

# Sistema de interrogación multi-sensor basado en multiplexación en longitud de onda y tiempo

## Multi-sensor interrogation system based on wavelength and time multiplexing

Mikel BRAVO<sup>(1)</sup>, Daniel LEANDRO<sup>(1)</sup>, Asier PEREZ<sup>(1)</sup>, Manuel LOPEZ-AMO<sup>(1)</sup>

1. Instituto de Smart Cities y Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Comunicación, Universidad Pública de Navarra, 31006 Pamplona, España

Persona de contacto: Mikel Bravo ([mikel.bravo@unavarra.es](mailto:mikel.bravo@unavarra.es)).

### RESUMEN:

En este trabajo se propone un sistema de interrogación versátil y económico basada en la generación de pulsos empleando la modulación directa de diodos láser DFB. Se ha demostrado una resolución en longitud de onda de 1 pm para una separación de sensores de 600m. La validación del interrogador se ha llevado a cabo monitorizando una red de sensores de 26 km de longitud que incluye redes de difracción de Bragg, reflectores y un interferómetro Fabry-Pérot.

**Palabras clave:** Láseres de fibra, sensores de fibra óptica, fibra óptica monomodo, redes de difracción de Bragg, red de sensores.

### ABSTRACT:

This work proposes a versatile and cost-effective interrogation system based on pulses generation using direct modulated DFB laser diodes. A wavelength resolution of 1 pm is demonstrated for a 600 m sensor-spacing. A 26 km-long sensor network including fiber Bragg gratings, wideband reflectors and a Fabry-Pérot interferometer is used to validate the interrogator.

**Key words:** Fiber lasers, fiber optics sensors; Single-mode fiber, fiber Bragg gratings, sensor network.

## 1.- Introducción

Una de las principales ventajas de los sensores de fibra óptica (SFO) con respecto a otras tecnologías es su capacidad de multiplexación. Dentro de esta capacidad de multiplexación destaca la gran cantidad de sensores que pueden monitorizarse en una misma red, que además pueden interrogarse a grandes distancias y de manera remota. Hoy en día, la tecnología de sensores de fibra óptica se está explotando comercialmente principalmente en aplicaciones nicho; esto es, en situaciones donde otras tecnologías convencionales no pueden operar [1]. Tras varias décadas de investigación, el grado de desarrollo de los sensores de fibra óptica todavía está muy por detrás de otras

tecnologías como los sensores eléctricos, especialmente en términos de coste por sensor.

Con el fin de reducir esta brecha y ampliar el rango de aplicaciones en las que los SFO son competitivos, se están llevando a cabo numerosas investigaciones y desarrollos tecnológicos. Además de estos avances científicos, el coste del equipamiento de fibra óptica ha decrecido significativamente debido a la expansión de soluciones de comunicaciones basadas en fibra. Teniendo en cuenta estos dos aspectos, tanto la reducción de coste como la madurez del estado de la técnica, creemos que existe la oportunidad de crear dispositivos interrogadores de fibra óptica económicos, que sean suficientemente competitivos como para

alcanzar aplicaciones que inicialmente estaban fuera de su alcance.

En este contexto, numerosos grupos de investigación a nivel internacional han explorado las capacidades de modulación en longitud de onda de los diodos láser cuando se modula la corriente, temperatura, presión, o incluso campo magnético [2-5]. Estas técnicas permiten desarrollar sistemas de interrogación diseñados para monitorizar diferentes tipos de sensores [6], redes de multiplexación densa [7-8], de medida distribuida [9-10], o de larga distancia [11].

En esta contribución, presentamos el desarrollo de un sencillo sistema de interrogación basado en el barrido continuo en longitud de onda empleando modulación directa de la corriente del diodo en combinación con la variación de temperatura. Para aumentar la capacidad de sistema se ha añadido multiplexación por división temporal (TDM), mediante la inclusión de un modulador externo a la salida del láser. Este sistema se ha validado empleando redes de difracción de Bragg (FBG), un interferómetro Fabry-Pérot y reflectores simples en una red de 26 kilómetros. Este esquema ofrece una gran capacidad de multiplexación a pesar de su simplicidad y robustez, abriendo la puerta a su adaptación para un desarrollo de bajo coste.

