

Monitorización de actividad sísmica usando sensores distribuidos en fibra basados en ϕ OTDR y pulsos con chirp

Seismic activity monitoring using distributed optical fiber sensors based on chirped-pulse ϕ OTDR

María R. FERNÁNDEZ-RUIZ⁽¹⁾, Hugo F. MARTINS⁽²⁾, Ethan F. WILLIAMS⁽³⁾, Luis COSTA⁽¹⁾, Regina MAGALHÃES⁽¹⁾, Sonia MARTIN-LOPEZ⁽¹⁾, Zhongwen ZHAN⁽³⁾, Miguel GONZALEZ-HERRAEZ⁽¹⁾

1. Departamento de Electrónica, Edificio Politécnico, Universidad de Alcalá, Ctra. Madrid-Barcelona, s/n, km. 33,600, 28806, Alcalá de Henares, Madrid.
2. Instituto de Óptica, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 28006, Madrid.
3. Seismological Laboratory, California Institute of Technology, 1200 E. California Blvd., Pasadena, CA 91125-2100, USA.

Persona de contacto: María R. Fernández-Ruiz (rosario.fernandezr@uah.es).

RESUMEN:

Actualmente, los sistemas de comunicaciones ópticas de larga distancia se basan en una extensa red de fibra óptica que se encuentra instalada alrededor del globo. En este trabajo, presentamos cómo esta red de fibra puede ser empleada para un uso alternativo: el análisis de movimientos sísmicos del planeta. Para ello, se ha utilizado la fibra como elemento sensor en un sistema de sensado distribuido basado en OTDR sensible a fase (ϕ OTDR) usando pulsos con chirp con el que se ha detectado un terremoto de grado 8,2 ocurrido el pasado agosto en las Islas Fiji. Este terremoto se ha detectado en dos localizaciones diferentes, un entorno metropolitano en la ciudad de Pasadena (California, EEUU) y un entorno submarino en la costa de Bélgica. Usando técnicas de procesamiento lineales se ha podido extraer información del terremoto del ruido ambiente. Los resultados aquí mostrados muestran el gran potencial de la red de fibra ya instalada para su uso como sismógrafo distribuido.

Palabras clave: Sensado distribuido, OTDR sensible a fase, sismología, fibra óptica, scattering Rayleigh, pulsos con chirp.

ABSTRACT:

Nowadays, long-haul optical communication systems are based on an extensive fiber optical network deployed all around the globe. In this work, we present an alternative use of this fiber network: the analysis of seismic activity on the planet. For this purpose, we have employed already-deployed fiber as sensing element in a distributed fiber sensor based on phase-sensitive OTDR (ϕ OTDR) probed using chirped-pulses. With this system, we have detected an M8.2 earthquake occurred last August in Fiji from two different locations: a metropolitan area in Pasadena (CA, USA) and a submarine area in Belgium. By using linear signal processing techniques, the seismic information has been successfully extracted from ambient noise. The presented results show the high potential of the already deployed fiber optical network for its use as distributed seismometer.

Key words: Distributed sensing, phase-sensitive OTDR, seismography, optical fiber, scattering Rayleigh, chirped pulse.

1.- Introducción

La tomografía sísmica es un área de estudio en continuo desarrollo que permite conocer la estructura interna de la tierra a partir del análisis de las ondas que se propagan durante movimientos sísmicos. Esta disciplina es de gran importancia para el conocimiento de los procesos que ocurren en el núcleo de la Tierra, así como para conocer la tectónica de placas o realizar análisis de zonas volcánicas. Para ello, hoy en día existe una amplia red de sismógrafos instalados alrededor del planeta monitorizando continuamente los distintos movimientos sísmicos (ya sean temblores débiles o terremotos de magnitudes considerables) que se producen en cada punto. Sin embargo, la gran mayoría de estos sismógrafos se encuentran instalados en terrenos superficiales y/o zonas de conocida actividad sísmica importante. Esto provoca un sesgo en el procesamiento y análisis de los datos usados para tomografía global, debido a la escasa información en ciertas regiones, sobre todo en entornos submarinos.

