

TÉCNICAS DE SENSADO CON FIBRAS ÓPTICAS PARA MONITOREO DISTRIBUIDO

DANIEL ENRIQUE CEBALLOS HERRERA

La Ciudad de México tiene cientos de kilómetros de cables de fibras ópticas instaladas a lo largo de caminos, puentes y túneles del metro, los cuales, pueden ser usados no solamente para transmitir información, sino también, para realizar un monitoreo continuo de las vibraciones ejercidas sobre estos cables de fibras en diferentes puntos y en forma distribuida. Dichas vibraciones pueden ser causadas por tráfico vehicular, por vibraciones presentes en las líneas del metro y por eventos sísmicos; éstas se pueden detectar en zonas donde se encuentre instalada la fibra óptica. Asimismo, se pueden instalar cables de fibra óptica a lo largo de acueductos y oleoductos de tal forma que, si se origina una vibración en algún punto del ducto causado por una fractura o por un cambio en el flujo o densidad del líquido transportado en su interior, estas vibraciones se pueden transmitir al cable de fibra óptica, entonces, usando la fibra como sensor, se pueden detectar la amplitud y la frecuencia de la vibración, así como su posición con resoluciones del orden de un metro. En este sentido, toda la extensión de la fibra óptica se utiliza para detectar vibraciones en forma distribuida. Actualmente, estos tipos de sistemas de monitoreo provienen del extranjero con un alto costo. Debido a su importancia, esta tecnología está siendo desarrollada en nuestros laboratorios añadiendo innovaciones que permitan obtener mayor sensibilidad en la detección.

La fibra óptica consiste de un delgado hilo de vidrio con un diámetro de 125 micrómetros (ver Fig. 1a), en cuyo interior se

transmite luz láser que lleva consigo información a alta velocidad, del orden de 100 Gb/s. Es natural que estas fibras ópticas se protejan con cables especiales de plástico para que los hilos de fibra óptica soporten la intemperie y se evite su ruptura. Estos cables protectores pueden agrupar varios hilos de fibra óptica tal como se observa en la Fig. 1b.

La luz láser que se transmite en el interior de la fibra óptica sufre reflexiones, variaciones en amplitud y fase, así como cambios en polarización cuando se aplica una perturbación externa en algún punto sobre la fibra óptica. En este sentido, cuando se monitorean las variaciones que sufre la luz guiada en el interior de la fibra, se puede detectar la magnitud y la posición de las perturbaciones externas. Estas perturbaciones externas pueden ser vibraciones y cambios de temperatura. En este sentido, las vibraciones estiran y comprimen el cable de fibra óptica en tiempo real, produciendo deformaciones que modifican la densidad del vidrio de la fibra óptica y reflejan un porcentaje de la luz láser que se transmite a lo largo de la fibra actuando de esta manera como un radar láser. Analizando estas reflexiones de luz láser, se puede determinar la frecuencia, amplitud y localización de la vibración ejercida sobre el enlace de fibra óptica.

En este punto, es importante mencionar que hay diferentes tipos de técnicas para detectar vibraciones en forma distribuida a lo largo de cables de fibras ópticas. En particular, en el laboratorio de Telecomunicaciones del Instituto nos encontramos desarrollando tres técnicas, la primera basada en la transmisión de pulsos de luz láser y analizando la reflexión de estos pulsos de luz causados por una perturbación externa. Esta primera técnica se denomina OTDR sensible a la fase, donde OTDR son las siglas en inglés de Optical Time Domain Reflectometer.

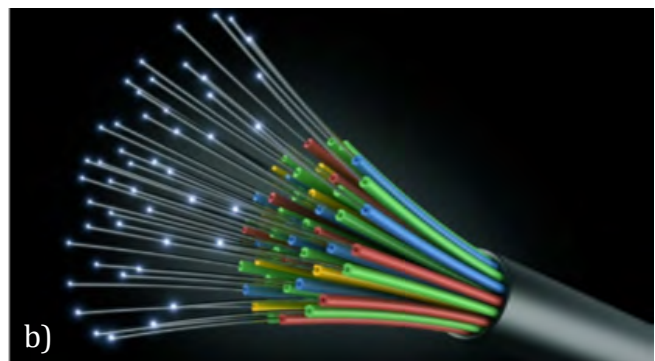


Figura 1. a) hilo de fibra óptica de vidrio, y b) cable protector agrupando varios hilos de fibra óptica

La segunda técnica utiliza luz láser emitida en forma continua y un interferómetro óptico conocido como Mach-Zehnder. La tercera técnica utiliza también luz láser con emisión continua y una sección de fibra óptica dopada con iones de Erblio, se analizan los cambios de la fluorescencia emitida por estos iones dentro de la fibra cuando estos son excitados. A continuación, se describirán cada una de estas técnicas.