## 2.- Principio de operación

Como ya se ha comentado, la modulación directa de la corriente del diodo láser (DL) se pulsa secuencialmente utilizando un modulador externo. Con ello se consigue un barrido en longitud de onda, así como la capacidad de multiplexar en el dominio temporal. Para evitar el solape de los pulsos reflejados, como en toda red de sensores multiplexadas en tiempo, el tiempo de repetición de pulsos debe ser mayor que el tiempo de vuelo de cada pulso reflejado en la red. Por otra parte, la distancia entre sensores debe ser mayor que el ancho del pulso para evitar solape entre sensores. Por

tanto, como puede verse en la figura 1, el espectro óptico puede reconstruirse tras concatenar adecuadamente los pulsos reflejados, considerando un periodo de repetición entre pulsos de  $P = T_r + t_p$ . La resolución espectral conseguida es directamente proporcional a la duración del pulso, afectando directamente a la resolución espacial, como en todos los sistemas basados en reflectometría óptica en dominio temporal (OTDR). De esta manera, como puede verse en la figura 1, el tiempo de escaneo del sistema sigue la siguiente expresión:

$$S = T_r \cdot (T_r + t_p) / t_p \quad (1)$$

Hay que tener en cuenta también que, aunque el pulso reflejado posee modulación en longitud de onda, la señal en este periodo de tiempo se integra en un único punto de información para aumentar la relación señal a ruido del sistema.

Para la generación de la rampa frecuencial en el diodo láser, se utiliza la modulación directa de corriente con una señal de diente de sierra. Sin embargo, los diodos láser DFB también tienen una emisión dependiente de la temperatura. Esta variación frecuencial alcanza un rango mayor mediante la variación del controlador termoelectrónico (TEC), por lo que la combinación de modulación directa de la corriente con una variación de temperatura permite extender el rango de medida. De esta manera, las medidas espectrales de alta resolución se realizan utilizando modulación en corriente, y después este proceso se repite para diferentes temperaturas del TEC, obteniendo un espectro mayor. Para hacer esto con precisión, se debe caracterizar debidamente la respuesta del láser. Para este experimento se ha utilizado un diodo láser DFB de 1 MHz de ancho de línea @1559 nm (Emcore Corp.). Presenta una excursión de 4.2 nm entre 15 °C @ 40 mA y 35 °C @ 260 mA. La figura 2 muestra el esquema de caracterización del láser.

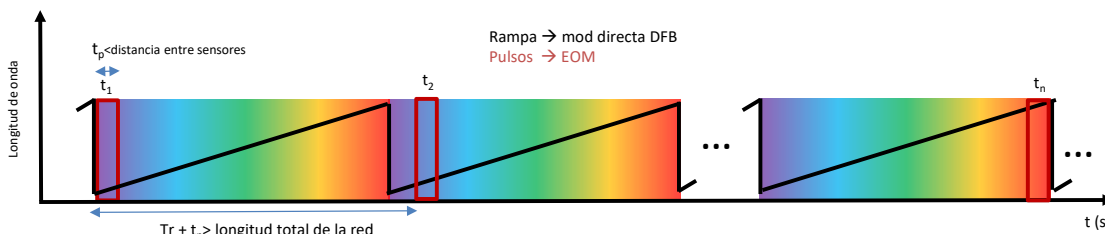


Fig. 1. Esquema del principio de multiplexación híbrido en longitud de onda / temporal.

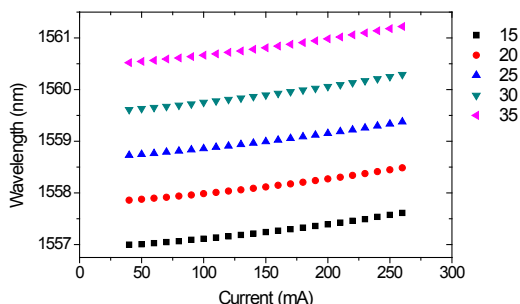


Fig. 2. Caracterización en temperatura y corriente del láser (unidades de la leyenda en °C).