Para dar solución a este problema, recientemente se ha propuesto utilizar la red de fibra óptica de comunicaciones ya instalada como una red de sismógrafos distribuidos [1,2]. Actualmente, gracias al desarrollo de las comunicaciones por fibra, contamos con una red de más de un millón de kilómetros de fibra óptica instalados cubriendo gran parte de la superficie terrestre, incluyendo fibra transoceánica que conecta los distintos continentes. El uso de la fibra óptica como elemento sensor para adquirir información sísmica supone importantes ventajas en el campo de la tomografía terrestre. Cuando se usa la fibra como sensor distribuido, esta se comporta como una densa red de sensores puntuales separados por la resolución espacial (del orden de metros). La alta resolución espacial unida a la gran cobertura de fibra alrededor del planeta aseguran un adecuado muestreo de las ondas sísmicas. Además, otra importante ventaja es el bajo coste asociado a la instalación y mantenimiento, ya que se estaría utilizando una infraestructura ya en uso. De hecho, las fibras oscuras se alzan como excelentes candidatas ideales para esta aplicación, asegurando una mínima intrusión en los enlaces de comunicaciones ópticas [2].

En este trabajo, se demuestra la viabilidad de utilizar la fibra óptica ya instalada para detección de actividad sísmica. Para ello, se ha utilizado la reciente tecnología de sensado distribuido basada en reflectometría óptica temporal sensible a fase (ϕ OTDR) usando pulsos con chirp (CP- ϕ OTDR) [3]. Esta tecnología ha demostrado su gran potencial para detectar vibraciones, variaciones de temperatura o de tensión en la fibra con gran precisión y usando un circuito muy simple y robusto frente al ruido. Un terremoto de grado 8,2 ocurrido el pasado mes de agosto en las Islas Fiji es detectado por esta tecnología en dos localizaciones diferentes, una metropolitana y otra submarina. Tras el procesado de los datos recogidos, estos se comparan con datos obtenidos por sismómetros cercanos, verificando la viabilidad de la red de fibra óptica como sismómetro distribuido.

2.- Montaje experimental

Desde su introducción hace tres años, los sensores distribuidos basados en CP- ϕ OTDR se han alzado como un sistema de altas prestaciones (alta resolución y sensibilidad, robustez frente al ruido de fase) usando un montaje extraordinariamente sencillo [4,5]. De hecho, este sistema permite detectar y cuantificar la magnitud de la perturbación usando un montaje muy similar al de los sensores usados solamente para detección de vibraciones, es decir, basados de detección directa de la traza. Esto contrasta con la complejidad de los sistemas alternativos para cuantificación de la perturbación, los cuales requieren o bien detección coherente y métodos de postprocesado para una correcta manipulación de la fase de la traza, o bien el uso de un láser sintonizable y un barrido en frecuencias de los pulsos sonda. Estas características hacen de los sensores CP- ϕ OTDR una tecnología idónea para uso en tomografía sísmica.

Para la realización de este trabajo se han utilizado dos sensores CP- ϕ OTDR con un diseño estándar, como el descrito en [3]. El montaje experimental del sensor CP- ϕ OTDR se encuentra representado en la Fig. 1. Como se ha comentado antes, este esquema coincide con el de un ϕ OTDR tradicional con detección directa, con la única modificación de modular la corriente del láser con una señal rampa para

variar linealmente la frecuencia instantánea de la emisión a lo largo de la duración del pulso, induciendo así el chirp. A continuación, se describirán con detalle los dos montajes experimentales utilizados para detectar el citado terremoto.

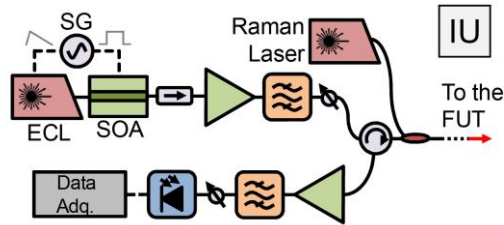


Fig. 1: Esquema del sistema interrogador (IU): ECL: external cavity laser; SG: signal generator; SOA: semiconductor optical amplifier, FUT: fiber under test.

