

Sensor de temperatura BOTDA asistido por Raman, de 2 metros de resolución sobre 100 km de distancia con incertidumbre de 1,2°C

2 meter resolution Raman-assisted BOTDA temperature sensor over 100 km with 1.2°C uncertainty

Xabier Angulo-Vinuesa^{(1,S,*),} Sonia Martín-López^{(1),} Javier Nuño^{(1),} Pedro Corredera^{(1,S),}
Juan Diego Ania-Castañón^{(1,S),} Miguel González-Herraez^(2,S)

1. Instituto de Óptica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 28006 Madrid, Spain.

2. Departamento de Electrónica, Universidad de Alcalá, 28871 Alcalá de Henares, Spain.

(*) Email: xabier.angulo@io.cfmac.csic.es

S: miembro de SEDOPTICA / SEDOPTICA member

Recibido / Received: 30/09/2011. Revisado / Revised: 14/12/2011. Aceptado / Accepted: 15/12/2011.

RESUMEN:

Para aumentar significativamente los rangos de medida de los sensores distribuidos basados en tecnología BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*) se puede emplear la amplificación Raman. En este trabajo hemos desarrollado un sensor de temperatura distribuido Brillouin asistido por amplificación Raman de 1er orden capaz de monitorizar 100 km de longitud con una resolución de 2 metros. La incertidumbre en cuanto a discriminación de temperatura es de 1,2°C, incluso en la región de menor contraste. Los valores de los parámetros empleados en este experimento están respaldados por un sencillo modelo analítico, considerando las mayores limitaciones del montaje.

Palabras clave: Scattering Brillouin, Sensor de Fibra Óptica Distribuido, Scattering Raman, Amplificación Raman Distribuida, Sensor de Temperatura.

ABSTRACT:

In order to increase significantly the measuring range of the distributed sensors based on Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) technology it is possible to employ Raman assistance. In this work we have developed a distributed Brillouin temperature sensor assisted by first-order Raman amplification that measures 100 km range with 2 meter resolution. The uncertainty in temperature discrimination is 1.2°C, even for the position of worst contrast. The parameters used in the experiment are supported by a simple analytical model of the required values, considering the main limitations of the setup.

Key words: Brillouin Scattering, Distributed Optic Fiber Sensor, Raman Scattering, Distributed Raman Amplification, Temperature Sensor.

REFERENCIAS Y ENLACES / REFERENCES AND LINKS

- [1]. T. Horiguchi, M. Tateda, "Optical-fiber-attenuation investigation using stimulated Brillouin scattering between a pulse and a continuous wave", *Opt. Lett.* **14**, 408-410 (1989).
- [2]. T. Horiguchi, M. Tateda, "BOTDA - Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory", *J. Lightwave Technol.* **7**, 1170-1176 (1989).
- [3]. G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 4th Edt., Chap. 9, Academic, San Diego (2007).
- [4]. M. Niklès, "Fibre optic distributed scattering sensing system: Perspectives and challenges for high performance applications," in Third European Workshop on Optical Fiber Sensors, 66190D, Italy (2007).

- [5]. M. N., Alahbadi, Y. T. Cho, T. P. Newson, "150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification", *J. Opt. Soc. Am. B* **22**, 1321-1324 (2005).
- [6]. F. Rodríguez-Barrios, S. Martín-López, A. Carrasco-Sanz, P. Corredera, J. D. Ania-Castañón, L. Thévenaz, M. González-Herráez, "Distributed Brillouin fiber sensor assisted by first-order Raman amplification", *J. Lightwave Technol.* **28**, 2162-2172 (2010).
- [7]. S. Martín-López, M. Alcón-Camas, F. Rodríguez, P. Corredera, J. D. Ania-Castañón, L. Thévenaz, M. González-Herráez, "Brillouin optical time-domain analysis assisted by second-order Raman amplification", *Opt. Express* **18**, 18769-18778 (2010).
- [8]. M. A. Soto, G. Bolognini, F. Di Pasquale, "Optimization of long-range BOTDA sensors with high resolution using first-order bi-directional Raman amplification", *Opt. Express* **19**, 4444-4457 (2011).
- [9]. N. J. Doran, D. Wood, "Nonlinear-optical loop mirror", *Opt. Lett.* **13**, 56-58, (1988).
- [10]. L. Thevenaz, S. Foaleng Mafang, J. Lin "Impact of pump depletion on the determination of the Brillouin gain frequency in distributed fiber sensors", in 21st Optical Fiber Sensors Conference, 7753-210, Canada (2011).
- [11]. S. M. Foaleng-Mafang, F. Rodriguez-Barrios, S. Martin-Lopez, M. Gonzalez-Herraez, L. Thévenaz "Detrimental effect of self-phase modulation on the performance of Brillouin distributed fiber sensors", *Opt. Lett.* **36**, 97-99 (2011).
- [12]. C. R. S. Fludger, V. Handerek, R. J. Mears, "Pump to signal RIN transfer in Raman fiber amplifiers," *J. Lightwave Technol.* **19**, 1140-1148 (2001).
- [13]. R. H. Stolen, E. P. Ippen, "Raman gain in glass optical waveguides", *Appl. Phys. Lett.* **22**, 276-278 (1972).
- [14]. J. Bromage, "Raman amplification for fiber communications systems", *J. Lightwave Technol.* **22**, 79-93 (2004).
- [15]. M. Niklès, L. Thévenaz, P. A. Robert, "Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers", *J. Lightwave Technol.* **15**, 1842-1851 (1997).
- [16]. J. Wu, Y. Li, C. Lou, Y. Gao, "Optimization of pulse compression with an unbalanced nonlinear optic mirror", *Opt. Commun.* **18**, 43-47 (2000).