## 2.- Esquema experimental

El funcionamiento del sistema se ha evaluado experimentalmente con un esquema de prueba-de-concepto. El esquema se basa en una estructura lineal con tres ramas, separadas 5 km entre sí, comenzando en el kilómetro 6. Cada rama se forma empleando acopladores ópticos con diferentes relaciones de acoplo en función de la distancia: 95:5, 90:10 y 80:20 del más cercano a la cabecera al más lejano.

En las diferentes ramas se incluyen los diferentes sensores, alternados con diferentes distancias de fibra: 4 sensores FBG, un reflector y un sensor de temperatura Fabry-Pérot S1 (alta Q-100 GHz FSR). El detalle del esquema utilizado puede verse en la figura 3. La intención de este esquema es demostrar la capacidad del sistema de interrogar diferentes tipos de sensores en una misma red, incluso solapando sus longitudes de onda. Por ello, tres de los FBGs presentan una longitud de onda central parecida, y todos ellos se solapan con el reflector así como con el interferómetro FP.

La cabecera con el sistema interrogador está formada por el diodo láser montado en un controlador comercial (Thorlabs CLD 1050). La salida del láser está conectada a un modulador de intensidad electro-óptico (EOM) y éste a un circulador. De esta manera, el circulador dirige la luz desde el láser hacia la red de sensores, mientras que la señal reflejada es dirigida hacia un fotodetector de 125 MHz de ancho de banda. Esta señal recibida se digitaliza (Analog Discovery 2) y trata mediante software.

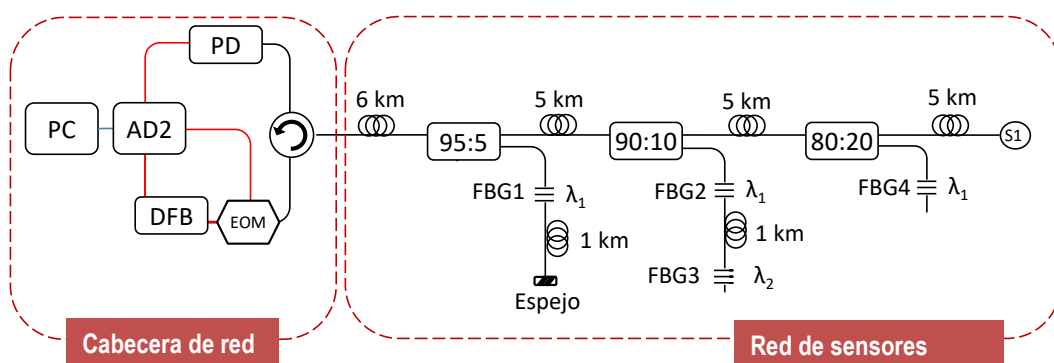


Fig. 3. Esquema del montaje experimental de la prueba de concepto de la red de sensores WDM/TDM. PC: Ordenador Personal, PD: Fotodiodo, AD2: Analog Discovery 2, DFB: Laser DFB, EOM: Modulador Electro-Óptico.

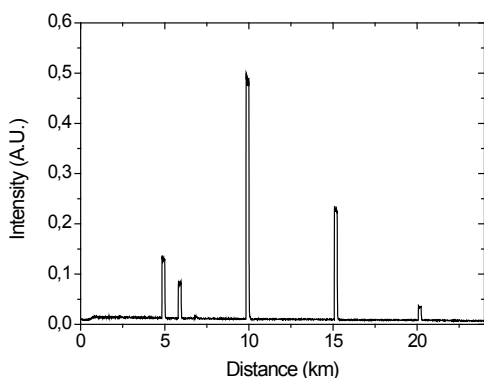
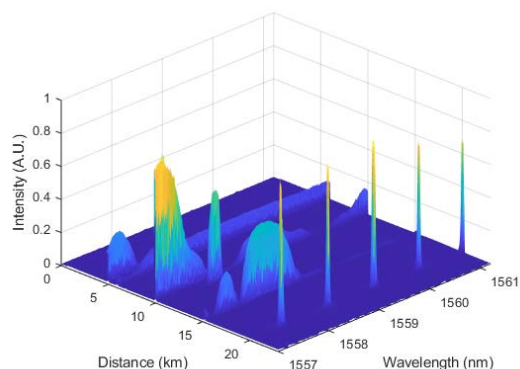


Fig. 4. Traza del osciloscopio del sistema propuesto para un valor de longitud de onda.