2.1.- Pasadena (California, EEUU)

Uno de los sensores distribuidos se ha instalado utilizando la red de fibra óptica existente en la ciudad de Pasadena, en California (EEUU). Se trata de una ciudad densamente poblada situada a más de 9.000 km del foco del terremoto. La fibra usada como sensor es de unos 25 km, recorriendo primero 2 km de este a oeste, luego 4 de sur a norte y finalmente 5 de oeste a este, tal y como se representa en la Fig. 2. La instalación de fibra da varias vueltas y curvas a lo largo de su recorrido, lo que explica la diferencia entre la longitud de fibra y la distancia geométrica.



Fig. 2: (a) Distribución geométrica de la fibra utilizada como sensor en Pasadena. IU: sistema interrogador (ver Fig. 2); (b) Distribución real de la red de fibra en la ciudad de Pasadena.

2.2.- Zeebrugge (Bélgica)

El segundo sensor se instala en una fibra submarina de 40 km situada en la costa de la localidad de Zeebrugge (Bélgica), tal y como indica el mapa de la Fig. 3. La fibra alcanza una profundidad de unos 30 m, con lo que está muy expuesta a ruido superficial como olas,

mareas, barcos, etc. Este sensor se encuentra a unos 16.000 km del foco del terremoto.

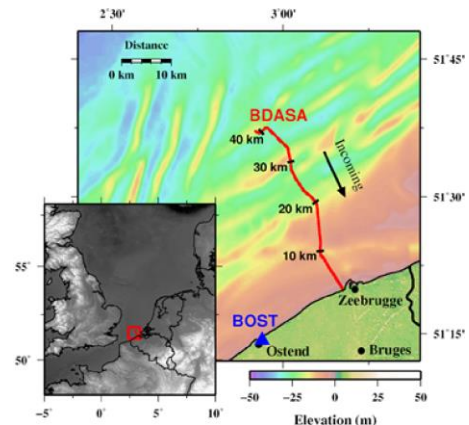


Fig. 3: (a) Distribución de la fibra utilizada como sensor en Zeebrugge. BOST station es el sismógrafo con el que se compararán los resultados obtenidos.

3.- Resultados de las medidas

Los dos sistemas interrogadores capturaron el terremoto junto con otras perturbaciones asociadas al entorno en el que se encontraba instalada la fibra. Los datos recogidos fueron procesados mediante filtrado bidimensional lineal (usando información espacial y temporal), con el fin de aislar la información sísmica del ruido ambiente. Los resultados de este procesado se han comparado con señales obtenidas por sismómetros cercanos para verificar la correcta adquisición de las vibraciones sísmicas.

3.1.- Pasadena (California, EEUU)

En la Fig. 4(a) se muestran los resultados capturados por el sensor. En el eje de abscisas se representa el tiempo de medida mientras que el eje de ordenadas representa la longitud de la fibra. Por simplicidad, se muestran solo los 5 últimos km, que corresponden con el último tramo lineal de fibra en dirección oeste-este. En la ciudad de Pasadena, la mayor parte del ruido ambiente capturado por la fibra es debido a tráfico y actividad humana. Un conocimiento previo de las características espectrales y espaciales de los movimientos sísmicos indica que estos se encuentran a frecuencias inferiores a 1 Hz y con periodos por encima de 1 km. Estas componentes son filtradas por un filtro paso de banda rectangular 2D. En particular, usamos un filtro que mantiene frecuencias temporales entre 0.02 Hz y 1 Hz, y

frecuencias espaciales entre 0 y $4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$. El filtro solo incluye bandas de paso en los cuadrantes 2 y 3, seleccionando así las vibraciones que se desplazan de oeste a este. Las trazas recogidas después de este filtrado se muestran en la Fig. 4 (b).

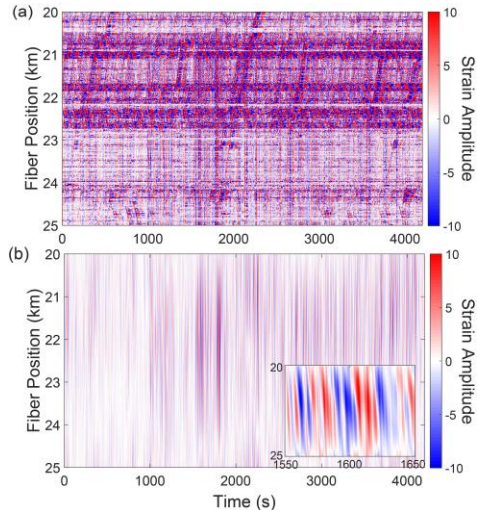


Fig. 4: (a) Trazas originales recogidas por el sistema interrogador; (b) Trazas tras el procesado bidimensional realizado.

