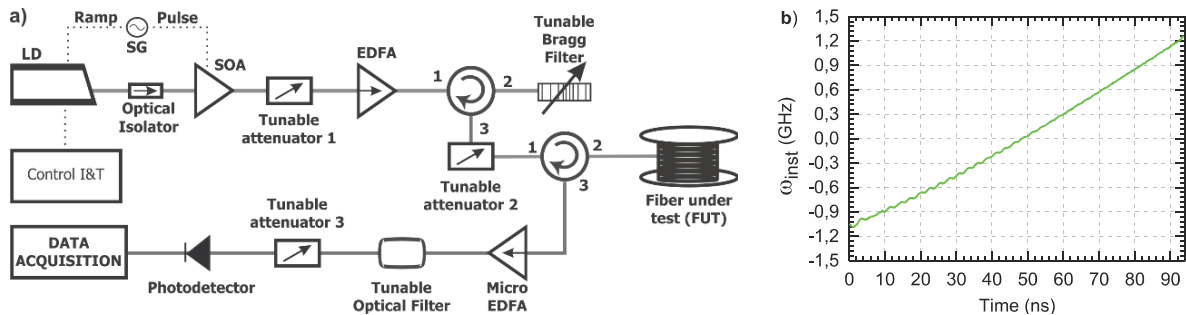


Figura 1. a) Montaje experimental: los acrónimos se encuentran explicados en el texto. B) Perfil de frecuencia instantánea del chirp inducido en el pulso óptico cuadrado de 100 ns (2.32 GHz).

4. RESULTADOS

Los resultados que se presentan a continuación demuestran la capacidad del sensor para realizar medidas dinámicas de deformaciones de forma dinámica, lo que permite la realización de medidas acústicas. Para este propósito, alimentando el PZT con una señal eléctrica controlada, aplicamos diferentes sonidos sobre la fibra óptica. Las trazas Φ OTDR fueron adquiridas a una frecuencia de 4 kHz, permitiéndonos así detectar vibraciones de hasta 2 kHz. Primero, aplicamos tres tonos puros de amplitud conocida a la fibra y recuperamos con el sensor las deformaciones aplicadas. Los resultados se muestran en la Figura 2. La señal aplicada tuvo una duración de 3.5 segundos y contenía tres frecuencias de 523 Hz, 659 Hz y 784 Hz.

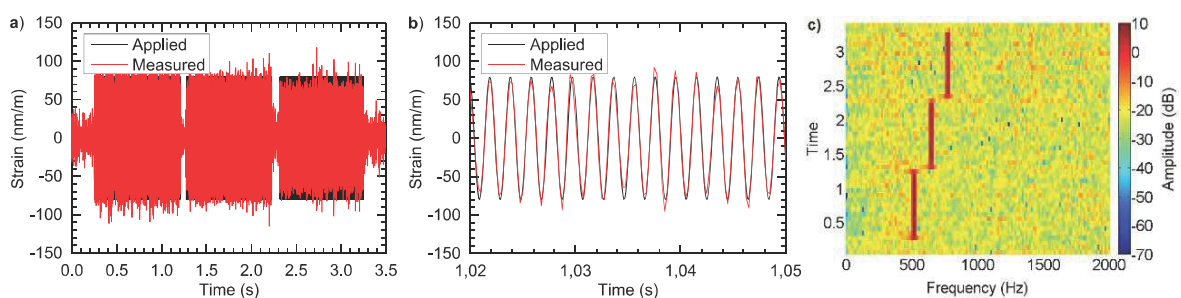


Figura 2. Deformaciones medidas cuando un PZT aplicaba vibraciones a lo largo de 20 m de fibra alrededor del metro 979. Tres tonos puros de 523 Hz, 659 Hz y 784 Hz fueron aplicados. a) Vibración completa b) Detalle de 0.03 s de la figura (a) c) Espectrograma de la vibración completa.

La Figura 2a muestra la medida completa, con una amplitud máxima de 80 ne. Como se puede observar claramente, las medidas experimentales se ajustan bien a la deformación aplicada. Existe una pequeña diferencia a 784 Hz causado por

la respuesta del PZT y no del sensor óptico. La Figura 2b muestra un zoom del primer tono, mostrado en la Figura 2a, donde se ve más claro la buena correlación entre la medida experimental y la deformación aplicada. Para demostrar la buena linealidad del sistema, en la Figura 2c se muestra el espectrograma de la vibración medida, donde se puede observar que no existen armónicos de los tonos puros aplicados. La relación señal-ruido de las frecuencias medidas es $>25\text{dB}$, lo cual indica claramente el potencial de esta técnica para alcanzar simultáneamente medidas dinámicas de deformación, con alta linealidad y buena relación señal-ruido.

Finalmente, los primeros 5 segundos de la 5ª sinfonía de Beethoven fueron aplicados a la fibra. La señal medida se presenta en la Figura 3. De nuevo, se muestra una buena correlación entre la medida recuperada con el sensor y la señal aplicada, excepto por pequeñas diferencias que provienen de un mal acoplo mecánico del sonido en la fibra y de la respuesta no plana del PZT. La señal medida por el ΦOTDR es también entendible perfectamente por el oído humano cuando ésta es reproducida por un altavoz, lo cual era imposible hasta el momento con un ΦOTDR convencional.