8 Fig. 5. Representación 3D de la distribución en distancia y longitud de onda de la red de sensores..

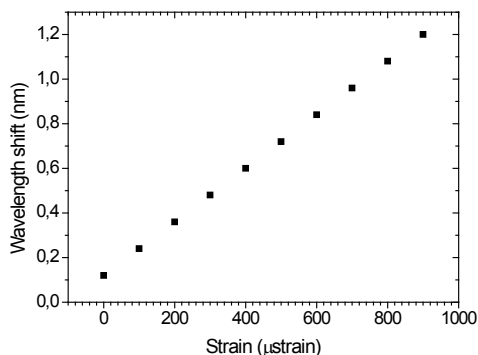


Fig. 6. Desplazamiento en longitud de onda del FBG4 ante deformación.

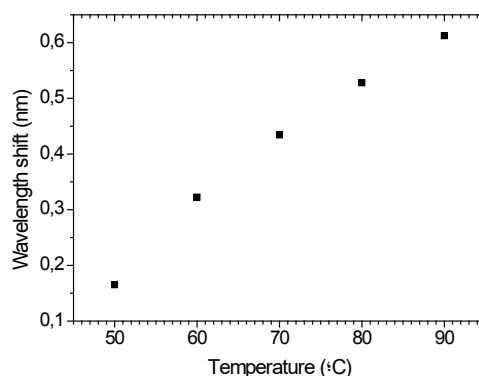


Fig. 7. Desplazamiento en longitud de onda del sensor S1 ante variaciones de temperatura.

El control de todos los dispositivos se realiza mediante un software propio, que genera las señales y secuencias de pulsos que modulan el diodo láser y el modulador respectivamente, además de controlar el punto de operación del modulador y el TEC. De la misma manera, la señal recibida en el osciloscopio digital se trata para reconstruir el espectro óptico a lo largo de la distancia.

La figura 4 muestra una traza de ejemplo. En ella se puede ver la señal reflejada por un sólo pulso a lo largo de la distancia (tiempo); por tanto, representa el perfil reflejado para un único valor en longitud de onda. Nótese que en este caso FBG3 no está presente, ya que su longitud de onda característica no corresponde con la de interrogación en ese pulso. Para la reconstrucción del espectro, se concatenan las trazas detectadas para cada longitud de onda, como puede verse en la figura 5. Como ya se ha comentado, la resolución del

sistema es proporcional al ancho del pulso. En este caso, con un periodo de repetición de la rampa de  $T_r = 1$  ms y un ancho de pulso de 2  $\mu$ s (o una excursión de 0.6 nm) se obtiene una resolución espectral de 1.2 pm y un tiempo de escaneo de 501 ms.

### 3.- Resultados

Para validar correctamente el sistema, se ha caracterizado la respuesta de los sensores a diferentes parámetros. En este caso, se ha deformado controladamente el sensor FBG4 utilizando un micro-posicionador motorizado (Figura 6). De la misma manera, se ha realizado un barrido en temperatura del sensor FP (S1) (Figura 7). Estos resultados se han obtenido mediante una rutina de software que inicialmente realiza un barrido completo en longitud de onda mediante la variación de la temperatura del TEC. Una vez el sistema localiza los sensores, se interrogan específicamente los

sensores de interés a una mayor frecuencia de muestreo. En ambos casos, la respuesta de los sensores concuerda con lo esperable.

