

# FENÓMENO SPECKLE EN FIBRA ÓPTICAS Y SUS APLICACIONES EN SENSORES

## FIBER OPTIC SPECKLE PHENOMENON AND ITS APPLICATIONS SENSORS

Mauro Lomer<sup>1</sup>

### RESUMEN

*Un patrón de luz altamente estructurado es observado cuando un haz de luz coherente se propaga por una fibra óptica multimodo y es proyectada sobre una pantalla. Este patrón está constituido por una gran cantidad de pequeñas manchas de luz brillantes (del inglés: speckle) sobre un fondo opaco, producidos por un fenómeno de interferencia intermodal. El patrón de speckle varía lentamente debido a factores medio-ambientales que rodean a la fibra óptica, pero la intensidad total se mantiene casi constante y puede ser registrada por una simple cámara CCD. Cualquier perturbación exterior (temperatura, vibración, presión, tensión, ...) realizada sobre la fibra afecta al patrón de speckle. Un adecuado procesamiento de las imágenes puede permitir extraer las causas del origen de la perturbación y construir una señal de correlación y su aplicación en la medida de parámetros físicos, químicos o biológicos. Se presentan la generación del fenómeno speckle en fibras ópticas multimodo con fuente de luz coherente. Se describen los conceptos teóricos que están presentes en el fenómeno, el montaje óptico y la demostración experimental, así como algunas aplicaciones que pueden dar lugar en sensores.*

*Palabras clave.*- Fenómeno speckle, Fibras ópticas multimodo, Sensores.

### ABSTRACT

*A highly structured light pattern is observed when a coherent light beam is propagated by a multimode optical fiber and projected onto a screen. This pattern consists of a large number of small patches of bright light (English: speckle) on an opaque background, caused by the intermodal interference phenomenon. The speckle pattern varies slowly due to environmental factors surrounding the optical fiber, but the total intensity remains almost constant and can be registered by a single CCD camera. Any external perturbation (temperature, vibration, pressure, voltage, ...) performed on the fiber affects the speckle pattern. An appropriate image processing can allow extracting the causes of the disturbance source and build a correlation signal and its application to the extent of physical, chemical or biological. Generation occur speckle phenomenon in multimode optical fibers with a source of coherent light. We describe the theoretical concepts that are present in the phenomenon, the optical setup and the experimental demonstration, as well as some applications that can result in sensors.*

*Key words.*- Speckle phenomenon, Multimode optical fibers, Sensors.

### INTRODUCCIÓN

Desde que las fibras ópticas fueron propuestas como medio de transmisión alternativa a los sistemas de radio, se han realizado dos tipos de

fibras: monomodo y multimodo. La primera tiene un diámetro del núcleo pequeño ( $\approx 10 \mu\text{m}$ ) y la señal óptica propagada tiene una velocidad de fase casi constante.

---

<sup>1</sup>Dr. Investigador de la Universidad de Cantabria, Grupo de Ingeniería Fotónica de España.

La segunda tiene un diámetro mucho mayor ( $\geq 50 \mu\text{m}$ ) y puede soportar muchos modos y que pueden propagarse con diferentes velocidades de fase. Si la luz acoplada en ambas fibras corresponde a una fuente de luz láser, la luz emergente en la fibra monomodo proyectada sobre una pantalla corresponde a una única mancha de luz uniforme. Por el contrario, en la fibra multimodo se observará un patrón de luz granulada, que llamaremos en adelante patrón de speckle. El fenómeno de speckle, en fibra óptica, es generado por la interferencia entre modos y por la interacción del propio modo. La distribución de patrón contiene speckle individuales que varían lentamente en el tiempo, pero la medida de intensidad total permanece constante [1]. Estas características particulares del fenómeno speckle en fibras ópticas son utilizadas en la tecnología de sensores. En todas las demostraciones del fenómeno de speckle se han utilizado fibras ópticas multimodo con diámetros de núcleo superiores a  $50 \mu\text{m}$ , siendo por lo general de fibras a base de vidrio. Un ejemplo de patrón de speckle obtenido en fibra óptica es mostrado en la Figura 1.



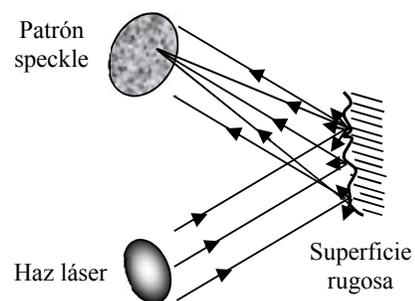
**Fig. 1** Patrón de speckle obtenido en el extremo de una fibra óptica multimodo de  $980 \mu\text{m}$  de diámetro de núcleo.

El patrón de speckle en fibra es relativamente fácil de obtener, pero también es extremadamente sensible a cualquier perturbación, tales como la temperatura, humedad, presión, etc. Así, relacionando la variación del patrón de speckle con la perturbación ocasionada en la fibra podemos obtener la medida de una magnitud, ya sea física, química o biológica. En los últimos años, todos los

dominios de la ciencia se han beneficiado de los avances científicos y tecnológicos. En efecto, disponemos de programas con gran capacidad de cálculos, cámaras de vídeo de alta velocidad y gran resolución, fibras ópticas con materiales diferentes al vidrio, por ejemplo, las fibras ópticas plásticas y diodos láseres de bajo costo. Esto nos puede permitir diseñar sensores basados en el fenómeno speckle para una variedad de aplicaciones y de bajo costo. En este artículo se presenta el fenómeno de speckle en fibra óptica multimodo y su aproximación teórica. La obtención experimental del patrón de speckle utilizando fibras ópticas plásticas (POF) de diferentes diámetros son realizados para disponer de los rangos de utilización en frecuencia en las posibles aplicaciones. Finalmente se presentan algunas aplicaciones de sensores realizadas en laboratorio.

