ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

ESTUDIO DE PATRONES DE SPECKLE OBTENIDOS POR FIBRAS ÓPTICAS Y SUS APLICACIONES

(Study of speckle patterns obtained by optical fibers and their applications)

Para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Iván Hernando Madrazo

Marzo - 2013



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Iván Hernando Madrazo **Director del PFC:** Mauro Lomer Barboza

- **Título:** "Estudio de patrones de speckle obtenidos por fibras ópticas y sus aplicaciones"
- Title: "Study of speckle patterns obtained by optical fibers and their applications"

Presentado a examen el día: 15 de Marzo de 2013

para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre): Quintela Incera, María Ángeles Secretario (Apellidos, Nombre): Lomer Barboza, Mauro Vocal (Apellidos, Nombre): Mediavilla Bolado, Elena

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC (sólo si es distinto del Secretario)

V° B° del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera N° (a asignar por Secretaría)

AGRADECIMIENTOS

A Mauro Lomer, por confiar en mí y por permitirme realizar el proyecto bajo su dirección, compartiendo sus experiencias y conocimientos.

A Luis Rodríguez, por ayudarme y guiarme desinteresadamente en algunas partes de este proyecto.

A todo el Grupo de Ingeniería Fotónica por hacerme sentir como uno más y mostrar siempre la mejor sonrisa.

A mis padres, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su apoyo incondicional y porque sin su ayuda esto no habría sido posible.

A mis hermanas, por aportar en la medida de lo posible su granito de arena y por el cariño y apoyo moral que siempre me han ofrecido.

A Saray, por apoyarme y darme fuerzas en los malos momentos y por hacerme sonreír cuando lo necesitaba.

A todos los compañeros de carrera con los que he compartido apuntes, conocimientos y sonrisas. Nombraros uno a uno sería imposible, seguramente se me olvidaría alguno.

A mis buenos amigos Zalo, Jesús y Fran, por apoyarme y estar siempre junto a mí al pie del cañón.

Y por último, a todos los profesores y profesoras que han contribuido a mi formación a lo largo de todos estos años.

Muchas gracias a todos.

Índice General

| Introducción | | | | | |
|--------------------------|--|---|--|--|--|
| 1.1 Introducción general | | | | | |
| 1.1 Objetivos | | | | | |
| 1.2 Organización9 | | | | | |
| Fenómeno de Speckle10 | | | | | |
| 2.1 | Intro | itroducción | | | |
| 2.2 | Des | scripción11 | | | |
| 2.3 | Mét | todos de obtención | | | |
| 2.4 | Con | ndiciones | | | |
| 2.4.1 | | Coherencia13 | | | |
| 2.4. | 2 | Interferencia14 | | | |
| 2.5 | Prop | piedades16 | | | |
| 2.6 | Con | clusión | | | |
| Speckle | en fib | ra óptica multimodo19 | | | |
| 3.1 | Intro | roducción | | | |
| 3.2 | Fibr | a óptica multimodo20 | | | |
| 3.3 | Con | icepto de modo22 | | | |
| 3.3.1 | | Cantidad de modos25 | | | |
| 3.3.2 | | Cantidad de modos en fibra óptica26 | | | |
| 3.3.3 | | Dispersión modal | | | |
| 3.3.4 | | Ruido Modal | | | |
| 3.3. | 5 | Dependencia del ruido modal con la frecuencia31 | | | |
| 3.4 | Con | clusión | | | |
| Estado d | Estado del arte de sensores basados en speckle en fibra óptica | | | | |
| 4.1 | Intro | oducción | | | |
| 4.2 | Sen | sor de velocidad y distancia [12]35 | | | |
| 4.2.1 | | Descripción teórica | | | |
| 4.2.2 | | Montaje | | | |
| 4.2.3 | | Resultados y conclusiones | | | |
| 4.3 | Sen | sor de vibración [15] | | | |
| 4.3.1 | | Descripción teórica | | | |

