Caracterización de un sensor interferométrico Mach-Zehnder simétrico con un sistema de curvatura bidireccional

Characterization of a Symmetric Mach-Zehnder Interferometric Sensor Using a Bidirectional Curvature System

Yael Federico Ramirez Zavala, Adán Flores Balderas, *Marco Bianchetti
Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca. yf.ramirezzavala@ugto.mx, adanfb@ugto.mx, mb@ugto.mx
*Autor de correspondencia

Resumen

La caracterización y el análisis del desempeño de los sensores ópticos de curvatura son fundamentales para aplicaciones críticas en ingeniería, tales como la detección de daños estructurales y el desarrollo de sistemas robóticos. En este trabajo se presenta la evaluación experimental de un sensor de curvatura basado en un interferómetro Mach-Zehnder de fibra óptica. El dispositivo aprovecha la modulación de los modos de revestimiento inducida por la deformación mecánica que se refleja en cambios en el espectro de transmisión óptico medidos mediante un analizador de espectros. Los resultados experimentales detallan la respuesta espectral, la sensibilidad obtenida, y el comportamiento de los picos de interferencia ante diversos radios de curvatura, demostrando su viabilidad y respuesta analítica para la medición precisa de deformaciones.

Palabras clave: Sensores ópticos; Interferómetro Mach-Zehnder; fibra óptica; caracterización de curvatura; picos de interferencia; respuesta espectral.

Introducción

En la actualidad, los sensores de curvatura de fibra óptica han tomado un gran papel en diversas áreas como la ingeniería mecánica, ingeniería biomecánica, monitorización estructural, entre otras, donde los sensores se aplican en la detección de desvíos de posturas [1], en las mediciones de flexión de mecanismos [2], en el monitoreo de estructuras, carreteras, puentes y edificios [3], y en la medición de ángulos en prótesis biomecánicas [4]. Las ventajas de estos sensores son el tamaño compacto, ausencia de interferencia electromagnética, resistencia a la corrosión, alta sensibilidad y bajo costo de fabricación. Los sensores de curvatura se clasifican con base a sus principios de modulación: intensidad, longitud de onda, y frecuencia. De igual forma se pueden encontrar distintos tipos de sensores que utilizan distintas técnicas, como rejillas de periodo largo, rejillas de Bragg, interferómetro de Mach-Zehnder (MZI), interferómetros Fabry-Perot [5]. Los sensores MZI destacan por su estructura simple, compacta, y su alta precisión.

El principio de funcionamiento de un interferómetro Mach-Zehnder con fibra óptica se basa en la división de la señal luminosa de entrada en al menos dos caminos ópticos, típicamente el modo fundamental del núcleo y los modos de orden superior excitados en el revestimiento o en secciones transitorias [6]. Al propagarse por trayectos con diferentes valores de índice de refracción, y al recombinarse posteriormente, se produce una diferencia de fase que genera un espectro de transmisión caracterizado por una serie bien definida de picos y valles de interferencia [7]. Cuando el sensor se somete a una deformación mecánica por curvatura, las condiciones de propagación y la fase relativa de los modos cambian, lo que se traduce en un desplazamiento cuantificable de los picos de interferencia en el espectro óptico. En la literatura científica se han reportado diversas configuraciones geométricas de MZI tales como las estructuras ahusadas (tapered), las desalineaciones de núcleo (core-offset), y las geometrías compuestas por segmentos de fibra sin núcleo (coreless) [7], [8]. En este artículo se estudia un sensor basado en una estructura de fibra coreless-monomodo-coreless, evaluando detalladamente su respuesta espectral y la evolución de los picos de interferencia en función de la magnitud y de la dirección de la curvatura aplicada al sensor, con el objetivo de validar su desempeño para aplicaciones de medición.

Metodología Propuesta

1. Arreglo experimental.

El arreglo experimental consiste en una fuente de amplio espectro (BBS), el sistema de curvatura bidireccional en el cual se monta el sensor, y un analizador de espectro óptico (OSA) para registrar la señal de salida del sensor.