## SPECKLE EN FIBRAS ÓPTICAS

El fenómeno speckle puede ser obtenido por iluminación de una superficie rugosa con un haz de luz coherente, la luz reflejada o transmitida está compuesta de una gran cantidad de manchas de luz brillante y oscuras (Fig. 2). Un punto o mancha de luz está compuesta por la superposición de muchas ondas provenientes de la superficie rugosa, generadas por un fenómeno de interferencia. Así, el patrón de speckle está compuesto de una multitud de puntos o manchas brillantes, donde la interferencia es constructiva y de manchas muy oscuras, donde la interferencia ha sido destructiva. La distribución de cada speckle en el patrón es de naturaleza aleatoria, por lo que el análisis completo del fenómeno es extremadamente complejo pero no imposible. La mayoría de aproximaciones se realizan por cálculo estadístico [2].



**Fig. 2** Formación del patrón de speckle con superficie rugosa.

El patrón de speckle también se puede obtenerse utilizando fibras ópticas, particularmente en fibras ópticas multimodo.

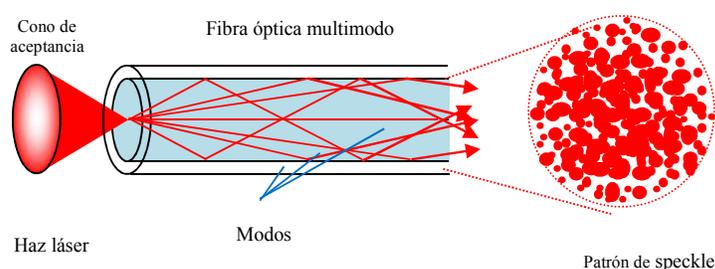
En efecto, la fibra óptica es una guía de ondas de luz de estructura cilíndrica y compuesta de un *núcleo* de índice de refracción  $n_1$ , y rodeado de un medio exterior llamada *cubierta* de índice de refracción  $n_2$  y ligeramente inferior que  $n_1$ . La luz se propaga por el núcleo cuyo diámetro permite que viajen varios *modos de propagación*.

Cuando se acopla luz en la entrada de la fibra, todos los modos de la fibra son excitados; todos parten al mismo tiempo, siguen diferentes caminos con velocidades de fase diferentes. Como la fibra es simétrica, las ondas que conforman el modo se

propagan por reflexiones totales internas y se interfieren entre ellos.

Por lo tanto, en la proyección del haz de salida de la fibra sobre una pantalla se puede observar un patrón de speckle similar a la obtenida por una superficie rugosa, pero en este caso debido a la interferencia entre modos (ver Fig. 3). En pantalla se puede observar que la intensidad de cada speckle varía lentamente por efectos medioambientales. Pero la intensidad total del patrón de speckle permanece casi constante.

Si la fuente de luz utilizada es incoherente, por ejemplo, un diodo LED, en pantalla se observaría una distribución de luz homogénea pero no estructurada.



**Fig. 3** Propagación de modos en una fibra óptica multimodo y generación del patrón de speckle.

### Cantidad de modos de propagación en fibra multimodo

La cantidad de manchas de luz brillantes observadas en salida de fibras ópticas, es decir, el patrón de speckle, es aproximadamente igual a la cantidad total de modos,  $M$ , soportados por la fibra, por lo que es útil estimar esta cantidad. En el caso de una fibra a salto de índice, la cantidad  $M$ , es dado por [3],

$$M = \frac{V^2}{2} \quad (1)$$

donde  $V$  es llamada frecuencia normalizada dado por:

$$V = \frac{2a\pi}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2)$$

donde  $a$  es el radio del núcleo,  $\lambda$  la longitud de onda de la fuente laser y  $n_1$  and  $n_2$  son índices de refracción que han sido definidos anteriormente.

Para una fibra a gradiente de índice, la cantidad de modos es:

$$M \approx \frac{V^2}{4} \quad (3)$$

En nuestras experiencias, hemos utilizado fibra a gradiente de índice de 50  $\mu\text{m}$  de diámetro de núcleo y fibras a salto de índice con diámetros de núcleo de 250 y 980  $\mu\text{m}$ , por lo que la cantidad de modos son relativamente elevados.

En la Tabla 1, se presentan las características de estas fibras.

**Tabla 1.** Características de las fibras ópticas plásticas.

Material de fibra	Diámetro núcleo/cubierta (μm)	Índice de refracción (n <sub>1</sub> )	Apertura numérica	Peso (g/m)	Cantidad de modos*
PMMA (SI)	980/1000	1.49	0.5	1.0	3'082,691
PMMA (SI)	240/250	1.49	0.5	0.01	184,884
Perfluorinated (GI)	50/500	(1.342-1.358)	0.2	---	665

\*calculado con  $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ .

### Interferencia entre modos

Como el fenómeno speckle en fibra óptica se debe a la interferencia entre modos, el cálculo se puede abordar a partir de la característica de los campos eléctricos y magnéticos propagados en la fibra óptica, suponiendo que la luz propagada es coherente. La cantidad  $M$  se obtiene por solución de la ecuación de Helmholtz considerando una onda plana y polarizada linealmente a lo largo de la dirección de propagación  $z$ . Cuando la luz es acoplada adecuadamente en la entrada de la fibra, representada a través de cono de aceptación en la Figura 2, ésta se descompone en modos de propagación y todos los modos soportados por la fibra pueden ser excitados. Todos los modos tienen velocidades de fase diferentes. Así, dos modos cualesquiera, se pueden interferir generando su propio patrón de interferencia, se reforzarán si están en fase o se anularán en caso contrario.

En la superficie de salida de la fibra, éstos ocuparán diferentes posiciones espaciales. Cada speckle tiene una intensidad, que depende de la interferencia modal, ésta se convierte en una señal eléctrica, si en cada punto en la pantalla ubicamos un fotodetector. También se puede considerar que un speckle en un punto del espacio está compuesto por la superposición aleatoria de otros modos, haciendo el análisis aún más complejo.

La interferencia de dos modos en la fibra puede obtenerse por resolución de las ecuaciones de onda de una fibra óptica a salto de índice, de estructura cilíndrica y sección circular y por aplicación de las condiciones de contorno. Consideremos dos modos diferentes, donde las expresiones de sus campos eléctricos son descritos por:

$$\vec{E}_1(r, \varphi, z) = \vec{E}_{01} \cdot \exp[j(\omega t - \beta_1 z + \phi_1)] \quad (4)$$

$$\vec{E}_2(r, \varphi, z) = \vec{E}_{02} \cdot \exp[j(\omega t - \beta_2 z + \phi_2)] \quad (5)$$

donde  $\vec{E}_{0i}$  es la amplitud de la onda,  $r$  y  $\varphi$  denotan la dirección radial y azimutal, respectivamente.  $\Phi$  es la constante de propagación,  $z$  la dirección de propagación,  $\omega$  la frecuencia angular,  $t$  el tiempo.  $\beta$  asocia a cada modo propagado con una fase aleatoria. El índice  $i = 1$  ó  $2$ .

La intensidad especial de la luz es dada por las componentes  $z$  del vector de Poynting,

$$I = \frac{1}{2} \Re e [E_x H_y^* - E_y H_x^*] \quad (6)$$

$H_x$  y  $H_y$  son componentes del vector de campo magnético. Para cualquier combinación, los modos se interfieren entre ellos y crean un patrón de intensidad específica diferentes de cualquiera de estos. Además, como la fase es un factor significativo de cada modo, se puede entender que cualquier perturbación en la fase se reflejara en una modulación de intensidad.

Si cada speckle individual tiene una intensidad dada por  $I_i$ , la intensidad total es aproximadamente constante, es decir,

$$I_t = \sum_{i=1}^N I_i = \text{cte} \quad (7)$$

donde  $N$  es la cantidad total de speckle. Recordemos que la cantidad de speckle es aproximadamente igual a la cantidad de modos ( $M \approx N$ ).

Aquí, asumimos el mismo cálculo desarrollado por Spillman et al., donde el resultado simplificado por integración sobre un speckle es dado por la sumatoria de los campos [1],

$$I_i = A_i \{1 + B_i [\cos(\delta_i) - F(t)\phi_i \sin(\delta_i)]\} \quad (8)$$

donde  $A_i$  representa el término representativo de la auto-interacción de cada modo.  $F(t)$ ,  $B_i$  y  $\delta_i$  son términos de la interferencia de modo-modo.  $F(t)$  el término de perturbación realizada sobre la fibra en función del tiempo,  $B_i$  tiene en cuenta el estado estable de la interacción modo-modo. El argumento de las funciones trigonométricas,  $\delta_i$ , contiene:

$$\delta_i = \Delta\beta_{ml} - \Delta\phi_{ml} \quad (9)$$

donde  $\Delta\beta_{ml}$  y  $\Delta\phi_{ml}$  representan la diferencia entre la constante de propagación y la fase aleatoria de los modos de  $m$  y  $l$ . por lo que son términos fuera de fase. Cuando la fibra es perturbada, el término de interacción modo-modo es afectado por  $A_i$ . Los términos,  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $\phi_i$  y  $\delta_i$  son valores constantes para cualquier valor de  $i$ . Este resultado obtenido corresponde a la salida de un interferómetro individual en condiciones de una perturbación de pequeña señal. Por lo que el patrón de speckle es considerado como una matriz de interferómetros sometidos a una misma perturbación simultánea.

Aunque estos interferómetros son relacionados con el análisis y modelado posterior, se asume que para pequeñas áreas de muestreo y un número suficientemente grande de muestras, los speckle individuales serán débiles o de forma aleatoria pero relacionada con la fase, la amplitud y la modulación de la perturbación sobre la fibra, es decir, que se supone que son colecciones de números aleatorios dentro de ciertos límites.

El grado de validez de este supuesto se determinará mediante la comparación de las predicciones del modelo con los resultados experimentales. La señal de salida, donde el valor absoluto de los cambios de intensidad del patrón de speckle es la sumatoria, dada por:

$$\Delta I_T = \left[ \sum_{i=1}^N |C_i \sin(\delta_i)| \right] \left| \frac{dF(t)}{dt} \right| \quad (10)$$

El término dentro de las sumatoria contiene un gran número de componentes de tal suerte que a pesar de las variaciones locales en la distribución local, la sumatoria total se mantendrá constante. Así, la aplicación de diferentes magnitudes físicas sobre la fibra hace que cambien los modos la forma de propagación y por tanto, las condiciones de interferencia, por lo que resulta una distribución de campo diferente en el extremo de salida de la fibra. Si bien es cierto que el cálculo exacto de los cambios de los parámetros de propagación para cada modo es sumamente complejo, los datos de perturbación pueden ser obtenidos mediante el análisis de las modificaciones en el patrón de speckle en el extremo de salida de la fibra.

