

Sensor distribuido para la detección de esfuerzos de umbral mediante rejillas de Bragg

I. Márquez Borbón, M.G. Shlyagin, S.V. Miridonov, V.V. Spirin y R.M. López
CICESE, División de Física Aplicada
Apartado Postal No.2732, Ensenada, B.C., México 22860

E.A. Kuzin y M. May Alarcón
Instituto Nacional Astrofísica, Óptica y Electrónica,
Apartado Postal 51 y 216, 7200, Puebla, Puebla, México

Recibido el 3 de julio de 2002; aceptado el 23 de mayo de 2003

Algunas aplicaciones sólo requieren que la variable en observación sea detectada dentro de un intervalo preestablecido, mediante un sistema de advertencia temprana o de alarma. Estos sistemas deben generar una señal de alarma cuando la variable de monitoreo se aproxime o cruce el límite de la zona de peligro. En este trabajo se propone un sensor distribuido, basado en un arreglo de rejillas de Bragg iguales, así como una técnica para interrogar al sensor utilizando una sola longitud de onda de prueba. Se discute el principio de operación del sensor y se presentan resultados experimentales de esta técnica para la detección distribuida de exceso de esfuerzo.

Descriptores: Rejillas de Bragg; sensor distribuido; esfuerzo.

For early warning and alarm systems, it is required to detect appearance of the monitored parameter, such as temperature or strain, within some predetermined interval. A system must generate an alarm signal when the monitored parameter approaches near or crosses the limit of the dangerous zone. For such applications, we propose a simple distributed sensor based on a large array of equal Bragg gratings. An interrogation of the sensor is performed at a fixed wavelength. We discuss a principle of operation of the sensor and present results of experimental demonstration of this technique for distributed detection of excess strain.

Keywords: Bragg gratings; distributed sensor; strain.

PACS: 42.81.Pa; 42.81.Wg; 42.79.Dj

1. Introducción

La tecnología de sensores que se basa en fibras ópticas ha sido un tópico importante en los últimos años, especialmente en el área relacionada con los sensores que utilizan rejillas de Bragg de fibra óptica [1,2]. Las rejillas son elementos sensores simples e intrínsecos que tienen la capacidad inherente de auto referenciarse y de multicanalizarse a lo largo de una fibra óptica. Estas ventajas de las rejillas de Bragg (por sus siglas en inglés FBG) sobre otro tipo de dispositivos sensores de fibra óptica, las han hecho muy atractivas para el desarrollo e implementación de muchos sistemas prácticos para el monitoreo de grandes estructuras y de objetos con acceso difícil para su inspección [3,4].

La rejilla de Bragg es una variación periódica del índice de refracción en el núcleo de una fibra óptica. La reflectividad de las rejillas de Bragg depende en gran medida de la longitud de onda de la luz y alcanza el máximo en la longitud de onda de Bragg, que corresponde a la condición de resonancia de la rejilla misma. El espectro de reflexión de la rejilla de Bragg depende también, de perturbaciones externas en la fibra. Cualquier variación de estas perturbaciones induce cambios en el período de la rejilla y en el índice de refracción efectivo de la misma. Como consecuencia se produce un corrimiento en la longitud de onda de Bragg. El principio de medición más común en sensores basados en estas rejillas, se basa en la evaluación del corrimiento de la longitud de onda

de Bragg. Este corrimiento se puede medir empleando técnicas basadas en filtros de espectro ancho (*e.g.*, de borde, pasa banda), filtros pasa banda sintonizables (*e.g.*, Fabry-Perot) y espectrométricas, entre otras [2].

Debido a que la rejilla refleja sólo la parte del intervalo espectral de la fuente que cumple con las condiciones de resonancia de ésta, la información sensada está codificada en longitud de onda, la cual es un parámetro absoluto y no depende directamente de los niveles totales de luz, de pérdidas o de la potencia de la fuente. Esta característica facilita la multicanalización por división de longitud de onda (por sus siglas en inglés WDM), asignando a cada sensor un segmento en el espectro de la fuente. Esto habilita el sensado cuasi-distribuido de variables físicas.

Para el sensado en distintos puntos distribuidos de manera discreta a lo largo de la fibra óptica ó sensado cuasi-distribuido, se han desarrollado diferentes técnicas de multicanalización. Entre ellas se encuentra la técnica de Multicanalización por división de longitud de onda que permite utilizar de 10 a 20 rejillas, con longitudes de onda de Bragg diferentes, en un solo arreglo de sensores. Por otro lado, la multicanalización por división del tiempo (por sus siglas en inglés TDM), puede incrementar este número mediante la reutilización del espectro de la fuente [2]. Sin embargo, muchas aplicaciones requieren que el número de sensores en el arreglo sensor sea mucho mayor. En orden de incrementar significativamente el número de sensores multicanalizados, se

han desarrollado técnicas que combinan la multicanalización por división de longitud de onda con la multicanalización por división del tiempo, del espacio y de la frecuencia [5]. No obstante, el principio de demodulación para estas técnicas, se basa en la medición exacta de corrimientos pequeños en la longitud de onda de Bragg, lo que requiere de instrumentación costosa a la vez que aumenta la complejidad de tales sistemas.

