

Sismología urbana de una carrera popular mediante sensado acústico distribuido en fibra óptica

Jorge Canudo^{1,2}, Diego Gella², Pascual Sevillano¹, Javier Preciado-Garbayo²

¹Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF)

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.

Tel. +34-976762707, e-mail: jcanudo@unizar.es

²Aragón Photonics Labs

Resumen

La tecnología DAS permite la monitorización en tiempo real de eventos multitudinarios mediante el uso de fibras ópticas como redes densas distribuidas de sensores acústicos. En carreras populares, permite analizar dinámicas de grupo, velocidades o tiempos de llegada a meta, demostrando su potencial para la monitorización urbana a gran escala.

Introducción

La Carrera por la Ciencia, organizada por el Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), tiene lugar todos los años en las inmediaciones de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA) de la Universidad de Zaragoza. Esta carrera reunió el pasado noviembre de 2025 a más de 700 corredores. El recorrido discurre por los alrededores de los edificios principales de la EINA, y se superpone en múltiples tramos con el despliegue de fibra óptica realizado por el Grupo de Tecnologías Fotónicas para experimentación con tecnologías de Sensado Acústico Distribuido (DAS, ‘distributed acoustic sensing’). Esta tecnología ha emergido en los últimos años como una herramienta de gran interés para la monitorización urbana, al permitir transformar redes de fibra óptica preexistentes en arrays de sensores acústicos de gran densidad y resolución espacial, con alta sensibilidad a las vibraciones sísmicas del terreno [1]. La posibilidad de monitorizar decenas de kilómetros con resolución del orden del metro mediante un único equipo interrogador resulta de especial interés en contextos como el urbano, donde el despliegue de sensores convencionales resulta en muchas ocasiones complejo y costoso. En este contexto, se monitorizó la Carrera por la Ciencia empleando dos interrogadores DAS con diferente técnica de medida (Φ OTDR y CP- Φ OTDR), con el objetivo de validar el uso de estas tecnologías para la monitorización de eventos multitudinarios.

Técnicas de medida DAS

La tecnología DAS engloba diversas técnicas de medida, diferenciadas por el principio físico empleado y por el esquema de emisión y detección de luz en la fibra óptica. En general, para alcanzar tasas de medida acústicas se emplean sistemas basados en retrodispersión Rayleigh, que analizan la luz retrodispersada tras inyectar pulsos ópticos en la fibra. Entre estas técnicas, la Reflectometría Óptica en Dominio Temporal sensible a Fase (Φ OTDR) [2] permite obtener medidas lineales y cuantitativas de las perturbaciones mediante detección coherente de pulsos de cientos de nanosegundos. En este caso, las perturbaciones se traducen en variaciones de la fase óptica de la señal retrodispersada. Sin embargo, esta tecnología requiere sistemas de detección complejos y un postprocesado exigente para mitigar problemas inherentes a la medida de fase, como los puntos de amplitud nula o el clipping. Como alternativa, la tecnología Φ OTDR de Pulso Chirpado (CP- Φ OTDR) [3] emplea pulsos con barrido lineal de frecuencia, permitiendo una detección directa de la intensidad óptica. En este caso, las perturbaciones se manifiestan como desplazamientos temporales localizados de la traza retrodispersada. Esta aproximación evita algunas limitaciones del Φ OTDR convencional y proporciona alta sensibilidad, especialmente a bajas frecuencias.

Medidas experimentales

Empleando dos equipos comerciales basados en las tecnologías descritas, PDASTM con Φ OTDR y HDASTM con CP- Φ OTDR, se monitorizaron dos fibras ópticas de un mismo cable desplegado en las inmediaciones del edificio Betancourt de la EINA. El trazado de fibra se solapa con la carrera en dos zonas principales: un tramo paralelo a la carretera, correspondiente a los kilómetros 1 y 4, y un tramo perpendicular al paso de los corredores situado cerca de la meta.

En el tramo paralelo, de aproximadamente 500 m, fue posible seguir de forma continua el paso de los corredores. A partir de la señal registrada se generaron mapas de energía mediante el cálculo de FFTs en cada punto de la fibra, integrando la señal en ventanas de 1 s dentro de la banda de 10 Hz a 50 Hz. Estos mapas permiten identificar las trayectorias de los corredores y estimar sus velocidades o ritmos de carrera a partir del tiempo y posición de entrada y salida del tramo monitorizado. Además, permiten analizar la dinámica del grupo, observando la dispersión entre el paso por el kilómetro 1 y el kilómetro 4. Los ritmos obtenidos mostraron una alta correlación con los estimados a partir de los tiempos oficiales de llegada a meta (Figura 1).

