

Estudio, análisis de dispositivos de fibra óptica SMF-28 aplicados en sistemas vibratoriales

Study, analysis of SMF-28 fiber optic devices applied in vibrational systems

Arteaga Sierra Samuel, Gasca Muñoz Alan Alfredo, Rodríguez Gómez Ana Karen, Vega Padilla Aylin, Estudillo Ayala Julian Moises, Hernández García Juan Carlos.

División de Ingenierías, Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago Km 3,5+1.8 Km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., 36885, México

s.artegasierra@ugto.mx; aa.gascamunoz@ugto.mx; ak.rodriguezgomez@ugto.mx; a.vegapadilla@ugto.mx; julian@ugto.mx; jchernandez@ugto.mx

Resumen

Este proyecto se centra en el estudio y análisis de configuraciones experimentales para el desarrollo de dispositivos de fibra óptica aplicados en la detección de vibraciones, utilizando como base interacciones interferométricas. Se simuló arreglos del tipo Sagnac y Mach-Zehnder de fibra óptica mediante MATLAB y se analizaron utilizando métodos matemáticos y a través del análisis de matrices de Jones. Además, se desarrollaron códigos para estudiar cómo la transmisión y la reflexión varían con el parámetro de acoplamiento, uno mostrando el comportamiento lineal y otro el comportamiento no lineal, los cuales, son anexados en este reporte de investigación. Se realizaron esquemas experimentales para el acoplamiento de fibra con un láser, observando el comportamiento en un analizador de espectro óptico (OSA) y en un osciloscopio. Los resultados sentaron las bases para el diseño de un prototipo que se manufacturará experimentalmente.

Palabras clave: Fibras ópticas; dispositivos interferométricos; análisis numérico.

Introducción

La fibra óptica SMF-28 es de alta importancia por sus propiedades ópticas y se utiliza en telecomunicaciones y diversas aplicaciones en el ámbito tecnológico. En este proyecto la utilizamos para la detección de vibraciones a través dispositivos interferométricos. Los cuales se espera que operen en condiciones extremas, lo que los hace perfectos para entornos industriales de alta exigencia. Una de las alternativas para la configuración, es el interferómetro de Sagnac en el régimen lineal y no lineal, este tipo de esquema ha ganado una amplia aceptación en distintos campos de estudio, lo cual se debe principalmente a que es una útil herramienta para una gran diversidad de aplicaciones, como lo son: sensado, tratamiento de señales ultra-rápidas, multiplexado, compresión de pulsos, compuertas digitales por medio de efectos ópticos, láseres de fibra basados en la técnica de amarre de modos, supresión de pedestal, láseres sintonizables, entre otras [1-7].

En la industria, la detección de alta precisión de vibraciones es fundamental para el monitoreo de maquinaria y estructuras, permitiendo la detección temprana de fallos y el mantenimiento preventivo. Mientras que en el ámbito científico se emplean en estudios geofísicos, monitoreo sísmico y experimentos avanzados de física. El objetivo de esta investigación es diseñar y analizar un sistema de detección de vibraciones que se basa en la fibra óptica SMF-28, la cual podemos ajustar en sensibilidad y rango de respuesta. Proponiendo y logrando que el sistema mejore la precisión en la detección de vibraciones y sea adaptable a diversos entornos y requerimientos. Buscamos proporcionar una solución única que pueda integrarse en diversas industriales, así mejorando la eficiencia y seguridad de nuestros sistemas.

Desarrollo numérico

Interferómetro de Sagnac de fibra óptica en régimen lineal

Para realizar el análisis del interferómetro de Sagnac de fibra óptica a baja potencia (régimen lineal de operación) y basándose en el caso ideal de operación (considerando fibra sin birrefringencia), se tiene que los caminos ópticos de ambos haces contra propagándose son iguales, dando como resultado una reflexión máxima y una transmisión mínima, es decir, el dispositivo tiene el comportamiento semejante al de un espejo. El estudio del dispositivo mostrado en la figura 1 considerando las pérdidas son despreciables y que la potencia se conserva en ausencia de pérdidas ($R + T = 1$) se obtiene que la reflexión en potencia R para el interferómetro de Sagnac está dada por:

$$R(C) = 4C(1 - C) = 1 - T(C) . \quad \text{Ec. (1)}$$

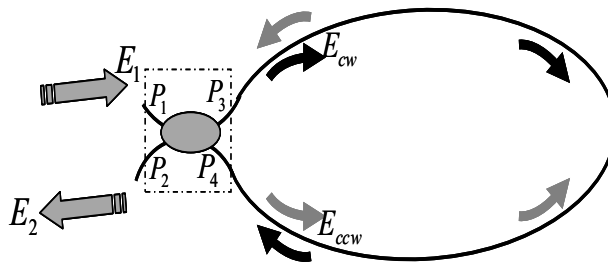


Figura 1. Esquema del Interferómetro de Sagnac de fibra óptica.

Interferómetro de Sagnac de fibra óptica en régimen no lineal o espejo de lazo óptico no lineal (NOLM).

Un caso de análisis interesante ocurre al estudiar el comportamiento del interferómetro de Sagnac de fibra óptica para altas potencias, en este caso el dispositivo estudiado utiliza el efecto Kerr para su funcionamiento recibiendo el nombre de espejo de lazo óptico no lineal (NOLM, Nonlinear Optical Loop Mirror). Se tiene entonces que partiendo de la ecuación 2.

$$P_{out} = |E_{out}|^2 = |E_3 + E_4|^2 = |CE_{in}e^{i\gamma LCP_{in}} - (1 - C)E_{in}e^{i\gamma L(1-C)P_{in}}|^2, \quad \text{Ec. (2)}$$

De tal forma que la transmisión del NOLM, ecuación 3, depende del factor de acoplamiento C , del coeficiente gamma γ , de la longitud del lazo L y de la potencia de entrada P_{in} .

$$T = 1 - 2C(1 - C)[1 + \cos(\gamma L(1 - 2C)P_{in})]. \quad \text{Ec. (3)}$$

Simulación de Arreglos Interferométricos.

El estudio presentado en este trabajo se basó en el arreglo interferométrico tipo Sagnac. Lo simulamos y modelamos en MATLAB mediante la utilización de métodos matemáticos y matriciales, así a la vez utilizamos el análisis de Jones para describir las propiedades de propagación de la luz, así como también su interacción dentro de la fibra SMF-28.

Métodos basados en solución de las ecuaciones de propagación y matrices de Jones:

Utilizamos el análisis de matrices de Jones para comparar y modelar la polarización de la luz y los cambios a través del sistema. Mientras que las matrices de transferencia fueron utilizadas para representar cada uno de los componentes ópticos y los efectos que tiene en la señal de la luz.

Simulación en MATLAB:

Desarrollamos el código en MATLAB para simular las reacciones del sistema a las condiciones espectrales, temporales y frecuenciales de los arreglos interferométricos. En estas simulaciones consideramos diferentes condiciones de vibración para evaluar la sensibilidad del sistema.

A continuación, se presentan los códigos de MATLAB de nuestra simulación.

Códigos para Análisis de Transmisión y Reflexión

Se desarrollaron dos códigos en MATLAB para estudiar cómo la transmisión y la reflexión varían con el parámetro de acoplamiento:

1. Código Lineal:

```

clc;
clear;
Ein = 1; % V/m
Lambda = 1.5E-6; % m
psi = 0.001; % W^-1*m^-1
L = 500; % m

% Baja potencia
C = 0:0.0001:1;
Pin = 0.0;
K = (2*pi) / Lambda; % vector de onda

% Notar que usamos .* y.^ para operaciones element-wise
Ecw = (C * Ein) .* exp(1i * (K*L + psi * L .* C) * Pin);
Eccw = -(1 - C) * Ein .* exp(1i * (K*L + psi * L .* (1 - C)) * Pin);

E = Ecw + Eccw;
T = (abs(E)).^2 / (abs(Ein))^2;
R = 1 - T;

figure;
plot(C, T, 'b', 'DisplayName', 'Transmitancia')
hold on;
plot(C, R, 'r', 'DisplayName', 'Reflectancia');
xlabel('Coeficiente de Acoplamiento (C)');
ylabel('Coeficiente');
legend('show');
title('Transmitancia y Reflectancia vs. Coeficiente de Acoplamiento');
grid on;