| 4.3.2 | 2 Montaje | . 40 | | |
|--|---|------|--|--|
| 4.3.3 | 3 Resultados y conclusiones | . 40 | | |
| 4.4 | Sensor de desplazamiento [16] | . 40 | | |
| 4.4.1 | L Descripción teórica | .41 | | |
| 4.4.2 | 2 Montaje | . 42 | | |
| 4.4.3 | 3 Resultados y conclusiones | . 43 | | |
| 4.5 | Sensor de desplazamiento/tensión [22] | . 43 | | |
| 4.5.1 | L Descripción teórica | . 43 | | |
| 4.5.2 | 2 Montaje | . 45 | | |
| 4.5.3 | 3 Resultados y conclusiones | . 45 | | |
| 4.6 | Sensor de flujo sanguíneo [25] | . 46 | | |
| 4.6.1 | L Descripción teórica | . 46 | | |
| 4.6.2 | 2 Montaje | . 47 | | |
| 4.6.3 | 3 Resultados y conclusiones | . 47 | | |
| 4.7 | Conclusión | . 48 | | |
| Trabajos experimentales y resultados obtenidos | | | | |
| 5.1 | Introducción | . 50 | | |
| 5.2 | Procedimiento de caracterización | . 50 | | |
| 5.2.1 Fibras ópticas plásticas | | . 51 | | |
| 5.2.2 | 2 Procesado de imágenes | . 52 | | |
| 5.3 | Caracterización de la vibración | . 54 | | |
| 5.4 | Medida de perturbaciones simultáneas en la fibra | . 73 | | |
| 5.5 | Medida del contraste | . 81 | | |
| 5.6 | Medida del patrón de speckle en función de la distancia | . 86 | | |
| Conclusiones y líneas futuras | | | | |

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción general

En la década de 1960, con la aparición de los primeros láseres comerciales, los investigadores observaron un nuevo fenómeno. Cuando la luz láser era reflejada en una superficie con cierta rugosidad, como puede ser el papel, se podía observar, a simple vista, un patrón granular de puntos con distintas intensidades. A este fenómeno se le empezó a conocer con el nombre de "speckle" [1].

El speckle aparece frecuentemente en óptica, ya sea cuando la luz es transmitida a través de un difusor o es dispersada por una suspensión de partículas. En muchos sistemas de medición la aparición de speckle representa un inconveniente. A raíz de esto muchos trabajos de investigación han estado enfocados en su reducción o supresión. Sin embargo, se ha descubierto que los patrones de speckle también pueden proveer información valiosa acerca del fenómeno que les dio origen. Así surgieron muchas técnicas de medición que podrían agruparse en lo que se denomina interferometría speckle.

Este trabajo está enfocado al estudio de patrones de speckle que varían en el tiempo (speckle dinámico) que son utilizados para la medición de diferentes parámetros. En este primer capítulo se presentarán los objetivos así como los capítulos en los que está organizado.

1.1 Objetivos

La primera parte del proyecto consiste en estudiar y analizar el patrón de speckle obtenido con fibras ópticas. Este estudio se basa en comprender el fenómeno físico del efecto speckle, la influencia de los parámetros físicos y geométricos de la fibra, y en establecer de manera simple las ecuaciones de evolución que intervienen en la modificación del patrón de speckle.

La segunda parte del proyecto consiste en realizar un montaje óptico para la obtención experimental del patrón de speckle. Una vez obtenido el patrón de speckle se analizará las modificaciones por efecto de una perturbación en la fibra. El patrón de speckle será detectado por una cámara fotográfica y el procesado de imágenes se realizará mediante el programa Matlab.