Existen aplicaciones donde no hay necesidad de medir con una gran precisión la magnitud de la influencia externa. Incluso hay aplicaciones donde es suficiente detectar la aparición de la variable de monitoreo dentro de un intervalo predeterminado y, de manera adicional, determinar la posición a lo largo de la fibra donde ocurre el evento. En este caso se pueden desarrollar métodos de interrogación simplificados manteniendo un número grande de sensores [6,7].

Este trabajo presenta un sistema viable, basado en rejillas de Bragg, para la detección distribuida de excesos de esfuerzo en la fibra. Se discute el principio de operación, una técnica de interrogación sencilla y se muestran resultados experimentales para la demostración del sensor.

2. Principio de operación

El principio básico de operación más común entre los sensores basados en rejillas de Bragg, es el monitoreo del corrimiento de la longitud de onda de Bragg en la señal que ésta refleja ante cambios en la variable de observación (*i.e.*, los sensores de rejillas son sensibles principalmente al esfuerzo y la temperatura). La longitud de onda de Bragg o condición de resonancia, se da mediante la expresión $\lambda_B = 2n\Lambda$, donde Λ es el período de las rejillas y n es el índice de refracción efectivo en el núcleo de la fibra [2]. A su vez, el período y el índice de refracción se ven afectados, principalmente por la temperatura y el esfuerzo. La respuesta a este último proviene de la elongación física del sensor (y cambio respectivo en el período) y al cambio en el índice de refracción de la fibra debido a efectos foto-elásticos; mientras que la respuesta termal proviene de la expansión térmica del material de la fibra y a la dependencia del índice de refracción a la temperatura. El cambio en la longitud de onda de Bragg se expresa por $(\Delta\lambda_B)/(\lambda_B) = \eta_T\Delta T + \eta_\epsilon\epsilon$, donde ΔT y ϵ representan el incremento en la temperatura y el esfuerzo, η_T ($\sim 0.01\text{nm}/^\circ\text{C}$ a $\lambda \sim 1.5 \mu\text{m}$) y η_ϵ ($\sim 0.001\text{nm}/\mu\epsilon$ a $\lambda \sim 1.5 \mu\text{m}$) son constantes de sensibilidad a la temperatura y al esfuerzo, respectivamente. Aun así, esta sensibilidad es muy pequeña y se requiere de una resolución muy alta ($\sim 0.001 \text{ nm}$) para resolver cambios muy pequeños de temperatura y de esfuerzo. Como se mencionó anteriormente, algunas aplicaciones prácticas no requieren de una medición exacta de la variable física; de hecho, puede ser suficiente detectar una condición de advertencia cuando la variable exceda cierto nivel de umbral en algún punto a lo largo de la fibra. Esto permite que el esquema de interrogación sea más simple. El sensor se basa en un arreglo de serie de rejillas de Bragg débiles con longitudes de onda nominales iguales. Las

rejillas se graban en el núcleo de una fibra monomodal y se pueden distribuir de manera arbitraria a lo largo de la fibra. La fibra se sujeta mecánicamente, en puntos múltiples, a lo largo de la estructura bajo inspección. Los puntos de sujeción se localizan entre rejillas adyacentes.

La fuente de luz opera a una longitud de onda fija, la cual queda fuera de la banda principal de reflexión de las rejillas de Bragg cuando la fibra está en condiciones normales sin perturbación. De ahí que, bajo condiciones normales, la reflectividad de la fibra sea baja. Cuando un exceso de esfuerzo de la estructura monitoreada aparece en algún punto de la fibra, éste produce elongación del segmento de la fibra que contiene una rejilla. Como resultado de esta elongación en la fibra, el espectro de reflexión de la rejilla afectada se corre hacia la región de longitudes de onda mayores. Iniciando desde algún nivel de esfuerzo, el lóbulo principal del espectro de reflexión de la rejilla afectada se traslapa con la longitud de onda de prueba y la reflectividad total de la fibra se incrementa. De la misma manera, la corriente del fotodetector cambiará del nivel bajo en condiciones normales a un nivel más alto cuando el evento de advertencia ocurra.