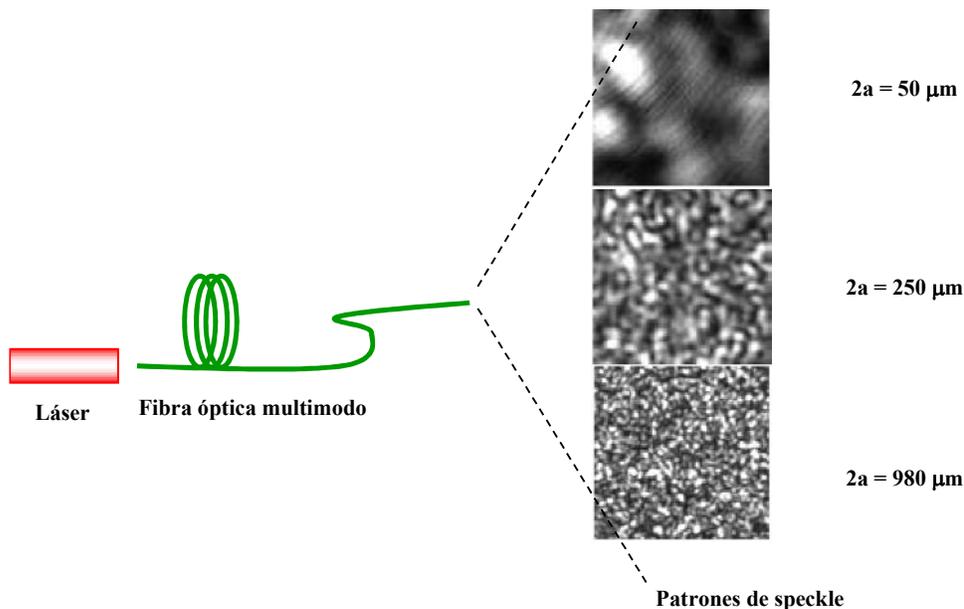
A partir de este análisis, se puede deducir que los parámetros causantes de una perturbación pueden ser detectados y se puede obtener información útil para una aplicación en sensores o en metrología.

## OBTENCIÓN EXPERIMENTAL

La obtención del patrón de speckle en fibra óptica es relativamente fácil si la fibra tiene un diámetro relativamente grande con relación a la longitud de onda. Cuando la fibra óptica tiene algunos modos, la dificultad es el acoplamiento de la luz en la fibra ó un mayor costo si se realiza mediante conectores estandarizados de fibras de telecomunicaciones. Por el contrario, con fibras ópticas multimodo de diámetro de núcleo grande, el acoplamiento de la luz puede ser directo utilizando un diodo láser. En la Figura 4 se muestra el montaje y las fotografías de 3 patrones de patrones de speckle obtenidos en fibras. Esta consiste en una fuente de luz de diodo láser ( $\lambda=620$  nm), una porción de fibra óptica y una pantalla de observación. Los patrones de speckle, mostrados en la Figura 4, corresponden a fibras ópticas multimodo de plástico de tres diámetros de núcleo diferentes, mostrados en la Tabla 1. Tal como se ha deducido en el apartado 2, la cantidad de speckle en salida del extremo de la fibra y proyectados en pantalla es proporcional a la cantidad de modos soportados por la fibra, la fotos de la figura muestran ésta correspondencia a través de las áreas. Esto es, cuanto más grande es el diámetro de la fibra, mayor es la cantidad de speckle, pero menor el área de la mancha de luz,

en consecuencia, más sensible a la perturbación, tal como la vibración, por ejemplo. A menor diámetro de núcleo, se tienen áreas más grandes del speckle, éstas podrían ser útiles donde la perturbación corresponda a procesos donde la variación es débil. También se puede obtener el patrón de speckle en una fibra monomodal. En este caso se tiene una sola mancha pero con variación espacial. Las imágenes de los patrones han sido capturadas con una cámara CCD ubicada en el

extremo de la fibra y enfocada únicamente una porción del patrón. Si fijamos la observación en un speckle sobre la pantalla podemos observar que éste varía lentamente en el tiempo, debido a las condiciones ambientales. Esto es, la influencia de la temperatura, vibraciones del edificio, la respiración, etc. Pero si provocamos accidentalmente una perturbación, podemos observar directamente la extrema sensibilidad del montaje.



**Fig. 4** Obtención del patrón de speckle con fibras ópticas de diámetros de núcleo diferentes.

### APLICACIÓN A SENSORES

Se ha demostrado que el patrón de speckle es muy sensible al medio ambiente y que sin ejercer ninguna perturbación, los gránulos de luz varían lentamente en el tiempo, pero, cuando se ejercen cambios abruptos sobre la fibra, como por ejemplo vibraciones, presión, torsión, tensión, etc., el patrón cambia a gran velocidad. Estas variaciones de patrón de speckle pueden ser capturadas mediante imágenes de video, a través de una cámara CCD. Así, un análisis y tratamiento adecuado de los cambios en las imágenes puede ser utilizado para extraer la información de la causa de la perturbación, esto es una correlación entre causa y efecto.