1. Introducción

La medida distribuida de temperatura y deformación a lo largo de una fibra óptica es posible gracias al uso de varias técnicas. Una de ellas, es la conocida como BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*) [1,2]. Esta técnica, alrededor de la que gira este trabajo, ha evolucionado hasta convertirse en una consolidada tecnología de sensado en fibra con aplicaciones en campos diversos como: ingeniería civil, seguridad, transportes, etc.

El fenómeno físico subyacente en esta tecnología es el fenómeno no-lineal de scattering Brillouin estimulado (SBS - *Stimulated Brillouin Scattering*) [3]. El SBS es un proceso acusto-óptico que se manifiesta como una amplificación de banda estrecha de una señal de sonda contra-propagante cuando una señal de bombeo de luz intensa y coherente se introduce por uno de los extremos de una fibra monomodo. En la literatura se conoce como desplazamiento Brillouin (v_B) a la separación en frecuencia entre

la señal de bombeo y el máximo de la curva de ganancia que genera [3]. Para proporcionar información distribuida al BOTDA, la señal de bombeo se pulsa y la señal de sonda se analiza en función del tiempo de vuelo de la señal pulsada en la fibra.

El rango de medida (longitud total en la cual podemos medir con precisión) y la resolución espacial son dos de las características más restrictivas de este tipo de sistemas, estando generalmente limitados a 20-30 km con resoluciones de 1-2 metros [4]. Por un lado, el rango de medida está limitado fundamentalmente por la atenuación de la fibra, causando un incremento en la incertidumbre de la medida en los tramos lejanos de la fibra. Por otro lado, la resolución se fija con la anchura de los pulsos usados para producir la interacción distribuida. El uso de pulsos ópticos cortos incrementa la resolución, pero al mismo tiempo la distancia efectiva para la amplificación se reduce y la incertidumbre de la medida aumenta debido a

un ensanchamiento espectral asociado a la interacción. Por lo tanto, es necesario encontrar un equilibrio apropiado entre la resolución y el rango de medida que concuerde con las especificaciones requeridas para cada aplicación.

Varios estudios han probado que las pérdidas en la fibra pueden ser compensadas satisfactoriamente usando amplificación Raman de primer y segundo orden [5-7], que conduce a un aumento del rango de medida sin comprometer la resolución. En [6], se muestra un rango de medida de 75 km con una resolución de 2 metros con un BOTDA asistido por Raman de primer orden. En [7], la distancia de medida se incrementó hasta los 100 km con una resolución de 2 metros, pero en este caso usando un montaje de segundo orden mucho más complejo. En estos trabajos [6,7], el RIN (*Relative Intensity Noise*) de los bombeos Raman y su transferencia a las señales Brillouin fue identificado como el mayor problema a solventar en futuras mejoras. En un reciente trabajo de Soto *et al.* [8] se demuestra un incremento del rango hasta 120 km, manteniendo una resolución de 2 metros con una incertidumbre de estimación de temperatura de 2,1°C. La clave que permitió un aumento en términos de rango de sensado fue el bajo RIN de los láseres de bombeo Raman empleados, co-propagantes a la sonda. De todas formas, el sensado se realizó al final de la fibra, donde el contraste de la medida no es el mínimo posible, y además la incertidumbre demostrada se considera elevada para ciertas aplicaciones. En este trabajo presentamos un BOTDA asistido por Raman de primer orden, de 100 km de rango de medida que mantiene una resolución de 2 metros y con una incertidumbre estimada de 1,2°C (lo que ya se considera adecuado, por ejemplo, para la monitorización de tuberías). Además, se muestran las mejoras realizadas respecto al montaje presentado en [6] que permiten alcanzar el rango y la resolución dichos. También proporcionamos un simple diseño metodológico para analizar los requerimientos del sistema en términos de potencias de sonda y bombeo, ratio de extinción del pulso y potencia de bombeo Raman. Mostramos así, que éste simple análisis proporciona una correcta aproximación a los

valores necesarios para una óptima configuración del sistema.

2. Análisis de requerimientos

En esta sección analizamos algunos requerimientos específicos a tener en cuenta cuando se desarrollan montajes de largas distancias, en particular para rangos de 100 km y superiores. A través de argumentos simples, podemos obtener los valores límite para evitar ratio de extinción, agotamiento, auto-modulación de fase y problemas de transferencia de RIN a nuestro montaje. De aquí en adelante, la señal de bombeo (P_B^+) se introduce en la fibra en $z = 0$ y la sonda (P_B^-) en $z = L$.