La fuente BBS, desarrollada internamente, consta de un diodo láser de bombeo (Q-Photonics) de 100 mW, con una longitud de onda de emisión de 980 nm, alimentado mediante una fuente de corriente (Hewlett Packard E3611A). La luz de bombeo se acopla mediante un multiplexor por división de longitud de onda (WDM) a un tramo de 5 m de fibra óptica dopada con erbio (EDF). Como resultado del proceso de emisión espontánea amplificada (ASE), se genera una señal óptica de banda ancha, la cual posteriormente se inyecta en el sensor bajo estudio.

Para la fabricación del sensor MZI, se propone una estructura axialmente simétrica utilizando dos secciones de fibra sin núcleo (CL, Thorlabs FG125LA) que actúen como acopladores hacia la fibra monomodo (SM, Corning SMF-28), con la estructura Coreless-monomodo-coreless (CL-SM-CL). El proceso de ensamblaje se realizó mediante una empalmadora por fusión de alta precisión (modelo Fitel S179), configurada en modo automático. En esta modalidad de operación la empalmadora detecta de manera automática los tipos de fibras a empalmar, y selecciona los parámetros para una empalmada óptima. La optimización de las longitudes de la fibra CL y de la SM se realizó de manera iterativa, buscando maximizar la amplitud de las oscilaciones de la señal registrada por el OSA, que indica una división equitativa de la señal óptica entre el núcleo y el recubrimiento de la fibra SM. Cómo se indica en la Fig.1, los parámetros optimizados de construcción del sensor son CL: 6.25 mm, SM: 35mm.

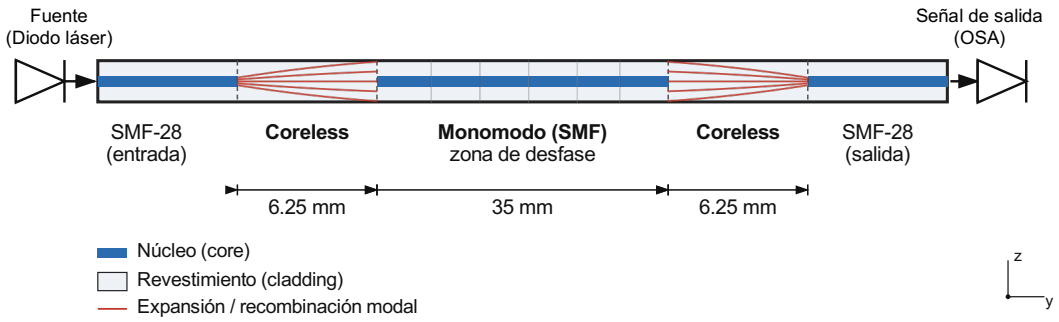


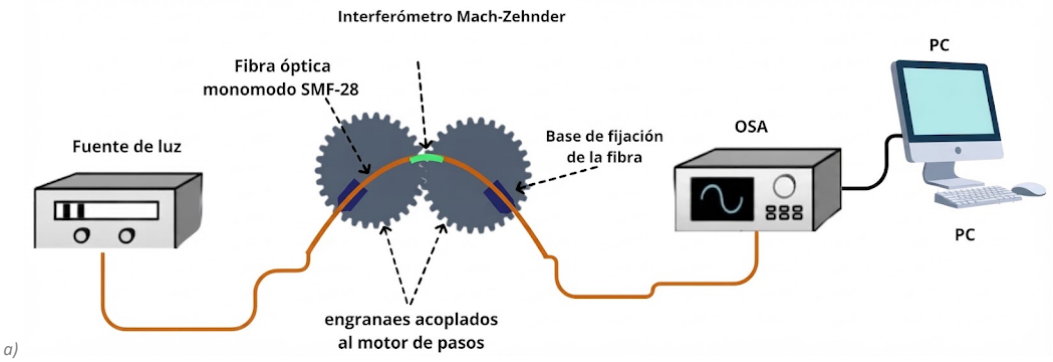
Fig.1. Representación esquemática del interferómetro de Mach-Zehnder simétrico (CL-SM-CL).