1.2 Organización

La memoria contiene los siguientes capítulos:

- En el capítulo 2 se realiza una pequeña introducción al fenómeno de speckle. Para ello se realiza una descripción del fenómeno así como sus métodos de obtención, propiedades, condiciones necesarias para que se produzca y los diferentes tipos.
- En el capítulo 3 se aplica el fenómeno de speckle a una fibra multimodo, sobre la cual esta basada este proyecto.
- En el capítulo 4 se realiza un estudio del estado del arte de los sensores de fibras ópticas basados en la variación del patrón de speckle. Se hace una revisión sumaria de los principales sistemas sensores basados en esta técnica realizados en los últimos años.
- En el capítulo 5 se realiza el análisis del patrón de speckle en diferentes situaciones, los cuales se analizan detalladamente.
- Por último, en el capítulo 6, se enumeran las conclusiones a las que se han llegado tras la realización del proyecto fin de carrera, así como posibles líneas futuras.

Capítulo 2

Fenómeno de Speckle

2.1 Introducción

A lo largo de este capítulo se explicará de forma detallada en que consiste el fenómeno de speckle, sobre el cual se basa este trabajo. Comenzaremos explicando los conceptos básicos para entender su comportamiento y después nos centraremos en el speckle en fibras multimodo, sobre las cuales se realizará el estudio y cuyos resultados se mostrarán en capítulos posteriores.

2.2 Descripción

Cuando la luz es incidente sobre una superficie lo suficientemente rugosa, con variaciones mayores que la longitud de onda de la luz, esta es reflejada en todas las direcciones (figura 2.1a). Estas ondas reflejadas interfieren entre si formando un patrón de interferencia, conocido como patrón de speckle, compuesto por pequeños gránulos brillantes y oscuros distribuidos aleatoriamente en el espacio. En la iluminación de luz blanca, este efecto es difícilmente observable debido a la falta de coherencia espacial y temporal (conceptos explicados en los siguientes apartados). Aplicando la luz láser, sin embargo, la luz dispersada adquiere un aspecto granular tal y como se puede observar en la figura 2.1b [2].



Figura 2.1. (a) Luz reflejada sobre una superficie rugosa. (b) Patrón de speckle a la salida de la fibra.

Para obtener información acerca del fenómeno que generó el speckle se utilizarán diferentes técnicas que se explican más adelante.

2.3 Métodos de obtención

Los dos métodos más comunes para la obtención de imágenes de patrones de speckle son:

- Speckle objetivo: Es el patrón registrado en el plano de observación producido por la contribución de las ondas lumínicas procedentes de la muestra y sin emplear ningún tipo de sistema óptico. A cada uno de los puntos del plano de observación llegan ondas procedentes de todos los puntos de la muestra, figura 2.2a.
- Speckle subjetivo: Utiliza un sistema óptico formado por un expansor del haz láser, para iluminar una porción mayor de la muestra, y una lente para formar la imagen del objeto, figura 2.2b. En este caso, el tamaño, la forma y la posición de la imagen del speckle dependerá tanto de las características del sistema óptico como de la posición del plano de observación.

2.4 Condiciones

Para poder explicar las condiciones necesarias para que se de el fenómeno de speckle, se realiza a continuación una pequeña introducción del concepto de la luz. La luz se define como una onda electromagnética compuesta por fotones, cuya frecuencia y energía determinan la longitud de onda de un color, el cual puede ser percibido por el ojo humano. Esta dispone de tres características principales:

- Longitud de onda (λ)
- Frecuencia (v)
- Velocidad (c)



Figura 2.2. (a) Speckle Objetivo (b) Speckle Subjetivo.

Los fenómenos ópticos que se pueden producir debido a esta partícula pueden ser explicados gracias a dos modelos muy útiles como son el modelo cuántico y el modelo ondulatorio. En nuestro caso particular, nos centraremos en el modelo ondulatorio, ya que nos permite explicar algunos fenómenos como pueden ser el fenómeno de interferencia o la coherencia [3].

2.4.1 Coherencia

Se dice que dos puntos de una onda son coherentes cuando guardan una relación de fase constante, es decir cuando conocido el valor instantáneo del campo eléctrico en uno de los puntos, es posible predecir el del otro. Existen 2 manifestaciones claramente diferenciadas de coherencia: la coherencia temporal y la espacial.