2.a. Ratio de extinción

En un montaje BOTDA convencional, el pulso de bombeo Brillouin se obtiene a través de una modulación externa de una fuente láser empleando un modulador electro-óptico. En el estado "off-apagado", el modulador deja pasar cierta cantidad de potencia de bombeo, que viene caracterizada por el ratio de extinción del propio modulador. Aunque esta fuga sea pequeña, es posible que tenga un gran impacto en la medida cuando se trabaja con largas distancias y altas resoluciones. A pesar de que la potencia continua no bloqueada por el modulador es varios órdenes de magnitud menor que el pulso de bombeo, su relativa importancia en la medida viene dada por el hecho de que la ganancia generada por esta señal continua se distribuye a lo largo de toda la longitud de la fibra (100 km en nuestro caso) mientras que la amplificación creada por el pulso de bombeo permanece limitada a la resolución de la medida (2 metros en nuestro caso).

Para pequeñas ganancias, se puede tratar esta no-idealidad como una superposición del caso ideal (pulso corto con ratio de extinción infinito), con un nivel de continua proveniente de la señal de sonda amplificada por la ganancia Brillouin que provoca el background continuo del bombeo. Empleando el análisis desarrollado en [6] para la configuración asistida por Raman, sólo podemos cuantificar el ratio de la señal de background de manera numérica. Aun así,

podemos entender fácilmente los requerimientos en términos de ratio de extinción comparándolos con un montaje convencional y una configuración asistida por Raman completamente transparente (cero pérdidas, similar a la configuración mencionada en [7]).

Para un montaje convencional, el peor caso de ratio señal-background, se obtiene al final de la fibra (donde el bombeo está más atenuado), y viene determinado por:

$$\frac{\Delta P_B^-|_{pulse}}{\Delta P_B^-|_{leak}} = \frac{\Delta z \exp(-\alpha L)}{\kappa L_{eff}}, \quad (1)$$

donde ΔP_B^- es la variación detectada en la potencia de la señal de sonda, α es la atenuación en la fibra, κ es el ratio de extinción del modulador, Δz es la longitud del pulso de bombeo, L es la longitud de la fibra y L_{eff} es la longitud efectiva, como se define convencionalmente. En la Ec. (1) hemos asumido que la variación en la sonda Brillouin es pequeña en todos los casos en que la fibra es perfectamente homogénea.

Para obtener los mejores resultados, el contraste debe ser el mayor posible. No obstante, se puede obtener un buen equilibrio fijando el ratio ≥ 1 . Para un montaje convencional de 20 km con 2 metros de resolución y $\alpha=0,2$ dB/km, la expresión (1) implica ratios de extinción del orden de los 40 dB. Estos valores son alcanzables con moduladores electro-ópticos convencionales.

Como se ha comentado anteriormente, no podemos obtener analíticamente éste ratio en una configuración asistida por Raman. Aun así, como comparación, podemos obtener una expresión similar para un fibra totalmente transparente (este régimen es muy similar al demostrado en [7]):

$$\frac{\Delta P_B^-|_{pulse}}{\Delta P_B^-|_{leak}} = \frac{\Delta z}{\kappa L}. \quad (2)$$

Un análisis de esta expresión demuestra que la asistencia Raman es menos estricta en términos de requerimientos de ratio de extinción. Si comparamos los resultados obtenidos anteriormente con un montaje de 100 km con 2 metros de resolución, es necesario un ratio de extinción de 47 dB con asistencia Raman

perfecta (transparencia total) y 60 dB en el caso convencional de no asistencia. Estos valores, de todas formas, no son estándares en moduladores electro-ópticos (aunque sí que se pueden alcanzar en moduladores acusto-ópticos). La mejora en cuanto a este problema en el caso de la asistencia Raman, proviene del hecho de que el contraste se mantiene constante a lo largo de la fibra, mientras que disminuye hacia el final de la fibra en montajes convencionales.

En el montaje empleado en este artículo, hemos incrementado significativamente el ratio señal-fondo. Esto se ha conseguido introduciendo un dispositivo adicional después del modulador (NOLM - *Nonlinear Optical Loop Mirror* [9]) para aumentar el ratio de extinción de los pulsos. Este dispositivo trabaja como un absorbente saturable: la transmisión aumenta con la potencia. En el rango de trabajo, la salida del dispositivo aumenta con el cubo de la potencia de entrada [9], lo que conduce, en teoría, a triplicar el ratio de extinción en dB. En la práctica, sin embargo, el ratio de extinción alcanzado es limitado (debido a la difusión Rayleigh u otras no-idealidades) a aproximadamente 60 dB. En comparación, en los resultados obtenidos en [6] a lo largo de 75 km con 2 metros de resolución se obtuvo un ratio de extinción de 43 dB con un modulador electro-óptico.

2.b. Agotamiento

En [6] se reconocía que el agotamiento era una de las mayores fuentes de no-idealidades en el caso de asistencia Raman. Hasta hace poco, no existía un modelo analítico del agotamiento en sensores BOTDA. En los últimos meses, Foaeng-Mafang *et al.* [10] han desarrollado un simple modelo analítico del agotamiento del bombeo en un BOTDA convencional. Aunque el modelo desarrollado en [10] no se adapta al caso de la asistencia Raman, podemos de nuevo tener una idea de los parámetros requeridos para nuestro sistema comparando de nuevo los dos casos tratados anteriormente: el caso convencional y el de transparencia perfecta.