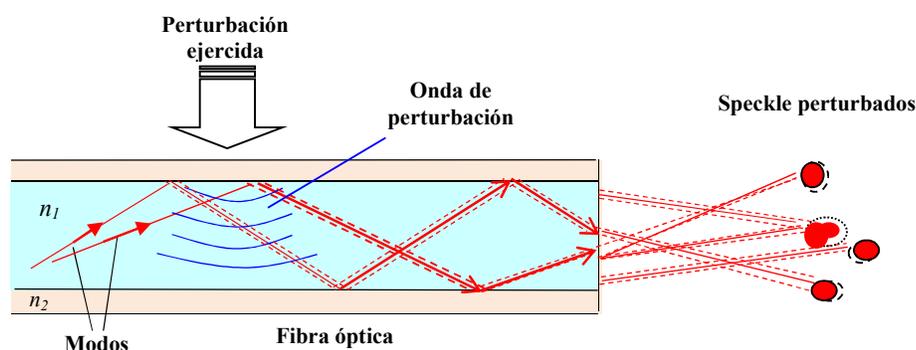
Existe una gran diversidad de posibilidades de utilización del patrón de speckle, obtenidos en

fibra óptica, como la técnica de sensado. Desde fines de los años 1980 numerosos trabajos han sido reportados utilizando el fenómeno de speckle fibra óptica. Shankaranarayanan et al., demostraron la medida de vibración utilizando fibras ópticas de pocos modos de propagación [4]. Se analizaba la distribución de campo en salida de la fibra en función de la deformación axial y se encontró una buena correspondencia entre la teoría y la experiencia. Spillman et al., demostraron un sensor de modo estadístico para detectar vibraciones que proporcionaba información detallada de la amplitud y frecuencia [1]. Un sensor de desplazamiento y fuerza fue propuesto por Garcia et al. [5]. El sensor tenía una gran sensibilidad y que detectaba desplazamientos débiles, del orden de 0.1Å. De otro lado, Yu et al., [6] propuso la medida de desplazamientos sub-micrométricos utilizando el análisis de patrones de speckle antes

y después de la perturbación. Pan et al., [7] presentó una técnica de sensado que detecta la media absoluta de la intensidad del patrón speckle para determinar el factor de perturbación del medio ambiente. Más recientemente, Zhang et al., [8] desarrollaron un sensor de desplazamiento y deformación utilizando la variación del patrón de speckle, donde el sensor es embebido en hormigón.

El análisis teórico desarrollado en el apartado 2 contempla dos efectos en la perturbación de un speckle, esto es la interacción del propio modo y la interferencia entre modos. Además, se supone que la fibra es recta y permanece constante durante la proyección del patrón en pantalla. Cada modo tiene una velocidad de fase y recorre un camino óptico constante. Pero en realidad el fenómeno es aún más complejo, por lo que aquí únicamente trataremos los casos comunes que suceden en la propagación de modos en fibra multimodo.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo de perturbación sobre la fibra. En función a la naturaleza de la perturbación, se pueden crear varias situaciones en la fibra, tales como curvaturas, micro-curvaturas, variación longitudinal y/o axial, micro-fisuras, pérdidas de propagación, etc. Todos estos accidentes, algunos temporales y otros permanentes, hacen que los caminos originales de los modos cambien de manera aleatoria y el patrón de salida sea aún más complejo. La gran cantidad de modos de propagación que intervienen en el fenómeno pueden dar lugar a mezclas y redistribución de modos, modos propagados por la cubierta, modos radiados, etc. Cuando se ejerce una perturbación local en algún lugar de la superficie exterior de la fibra, se perturba la posición espacial de reposo de los modos. A partir de allí, los modos se propagan con esta perturbación generando todas las combinaciones posibles de alteraciones hasta el extremo de salida.



*Fig. 5 Perturbación de modos en una fibra multimodo.*

Si la perturbación sobre la fibra es débil, el patrón de speckle podría recuperar su distribución original de reposo. En este caso el modelo de pequeña señal del fenómeno físico puede predecir el resultado. En cambio cuando la perturbación supera el umbral de señal débil, pasando a ser mediana o de alta perturbación, la distribución del patrón de speckle no necesariamente recuperará su posición de reposo original.

El fenómeno es aún más complejo. Las áreas de los speckle cambian de dimensión y de posición espacial, siendo diferente para cada instante de tiempo.

Cuando la fibra es fuertemente multimodal se pueden considerar modos de orden alto y modos de orden bajo. Los primeros son aquellos que se propagan por reflexiones totales internas, y los segundos son aquellos que se propagan en paralelo al eje de la fibra. Los primeros son más sensibles a las perturbaciones, proyectados sobre una pantalla, se les ubica en la periferia del patrón de distribución. En este caso el análisis por zonas del patrón puede ser el más adecuado para extraer la información de una perturbación. De todo lo anterior, se puede deducir que cada fibra óptica en el extremo tendrá un patrón de speckle particular, cuyas características y propiedades son únicas. Los

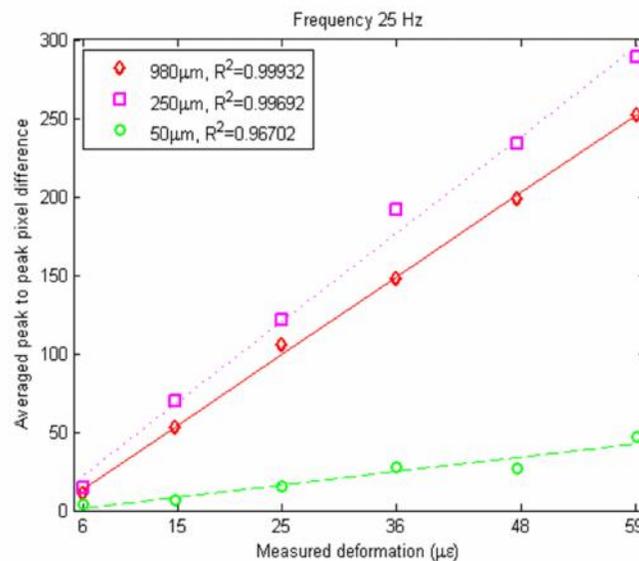
parámetros opto-geométricos de la fibra, tales como diámetro del núcleo y la cubierta, espesor de la cubierta, índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ , diferencia de índices y la  $AN$ , también influyen. Para cada aplicación en particular se deberá elegir la fibra y si es necesario caracterizarla en función a las magnitudes a medir.