Para evaluar los requerimientos de la fuente de luz, detector y propiedades de las rejillas de Bragg, presentamos un análisis simplificado del sistema sensor. Suponemos que las distancias entre las rejillas exceden la longitud de coherencia de la fuente de luz, de tal modo que los efectos de interferencia se pueden discriminar y el espectro resultante es la superposición de todos los espectros individuales de las rejillas. Supongamos que a la longitud de onda de monitoreo (λ_{prueba}) la cual debe ser mayor que la longitud de onda de Bragg normal, $\lambda_{prueba} > \lambda_{BGnorm}$, la atenuación de la fibra es pequeña y que las reflectividades de las rejillas de Bragg, r_k (k se refiere a la k 'ésima rejilla), bajo condiciones sin perturbación, son lo suficientemente pequeñas para satisfacer la condición

$$\sum_{k=1}^N r_k(\lambda_{prueba}) \ll 1 . \tag{1}$$

Las reflectividades de las rejillas de Bragg a la longitud de onda de prueba corresponden a los lóbulos laterales del espectro de reflexión, el cual, típicamente, es lo suficientemente pequeño para satisfacer la condición (1). En este caso, la reflexión del arreglo de rejillas de Bragg a la longitud de onda de prueba se puede presentar como

$$\sum_{k=1}^N r_k(\lambda_{prueba}) \approx N \overline{r(\lambda_{prueba})} , \tag{2}$$

donde $\overline{r(\lambda_{prueba})}$ es la reflectividad efectiva promedio, a la longitud de onda de prueba, de una rejilla sin perturbar; N es el número total de rejillas de Bragg en el arreglo. La reflectividad total de la fibra bajo condiciones normales sin perturbación es

$$R_{norm} = R_0 + \sum_{k=1}^N r_k(\lambda_{prueba}) \approx R_0 + N \overline{r(\lambda_{prueba})} , \tag{3}$$

donde R_0 es la reflexión de la fibra misma. Esta puede aparecer debido a reflexiones de Fresnel en los puntos de empalme y de conectores, y debido al retroesparcimiento de Rayleigh. Las reflexiones de Fresnel se pueden suprimir significativamente por medios técnicos. De ahí que el retroesparcimiento de Rayleigh sea la principal contribución en R_0 . Para fuentes de luz de onda continua se debe tomar en cuenta toda la longitud de la fibra cuando se considera el retroesparcimiento de Rayleigh. En este caso, el término de reflexión R_0 se puede estimar como [9]

$$R_0 = \frac{\alpha_s S(1 - e^{-2\alpha L})}{2\alpha}, \quad (4)$$

donde α_s es el coeficiente de atenuación debido al esparcimiento de Rayleigh, S es el factor de recapturamiento, α es la atenuación total en la fibra y L es la longitud de la fibra. Siguiendo a la Ec. (4), la intensidad del retroesparcimiento de Rayleigh se incrementa conforme a la longitud de la fibra y para valores típicos de $\alpha = 0.2 \dots 0.5$ dB/km, se satura para longitudes de fibra mayores a 10-20 Km. Los parámetros comunes de una fibra monomodal para telecomunicaciones, a una longitud de onda de $1.55 \mu\text{m}$, son $\alpha_s \sim 0.15$ dB/Km, $\alpha \sim 0.2$ dB/Km, $S \sim 0.0016$ [9,10]. Utilizando estos valores la reflectividad de saturación debido al retroesparcimiento de Rayleigh (para una fibra mayor a 10 Km) es de aproximadamente 0.05%. De ahí se puede suponer que a la longitud de onda de prueba, $R_0 \ll 1$ y de acuerdo con la Ec. (1), que la reflectividad total de la fibra bajo condiciones normales sin perturbar es también muy pequeña ($R_{norm} \ll 1$).

Si una influencia externa afecta a cualquiera de las rejillas de Bragg y como resultado, el espectro de reflexión de las rejillas se corre hacia la longitud de onda de prueba, la reflectividad de la fibra cambia y se convierte en

$$R_{pert} \approx R_0 + (N - 1) \overline{r(\lambda_{prueba})} + R(\lambda_{prueba}), \quad (5)$$

donde $R(\lambda_{prueba})$ es la reflectividad de la rejilla bajo la influencia de esfuerzo. Aquí aún se supone que la reflectividad máxima de la rejilla es pequeña, $R(\lambda_{prueba}) \ll 1$. De ahí que el valor absoluto del cambio en la reflectividad de la fibra, cuando una rejilla de Bragg está bajo condiciones perturbadas, sea aproximadamente

$$\Delta R = |R_{pert} - R_{norm}| \approx R(\lambda_{prueba}) - \overline{r(\lambda_{prueba})}. \quad (6)$$