De acuerdo con [10] la fracción de potencia perdida por el bombeo a través del agotamiento puede directamente ser calculada de las

pérdidas teóricas Brillouin inducidas por la sonda, por lo que:

$$d = \frac{P_{Bo}^+ - P_B^+}{P_{Bo}^+} = 1 - \exp\left(-\frac{g_B}{A_{eff}} P_B^-(L) L_{eff}\right), \quad (3)$$

donde P_{Bo}^+ es la potencia de bombeo en ausencia de interacción Brillouin, g_B es el coeficiente de ganancia Brillouin y A_{eff} es el área efectiva de la fibra. Ésta expresión proviene del hecho de que la ganancia de la sonda puede ser considerada despreciable en todos los casos. Para un montaje con transparencia total (similar a [7]), se puede obtener una expresión similar reemplazando L_{eff} por L . Con esto ya se puede fijar el valor aceptable de agotamiento con valores por debajo del 10%. Se ha comprobado que se obtienen valores aceptables de error de frecuencia, por debajo de 1MHz [10]. Para fibras con características típicas ($g_B=5 \times 10^{-11}$ m/W, $A_{eff}=70 \mu\text{m}^2$) y $L=100$ km, se puede deducir que hay que trabajar a niveles de potencia del orden de 1 μW o menor en la configuración asistida por Raman (en condiciones de perfecta transparencia), mientras que se pueden alcanzar valores de hasta 7 μW en el caso convencional de no-asistencia.

2.c. Automodulación de fase

La automodulación de fase (SPM - *Self-Phase Modulation*) se ha mostrado como un fenómeno que juega un papel perjudicial no despreciable en los sensores BOTDA, particularmente en los montajes de largas distancias y altas resoluciones. La SPM produce pequeñas perturbaciones (*chirp*) de fase durante las transiciones de intensidad de los pulsos de bombeo (en la parte superior y en los bordes) que eventualmente se convierten importantes en fibras largas. El ensanchamiento en frecuencia asociado a esta modulación de fase conduce a una reducción del pico de ganancia e incertidumbres en la determinación del desplazamiento Brillouin, pero deja la distribución temporal de intensidad del pulso de bombeo sin cambios, por lo que la resolución espacial se conserva. Como se muestra en [11], para un pulso Gaussiano con anchura $\tau = 1/e$, la expresión de la frecuencia instantánea viene determinada por:

$$\Delta\omega_{max} = \frac{2\gamma P z_{eff}}{\sqrt{e}\tau} = 1,43 \frac{\gamma P z_{eff}}{T}, \quad (4)$$

donde T es la anchura total a media altura (FWHM - *Full-Width at Half-Maximum*) del pulso. Para un montaje perfectamente transparente, la longitud efectiva en la expresión anterior debería ser reemplazada por la longitud física de la fibra. Se puede conservar un buen contraste a lo largo de la fibra fijando la anchura máxima a 10 MHz. En el caso de transparencia perfecta, esto limita la potencia de bombeo a aproximadamente 1,4 mW. En una configuración no asistida la limitación de potencia para evitar un ensanchamiento espectral significativo en el bombeo podría estar en aproximadamente 6 mW.

2.d. Transferencia de RIN

En trabajos previos de BOTDAs asistidos por Raman [12-14], la transferencia de RIN fue identificada como una de las mayores limitaciones del sistema. En este apartado analizamos más en profundidad el efecto de la transferencia de RIN en el desarrollo de un BOTDA, en particular en lo que concierne a potencia y configuración del bombeo. En este análisis determinaremos el máximo de potencia de bombeo Raman a partir del cual la asistencia Raman deja de ser efectiva a la hora de mejorar la calidad de la señal en nuestro sistema.

La transferencia de RIN en un sistema BOTDA se analiza empleando el modelo desarrollado en [12]. En nuestro caso, este modelo se emplea para cuantificar la transferencia de RIN como función de la potencia de bombeo en un esquema de bombeo bi-direccional como función de la frecuencia de la señal (dentro del rango del ancho de banda de detección, aproximadamente 100 MHz), potencia total de bombeo (desde ambos lados de la fibra) y configuración del bombeo. Los resultados para una fibra estándar monomodo se muestran en la Fig. 1. Las señales del BOTDA (sonda y bombeo) están localizadas espectralmente a 1554 nm y las del bombeo Raman a 1455 nm. Todos los parámetros de la fibra son idénticos a los empleados en [6]. La Fig. 1(a) muestra la evolución de la transferencia RIN en función del bombeo Raman para una fibra de 100 km, y la Fig. 1(b) es la comparación de 300 mW con los

casos de bombeo co-propagante y contra-propagante a 150 mW.

Como era de esperar, la transferencia logarítmica del RIN se incrementa rápidamente con la potencia. En la configuración bi-direccional, la curva de transferencia de RIN muestra una forma paso-bajo con dos frecuencias de corte características, una en el rango de los KHz y la otra en el rango de las decenas de MHz. Como se muestra en la Fig. 1(b), la forma de la curva de transferencia de RIN se puede considerar como la suma de los vectores co- y contra-propagantes, donde el ejemplo contra-propagante (respecto a la sonda) muestra una frecuencia de corte mucho más baja. Esto concuerda con la figura de la configuración de amplificación co-propagante, donde el bombeo y la señal viajan con velocidades de grupo similares, lo que favorece la transferencia de RIN sobre un rango de frecuencias mayores. La mayor limitación en cuanto a términos de ruido en esta configuración está, por lo tanto, impuesta por la potencia de la señal contra-propagante a la sonda.