1.2 Procedimiento de Caracterización por Flexión

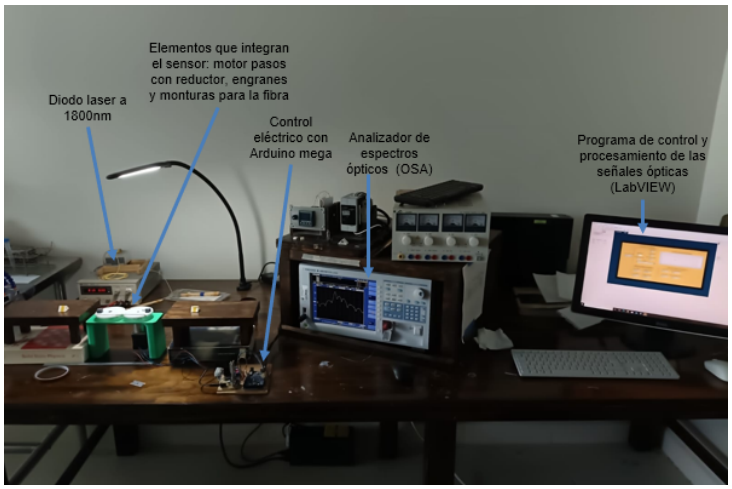
El sistema de curvatura presentado en este trabajo está constituido por un mecanismo de dos engranes (Fig. 2a), acoplado a una caja reductora con una relación de transmisión de 50:1 y accionado mediante un motor paso a paso. Esta configuración permite controlar de manera precisa el desplazamiento angular del mecanismo y, en consecuencia, inducir curvaturas reproducibles en el sensor. El dispositivo permite generar curvaturas tanto positivas como negativas de manera controlada, mediante la rotación bidireccional del mecanismo, cubriendo un intervalo de $-25m^{-1}$ a $25m^{-1}$. El motor paso a paso es controlado mediante una etapa de potencia gobernada por un Arduino MEGA, que se comunica con una interfaz desarrollada en LabVIEW. El sensor se encuentra sujeto mediante dos soportes rígidos montados sobre los engranajes. La posición relativa de estos soportes se establece de manera que, para una curvatura de $0m^{-1}$, el sensor adopta una configuración rectilínea. A partir de esta posición de referencia, el movimiento controlado de los engranes permite imponer al sensor una curvatura definida y reproducible dentro del intervalo de operación establecido.

El OSA utilizado para la adquisición de la señal óptica es el modelo YOKOGAWA AQ6370D. Un programa desarrollado en LabVIEW gestiona de manera automatizada el proceso de curvatura del sensor y la adquisición de los datos experimentales. El programa permite establecer los valores de curvatura máxima y mínima que debe alcanzar el sensor, así como el número de mediciones dentro de dicho intervalo y el número de ciclos de medición que se desea realizar. Asimismo, el programa de control almacena cada medición, generando una base de datos que contiene la respuesta del sensor a lo largo de todo el intervalo de curvatura y durante los ciclos de medición establecidos. El sistema de medición completo se presenta en la Fig. 2b), donde se muestran los diferentes elementos que conforman el sistema experimental.

En las pruebas preliminares realizadas con el sensor CL-SM-CL, se exploró inicialmente un intervalo de curvatura de -3m^{-1} a 3m^{-1}. Posteriormente, este intervalo se redujo a -1m^{-1} a 1m^{-1}, rango en el cual se obtuvo una correspondencia unívoca entre el valor de la curvatura y la posición espectral de los picos del patrón de interferencia registrado por el OSA. Adicionalmente, se realizaron ciclos sucesivos de pruebas de repetibilidad dentro de este mismo intervalo de curvatura, con el propósito de evaluar la estabilidad temporal de la respuesta espectral y verificar la ausencia de efectos de histéresis o deformaciones permanentes en la estructura del sensor.



a)



b)

Fig.2. Arreglo experimental del sistema de medición de curvatura para la caracterización del sensor; a) esquema general de curvatura en el sistema, b) Implementación física.