Coherencia Temporal

La coherencia temporal está relacionada con la correlación de la fase de energía de la onda en un determinado punto, alcanzado por la misma en dos instantes de tiempo diferentes. Si consideramos el campo eléctrico en un punto P, en dos instantes distintos t y t + τ , se define el tiempo de coherencia como el máximo valor de τ para que la diferencia de fase entre el campo en ambos puntos permanece predecible (figura 2.3).

Si la luz fuera totalmente monocromática la coherencia temporal sería infinita, ya que la frecuencia sería constante a lo largo del tiempo. Una forma de medir la coherencia temporal es con el interferómetro de Michelson, en el cual se divide el haz de referencia en dos haces que se hacen interferir entre sí.

El elevado índice de coherencia temporal de los láseres es explotado en diversas aplicaciones como medidas de distancias, velocidades, vibraciones, etc.



Figura 2.3. Representación de la coherencia temporal.

Coherencia espacial

La coherencia espacial hace referencia a una relación de fase definida entre puntos distintos de una sección transversal de un haz luminoso. Para ilustrar este concepto consideremos 2 puntos, P1 y P2, que se encuentran en la misma sección transversal del haz (superficie perpendicular a la dirección de propagación), y sean E1(t) y E2(t) los campos eléctricos en ambos puntos. Si la diferencia de fase entre los campos permanece constante en cualquier instante t > 0 se dice que entre ambos puntos hay una coherencia espacial perfecta (figura 2.4).

En general para un determinado punto P1, los puntos P2, para los cuales se cumple la condición de coherencia espacial, pertenecen a un área limitada en torno a P1, llamada área de coherencia, por lo que se dice que el haz presenta coherencia espacial parcial.

Para las fuentes luminosas convencionales el área de coherencia es del orden de 0.0001 mm², mientras que para el láser es del orden de 1 mm².

La forma de detectar la coherencia espacial en un haz luminoso es mediante el experimento de Young.

La coherencia de la fuente de luz es una de las condiciones para que se de el fenómeno de interferencia.

2.4.2 Interferencia

Se denomina interferencia a la superposición coherente, tanto espacial como temporal, de dos o mas ondas en un punto dado formando una onda resultante de mayor o menor amplitud, dependiendo de si se trata de interferencia constructiva o interferencia destructiva.



Figura 2.4. Representación de la coherencia espacial.

Interferencia constructiva

Se produce cuando dos ondas de la misma frecuencia y fase se superponen en un punto, obteniéndose como resultado una onda de mayor amplitud, es decir, cuando la cresta o el valle de una onda coincide con la cresta o el valle de otra onda, los efectos individuales se suman (figura 2.5).



Figura 2.5. Explicación gráfica de la interferencia constructiva [4].

Interferencia destructiva

Se produce cuando dos ondas de la misma frecuencia y distinta fase se superponen en un punto, obteniéndose como resultado una onda de menor amplitud. En el caso de que la cresta de una onda coincida con el valle de la otra provocaría que la onda resultante fuese nula, ya que debido a los efectos individuales de cada una, las ondas se anularían (figura 2.6).



Figura 2.6. Explicación gráfica de la interferencia destructiva [4].

Como se ha comentado anteriormente tenemos que imaginarnos la interferencia en un solo punto, es decir las ondas que se superponen son las contenidas en un solo rayo de luz. De esta manera en el caso de interferencia totalmente destructiva, la mancha de luz que tendríamos que ver no existiría, y la luz se habría esfumado aparentemente. Por otro lado, en el caso de la interferencia totalmente constructiva la mancha de luz aparecería muy intensa, con una intensidad aparente del doble de una onda individual. Si ahora imaginamos que, de las fuentes láser que generan las ondas que interfieren, emergen una infinidad de rayos de luz, podremos también visualizar que la mancha de luz en la zona de superposición, la cual estará formada por infinidad de puntos. Cada uno de los puntos tendrá una intensidad, dependiente de los dos rayos de luz que se encuentren en ese lugar. Si todos los rayos tienen la misma fase original y no sufren cambios, la mancha de luz será brillante en el caso de la interferencia constructiva y desaparecerá en el caso de la destructiva.