Considerando un valor típico de RIN de un láser Raman en -110 dBc/Hz, el valor RMS esperado de ruido en este caso sería del orden de 10^{-3} , lo que estaría en el mismo orden de la ganancia a medir. A medida que se incrementa la potencia del bombeo Raman, el RIN global se duplica a aproximadamente 420 mW y se triplica a una potencia ligeramente por debajo de los 500 mW. El aumento de la transferencia de RIN es, por lo tanto, más rápido que la ganancia adquirida. Por consiguiente, tan sólo debería emplearse la amplificación Raman hasta el punto límite de la superación de los problemas de detección. Para evitar problemas de RIN, sería necesario emplear bombeos con bajo RIN como los empleados en el montaje de [8], o bombeos que consigan hacer la señal visible dentro del rango de detección del sistema. Éste último es el empleado en el montaje de este artículo.

3. Montaje experimental

El montaje empleado para este trabajo se muestra en la Fig. 2, y es similar al realizado por algunos de los autores de este artículo en el

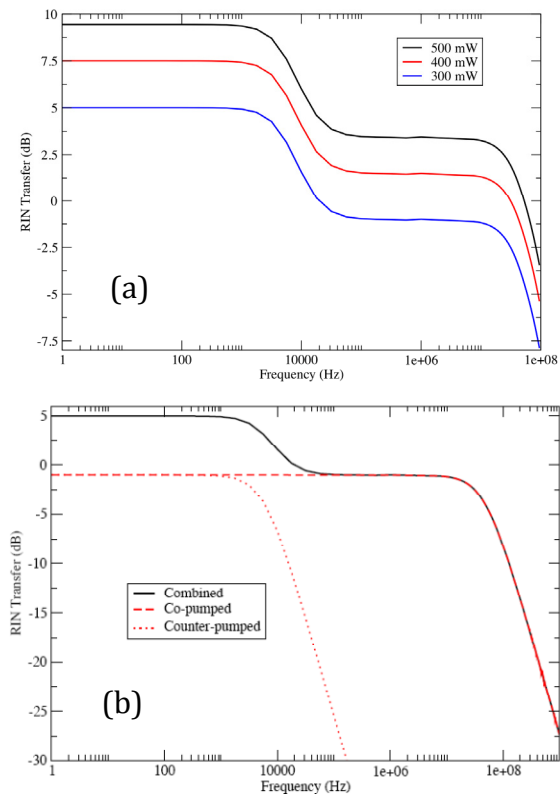


Fig. 1 (a) Transferencia de RIN en función de la potencia Raman de bombeo para 100 km de fibra y diferentes potencias de bombeo y (b) detalle de la transferencia RIN como función de la frecuencia estimada para las configuraciones co- y contra-propagante en relación al caso bi-direccional (todos los parámetros de la fibra son idénticos a los empleados en [6]).

trabajo citado en [6], aunque éste tiene optimizaciones clave en la parte de la generación del pulso y en el bombeo Raman. Las señales de sonda y bombeo se generan con una diferencia de frecuencia controlada de una única fuente, cuya señal se divide y modula [15]. Este esquema evita el efecto que cualquier perturbación de frecuencia en las señales pueda tener sobre la posición espectral de la sonda y el bombeo. La fuente de nuestro BOTDA (Fig. 2) es un láser de diodo (LD - *Laser Diode*) que emite 4 mW, con una anchura espectral de línea de 1 MHz, a la longitud de onda de 1553.59 nm.

El bombeo se pulsa con pulsos de 30 ns, que son amplificados a través de un amplificador de fibra dopado con erbio (EDFA - *Erbium Doped Fiber Amplifier*). Ya que la distancia de medida es de 100 km, el rango de repetición de los pulsos tiene que ser menor de 1 ms, lo que significa que