1.3 Adquisición y Análisis de Datos

La adquisición de los espectros de transmisión se realizó mediante un sistema de curvatura automatizado, controlado por un programa desarrollado en LabVIEW. El programa se comunica con el OSA para automatizar la adquisición y el almacenamiento de los espectros correspondientes a cada valor de curvatura, generando una base de datos que contiene la respuesta espectral del sensor a lo largo de todo el intervalo de curvatura evaluado (Fig. 2b). El OSA se configuró con una resolución espectral de 1 nm, registrando la señal de transmisión en un rango de 1450 nm a 1650 nm.

A partir de los registros obtenidos mediante el OSA, se realiza un análisis mediante un programa desarrollado en MATLAB, el cual permite identificar la posición espectral y la amplitud de los picos de interferencia, así como determinar su desplazamiento en longitud de onda ante las variaciones de curvatura del sensor. La base de datos generada contiene los valores de curvatura aplicados al sensor, así como las posiciones espectrales y amplitudes correspondientes a cada uno de los picos identificados en los espectros de interferencia.

Resultados

El desempeño del sensor se evaluó sometiendo el dispositivo a un intervalo de curvatura de $-1m^{-1}$ a $1m^{-1}$, utilizando un total de 31 puntos de medición por recorrido y cuatro repeticiones consecutivas, con el propósito de evaluar la repetibilidad y estabilidad de la respuesta óptica. En la Fig. 3 se presentan las cuatro mediciones de los espectros correspondientes a los valores de curvatura de $-0.870m^{-1}$ y $-0.334m^{-1}$. Se observa una buena superposición entre los cuatro patrones de interferencia para cada valor de curvatura, lo que evidencia una alta repetibilidad de la respuesta espectral y sugiere la ausencia de efectos de histéresis apreciables en las condiciones experimentales evaluadas.

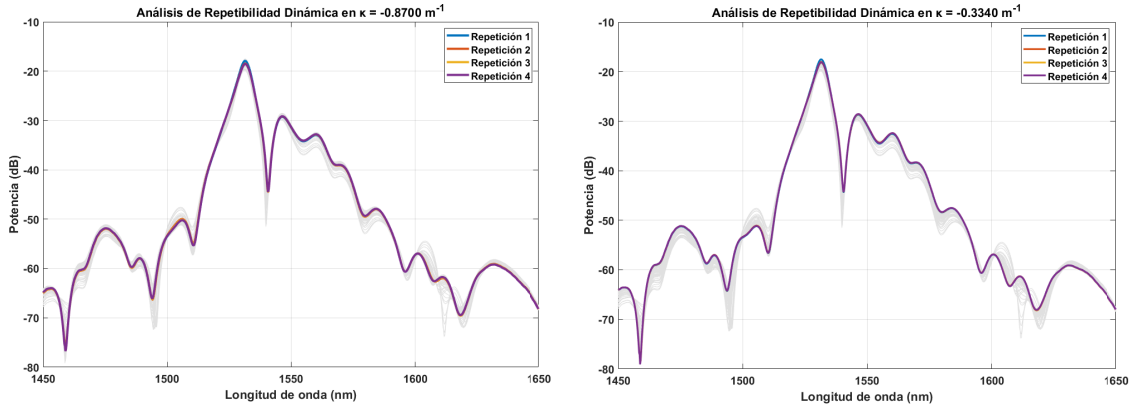


Fig.3. Mediciones de los espectros a valores de curvatura de $-0.870m^{-1}$ y $-0.334\ m^{-1}$.