Para detectar de manera confiable una condición de alarma, el cambio en la corriente del fotodetector correspondiente al cambio en la reflectividad de la fibra debe ser perfectamente distinguible respecto a las variaciones de corriente debidas al ruido óptico y del fotodetector. La corriente del fotodetector en condiciones normales es

$$J_{norm} = \gamma \Re I_0 \left(R_0 + \overline{K r(\lambda_{prueba})} \right) + i_{ruido}, \quad (7)$$

donde \Re es la responsividad del detector, γ es un coeficiente que depende del componente utilizado para acoplar la luz de la fuente a la fibra sensora y guiar la luz reflejada por esta hacia el detector (*e.g.*, para un acoplador de fibra óptica de 3 dB, $\gamma \approx \frac{1}{4}$ por que la luz pasa dos veces), I_0 es la intensidad de la fuente de luz acoplada a la fibra e i_{ruido} es la corriente de ruido total del sistema. Esta componente representa al ruido de diferentes orígenes. Las fuentes de ruido más comunes, asociadas a la detección óptica son: el térmico (o ruido de Johnson), de disparo (cuántico o de fotones-*shot-noise* en inglés) de intensidad y de fase. El ruido térmico se genera en los fotodetectores cuando la fotocorriente encuentra una resistencia y su calentamiento produce vibraciones en el material. El ruido eléctrico de disparo ocurre por que el tiempo de llegada de los fotones que generan la corriente eléctrica es aleatorio. Por otro lado, el ruido de intensidad es muy importante en las mediciones ópticas y existe en la señal óptica aun antes de detectarla. El ruido de intensidad se origina en las fuentes de luz mismas. El ruido de fase óptica (fluctuaciones de frecuencia en la portadora óptica) se convierte en fluctuaciones de intensidad cuando ocurren reflexiones múltiples que interfieren entre ellas. Para simplificar el análisis se considera, de entrada, que la separación entre rejillas es mucho mayor a la longitud de coherencia de la fuente; por lo tanto, no hay efectos de interferencia coherente entre las reflexiones múltiples de las rejillas en el arreglo sensor.

El primer término a la derecha de la expresión (7) es la componente de corriente de la señal debido a la luz reflejada de la fibra. El ruido del detector se determina mediante el ruido térmico, $i_{termico}^2$, de las reflexiones totales de la fibra en condiciones normales que producen el ruido de disparo, i_{shot}^2 , y además de las fluctuaciones en la corriente debido al ruido de intensidad de la fuente de luz, i_{laser}^2 . De modo que la componente de ruido presente en el sistema se puede expresar como

$$i_{ruido} = \sqrt{i_{termico}^2 + i_{shot}^2 + i_{laser}^2} = \sqrt{\frac{4kT_e \Delta f}{R_{pd}} + 2q\Delta f \gamma \Re I_0 (R_0 + N\bar{r}) + RIN \Delta f \gamma^2 \Re^2 I_0^2 (R_0 + N\bar{r})^2}. \quad (8)$$

Aquí,

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$$

es la constante de Boltzman, T_e es la temperatura ($^\circ\text{K}$), R_{pd} es la resistencia a la entrada del fotodetector (Ω), $q = 1.6022 \times 10^{-9}$ es la carga del electrón, Δf es el ancho

de banda de frecuencia del detector (Hz) y RIN es el ruido de intensidad relativo en la fuente de luz (Hz^{-1}).

Generalmente se acepta que una señal se detecta de manera confiable si el cambio en ella es mayor al triple de la

desviación estándar del ruido, σ_{ph} (A). Por lo tanto, la relación

$$\Delta J_{pert} \geq 3\sigma_{ph}, \tag{9}$$

se puede utilizar para estimar los parámetros del sensor. De acuerdo a (5) y (6), cuando un exceso de esfuerzo se aplica a la rejilla más alejada, con el número K y tomando en cuenta la atenuación de la fibra, el cambio en la corriente del detector se puede expresar como

$$\Delta J_{pert} = \gamma \mathcal{R} I_0 (R_N(\lambda_{prueba}) - r_N(\lambda_{prueba})) T^2(L), \tag{10}$$

donde $R_N(\lambda_{prueba})$ y $r_N(\lambda_{prueba})$ son la reflectividad de la rejilla estirada y el nivel de reflexión del lóbulo lateral de la rejilla sin perturbar a la longitud de onda de prueba; λ_{prueba} es la longitud de onda de la fuente (nm) y $T(L)$ es la trasmisividad de la fibra.