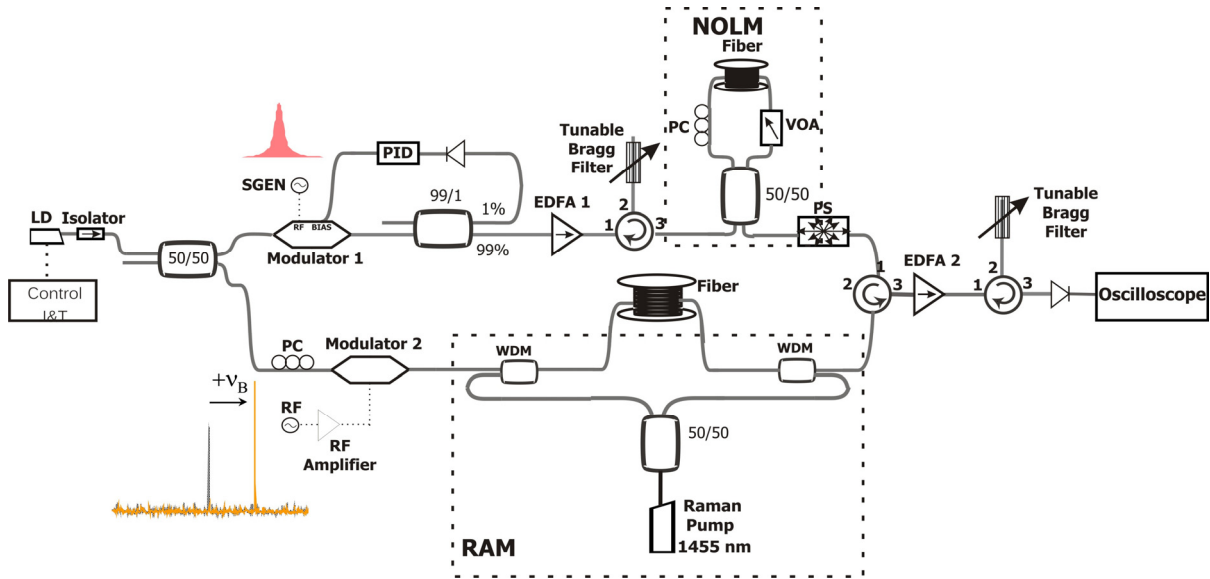


Fig. 2. Montaje experimental del sensor Brillouin distribuido asistido por Raman. LD: Láser de diodo; PC: Controlador de polarización; SGEN: Generador de pulsos; PID: Circuito electrónico proporcional-integrador; EDFA: Amplificador de fibra dopado con erbio; RF: Generador de radio-frecuencia; NOLM: Espejo no-lineal; VOA: Atenuador óptico variable; PS: Aleatorizador de polarización; WDM: Multiplexador por división en longitud de onda.

se emplea un ciclo de trabajo muy bajo (del orden de 10^{-5}). Por lo tanto, es necesario obtener ratios de extinción del orden de 10^5 para ser capaces de medir de manera correcta las variaciones en la señal de sonda. Para asegurar el ratio de extinción del bombeo se emplean dos sistemas. Primero, un circuito electrónico integrador (PI - *Proportional Integrative*) está conectado al modulador óptico para fijar su punto de trabajo a mínima transmisión, lo que permite un ratio de extinción de 25-30 dB.

Con el fin de mejorar este ratio se emplea un NOLM [9] después de la formación del pulso y de su amplificación. El NOLM proporciona la extinción de señal continua suficiente para alcanzar más de 50 dB de extinción en el pulso de bombeo. El NOLM, además, produce una pequeña compresión en los pulsos obteniendo un pulso estrecho y sin apenas señal continua [9,16], que altera la anchura temporal original de 30 ns a aproximadamente 20 ns. De este modo se consiguen, a la entrada de la fibra, pulsos de bombeo de 20 ns y tasa de repetición de 700 Hz.

La señal de sonda se obtiene de la banda lateral de menor frecuencia generada a partir de una modulación en frecuencia sobre la mitad de la señal proveniente del láser. Esta modulación se realiza con una frecuencia que se aproxima al

desplazamiento Brillouin para la fibra bajo prueba ($\sim 10,68$ GHz). La frecuencia de la portadora resultado de la modulación se suprime fijando correctamente la corriente DC de polarización del modulador. La banda lateral superior se propaga junto a la inferior (señal de sonda) a lo largo de la fibra, que ayuda a amplificar ligeramente la señal de bombeo [6]. En ningún caso la amplificación residual del bombeo debido a la banda lateral superior excede de 0,1 dB.

Para obtener SBS, tanto la señal de sonda como la de bombeo se introducen por lados opuestos de la fibra en direcciones contra-propagantes, junto con el bombeo Raman a través de multiplexadores por división en longitud de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexer*). El bombeo Raman se obtiene dividiendo la salida de un láser Raman en fibra (RFL - *Raman Fiber Laser*) con un acoplador 50/50, e introduciendo por cada extremo de la fibra la mitad de la potencia del bombeo. De esta manera, se emplea una configuración Raman bidireccional para el proceso de amplificación [13,14]. El RFL emite a 1455 nm, que induce amplificación Raman en la ventana de 1550 nm. El RFL puede emitir hasta potencias de 2,4 W, aunque nosotros usamos únicamente 480 mW (240 mW por cada extremo de la fibra). Este

valor de potencia de bombeo Raman está por debajo del valor necesario para una perfecta compensación de las pérdidas (es más bajo que los valores empleados en [6]), y aun así garantiza el mejor compromiso entre la amplificación y la transferencia de RIN que transfiere nuestro RFL al sistema. Para mitigar la sensibilidad a la polarización de los procesos implicados, se emplea un aleatorizador de polarización (PS- *Polarization Scrambler*). Antes de la detección, la señal se amplifica por medio de otro EDFA.

4. Resultados

En esta sección ilustramos los resultados obtenidos con la configuración BOTDA asistida por Raman descrita anteriormente, así como los resultados calculados con el modelo teórico obtenido en [6]. Los 100 km de fibra se componen de 4 bobinas de 25 km de fibra monomodo G652 (SMF – Single Mode Fiber) con un área efectiva de $70 \mu\text{m}^2$ y un desplazamiento Brillouin uniforme localizado a 10,68 GHz de la longitud de onda del bombeo ($\sim 1554 \text{ nm}$). Las potencias de pico de sonda y bombeo son 0,17 μW y 2,133 mW respectivamente, con 480 mW de bombeo Raman.