Para verificar que los datos procesados se corresponden con la actividad sísmica ocurrida en las inmediaciones de la fibra los comparamos con datos recogidos una estación sísmica cercana, indicada en la Fig. 1. En la Fig. 5(a) se muestra es espectrograma de la traza resultante de sumar los canales de los últimos 5 km, y en la Fig. 5(b), el espectrograma de la señal recogida por el sismómetro. La diferencia en el tiempo de inicio de trazas es debido a un retardo en el comiendo de grabado de datos de los sensores. Aun así, se puede observar que alrededor del segundo 1000 comienza el terremoto, y la dinámica tiempo-frecuencia que siguen las dos gráficas es muy parecida, disminuyendo progresivamente la frecuencia a lo largo de la traza. Se observa que la señal medida por el sismógrafo es más energética, lo cual es debido a la diferente magnitud que miden ambos sensores: mientras el sensor distribuido mide elongación de la fibra, el sismógrafo mide velocidad de partículas. Estos parámetros son aproximadamente proporcionales, lo cual nos permite hacer la comparación.

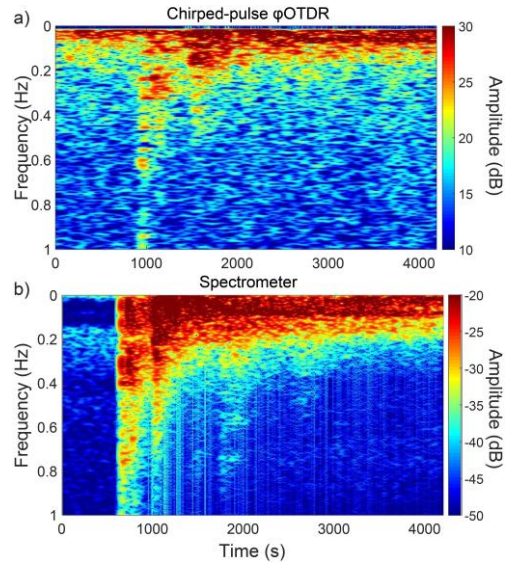


Fig. 5: (a) Espectrograma de la traza recogida por el sensor de fibra; (b) Espectrograma de la señal recogida por es sismómetro.

3.2.- Zeebrugge (Bélgica)

En el entorno submarino, la principal fuente de ruido son los movimientos marinos asociados a las olas, sobre todo debido a la poca profundidad de las aguas en las que está instalada la fibra. Afortunadamente, ondas sísmicas y la mayoría de ondas marinas se encuentran en bandas espectrales diferentes. Aplicando un filtro 2D de similares características al descrito en la sección anterior, de nuevo aislamos la información sísmica del ruido ambiente. La Fig. 6 muestra la comparativa entre los espectrogramas de las señales recogidas por el sensor distribuido en los últimos 5 km (correspondientes a la fibra a más profundidad) y el sismógrafo.

De manera similar al caso anterior, los resultados mostrados en la Fig. 6 muestran la semejanza entre el comportamiento de la señal sísmica recogida por ambos sensores. Dos picos energéticos a 0,18 Hz y 0,36 Hz se encuentran además presentes en la traza CP- ϕ OTDR, los cuales corresponden a microseismos (ondas primaria y secundaria, respectivamente) inducidos por las olas. De nuevo, con estos resultados hemos verificado la validez del sensor CP- ϕ OTDR como sismógrafo distribuido también en entornos submarinos.