Para la reflectividad mínima requerida de la rejilla perturbada, se considera el caso donde el ruido de intensidad del láser predomina. Esto es válido cuando la intensidad de la luz reflejada es lo suficientemente alta y el ruido de intensidad predomina de manera que el ruido térmico y el ruido de disparo en el detector se pueden discriminar. De ahí que, la desigualdad (9) se puede expresar en la forma

$$(R_N - r_N) T^2(L) \geq 3(R_0 + N\bar{r}) \sqrt{\Delta f RIN}, \tag{11}$$

y finalmente, tomando en cuenta que $R_N \gg r_N$,

$$R_N \geq 3 \frac{(\alpha_s/2\alpha) S(1 - e^{-2L}) + N\bar{r}}{e^{-2L}} \sqrt{\Delta f RIN}. \tag{12}$$

La desigualdad (12) conecta a parámetros del sistema, tales como, la longitud de la fibra L (m), el nivel del lóbulo lateral en el espectro de reflexión de la rejilla (\bar{r}), el número de rejillas en el arreglo (N) y la reflectividad mínima requerida de la rejilla perturbada (R_N). Se han hecho algunas suposiciones para presentar el análisis de una manera sencilla. No obstante, la expresión (12) puede ser útil para una primera estimación de los parámetros del sensor.

Como ejemplo consideremos un arreglo de rejillas de Bragg, el cual puede formarse en una fibra monomodal estándar durante el estirado de la fibra en el proceso de fabricación de la misma. Tomando en cuenta que las rejillas grabadas en fibras estándar mediante un sólo pulso de láser excímero pueden ser del 0.1 % [11], que el nivel del lóbulo lateral en el espectro de reflexión de cada rejilla no excede -20dB, con un diodo láser con RIN de -100dB/Hz y un detector con ancho de banda de 10Hz; de la Ec. (12) obtenemos que un arreglo de sensores con longitud de 10 Km, puede consistir hasta de 300,000 rejillas distribuidas uniformemente a lo largo de la fibra.

3. Arreglo experimental y resultados

En la Fig. 1 se muestra un diagrama esquemático del arreglo experimental para las pruebas preliminares de funcionalidad

del sensor. La luz de la fuente se acopla a la fibra sensora mediante un acoplador direccional de 3 dB. La reflexión de la fibra sensora se guía hacia el detector a través del mismo acoplador. La fibra sensora consta de diecisiete rejillas posicionadas a lo largo de la fibra y separadas por 0.5 metros entre ellas. Las rejillas se grabaron en el núcleo de la fibra monomodal, mediante el cuarto armónico de un láser Nd:YAG “Q-switched”. La salida del láser es de 266 nm. Se utilizó la técnica de mascarilla de fase para grabar las rejillas. El perfil de intensidad del haz UV es aproximadamente gaussiano, de manera que las rejillas son apodizadas y, por consiguiente, el nivel de los lóbulos laterales del espectro de reflexión es muy bajo. Todas las rejillas tienen longitudes aproximadas de 2 mm y un ancho de banda espectral de 0.4 nm. Las primeras 16 rejillas tienen una reflectividad del 5 %, mientras que la décimo-séptima tiene reflectividad del 3 %. La rejilla con reflectividad del 3 % se utilizó para demostrar la respuesta del sensor al esfuerzo. Esta se puede observar en la Fig. 1 entre dos sujetadores, que fueron utilizados para introducir un esfuerzo en la sección de la fibra que contiene a la rejilla. Para grabar los espectros de reflexión e investigar el funcionamiento del sensor, se utilizó una fuente de espectro ancho basada en fibra dopada con erbio (Er^{+}) y un analizador de espectros ópticos como detector. La fuente consiste en un diodo láser de bombeo a 980 nm, conectado en serie con la fibra dopada con Er^{+} de 3m de longitud y un aislador de fibra óptica para evitar realimentación a la fibra (emisión estimulada). Esta fuente entrega una potencia promedio de aproximadamente 3 mW y tiene un ancho de banda de 10 nm (ancho a la mitad del máximo) centrado a ~ 1531.8 nm. En la Fig. 2 se muestra un espectro típico de las rejillas grabadas.

Con el fin de realizar estimaciones de las componentes de ruido del sistema y verificar cuáles son las más importantes, se realizaron algunas mediciones para estimar efectos de ruido térmico en el sistema y la estimación del ruido de intensidad relativo de la fuente. Todas las mediciones se tomaron con los mismos parámetros en el equipo (longitud de onda de prueba a 1536.77 nm, ancho de banda del detector, $(\Delta f) \sim 50$ Hz, resolución espectral = 0.5 nm, ventana de observación = 0 nm).