Así, por ejemplo, con la finalidad de caracterizar la respuesta del patrón de speckle a la vibración en fibra multimodo, se ha realizado un montaje experimental con un actuador piezo-eléctrico (PZT) de forma cilíndrica, cuya función es generar una vibración mecánica sobre la fibra. Alrededor del PZT se ubica la fibra óptica.

El actuador PZT es modulado con una onda sinusoidal en frecuencia y amplitud. Las imágenes del patrón de speckle son capturadas por una cámara CCD. El CCD se encuentra conectado mediante USB al ordenador y las imágenes son almacenadas, que luego son procesadas para obtener la señal. Los resultados para una

frecuencia de vibración de 25 Hz y utilizando las fibras de la Tabla 1 son mostrados en la figura 6.

En esta figura se representa la diferencia entre los valores medios de los picos de variación entre dos imágenes consecutivas registradas en el tiempo. Como se puede observar, existe una correlación lineal entre la perturbación ocasionada por la vibración y las variaciones del patrón de speckle. Se puede observar que la respuesta del sistema mejora en sensibilidad cuando el núcleo de la fibra es grande (250 y 980  $\mu\text{m}$ ). Esto es, mayor cantidad de modos y áreas de speckle más pequeñas. Comparando estas dos fibras, la respuesta es ligeramente mejor para una fibra de 250  $\mu\text{m}$ ; esto es debido a que la fibra de 980  $\mu\text{m}$  es más compacta y de mayor peso para las mismas condiciones de vibración. Pero la fibra de 50  $\mu\text{m}$ , que proporciona áreas de speckle más grandes, puede ser útil cuando las perturbaciones son de deformación axial o transversal de la fibra. Por tanto, es muy importante elegir y caracterizar el tipo de fibra en función a la aplicación.



**Fig. 6** Respuesta de 3 fibras ópticas multimodo sometidas a vibraciones con actuador PZT a la frecuencia de 25 Hz [Ref. 9].

### Captura de imágenes y procesamiento

Cuando se produce una perturbación en función del tiempo en la fibra óptica, el patrón de speckle varía a gran velocidad, por lo que es muy complicado realizar la medida con un fotodetector.

Por esta razón, es conveniente utilizar la medida a través de un arreglo de fotodiodos o superficies fotosensibles y que sean capaces de capturar las variaciones de los patrones a la misma velocidad en que suceden los eventos. Esto puede ser realizado por las cámaras CCD (Dispositivo de

Cargas Acopladas) que, además de detectarla, registran en forma de una secuencia de imágenes a gran velocidad.

Las cámaras CCD pueden registrar imágenes con velocidades que pueden ser de decenas, centenas o miles de imágenes por segundo. Son caracterizadas por la resolución o unidades de mínima superficies detectas por los pixeles. Así, el extremo de salida de la fibra óptica se ubica en la entrada del CCD, adaptada y acomodada a la distancia focal de la lente.

Una secuencia de imágenes de unas decenas de segundos es suficiente para extraer la señal.

Una vez capturado el evento en imágenes, un aspecto importante es su procesado con la finalidad de poder generar una señal a partir de la evolución temporal del patrón. Para este propósito existen varios métodos para procesar las imágenes y dependen de sus características particulares o dominios de aplicación.

Si la evolución del patrón es lenta, un análisis mediante la matriz de co-ocurrencia puede ser aplicado sobre las imágenes [10]. Si las variaciones del patrón son rápidas y periódicas, un análisis diferencial simple puede ser suficiente [11].

Este método consiste en substraer dos imágenes y obtener un valor absoluto, que registra los cambios de intensidad para cada pixel en dos instantes.

Este último método es el que hemos utilizado en las aplicaciones que se presentan en el presente artículo.

### **ALGUNOS EJEMPLOS DE SENSADO**

Presentamos aquí dos ejemplos de aplicación utilizando el patrón de speckle obtenido en fibra óptica.

### **Medida del pulso arterial**

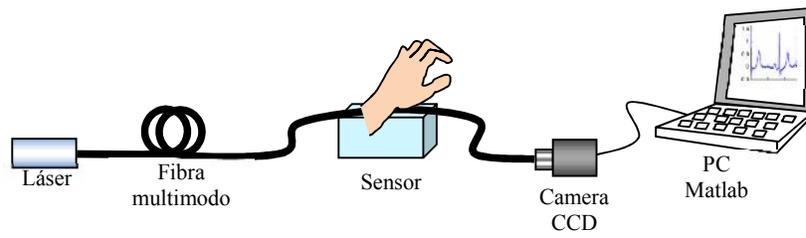
El esquema de la figura 7(a) muestra el montaje experimental para la medida del pulso arterial. Este consiste en un diodo láser ( $\lambda=620$  nm) conectado a una fibra óptica multimodo de perfil de salto de índice y de 980  $\mu\text{m}$  de diámetro de núcleo.