```

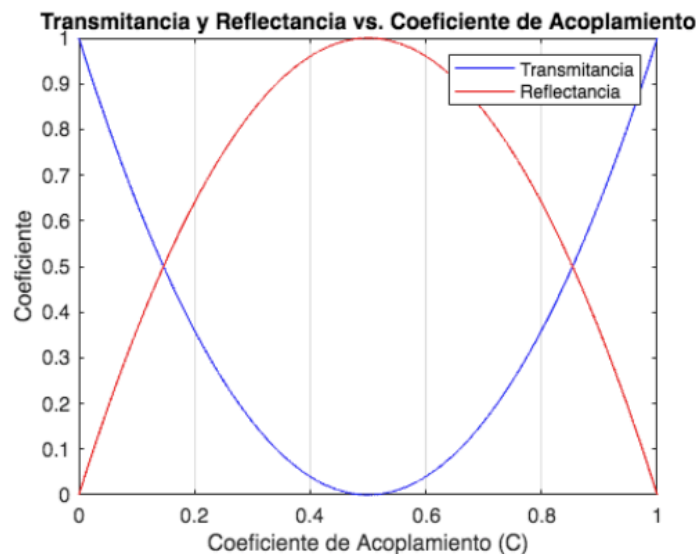


Figura 2. Análisis de la transmisión del esquema Sagnac de fibra óptica en régimen lineal.

Este código muestra cómo la transmisión y la reflexión varían linealmente con respecto al parámetro de acoplamiento. Se observó una relación directa y proporcional entre el acoplamiento y las respuestas de transmisión y reflexión.

2. Código No Lineal:

```

clc;
clear all;

% -----
Ein = 1; % V/m
Lambda = 1.5E-6; % m
psi = 0.1; % W^-1*m^-1
L = 500; % m

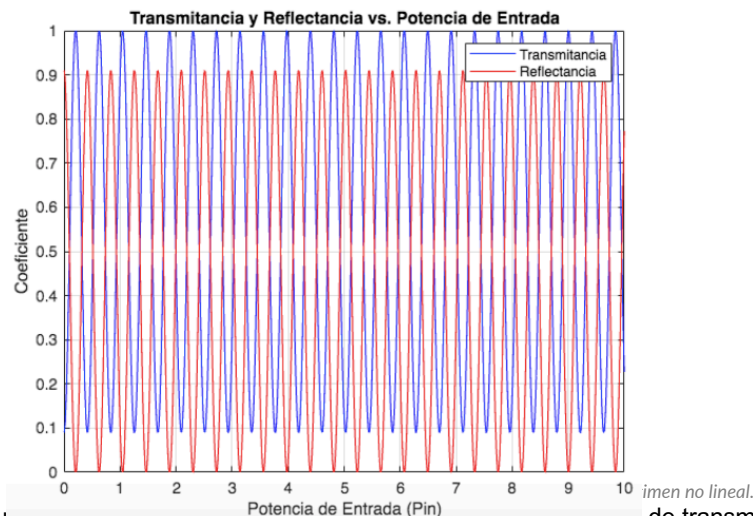
% Alta potencia
Pin = 0:0.001:10;
C = 0.35;
K = (2*pi) / Lambda;

% Notar que usamos .* y .^ para operaciones element-wise
Ecw = (C * Ein) .* exp(1i * (K * L + psi * L * C) * Pin);
Eccw = -(1 - C) * Ein .* exp(1i * (K * L + psi * L * (1 - C)) * Pin);

E = Ecw + Eccw;
T = (abs(E)).^2 / (abs(Ein))^2;
R = 1 - T;

figure;
plot(Pin, T, 'b', 'DisplayName', 'Transmitancia');
hold on;
plot(Pin, R, 'r', 'DisplayName', 'Reflectancia');
xlabel('Potencia de Entrada (Pin)');
ylabel('Coeficiente');
legend('show');
title('Transmitancia y Reflectancia vs. Potencia de Entrada');
grid on;

```



Este código explora una relación no lineal entre el acoplamiento y las respuestas de transmisión y reflexión. Los resultados mostraron comportamientos más complejos y no lineales, indicando la presencia de efectos secundarios y modulaciones no lineales en la fibra óptica.