2.5 Propiedades

Para poder entender correctamente los patrones de speckle a continuación se va a proceder a realizar una introducción sobre sus propiedades. Para ello analizaremos el speckle como un fenómeno aleatorio.

Antes de comenzar el desarrollo de las explicaciones se supone que el campo incidente en un punto (x, y, z) está perfectamente polarizado y es perfectamente monocromático. Teniendo en cuenta estas suposiciones podemos representar este campo como una señal analítica de valor complejo de la forma:

$$u(x, y, z; t) = A(x, y, z)\exp(i2\pi vt)$$
(2.1)

Donde v es la frecuencia óptica y A(x, y, z) es un fasor de amplitud complejo.

$$A(x, y, z) = |A(x, y, z)| \exp[i\theta(x, y, z)]$$
(2.2)

La cantidad de luz directamente observable es la irradiancia y esta dada por:

$$I(x, y, z) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |u(x, y, z; t)|^2 dt = |A(x, y, z)|^2$$
(2.3)

La amplitud compleja en un punto (x, y, z) puede ser considerada como la suma de las contribuciones de muchas áreas elementales dispersadas procedentes de la superficie rugosa. Por lo tanto el fasor de amplitud puede ser escrito como:

$$A(x, y, z) = \sum_{k=1}^{N} |a_k| \exp(i\phi_k)$$
(2.4)

Donde $|a_k|$ y ϕ_k representan la amplitud y la fase de la contribución del área dispersada k y N es el número total de contribuciones.

Siempre que el número de contribuciones sea grande las partes real e imaginaria del campo complejo en el punto (x, y, z) son variables aleatorias Gaussianas independientes (media cero) y la irradiancia *I* obedece a un estadístico exponencial negativo cuya función densidad de probabilidad es de la forma,

$$p(I) = \begin{cases} (1/\bar{I}) \exp(-I/\bar{I}), & I \ge 0, \\ 0, & Resto \end{cases}$$
(2.5)

Donde \overline{I} es la media o la irradiancia esperada.

Una característica fundamental de la distribución exponencial negativa es que su desviación estándar es igual a su media. Por lo tanto, el contraste de un patrón de speckle polarizado esta definido por,

$$C = \sigma_I / \bar{I} \tag{2.6}$$

El cual siempre toma el valor de 1.

Podemos concluir a modo de resumen que la intensidad en un punto (x, y, z) debida a un patrón de speckle sigue una estadística exponencial negativa, mientras la fase dentro del intervalo (- π , π) tiene la misma probabilidad estadística. A continuación se muestran algunas conclusiones con respecto a las propiedades del speckle:

- La fase sigue una estadística uniforme, es decir, dentro de un speckle (gránulo) la fase es la misma.
- La intensidad sigue una estadística exponencial negativa. Es muy importante observar que en vez de tener una distribución uniforme de intensidad de infinitos valores tenemos una distribución exponencial negativa, en la cual, el suceso más probable es que la intensidad sea nula con algunos puntos en los cuales es máximo relativo (gránulo o speckle).
- Los máximos relativos (speckles) destacan claramente sobre el fondo al tener un contraste C muy alto $C = \sigma_I / \overline{I} = 1$. Por esta razón se obtiene el aspecto granulado característico de un patrón de speckle.

Una segunda propiedad importante es el tamaño de los gránulos que conforman el patrón de speckle, los cuales pueden ser medidos con el llamado espectro de Wiener.