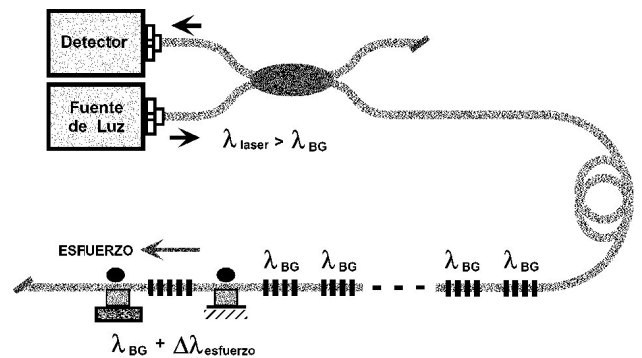


FIGURA 1. Arreglo experimental para la detección de esfuerzo.

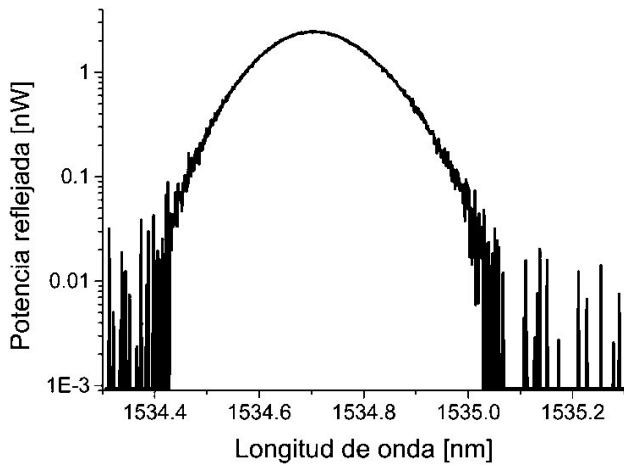


FIGURA 2. Ejemplo del espectro de reflexión de la rejilla.

Se tomaron lecturas del nivel de potencia cuando el analizador de espectros no tiene iluminación a la entrada. Estos niveles corresponden a la señal generada por ruido de oscuridad debida, en mayor parte, por efectos de ruido térmico del detector [12]. La potencia promedio fue de 17.8 pW y su desviación estándar, σ_{th} , de 5.7 pW, que corresponde al ruido térmico. Después se realizó el procedimiento para medir el ruido de la fuente; para este caso se conectó la fuente de luz directamente al analizador de espectros y se tomaron mediciones de los niveles de potencia para $\lambda=1536.77$ nm con ancho de banda del espectrógrafo de 0.5 nm. El nivel promedio (I_{fuente}), fue de 17.5 μ W y su desviación estándar (σ_{fuente}), de 22.8 nW. El ruido de intensidad relativo (RIN) de la fuente ésta dado por $(\sigma_{fuente}/I_{fuente})^2 \Delta f^{-1}$, que resultó de $\sim 34 \times 10^{-9}$ /Hz (~ -75 dB/Hz).

Posteriormente se conectó el arreglo de sensores de rejillas de Bragg (ver Fig. 1) y se tomaron mediciones. La Fig. 3 muestra el espectro de reflexión total cuando todas las rejillas están en condiciones normales. La Fig. 4 muestra una serie de espectros de reflexión de la fibra obtenidos experimentalmente y sirven para presentar el principio de operación del sensor. Las condiciones ambientales de laboratorio fueron constantes

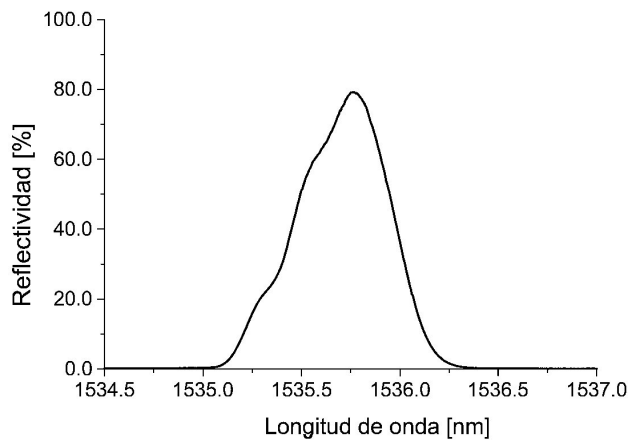


FIGURA 3. Espectro de reflexión total del arreglo de rejillas de Bragg bajo condiciones sin perturbar.