Con respecto a la primera técnica, se emplean pulsos de luz láser en la transmisión y se analizan sus reflexiones a lo largo de una red de fibra óptica, tal como se indica en la Fig. 2. Estas reflexiones de luz son causadas por diferentes mecanismos lineales y no lineales producidos por la interacción de los pulsos de luz transmitidos a través de la fibra con el material con que es fabricada la fibra óptica. Entre estos mecanismos físicos tenemos el esparcimiento Rayleigh, el esparcimiento Brillouin y el esparcimiento Raman. En especial, nosotros estamos enfocados en analizar las reflexiones de pulsos de luz causados por esparcimiento Rayleigh cuyo fenómeno se encuentra ejemplificado en la Fig. 3. Lo anterior se debe a que este tipo de reflexiones se producen con mayor facilidad ante perturbaciones dinámicas en el tiempo como las vibraciones acústicas. En algún punto de la fibra, estos

pulsos de luz reflejados por esparcimiento Rayleigh pueden modificar su amplitud y fase cuando se aplica un cambio de presión o temperatura en dicho punto de la fibra. La posición donde se ejerce la perturbación, también, puede ser conocida midiendo el tiempo que ha transcurrido desde que se ha enviado un pulso de luz a través de la fibra óptica hasta que el reflejo del pulso de luz es detectado de vuelta, considerando también la velocidad del pulso de luz en el medio. En general, estos sistemas de sensado distribuido requieren fuentes de luz basados en láseres altamente coherentes y técnicas de modulación externa para generar secuencias de pulsos de luz con características específicas. El ancho de estos pulsos de luz es entre 10 y 100ns, este ancho de pulso también, define la resolución espacial con que es detectada una perturbación a lo largo de la fibra. En este sentido, podemos mencionar como ejemplo una resolución de 1m para pulsos de 10ns y una resolución de 10m para pulsos de 100ns respectivamente. Por otro lado, el sistema de detección en estos sensores también es un factor importante, donde no sólo consiste en medir la amplitud de los pulsos reflejados, sino también la fase de éstos, implicando con ello, el empleo de técnicas de recepción coherentes utilizadas en comunicaciones ópticas.

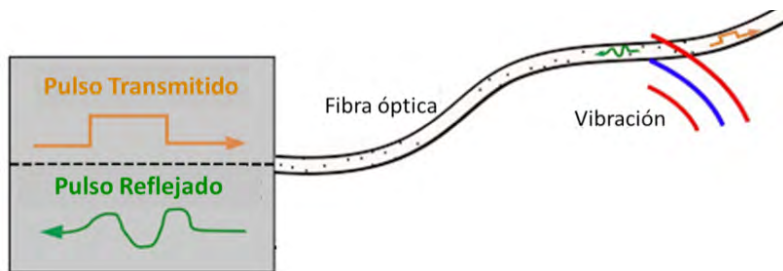


Figura 2. Primera técnica para medir vibraciones basados en pulsos de luz

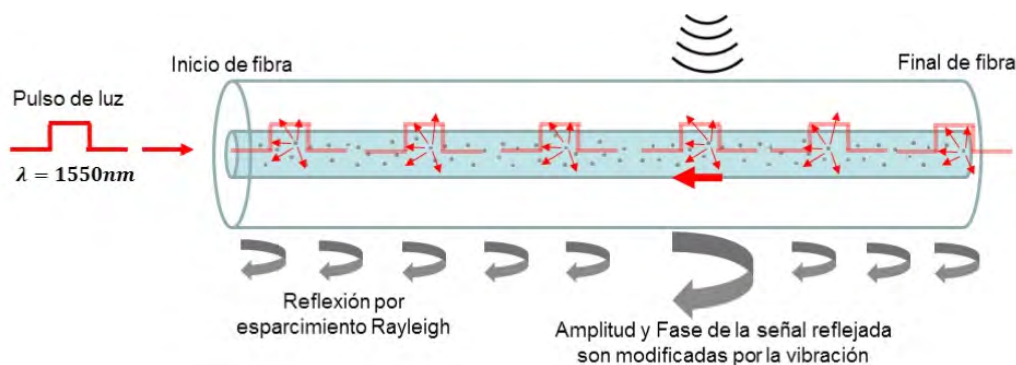


Figura 3. Reflexiones de pulsos de luz causados por esparcimiento Rayleigh.