Una forma muy usual es calcular la función autocorrelación del patrón, para después realizar la transformada de Fourier, de acuerdo al teorema de Wiener-Kinchine [5].

Hay que tener en cuenta que cualquier patrón de speckle consiste en una serie continua de componentes de Fourier. Nos centraremos en un vector de frecuencia espacial específico $v = (v_x, v_y)$. Una componente ideal de Fourier debe ser pensada como una franja en el patrón de speckle con una componente sinusoidal. Por lo tanto, para crear una franja en el patrón de speckle con una componente frecuencial v se tiene que producir una interferencia de la luz reflejada, la cual proceden de dos puntos en el objeto separados por un espacio vectorial

$$s = (s_x, s_y) = (\lambda z v_x, \lambda z v_y)$$
(2.7)

Donde z es la distancia desde la superficie que se refleja hasta el plano de observación. El espectro de Wiener $\omega(v)$ está dado matemáticamente por,

$$\omega(\nu) = (\bar{I})^2 \left[\delta(\nu) + \iint_{-\infty}^{\infty} R(\xi) R(\xi - \lambda z \nu) d\xi / \left(\iint_{-\infty}^{\infty} R(\xi) d\xi \right)^2 \right]$$
(2.8)

Donde \overline{I} es la irradiancia media en el patrón de speckle, $R(\xi)$ representa la luminosidad del objeto en el punto ξ , y $\delta(v)$ es una función Dirac de dos dimensiones en el origen del plano v.

2.6 Conclusión

En este capítulo se ha realizado una introducción al fenómeno de speckle, con el objetivo de conocerlo y entender como se origina. Para ello, se han descrito algunos fenómenos importantes, como son la coherencia y la interferencia, los cuales permiten explicar la formación del speckle. También se ha descrito algunas de sus propiedades, así como los diferentes tipos de obtención, speckle objetivo y speckle subjetivo. Los conceptos explicados se aplicarán en el siguiente capítulo a la fibra multimodo, que es el tipo de fibra utilizada en la parte experimental de este trabajo.

Capítulo 3

Speckle en fibra óptica multimodo

3.1 Introducción

Una vez explicadas las características fundamentales del speckle así como sus diferentes tipos nos centraremos en estudiar este fenómeno en las fibras multimodo. Para ello definiremos la fibra óptica y explicaremos sus características.

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos y es utilizada ampliamente en telecomunicaciones. Se trata de un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz, que representan los datos a transmitir. Cada haz de luz queda completamente confinado y se propaga por el interior de la fibra basándose en la ley de Snell. Existen dos tipos de fibras, fibra monomodo y fibra multimodo (figura 3.1).

3.2 Fibra óptica multimodo

Tal y como indica su nombre, la fibra óptica multimodo permite la propagación de múltiples modos o haces luminosos, cada uno de los cuales sigue un camino diferente en el interior de la fibra. Este hecho provoca que no todos los modos lleguen a la vez, y por lo tanto, que su ancho de banda sea inferior al de las fibras monomodo (un único modo de propagación). Este tipo de fibra es utilizada en telecomunicaciones en aplicaciones de corta distancia, del orden de los 2 Km. La característica de esta fibra es que el diámetro del núcleo es bastante grande con relación a la longitud de onda. En la figura 3.2 se muestra el esquema de una fibra óptica multimodo.



Figura 3.1. Tipos de fibra óptica.



Figura 3.2. Propagación del frente de onda a través de una fibra óptica multimodo.

3.3 Concepto de modo

Existen dos formas de describir los modos ópticos propagados en la fibra. La primera utiliza la teoría de rayos, en la que se considera que la longitud de onda es cero, es decir, que la luz es representada por un rayo, por lo que un modo es la agrupación de un conjunto de rayos que tienen similares caminos ópticos dentro de la fibra. La segunda utiliza la teoría electromagnética, es decir, que la luz es considerada como una onda, también es llamada teoría modal, donde el modo óptico es una distribución de energía en la sección transversal de la fibra.