El segundo tramo de fibra estudiado se sitúa a menos de 50 metros de la llegada a meta, en el interior del edificio Betancourt, y gracias a su disposición espacial, actúa como un contador de eventos, registrando señal únicamente cuando los corredores pasan sobre él. Cuando un corredor pasa de manera aislada, es posible distinguirlo en el mapa como un aumento puntual de la energía registrada en la fibra. Cuando múltiples corredores pasan al mismo tiempo, no es posible distinguir el número exacto de los mismos, pero gracias a la linealidad de la medida, es posible estimarlo. Para ello, se comparó la energía registrada por la fibra en este tramo con el histograma de tiempos oficiales de llegada a meta, resultando en la Figura 2. Como se puede observar, la medida con ambos equipos presenta una gran concordancia con los datos oficiales. Esta medida podría emplearse como calibración del sistema, de modo que fuera posible estimar el número de corredores que han pasado por esa sección de fibra basándose únicamente en la energía registrada por esta.

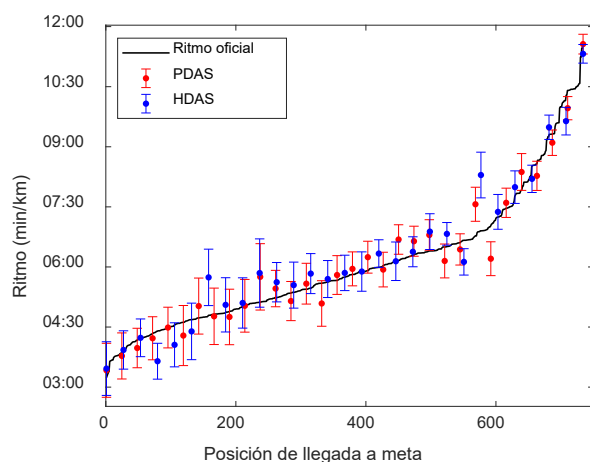


Figura 1. Ritmos de carrera estimados.

Conclusiones

Se ha demostrado la viabilidad de monitorizar una carrera popular en entorno urbano mediante sensado acústico distribuido en fibra óptica, empleando de forma simultánea dos tecnologías DAS complementarias. La instalación, con tramos paralelos y perpendiculares al recorrido, ha permitido caracterizar tanto la dinámica colectiva del pelotón como el paso individual de los corredores en la zona de meta, con resultados consistentes con los tiempos oficiales del evento. El alto grado de coherencia entre la energía medida por DAS y la distribución oficial de tiempos confirma el potencial del sensado distribuido en fibra como herramienta cuantitativa para la monitorización no invasiva de actividad antropogénica y multitudes en ciudades.

REFERENCIAS

- [1]. WANG, Xin; WILLIAMS, Ethan F.; KARRENBACH, Martin; GONZÁLEZ-HERRÁEZ, Miguel; MARTINS, Hugo F.; ZHAN, Zhongwen. Rose Parade Seismology: Signatures of Floats and Bands on Optical Fiber. *Seismological Research Letters*. 2020, 91(4), 2395-2402. Available from: 10.1785/0220200091.
- [2]. DONG, Yongkang; CHEN, Xi; LIU, Erhu; FU, Chen; ZHANG, Hongying; LU, Zhiwei. Quantitative measurement of dynamic nanostrain based on a phase-sensitive optical time domain reflectometer. *Applied Optics*. 2016, 55, 7810-7815. Available from: 10.1363/AO.55.007810.
- [3]. PASTOR-GRAELLS, Juan; MARTINS, Hugo F.; GARCIA-RUIZ, Andres; MARTIN-LÓPEZ, Sonia; GONZÁLEZ-HERRÁEZ, Miguel. Single-shot distributed temperature and strain tracking using direct detection phase-sensitive OTDR with chirped pulses. *Optics Express*. 2016, 24, 13121-13133. Available from: 10.1364/OE.24.013121.

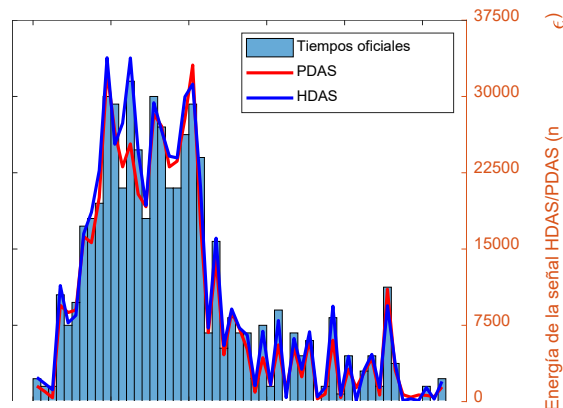


Figura 2. Número de corredores en meta.