A partir del procesamiento de los espectros obtenidos mediante el OSA, se identificaron 11 picos de interferencia principales. De estos, cinco presentaron una respuesta clara, estable y altamente sensible a las variaciones de curvatura. Con el propósito de reducir la influencia de las variaciones entre mediciones, el análisis se realizó utilizando los datos promediados de las cuatro mediciones efectuadas. Los resultados obtenidos a partir de los datos promedio se ajustaron mediante polinomios de segundo orden $y=ax^2+bx+c$ (Fig. 4), obteniéndose altos coeficientes de determinación para los cinco picos analizados: $R^2 = 0.9826$, $R^2 = 0.9861$ y $R^2 = 0.9606$, $R^2 = 0.9939$, $R^2 = 0.9731$, respectivamente. Estos valores indican una alta correspondencia entre la respuesta espectral de los picos y el modelo polinómico propuesto dentro del intervalo de curvatura evaluado. Asimismo, los ajustes presentan un centrado de las parábolas próximo al origen, correspondiente a una curvatura de $0m^{-1}$, lo que es consistente con la condición de referencia establecida para el sistema de medición.

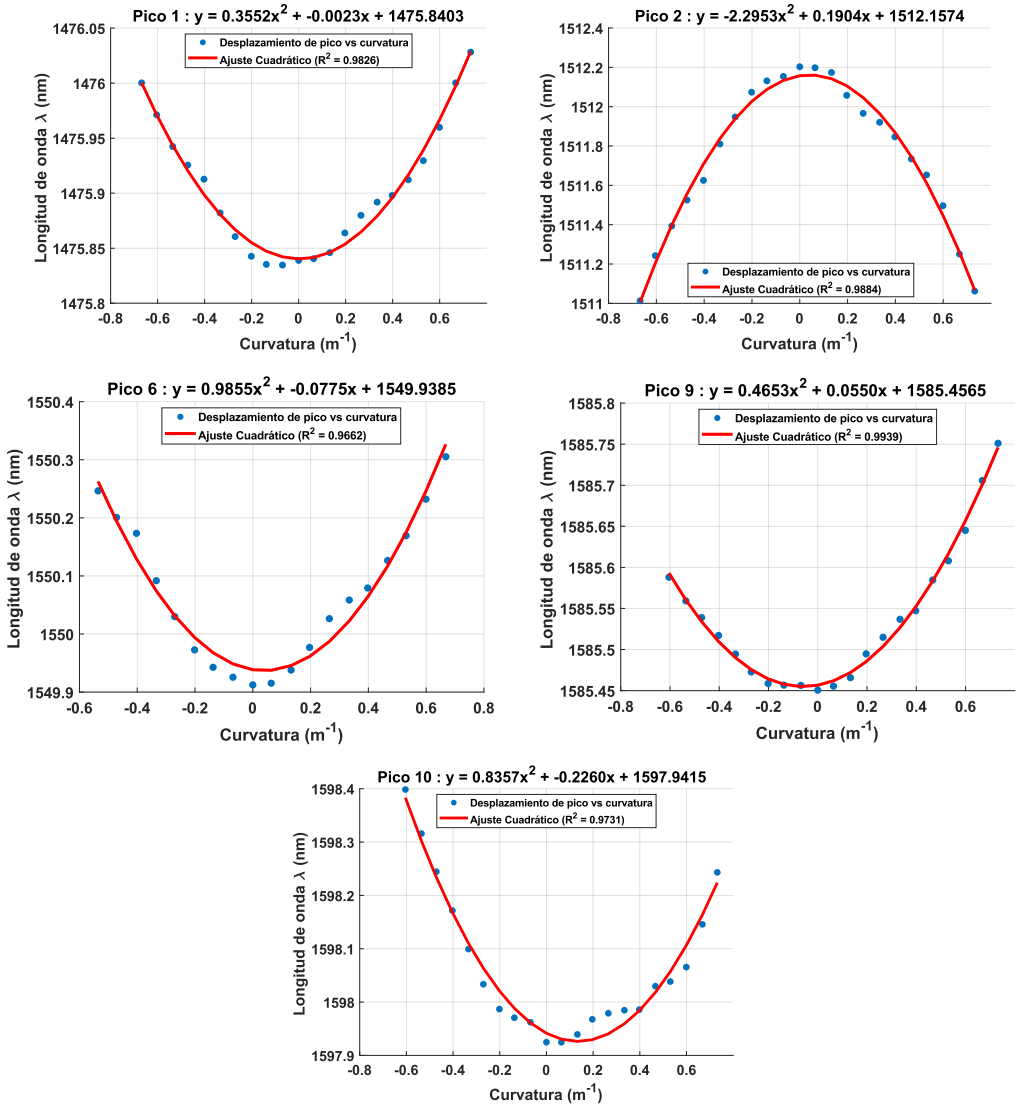


Fig.4. Graficas de resultados del análisis promedio ajustes polinómicos de segundo orden.

Conclusiones y Trabajo Futuro

El sistema de curvatura empleado en este experimento demostró ser flexible y robusto, permitiendo evaluar diferentes rangos de curvatura y obtener resultados reproducibles. El sensor demostró una excelente sensibilidad en el intervalo operativo de -0.8m^{-1} a 0.6m^{-1} bajo un recorrido continuo de curvatura, alcanzando valores de hasta 3.86 nm/m^{-1} en el pico de mayor respuesta, con coeficientes de determinación superiores a 0.96 en todos los picos analizados. Como trabajo futuro, se proyecta extender las pruebas experimentales al rango completo de -25m^{-1} a 25m^{-1} para analizar el comportamiento espectral en condiciones de alta exigencia y consolidar el desarrollo de este tipo de transductores ópticos.

Agradecimientos