El concepto de modo es fundamental para todos los fenómenos ondulatorios tanto en la física, como la óptica, la acústica y la mecánica cuántica. En óptica y en fotónica, el concepto de modos es muy útil para describir la emisión y absorción, coherencia e interferencia, propagación y dispersión. Para explicar dicho concepto utilizaremos la teoría modal.

La teoría modal se utiliza para describir el comportamiento de la luz en el interior de una fibra óptica. Esta teoría permite explicar las propiedades que no es capaz de explicar la teoría de rayos. El conjunto de ondas electromagnéticas guiadas por el interior de la fibra se les denomina modos.

La teoría modal sugiere que la luz puede representarse como una onda plana. Una onda plana se caracteriza por su dirección, amplitud y longitud de onda. Se trata de una onda de frecuencia constante cuyos frentes de onda (superficies con fase constante) son planos paralelos infinitos normales a la dirección de propagación.

La longitud de onda de una onda plana viene dado por:

$$\lambda = \frac{c}{f * n} \tag{3.1}$$

Donde

$$\lambda$$
 = Longitud de onda

c = Velocidad de la luz en el vacío

f = Frecuencia de la luz

n = Índice de refracción del medio

Las ondas planas se propagan a lo largo de la fibra de forma similar a los rayos de luz. Consideramos que el frente de onda incide en el núcleo de una fibra óptica, tal como se puede ver en la figura 3.2, solo los frentes de onda menores o iguales que el ángulo crítico se propagarán a lo largo de la fibra. El frente de onda se someterá a un cambio de fase gradual a medida que viaja por la fibra. También se produce un cambio de fase cuando el frente de onda es reflejado. Considerando los puntos A y B de la figura 3.2, podemos decir que las ondas reflejadas en dichos puntos están en fase si la cantidad de fase total es un múltiplo entero de 2π radianes.

Si los frentes de onda no están en fase, desaparecerán debido a la interferencia destructiva, ya explicada anteriormente.

La interferencia es la razón por la que solo un número determinado de modos se puede propagar a través de la fibra. Los modos están ligados a la longitud de onda, de manera que, si esta varía, el modo puede ser que no se propague por la fibra. Los modos que están ligados a una longitud de onda no pueden ser propagados a longitudes de onda mayores. La longitud de onda para la cual el modo se deja de propagar se denomina longitud de onda de corte. Cabe destacar que por la fibra siempre se propaga al menos un modo, denominado modo fundamental. Por lo tanto, una fibra que trabaja por debajo de la longitud de onda de corte se denomina fibra monomodo, mientras que si opera por encima se denomina fibra multimodo.

Las ecuaciones de Maxwell describen las ondas electromagnéticas o modos mediantes dos componentes. Estas dos componentes son el campo eléctrico E(x, y, z) y el campo magnético H(x, y, z). Ambos campos son perpendiculares entre si y ambos perpendiculares a la dirección de propagación. Los modos que viajan a través de la fibra se les denomina modos transversales. Por lo tanto, según lo anterior podemos decir que existen diferentes modos:

- Modos TE (Transversal Eléctrico): no existe ninguna componente del campo eléctrico en la dirección de propagación.

- Modos TM (Transversal Magnético): no existe ninguna componente del campo magnético en la dirección de propagación.
- Modos TEM (Transversal Electromagnético): no existe ninguna componente del campo eléctrico y magnético en la dirección de propagación.
- Modos Híbridos: son aquellos donde hay componentes del campo eléctrico y magnético en la dirección de propagación.

En la figura 3.3 podemos observar cuatro patrones diferentes del campo eléctrico, los cuales son soluciones a las ecuaciones de Maxwell. Cada patrón se corresponde con un modo. El orden del modo también esta relacionado con el ángulo que forma el frente de onda con el eje de la fibra.