La Fig. 3 muestra la comparación entre la ganancia medida y calculada en cada punto de la fibra. Se puede observar un ajuste bueno entre las dos curvas, que demuestra un buen funcionamiento del sistema. Como hemos mencionado, el valor de la potencia de bombeo está un poco por debajo del valor necesario para una buena compensación de las pérdidas. Aún así, esto asegura un buen funcionamiento del RFL en términos de transferencia de RIN.

En la Fig. 4 se muestra la variación del desplazamiento Brillouin obtenida para toda la distancia de sensado. La variación del desplazamiento Brillouin se concentra entre 10,67 GHz y 10,68 GHz (10 MHz), diferencia razonablemente estable, a excepción de los primeros 20 km donde el desplazamiento Brillouin desciende hasta 10,66 GHz. La notable variación de ν_B a lo largo de los primeros kilómetros se debe probablemente a alguna variación longitudinal en la construcción de los parámetros de la fibra (probablemente el

dopado de GeO_2). La diferencia en el desplazamiento Brillouin obtenido entre dos trazas consecutivas es menor de 1,5 MHz. De esta información, por lo tanto, se puede determinar la incertidumbre de la medida en temperatura del sensor desarrollado. El desplazamiento Brillouin tiene una variación lineal respecto a la temperatura de 1,3 MHz/ $^\circ\text{C}$ [15], por lo que un desplazamiento menor de 1,5 MHz nos asegura una incertidumbre en temperatura de al menos 1,2 $^\circ\text{C}$.

La Fig. 5 muestra una representación tridimensional de la ganancia Brillouin a lo largo de los 100 km de la fibra bajo test, para valores de separación en frecuencia entre bombeo y sonda comprendidos entre 10,74 GHz y 10,58 GHz, equiespaciados 2 MHz. Es remarcable que la ganancia en función de la frecuencia concuerda con el perfil Gaussiano/Lorentziano

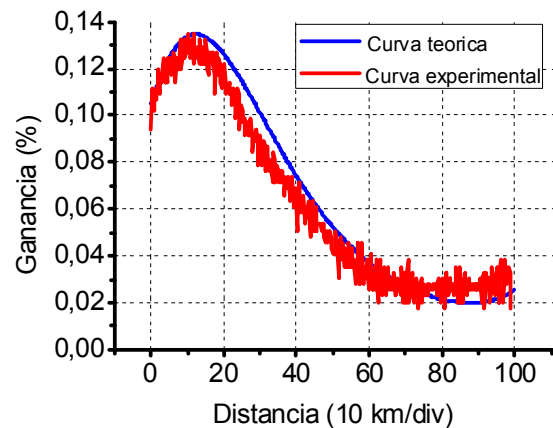


Fig. 3. Comparación entre la traza obtenida de la ganancia máxima en cada posición (línea roja) y los resultados calculados usando el modelo analítico de la configuración Raman bi-direccional [6].

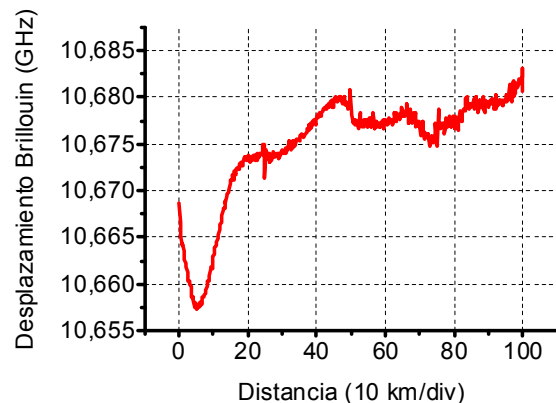


Fig. 4. Variación del desplazamiento Brillouin a lo largo de los 100 km de fibra.

esperado [3], y además no se observa agotamiento. El contraste máximo en ganancia se obtiene aproximadamente en el 15 km del comienzo de la fibra y el mínimo contraste aparece en el 75 km aproximadamente. De ese punto en adelante la ganancia sigue aumentando hasta el final de la fibra.

Para demostrar que nuestro BOTDA es preciso incluso en las peores condiciones, hemos decidido localizar un punto caliente entre las dos últimas bobinas de fibra donde el contraste de la ganancia es mínimo, pero con una relación señal/ruido del 0,025 %, valor suficientemente elevado como para poder realizar medidas. Aún así, el número de promediados necesario para poder sensar en esa región es como mínimo de 65536. Se introdujeron 2 metros de fibra en un baño de agua a $56 \pm 5^\circ\text{C}$, estando el resto de la fibra a temperatura ambiente, $21 \pm 2^\circ\text{C}$.