#### 4.- Conclusión

En conclusión, este trabajo presenta un nuevo sistema de bajo coste para multiplexación WDM/TDM mediante el pulsado secuencial de un diodo láser modulado directamente. Se ha validado el funcionamiento con una red de prueba, que incluye diferentes tipos de sensores de fibra óptica en diferentes posiciones a lo largo de 26 km. Además, se ha validado la capacidad de interrogación detectando variaciones tanto de temperatura como de deformación en dos de los sensores.

El sistema presenta una alta resolución espectral, alrededor de 1 pm a pesar de emplear dispositivos sencillos y, por tanto, económicos. Además de la modulación directa, el sistema la combina con una modulación de la temperatura del controlador termoeléctrico TEC, con el fin de aumentar el rango de longitud de onda a interrogar. Una evolución natural del sistema permitiría su adaptación a un sistema de medida distribuido, en la línea de otros trabajos anteriores [9-10]. Sin embargo, el objetivo de este trabajo es explorar la posibilidad de diseñar dispositivos interrogadores flexibles y económicos, capaces de interrogar cualquier tipo de sensor. De hecho, se está trabajando en esta línea, tratando de reducir aún más el número de componentes del sistema, como por ejemplo utilizando modulando directa de pulsos.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado por los proyectos TEC2016-76021-C2 y PID2019-107270RB-C22, los fondos FEDER, la European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 838143, el contrato Beatriz Galindo BEAGAL18/00116 y las fundaciones "Caja Navarra" y "la Caixa" con el proyecto LCF/PR/PR13/51080004..

#### Referencias

- [1] R. A. PEREZ-HERRERA and M. Lopez-Amo, "Fiber optic sensor networks", *Opt. Fiber Technol.*, 19, 6, Part B, pp. 689-699, (2013)
- [2] A. R. CALAWA, J. O. Dimmock, T. C. Harman, y I. Melngailis, "Magnetic Field Dependence of Laser Emission in Pb1-XSnXSe Diodes", *Phys. Rev. Lett.*, 23, 1, pp. 7-10, (1969)
- [3] H. KIKUTA, K. Iwata, and R. Nagata, "Distance measurement by the wavelength shift of laser diode light", *Appl. Opt.*, 25, 17, p. 2976, (1986)
- [4] K. SAITO and R. Ito, "Buried-heterostructure AlGaAs lasers", *IEEE J. Quantum Electron.*, 16, 2, pp. 205-215, (1980)
- [5] J. M. BESSON, J. F. Butler, A. R. Calawa, W. Paul, and R. H. Rediker, "Pressure-tuned PbSe diode laser", *Appl. Phys. Lett.*, 7, 8, pp. 206-208, (1965)
- [6] L. S. YAN, A. Yi, W. Pan, and B. Luo, "A Simple Demodulation Method for FBG Temperature Sensors Using a Narrow Band Wavelength Tunable DFB Laser", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 22, 18, pp. 1391-1393, (2010)
- [7] M. NJEGOVEC and D. Donlagic, "Rapid and broad wavelength sweeping of standard telecommunication distributed feedback laser diode", *Opt. Lett.*, 38, 11, p. 1999, (2013)
- [8] M. NJEGOVEC and D. Donlagic, "Interrogation of FBGs and FBGs Arrays Using Standard Telecom DFB Diode", *J. Light. Technol.*, 34, 22, pp. 5340-5348, (2016).
- [9] M. R. FERNÁNDEZ-RUIZ, J. Pastor-Graells, H. F. Martins, A. Garcia-Ruiz, S. Martin-Lopez, and M. Gonzalez-Herraez, "Laser Phase-Noise Cancellation in Chirped-Pulse Distributed Acoustic Sensors", *J. Light. Technol.*, 36, 4, pp. 979-985, (2018)
- [10] J. PASTOR-GRAELLS et al, "Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses", *Opt. Express*, 24, 12, p. 13121, (2016)
- [11] D. LEANDRO, V. deMiguel Soto, R. A. Perez-Herrera, M. B. Acha, and M. López-Amo, "Random DFB Fiber Laser for Remote (200 km) Sensor Monitoring Using Hybrid WDM/TDM", *J. Light. Technol.*, 34, 19, pp. 4430-4436, (2016)