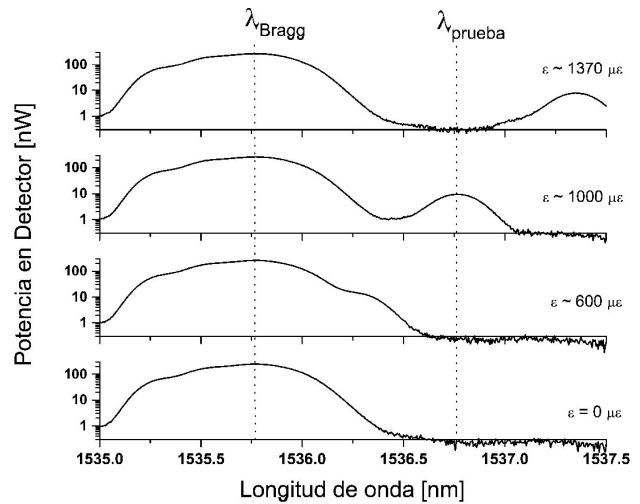


FIGURA 4. Espectro de reflexión de la fibra a diferentes niveles de esfuerzo aplicado a una sola rejilla.

durante las pruebas. Se seleccionó una longitud de onda de prueba que fuese mayor a las longitudes de onda de la banda reflejada por la fibra que contiene a las rejillas. Para este experimento la longitud de onda de prueba se estableció a 1 nm de la longitud de onda de Bragg de las rejillas bajo condiciones normales ($\lambda_{prueba}=1536.7$ nm). La longitud de prueba se marca en la gráfica con una línea punteada.

Cuando no se aplica esfuerzo alguno a las rejillas, la reflectividad a la longitud de onda de prueba es mínima. Como se puede ver en los espectros de la Fig. 4, a medida que se estira la zona de la fibra que contiene a la última rejilla, su longitud de onda se comienza a correr hacia la longitud de onda de prueba. La reflexión de la fibra alcanza su máximo en un nivel de esfuerzo de 1050 $\mu\epsilon$. La Fig. 5 muestra la intensidad pico reflejada contra el esfuerzo aplicado a la rejilla 17^a. Se tomaron mediciones del nivel de la señal reflejada y ruido para dos casos. El primero en condiciones normales y el segundo bajo condiciones de perturbación en la última rejilla del arreglo. La señal obtenida bajo condiciones normales

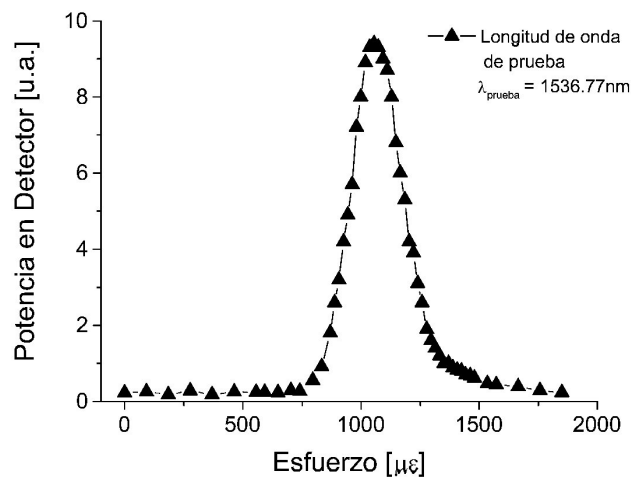


FIGURA 5. Potencia reflejada por la fibra versus esfuerzo sobre la rejilla de Bragg bajo prueba.

contiene a todas las componentes de ruido presentes en el sistema generadas por la señal óptica (reflexiones de Fresnel, retroesparcimiento de Rayleigh, efectos de lóbulos laterales de las rejillas) que contribuyen principalmente, al ruido de *shot* y al del intensidad; así como, al el ruido térmico generado por el detector. En términos de la potencia óptica, el nivel promedio de la señal fue de ~ 0.72 nW y su desviación estándar, σ_{ruido} , de 17.3 pW, que corresponde a la componente de ruido total del sistema. En el segundo caso se estiró la región de la fibra con la rejilla hasta obtener la reflexión máxima a la longitud de onda de prueba, correspondiente a la señal que llega al detector en condiciones de perturbación (nivel de esfuerzo de ~ 1050 $\mu\epsilon$). El valor promedio de la señal, I_{dc} , fue de ~ 142.4 nW. A partir de $I_{dc}/\sigma_{\text{ruido}}$, se obtuvo la relación de señal a ruido cercano a 8200.

La diferencia entre la longitud de onda de prueba y la longitud de onda de Bragg nominal de las rejillas, determina el nivel de umbral para alguna aplicación específica. Para algunas aplicaciones, ésta debe ser lo suficientemente grande para evitar señales de falsa alarma, debido, posiblemente, a variaciones de temperatura. Para este experimento el nivel de umbral fue seleccionado a 1000 $\mu\epsilon$. En este caso las variaciones de temperatura en el intervalo de ± 40 °C no producirán señal de falsa alarma alguna.