La Fig. 6 muestra el resultado de un barrido en frecuencia para una región de la fibra alrededor del punto caliente, desde 10,58 GHz hasta 10,75 GHz con resolución de 2 MHz, lo que se traduce en un total de 86 medidas. Teniendo en cuenta un mínimo de 65536 promediados, el tiempo de medida que se puede conseguir depende de dos factores fundamentales: por un lado el tiempo que tarda la señal de bombeo en recorrer la fibra dos veces, ya que la detección se realiza en el extremo por el que se introduce el bombeo Brillouin, y por otro lado la velocidad y resolución de la electrónica empleada. El primero de los factores, teniendo en cuenta la velocidad de la luz en la fibra, la longitud de fibra bajo test (100 km), y el número de frecuencias analizadas (86), nos daría un tiempo óptimo de adquisición de aproximadamente una hora y media, lo cual es sólo ligeramente mayor que los sistemas convencionales de larga distancia (típicamente una hora de medida con este grado de incertidumbre sobre 50 km). En nuestro caso los cambios de sintonía de frecuencia y la electrónica de adquisición no están optimizados, por lo que el tiempo invertido es algo mayor, de unas dos horas.

La ν_B de la sección de fibra a temperatura ambiente se encuentra alrededor de 10,67 GHz, mientras que en la posición del punto caliente (74,83 km) ν_B se ha desplazado hasta los 10,71 GHz. Debido a que la respuesta de la fibra óptica

en desplazamiento Brillouin a la temperatura es totalmente lineal con una sensibilidad de 1,3 MHz/ $^\circ\text{C}$ [15], esta diferencia de 45 MHz entre la frecuencia del punto caliente y el resto de la fibra determinan una variación de 35°C , que se ajusta perfectamente a la diferencia de temperatura esperada. Por lo tanto, se puede ver claramente el punto caliente en la posición esperada (aproximadamente 74,83 km) además de la transición entre la tercera y la cuarta bobina (74,80 km) que tienen valores de ν_B ligeramente diferentes.

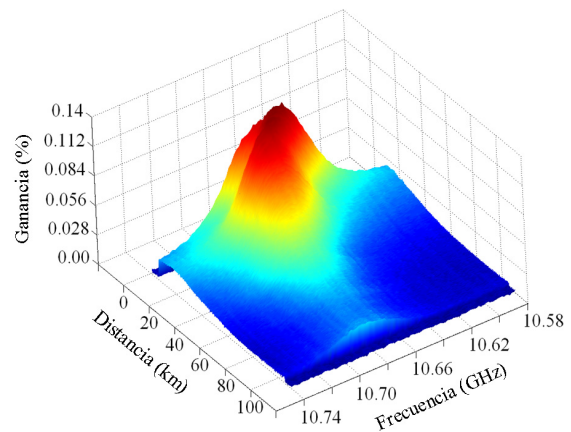


Fig. 5. Representación de la ganancia Brillouin a lo largo de los 100 km de distancia de medida, en función de la separación en frecuencia entre el bombeo y la sonda.

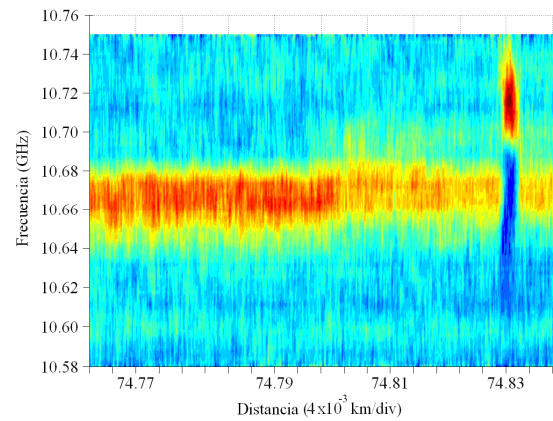


Fig. 6. Representación de la ganancia Brillouin alrededor del punto caliente (localizado cerca del 75 km), para un en frecuencia entre 10,58 GHz y 10,75 GHz, con resolución de 2 MHz.

5. Conclusiones

En conclusión, hemos presentado un sensor de fibra óptico distribuido de 100 km de alcance con 2 metros de resolución. Hemos mostrado que el sistema realiza correctamente la función

de sensor de temperatura demostrando una determinación precisa de la temperatura de un punto caliente incluso en la posición con contraste mínimo de ganancia. En comparación con configuraciones previas, hemos logrado una extensión del rango dinámico de 25 km manteniendo la misma resolución. Esto ha sido posible gracias al uso de menores potencias de sonda, bombeo y Raman en comparación con [6], lo que se traduce en una menor transferencia del RIN del Raman a la sonda Billouin. Adicionalmente, se ha conseguido un mejor ratio de extinción gracias al uso del NOLM. La calidad de los resultados nos hace pensar que es posible alcanzar longitudes medibles mayores aumentando los niveles de potencia con configuraciones más precisas y bombeos Raman con menor RIN.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado en parte por el Ministerio de Ciencia y Educación a través de los proyectos TEC2008-5791, TEC2009-14423-C02-01 y TEC2009-14423-C02-02, por el Ministerio de Fomento a través del proyecto MIFFO (FOM-77/07) y la Comunidad de Madrid a través del proyecto FACTOTEM2 (S2009/ESP-1781). Sonia Martín López y Javier Nuño agradecen financiación económica del Ministerio de Ciencia e Innovación a través de un contrato “Juan de la Cierva” y una beca FPI, respectivamente.