Trabajo experimental

Para la realización de los experimentos, acoplamos la fibra SMF-28 con un láser y observamos su comportamiento utilizando un OSA (Analizador de espectro óptico) y un osciloscopio, para esto se realizó el siguiente procedimiento.

- **Acoplamiento con 5 Vueltas (π):** Enrollamos la fibra 5 veces alrededor del láser, lo que representa un estado de π .
- **Acoplamiento con 3 Vueltas ($1/4 \lambda$):** Se enrolló la fibra 3 veces, representando un estado de $1/4$ de longitud de onda (λ). Con el control de polarización FPC560 y con la fibra que tiene un diámetro de $125 \mu\text{m}$ obtenemos el número de vueltas necesarias de la fibra óptica.
- **Dispositivo armado:**

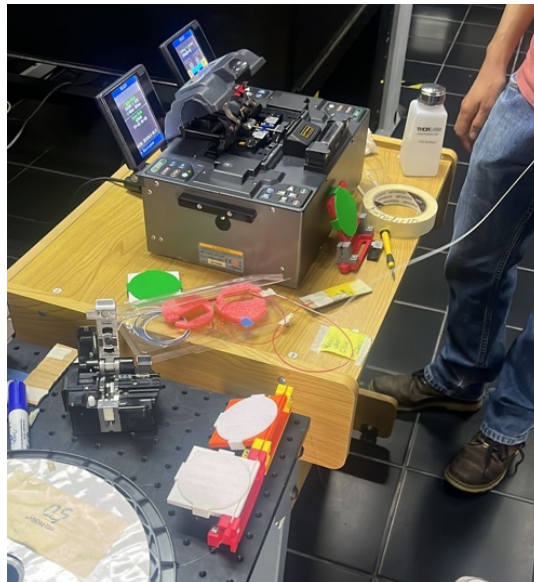


Figura 4. Desarrollo del interferómetro de fibra en el laboratorio.

- **Observaciones:** Se observaron los patrones de interferencia y las variaciones en el espectro óptico y en la señal del osciloscopio.

Resultados del experimento:

- **Comportamiento visualizado en OSA:** Se registraron los cambios en el espectro óptico para ambas configuraciones.
- **Señal vista en Osciloscopio:** Se analizaron las variaciones en la señal temporal y frecuencial capturadas por el osciloscopio.

OSA:

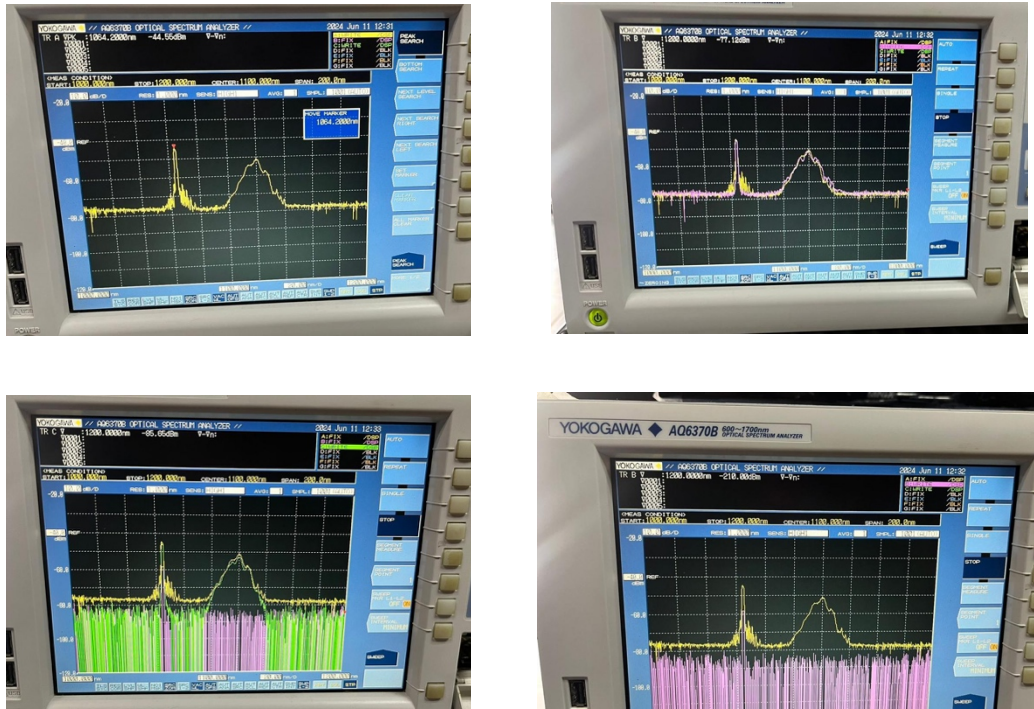


Figura 5. Mediciones realizadas mediante el analizador de espectros óptico.

Osciloscopio:

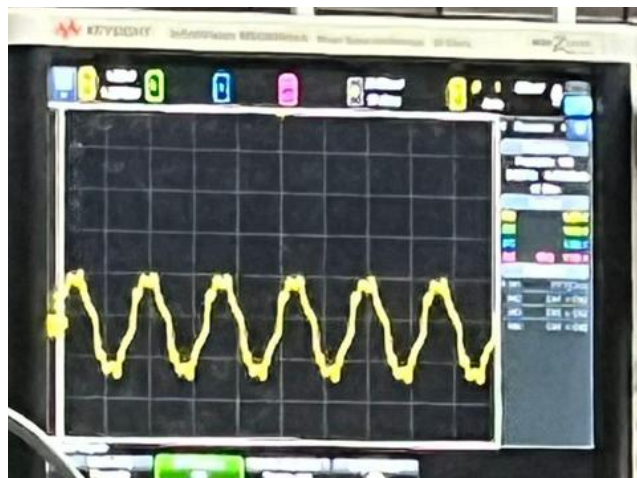


Figura 6. Mediciones realizadas a través del osciloscopio ultrarrápido.

Propuesta de Diseño

Con base en los resultados, se propone un diseño para un prototipo de sensor de vibración de fibra óptica SMF-28 que incorpore los ajustes mecánicos para variar el número de vueltas de la fibra y de tal manera también la sensibilidad del sistema, al integrarlo con el sistema de medición mediante la conexión con analizadores de espectros ópticos y con el osciloscopio para monitorear la respuesta del sensor con precisión y en tiempo real. Finalmente evaluaremos el prototipo en condiciones parecidas a las industriales, es decir, con altas temperaturas y campos magnéticos, así de esta manera validaremos su fiabilidad.

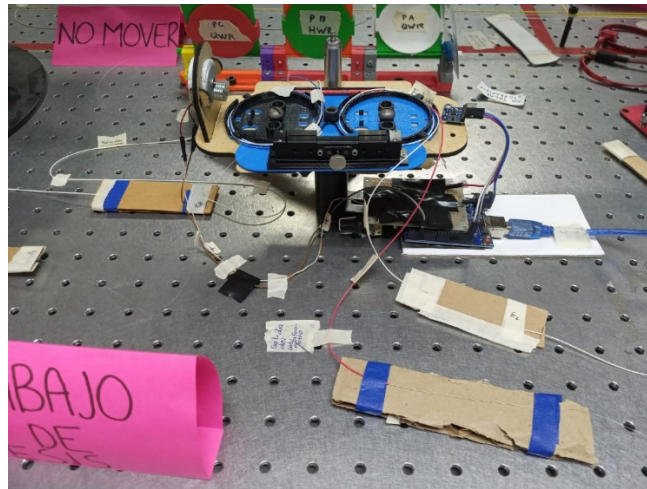


Figura 7. Primera propuesta de diseño del sensor de vibraciones.