Los resultados experimentales, principalmente la razón señal/ruido, nos dan una idea del potencial que puede tener este esquema de sensado. En primera instancia que el número de rejillas en el arreglo (con características iguales) se puede incrementar significativamente (entre 100 y 200 veces) y aun mantener la detección confiable de la condición de alarma, es decir, una condición de señal a ruido suficiente para la detección segura del evento. Como segunda instancia, en los experimentos se utilizó una fuente de luz de espectro ancho y un filtro espectral utilizando un analizador de espectros ópticos. Tal configuración es adecuada para demostrar la funcionalidad del sensor. Sin embargo, en un sistema optimizado, sería más conveniente utilizar como fuente de luz a un diodo láser ó un láser de fibra óptica. Debido a que el láser tiene un ancho de banda mucho más angosto (0.001 - 0.1 nm), la densidad de potencia espectral es más alta, con esto la reflectividad de las rejillas puede ser menor. Por otra parte, esta potencia mayor del láser ubica al sistema en el punto donde el ruido de intensidad es el ruido dominante [como se propone en la Ec. (12)] y en consecuencia la relación señal a ruido mejora. Lo anterior simplifica y baja el costo del sistema, puesto que no sería necesario utilizar para la detección un equipo tan com-

plejo como el analizador de espectros ópticos y en su lugar bastaría un simple fotodetector.

Como investigación a futuro se pueden implementar diferentes técnicas para determinar la posición a lo largo de la fibra donde se detectó una condición de alarma (esfuerzo excediendo un nivel de umbral). La salida del láser se puede modular de modo que produzca pulsos. En este caso se puede utilizar un método estándar de reflectometría óptica en el dominio del tiempo (por sus siglas en inglés OTDR). Sin embargo, un dispositivo comercial de OTDR no es útil en el sensor propuesto debido a la exactitud y estabilidad baja en su longitud de onda (± 10 nm), por lo que un método más apropiado para localizar la perturbación puede ser la reflectometría incoherente en el dominio de la frecuencia [13].

4. Conclusiones

Se presentó un nuevo sensor apropiado para la detección distribuida de condiciones de alarma a lo largo de grandes estructuras. Este sensor se basa en un arreglo en serie de rejillas de Bragg de fibra óptica idénticas con reflectividad baja. La interrogación del sensor se realiza mediante el monitoreo de la señal de salida del sensor a una longitud de onda de prueba fija. La diferencia entre la longitud de onda de interrogación y la longitud de onda de Bragg de las rejillas en condiciones normales, establece el nivel de umbral para la detección. La interrogación consiste en la detección de la señal cuando esta alcanza ó excede este nivel de umbral establecido. Se presentó un análisis teórico del sistema y se muestran datos experimentales preliminares en la configuración para la detección de exceso de esfuerzo que demuestran la funcionalidad del sensor. Estimaciones indican que se puede alcanzar un número muy elevado de rejillas en un arreglo. El diseño sencillo del sensor en combinación con la técnica de interrogación de bajo costo, hace a este sensor interesante para aplicaciones reales. Ya que el principio del sensor se basa en una fuente de luz con una longitud de onda fija, la instrumentación de interrogación se puede simplificar enormemente utilizando un diodo láser.

Agradecimientos

Este trabajo fue soportado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través del proyecto #35460U, y por el Instituto Mexicano del Petróleo, a través del proyecto FIES 97-04 IV.

1. K.T.V. Grattan y T. Sun, *Sensors and Actuators* **82** (2000) 41.
2. A.D. Kersey *et al.*, *J. of Lightwave Technol.* **15** (1997) 1442.
3. Y.J. Rao, *Optics and Lasers in Engineering* **31** (1999) 297.
4. J.P. Dakin y M. Volanthen, *IEICE Trans. Electron.* **E83-C** (2000) 391.
5. Y.J. Rao, *et al.*, *Optics Communications.* **125** (1996) 53.
6. B. Culshaw y J. Dakin, (ed.) *Optical Fiber Sensors, Vol. III* (Artech House, Boston, 1997).
7. J. Dakin and B. Culshaw, (ed.) *Optical Fiber Sensors, Vol. IV* (Artech House, Boston, 1997).

8. W.V. Surin, en *Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors, II, Proc. SPIE*. **1797** (1992) 108.
9. P. Gysel y R.K. Staubli, *J. Lightwave Technol.* **8** (1990) 561.
10. Shien-Kuei Liaw, Sohn-Ling Tzeng, Yu-Ju Hung, *Opt. Comm.* **188** (2001) 63.
11. Dong L. *et al.*, *Electronics Lett.* **29** (1993) 1577.
12. Dennis Derickson, (ed.) *Fiber Optic Test and Measurement* (Prentice-Hall, New Jersey, 1998).
13. R.I. MacDonald, *Appl. Opt.* **20** (1981) 1840.