YFRZ agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada para la realización de sus estudios de posgrado, así como a la Universidad de Guanajuato por las instalaciones y el equipo proporcionado para el desarrollo experimental de este trabajo.

Referencias

1) Culshaw, B. (2010). Fibre optic sensor technology – an engineering reality or a scientific opportunity? *Proceedings of SPIE*, 7653, 765304.https://doi.org/10.1117/12.867986

2) Acuña, R., Causado, J. y Torres, P. I. (2006). Sensores de fibra óptica para medición de pequeños desplazamientos basados en pérdidas por curvatura. *Revista Colombiana de Física*, *38*(2).

3) Rubio Gleana, J., Carmona Reyes, V. M., Rivera Olvera, J. N., Higuera Gonzalez, R. M. y Lopez Dieguez, Y. (2021). Diseño de un sensor de vibraciones y curvaturas de fibras ópticas. *Mexican Optics and Photonics Meeting*, MOPM2021-92, 104. https://photonics-mexico.com/mopm2021/assets/docs/abstracts-book-MOPM-2021b.pdf

4) González Uresti, G., Armenta Serna, F. A., Fuentes Rubio, Y. A., García Garza, L. A. y Domínguez Cruz, R. F. (2022). Interferómetro de fibra aplicado como sensor de curvatura. *Pistas Educativas*, *43*(141), 504-518. https://pistaseducativas.celaya.tecnm.mx/index.php/pistas/article/viewFile/2682/2149

5) Zhao, C. y Qiao, X. (2019). Optical fiber curvature sensors: A review. *Photonic Sensors*, *9*(4), 289–310. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.068.

6) Zhao, Y., Li, Y. y Lv, R. (2020). Review of optical fiber Mach–Zehnder interferometers with micro-cavity fabricated by femtosecond laser and sensing applications. *Optics & Laser Technology*, *125*, 106037. https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.12.013.

7) Dong, X., Shum, P. y Lu, C. (2013). A fiber optic bend sensor using multimode fiber interferometer. *IEEE Sensors Journal*, *13*(9), 3438–3441.

8) Fu, H. (2019). High-sensitivity curvature sensor based on core-offset and single-mode-coreless-single-mode fiber structures. *Applied Optics*, *58*(15), 4125–4130.