Estas reflexiones se producen a lo largo de toda la fibra y son causadas por imperfecciones y aglomeraciones moleculares

Con respecto a la segunda técnica basada en un interferómetro óptico denominado Mach-Zehnder, se utiliza una fuente de luz láser continua en comparación con la técnica anterior que utiliza luz pulsada. En particular, para esta técnica basada en interferómetros ópticos como el mostrado en la Fig. 4, se requiere el uso de un par de hilos de fibra óptica que permita transmitir en un sentido horario (clockwise - CW) dos señales ópticas continuas en forma paralela (indicados con color violeta en la Fig. 4), que también permita transmitir en sentido anti-horario (counterclockwise - CCW) dos señales ópticas continuas en forma paralela (indicados con color verde en la misma Fig. 4). En el Laboratorio de Telecomunicaciones se cuenta con enlaces de fibra óptica *full dúplex* de 21 km, lo que permite realizar estos tipos de sistemas de detección empleando longitudes de fibra óptica similares a las instaladas en Ciudad de México.

De acuerdo a la Fig. 4, las dos señales ópticas en sentido horario (CW), después de transmitirse en forma paralela por 21 km de fibra óptica, se combinan al final a través de un acoplador/divisor 3x3, generando una interferencia óptica denominada "señal de interferencia CW". Lo mismo ocurre con las dos señales ópticas continuas que se transmiten en sentido anti-horario (CCW), generando al final una interferencia óptica denominada "señal de interferencia CCW". En este sistema cuando se genera una vibración en algún punto del enlace de fibra *full-duplex*, por ejemplo, en el kilómetro 3 del enlace como se observa en la Fig. 4, es notorio que las dos señales que

viajan en sentido horario (CW) detectarán primero la vibración en comparación a las dos señales que viajan en sentido anti-horario (CCW), lo anterior, hace que la señal de interferencia CW empiece a tener cambios en el receptor antes que lo haga la señal de interferencia CCW, produciendo un desfase en tiempo el cual se utiliza para ubicar la posición de la vibración respectivamente. En este tipo de técnicas interferométricas es muy importante contar con láseres altamente coherentes.

Finalmente, con respecto a la tercera técnica de detección de vibraciones, se utiliza una longitud de fibra óptica de 150 metros, donde en una pequeña sección de 2 metros se tiene una fibra óptica dopada con iones de Erblio, tal como se puede visualizar en la Fig. 5. Toda la sección de fibra óptica se le introduce luz láser continua con una longitud de onda de 980nm que es absorbida por los iones de Erblio para generar una fluorescencia con longitudes de onda alrededor de 1550nm. Esta fluorescencia es contenida dentro de una cavidad resonante formada por los 150 metros de fibra óptica y los cortes planos en los extremos de la fibra óptica; como resultado, se produce una emisión láser a 1550nm siendo dicha emisión dependiente de las pérdidas que hay dentro de la cavidad. Dichas pérdidas pueden ser suministradas a través de la aplicación de una vibración en algún punto de la fibra como se indica en la Fig. 5. Por tanto, a través del monitoreo de las variaciones de potencia de la emisión láser que se generó a partir de la fluorescencia de los iones de Erblio, se pueden determinar las características de la vibración ejercida sobre la fibra óptica.