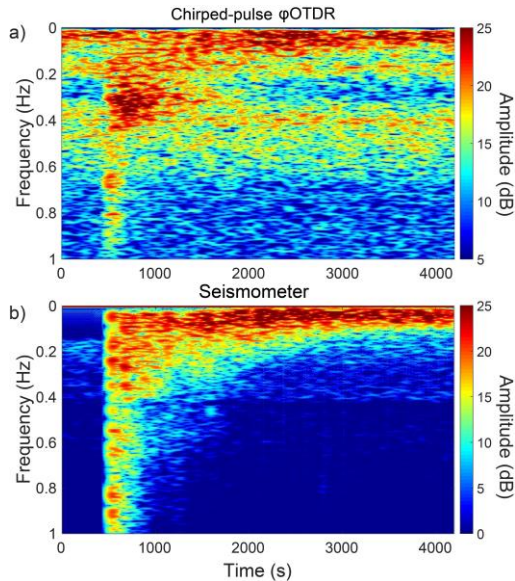


Fig. 6: (a) Espectrograma de la traza recogida por el sensor de fibra; (b) Espectrograma de la señal recogida por es sismómetro.

4.- Conclusiones

En este trabajo, hemos demostrado la viabilidad de usar la fibra óptica ya instalada como parte de los sistemas de telecomunicaciones de larga distancia para monitorización de actividad sísmica del planeta. Para ello, hemos detectado un terremoto desde dos localizaciones con características de ruido totalmente distintas: un entorno metropolitano altamente poblado y un entorno submarino. En ambos casos, hemos utilizado un sensor distribuido basado en CP- ϕ OTDR. Tras un simple procesado lineal 2D, hemos comprobado que la fibra es capaz de detectar con adecuada precisión un terremoto cuyo foco está situado a varios miles de kilómetros de distancia. Estos resultados pueden dar lugar a un gran avance en el campo de la topología sísmica.

Agradecimientos: Este trabajo ha sido financiado en parte por: el programa EC Horizon 2020 y el MINECO a través de proyecto DOMINO Water JPI; el proyecto FINESSE MSCA-ITN-ETN-722509; el MINECO a través del proyecto TEC2015-71127-C2-2-R; y el programa regional SINFOTON2-CM: P2018/NMT-4326. El trabajo de MRFR y HFM ha sido financiado por el MINECO a través de dos contratos “Juan de la Cierva”.

Referencias

- [1] Giuseppe MARRA, Cecilia CLIVATI, Richard LUCKETT, Anna TAMPELLINI, Jochen KRONJÄGER, Louise WRIGHT, Alberto MURA, Filippo LEVI, Stephen ROBINSON, André XUEREB, Brian BAPTIE, Davide CALONICO, “*Ultrastable laser interferometry for earthquake detection with terrestrial and submarine cables*”, Science, 361, 6401, 486–490, 2018.
- [2] Jonathan B. AJO-FRANKLIN, Shan DOU, Nathaniel J. LINDSEY, Inder MONGA, Chris TRACY, Michelle ROBERTSON, Veronica RODRIGUEZ TRIBALDOS, Craig ULRICH, Barry FREIFELD, Thomas DALEY, Xiaoye LI, “*Distributed Acoustic Sensing Using Dark Fiber for Near-Surface Characterization and Broadband Seismic Event Detection*”, Scientific Reports, 9, 1328, 1-14, 2019.
- [3] Juan PASTOR-GRAELLS, Hugo F. MARTINS, Andres GARCIA-RUIZ, Sonia. MARTIN-LOPEZ, Miguel GONZALEZ-HERRAEZ, “*Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses*”, Optics Express, 24, 12, 13121-13133, 2016.
- [4] María R. FERNÁNDEZ-RUIZ, Hugo F. MARTINS, Luís COSTA, Sonia. MARTIN-LOPEZ, Miguel GONZALEZ-HERRAEZ, “*Steady-Sensitivity Distributed Acoustic Sensors*”, Journal of Lightwave Technology, 36, 23, 5690-5696, 2018.
- [5] Luís COSTA, Hugo F. MARTINS, Sonia MARTÍN-LÓPEZ, María R. FERNÁNDEZ-RUIZ and Miguel GONZÁLEZ- HERRÁEZ, “*Fully distributed optical fiber strain sensor with 10^{-12} $\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ sensitivity*”, Journal of Lightwave Technology, artículo aceptado.