Conclusión.

1. Simulación:

- En la simulación pudimos ver que los arreglos interferométricos tienen una alta sensibilidad a las vibraciones, con variaciones en la respuesta espectral y temporal. En el análisis de Jones se logró predecir los efectos de las vibraciones sobre la polarización de la luz.

2. Análisis de Transmisión y Reflexión:

- El código lineal demostró una relación entre el acoplamiento y las respuestas de transmisión y reflexión.
- El código no lineal demostró comportamientos complejos que sugieren la presencia de efectos no lineales en el sistema.

3. Experimentos:

- El acoplamiento de la fibra con el láser mostró patrones de interferencia en el OSA y en el osciloscopio.
- Las diferentes configuraciones de 5 vueltas y 3 vueltas dieron como resultado respuestas distintas, esto significa que la sensibilidad puede modificarse mediante el número de vueltas de la fibra.

En conclusión, la fibra óptica SMF-28 demostró ser una opción para desarrollar sensores de vibración, por su alta sensibilidad. Las simulaciones y experimentos realizados hasta la fecha han proporcionado una base sólida para el diseño y manufactura de estos dispositivos, evidenciando su potencial en diversas aplicaciones industriales y científicas.

La alta sensibilidad de la fibra SMF-28 nos permitió la detección de vibraciones en sistemas industriales, lo que es lo que se busca para aplicaciones de monitoreo y detección de movimientos. Su capacidad de ajuste nos permitirá su adaptación a los entornos industriales. Los experimentos y la teoría nos han confirmado las propiedades de la fibra SMF-28 y hemos establecido algunos parámetros clave para comenzar a ponerlo en práctica.

El siguiente paso es la fabricación de prototipos de sensores de vibración experimentales utilizando fibra óptica SMF-28. Esta fase incluirá la construcción de dispositivos en un entorno controlado y la realización de pruebas exhaustivas para evaluar su comportamiento y se considerará la integración de estos sensores en sistemas que ya se conocen y evaluarlos en aplicaciones específicas como el monitoreo de estructuras, la detección de fallas en máquinas.

Desde el inicio, nuestro objetivo fue desarrollar sensores de alta precisión y fiabilidad que puedan ser implementados, contribuyendo así al avance tecnológico en el campo de la detección y monitoreo de vibraciones.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Guanajuato por llevar a cabo los Veranos de la Ciencia y permitirnos participar en ellos, así como por el apoyo mediante el proyecto institucional CIIC 006/2024. Este trabajo fue apoyado por el CONAHCYT mediante el programa Investigadoras e Investigadores por México proyecto 3155, y proyecto CF-2023-G-109. Finalmente, agradecemos al Dr. Juan Carlos Hernández García y al Dr. Julián Moisés Estudillo Ayala, por la aceptación, asesoramiento en el proyecto y por el apoyo brindado durante las sesiones.

Bibliografía

- [1] V. Vali, R. W. Shorthill, "Fiber laser gyroscopes", Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 76, 110 (1976).
- [2] R. A. Bergh, H. C. Lefevre, H. J. Shaw, "All single mode fiber optic gyroscope", Opt. Lett. 6, 198 (1981).
- [3] K. Otsuka, "Nonlinear antiresonant ring interferometer", Opt. Lett. 8, 471 (1983).
- [4] N. J. Doran, D. Wood, "Nonlinear optical loop mirror", Opt. Lett. 13, 56 (1988).
- [5] D. B. Mortimore, "Fiber loop reflectors", J. Lightwave Technol. 6, 1217 (1988).
- [6] J. D. Moores, K. Bergman, H. A. Haus, E. P. Ippen, "Demonstration of optical switching by means of solitary wave collisions in a fiber ring reflector", Opt. Lett. 16, 138 (1991).
- [7] E. A. Kuzin, N. Korneev, J. W. Haus, B. Ibarra-Escamilla, "Polarization independent nonlinear fiber Sagnac interferometer", Opt. Commun. 183, 389 (2000).