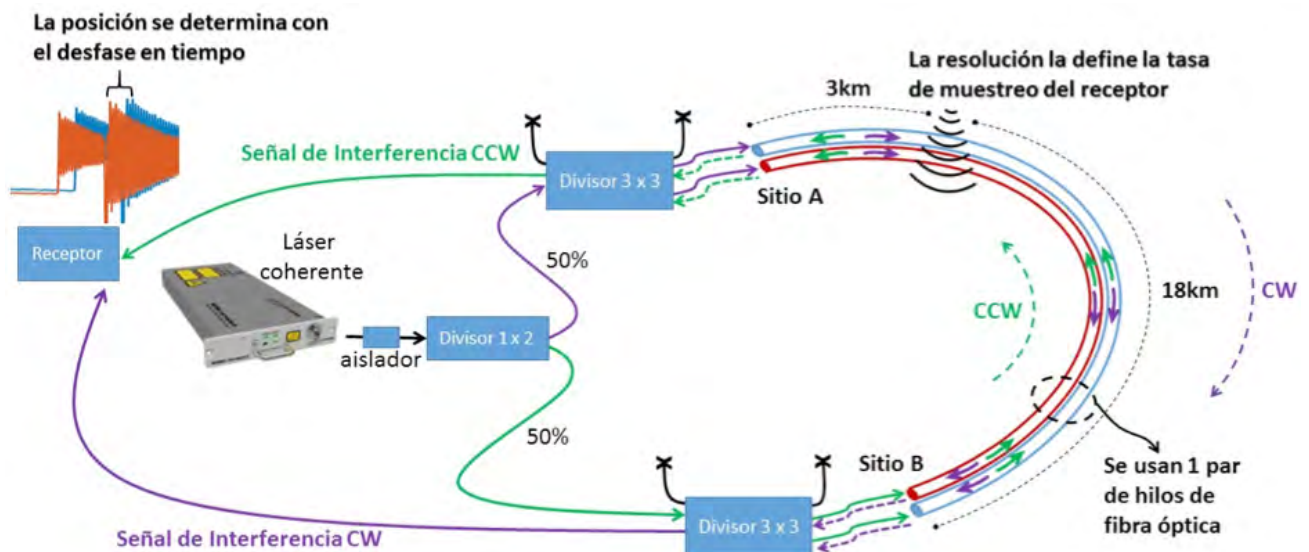


Figura 4. Segunda técnica para medir vibraciones usando luz láser continua y un interferómetro Mach-Zehnder

Se monitorea la emisión de luz láser a 1550nm con vibraciones dentro de la cavidad resonante.

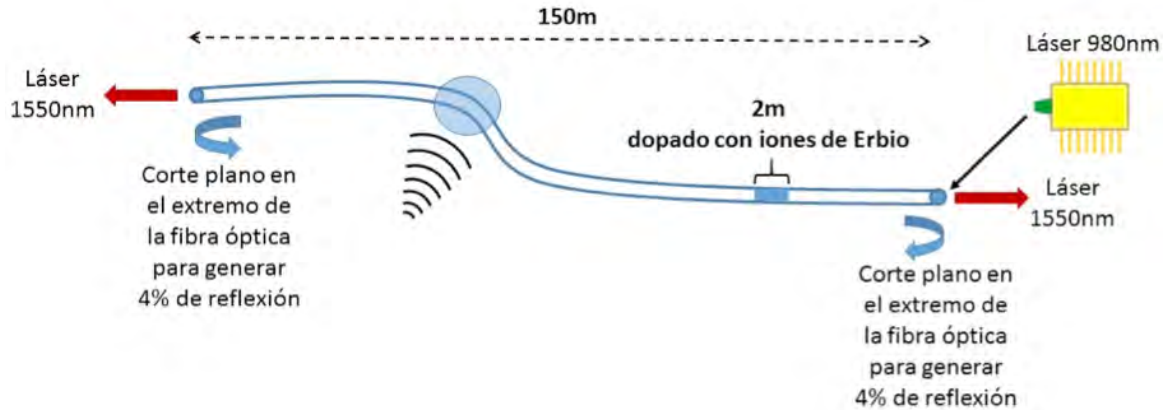


Figura 5. Tercera técnica para medir vibraciones usando la fluorescencia de fibras ópticas dopadas con iones de Erbio

Actualmente, estos sistemas se encuentran implementados en el laboratorio de Telecomunicaciones y se encuentran en una etapa de investigación para aplicarlos tanto en la detección como en el monitoreo de vibraciones ocurridas en ductos de agua y gas, que puedan generar fugas y rupturas en sus sistemas de distribución,

así como también en aplicaciones de monitoreo sísmico y distribución de vibraciones causadas por tráfico vehicular; con ello podemos brindar apoyo a las investigaciones que se realizan en las diferentes coordinaciones del Instituto de Ingeniería. Estos experimentos se realizan bajo el marco del proyecto PAPIIT IN104720.