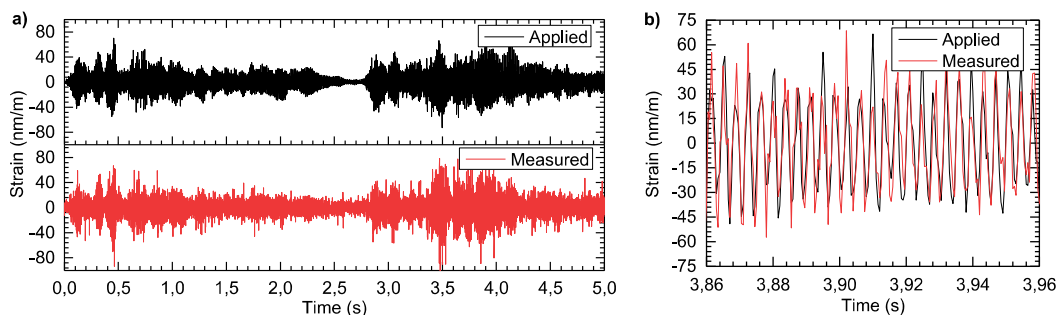


Figura 3. Deformaciones medidas cuando un PZT aplicaba vibraciones a lo largo de 20 m de fibra alrededor del metro 979. Fueron aplicados y medidos los primeros 5 segundos de la 5ª sinfonía de Beethoven. a) Vibración completa b) Detalle de 0.1 s de la figura (a).

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, hemos presentado un novel sensor distribuido de fibra óptica el cual permite la medida real y dinámica de deformaciones empleando únicamente medidas de intensidad y sin requerir barridos de frecuencia. Está basado en un ΦOTDR que emplea pulsos linealmente *chirpeados*. Comparado con el ΦOTDR convencional, la necesidad de un barrido de frecuencia es remplazada por la computación de correlaciones temporales locales entre traza y traza. Con el sistema propuesto, se puede realizar medi-

das acústicas del orden de los kHz con una resolución en la medida de las deformaciones de $n\epsilon$. Dicha resolución puede ser adaptada actuando sobre el perfil del *chirp* de los pulsos y el ancho de banda de muestreo del sistema de digitalización.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido financiado en parte por: el *European Research Council* a través del proyecto U-FINE (ayuda 307441); el programa *EC Horizon 2020*; el proyecto FINESSE MSCA-ITN-ETN-722509; el proyecto DOMINO, cofinanciado por *EC Horizon 2020* y el Ministerio de Economía y Competitividad; el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los proyectos TEC2013-45265-R y TEC2015-71127-C2-2-R; el programa regional SINFOTON-CM: S2013/MIT-2790. El trabajo de HFM fue financiado por la Unión Europea a través del programa FP7 ITN ICONE (ayuda 608099). El trabajo de JPG y SML fue financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad a través de los contratos FPI y «Ramón y Cajal», respectivamente.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Angulo-Vinuesa, X., Martin-lopez, S., Nuño, J., Corredera, P., Ania-castañón, J. D., Thévenaz, L. & González-herráez, M. (2012). Raman-assisted brillouin distributed temperature sensor over 100 km featuring 2 m resolution and 1.2 °C uncertainty. *J. Lightwave Technol.*, 30, pp. 1060-1065.
- Bao, X. & Chen, L. (2012). Recent progress in distributed fiber optic sensors. *Sensors*, 12, pp. 8601-8639.
- Koyamada, Y., Imahama, M., Kubota, K. & Hogari, K. (2009). Fiber-Optic distributed strain and temperature sensing with very high measurand resolution over long range using coherent OTDR. *J. Lightwave Technol.*, 27, pp. 1142-1146.
- Martins, H. F., Martín-López, S., Corredera, P., Filograno, M. L., Frazão, O. & González-Herráez, M. (2013). Coherent noise reduction in high visibility phase-sensitive optical time domain reflectometer for distributed sensing of ultrasonic waves. *J. Lightwave Technol.*, 31, pp. 3631-3637.
- Martins, H.F., Pastor-Graells, J., Romero Cortés, L., Piote, D., Martin-Lopez, S., Azaña, J. & Gonzalez-Herraez, M. (2015). PROUD-based method for simple real-time in-line characterization of propagation-induced distortions in NRZ data signals. *Opt. Lett.*, 40, pp. 4356-4359.

- Pastor-Graells, J., Martins, H. F., Garcia-Ruiz, A., Martin-Lopez, S. & Gonzalez-Herraez, M. (2016). Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses. *Opt. Express*, 24, pp. 13121-13133.
- Peled, Y., Motil, A. & Tur, M. (2012). Fast Brillouin optical time domain analysis for dynamic sensing. *Opt. Express*, 20(8), pp. 8584-8591.
- Wang, Z., Zhang, L., Wang, S., Xue, N., Peng, F., Fan, M., Sun, W., Qian, X., Rao, J. & Rao, Y. (2016). Coherent Φ -OTDR based on I/Q demodulation and homodyne detection. *Opt. Express*, 24, pp. 853-858.