El extremo de salida de la fibra es conectada a una cámara CCD, y mediante un cable-conector USB al ordenador. Las imágenes registradas por la cámara son almacenadas en un archivo del programa de cálculo Matlab. Una porción de la fibra es reservada para realizar la medida del pulso arterial, lugar donde se ubica la muñeca de la mano y donde las venas se encuentran más cerca de la superficie.

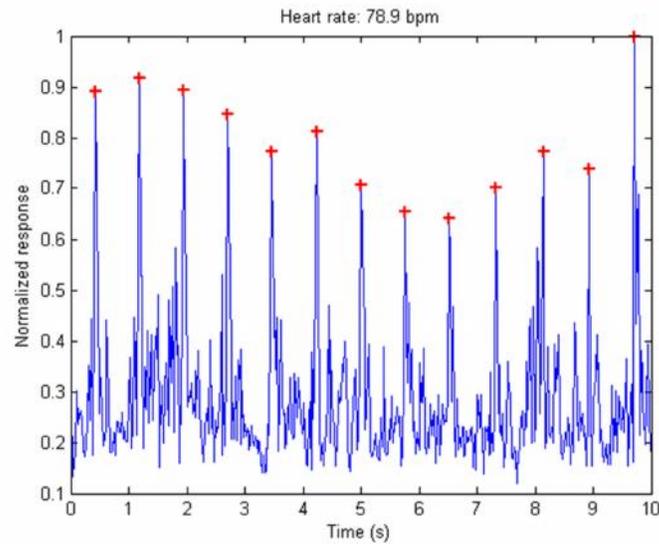
Cuando el corazón bombea sangre a las arterias, ésta se propaga por el cuerpo humano. En lugares donde las arterias se encuentran más cerca de la superficie de la piel (muñeca de la mano por ejemplo), y haciendo una débil presión con el dedo se puede sentir las pulsaciones. Esta región de la arteria se puede posar sobre la fibra óptica. Así, cada pulso producirá una onda mecánica sobre la fibra, perturbándola localmente y finalmente el patrón de speckle en la salida de la fibra.

La captura de una secuencia de video de 30 segundos es suficiente para extraer la información del número de pulsos por minutos.

En la figura 7(b) se muestra el resultado de la medida del pulso arterial de una persona de sexo masculino de 22 años de edad con 78 pulsos/minuto. La extracción de la señal ha sido obtenida por simple substracción de dos imágenes consecutivas. En este caso la cámara ha capturado 100 imágenes por segundo. Se puede observar que los pulsos, representado por los picos son bastante regulares. Se han realizados medidas a diferentes personas de diferentes edades con resultados.



(a)



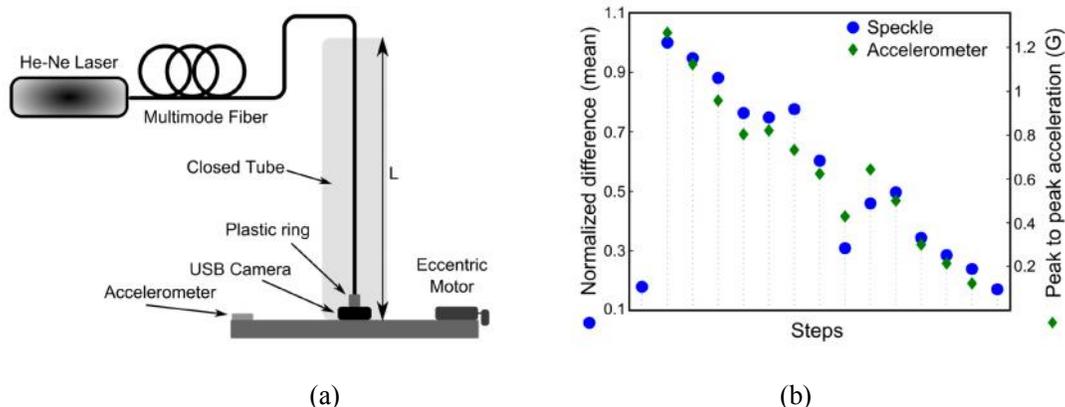
(b)

**Fig. 7** Montaje experimental para la medida del pulso arterial y resultado [Ref. 12].

### Medida de vibración

En la figura 8(a) se muestra el montaje experimental del sensor de vibración. Esta consiste una fuente láser He-Ne ( $\lambda=632.8$  nm) conectada a una fibra óptica de plástico multimodo de  $250 \mu\text{m}$  de diámetro de núcleo. Una porción de la fibra es suspendida verticalmente dentro de un tubo de longitud  $L$ . En el extremo de salida de la fibra se

ha ubicado una cámara CCD de bajo costo y conectada a través de USB al computador. El tubo y la cámara están ubicados sobre una tabla de prueba, donde está emplazado un motor descentrado para que en funcionamiento genere vibraciones en todo el conjunto con frecuencias de 1 a 10 Hz. Con la finalidad de controlar las variaciones de velocidad de motor, se ha ubicado sobre la tabla un acelerómetro.



**Fig. 8** Sensor de vibración y resultado experimental [Ref. 13].

En la figura 8(b) se muestra el resultado experimental de 14 etapas de variación de la velocidad del motor por control de voltaje, mantenidas durante 10 segundos. La señal es obtenida por procesamiento similar al caso de la medida del pulso arterial. Como la fibra es muy sensible a las perturbaciones ambientales, esto genera un ruido en la señal obtenida luego del procesamiento. En este caso es necesario utilizar un filtro para reducir el ruido. Las medidas de vibración mediante speckle (en círculos azules) son comparadas con la medida pico a pico de la aceleración (en picos verdes). El primer y el último círculo son medidos en condiciones de no vibración inducida, por lo que es menos sensible en las condiciones de ensayo. Las dos medidas tienen la misma tendencia, lo que permite validar el método de medida. En la curva se observa una variación abrupta en la tendencia lineal descendente ( $t=70$  segundos), esto es debido a la frecuencia de resonancia del motor, medido también con el acelerómetro.

## CONCLUSIÓN

Se ha demostrado que el patrón de speckle generado en fibras ópticas es sensible a los parámetros medio-ambientales, capaz de detectar pequeñas gradientes de temperatura en ambientes aislados o vibraciones estructurales de edificios.

A pesar que en telecomunicaciones ópticas el patrón de speckle representa una fuente de ruido, sus características y propiedades espaciales pueden ser explotadas como técnicas de medidas de parámetros físicos, químicos o biológicos. Estas

posibilidades pueden permitir diseñar sistemas sensores de muy bajo costo. Los beneficios por las fibras ópticas a la industria y la sociedad en los 30 años son ampliamente conocidos. En la actualidad existen fibras ópticas de diferentes materiales y estructuras, siendo las de material plástico las que presentan unas ventajas excepcionales, bajo peso, flexibilidad, fácil manipulación y adaptabilidad. Además, se disponen componentes optoelectrónicos disponibles comercialmente. Estos factores son muy favorables para realizar sistemas sensores de buenas prestaciones y competitivas.

El fenómeno speckle en fibra óptica es muy complejo, se ha propuesto una aproximación como un efecto de la interacción del mismo modo y por un fenómeno de interferencia entre modos. Siendo el fenómeno aleatorio y la correlación con la perturbación se realiza estadísticamente. Pero aún quedan fenómenos por caracterizar los factores que influyen en las variaciones de patrón de speckle cuando la fibra es perturbada por una magnitud física. Estos esfuerzos permitirán aproximarnos al fenómeno completo de speckle en fibras ópticas.

Una presentación pública de este mismo tema, realizada por el autor el 23 de agosto de 2012 en la Pontificia Universidad Católica, se puede encontrar en el enlace de la Ref. [14].

## REFERENCIAS

1. **W. B. Jr. Spillman, Kline, B. R. Maurice, L. B. Fuhr, P. L.** "Statistical-mode sensor

- for fiber optic vibration sensing uses”, *Applied Optics*, 28, 3(1989) 166-3176,
2. **Goodman, J. W.** “Speckle Phenomena in Optics”, Roberts and Company, Chapter 7, Englewood, Colorado, (2007).
  3. **Kaiser, G.** “Optical Fiber Communications”, McGraw-Hill, Second Edition, Chapter 2, NY (1991).
  4. **Shankaranarayanan, N. K., Srinivas, K. T., Claus, R. O.,** “Mode-mode interference effect in axially strained few mode optical fibers”, *Proc. SPIE* 838 (1987) 385-388.
  5. **A Garcia, M., Tabib-Azar,** “Fiber optic force and displacement sensor based on speckle detection with 0.1 nN and 0.1 Å resolution, *Proc. SPIE*, 1973 (1992) 247-258.
  6. **Yu, F. T. S. Wen, M., Jing, S., Uang, C.M.,** “Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields”, *Applied Optics*, 32, (1993) 4685-4689.
  7. **Pan, K., Uang, C-M., Cheng, F., Yu, F.,** “Multimode fiber sensing by using mean-absolute speckle-intensity variation”, *Applied Optics*, 33 (10) (1994) 2095-2098.
  8. **Zhang, Z., Ansari, F.,** “Fiber-optic laser speckle-intensity crack sensor for embedment in concrete”, *Sensors and Actuators A-126*, (2006) 107-111.
  9. **Rodriguez-Cobo, L., Lomer, M.** “Speckle characterization in multimode fiber for sensing applications”, V International Conference on Speckle Metrology, Proceedings of SPIE Vol. 8413, paper 40, Vigo, Spain, September 2012.
  10. **Soh, L. K., Tsatsoulis, C.,** “Texture Analysis of SAR Sea Ice Imagery Using Gray Level Co-Occurrence Matrices”, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, 37, (1999) 780-795.
  11. **Arizaga, R., Cap. N., Rabal, H. J., Trivi, M.,** “Display of local activity using dynamic speckle pattern”, *Optical Engineering*, 41 (2002) 287-294.
  12. **Lomer, M., Rodriguez-Cobo, L.,** “Plastic Optical Fiber Sensor for measuring arterial pulse”, 21<sup>st</sup> International Conference on Plastic Optical Fibers POF, Proceeding ICPOF-2012, pp. 198-220, Atlanta, Georgia, USA, September 2012.
  13. **Rodriguez-Cobo, L. Lomer, M.,** “POF vibration sensor based on speckle pattern changes”, 22<sup>nd</sup> International Conference on Optical Fiber Sensors OFS-22, Proceedings of SPIE Vol. 8421, paper 2y1-4, Beijing, China 2012.
  14. Coloquios de física: <https://sites.google.com/site/fisicapucp/semest-re-2012-2>

Correspondencia: [lomerm@unican.es](mailto:lomerm@unican.es)

Recepción de originales: noviembre 2012

Aceptación de originales: abril 2013