La figura 3.4 ilustra como viajan los rayos de luz a través de la fibra los cuales indican la dirección de los frentes de onda. También podemos observar que los modos de orden superior cruzan el eje de la fibra con ángulos más pronunciados.



Figura 3.3. Patrones de distribución de campo para modos TE (Transversal Eléctrico).



Figura 3.4. Representación de modos de orden superior y orden inferior que viajan por el interior de la fibra óptica.

Los modos no viajan por el centro de la fibra, si no que estos se extienden hasta la interface núcleo-cubierta. Cabe destacar que algunos de estos modos penetran en la cubierta, lo cual indica que son refractados hacia el exterior del núcleo. Estos modos refractados quedan atrapados en la cubierta, formando lo que se conoce como modos de revestimiento. Este tipo de modos también se propaga y se puede producir acoplamiento entre ellos (intercambio de potencia). En la práctica se intenta atenuarlos después de una corta distancia de propagación.

Existen otro tipo de modos conocidos como modos de fuga los cuales se caracterizan por que pierden potencia a medida que viajan por la fibra.

Para que un modo pueda permanecer en el interior del núcleo debe cumplir una serie de condiciones límite. Para ello, la constante de propagación beta (β) debe permanecer entre los siguientes valores:

$$\frac{2*\pi*n_2}{\lambda} < \beta < \frac{2*\pi*n_1}{\lambda}$$
(3.2)

Donde

 λ = Longitud de onda β = Constante de propagación n₁ = Índice de refracción del núcleo n₂ = Índice de refracción de la cubierta

Cuando la constante de propagación toma un valor menor de $2\pi n_2/\lambda$, la potencia se propaga del núcleo a la cubierta (el modo). Generalmente, los modos fugados hacia la cubierta son perdidos en pocos centímetros. Sin embargo, este tipo de modos pueden llevar una gran cantidad de potencia en fibras de corta distancia.

Frecuencia Normalizada

La frecuencia normalizada esta relacionada con la frecuencia de corte de la fibra y está definida como:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \tag{3.3}$$

Donde, V es la frecuencia normalizada y *a* el radio del núcleo.

El número de modos que viajan a través de la fibra esta determinado por el valor de V. Cuando V incrementa el número de modos es mayor.

3.3.1 Cantidad de modos

Debido a que nos hemos centrado en la fibra multimodo, es importante conocer el número de modos soportados de por la fibra a utilizar. Dependiendo del tipo de fibra el cálculo difiere.

Para el caso de una fibra multimodo a salto de índice, el número de modos soportados viene dado por [6]:

$$M \approx \frac{2\pi a}{\lambda_0} AN \tag{3.4}$$

Donde AN es la apertura numérica, parámetro que da una idea de la cantidad de luz que es inyectada a la fibra.

La apertura numérica está relacionada con los índices de refracción del núcleo y de la cubierta de la fibra a través de la siguiente fórmula:

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta} \tag{3.5}$$

Donde Δ es la diferencia relativa de índices, dada por:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$
(3.6)

Se supone que $\Delta \ll 1$, por lo que el número de modos será:

$$M \approx \frac{2\pi a n_1}{\lambda} \sqrt{2\Delta}$$
(3.7)

Siempre que la potencia de cada modo sea la misma, el número de grados de libertad es M, y el número medio de gránulos (manchas) que aparecen al final de la fibra será también M. Una fibra de gradiente de índice tiene un perfil dado por:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 [1 - 2\Delta (r/a)^{\alpha}]^{1/2} & r < a \\ n_2 & resto \end{cases}$$
(3.8)

Donde r es el radio desde el centro del núcleo y α es el parámetro del perfil de índice. Cuando el perfil de índice $\alpha = \infty$ se convierte en una fibra salto de índice. Cuando $\alpha = 2$, la fibra es referida a una fibra de índice parabólico. En este tipo de fibra la variación gradual del índice de refracción provoca que los rayos se alejen y se acerquen del eje de la fibra periódicamente a lo largo de la longitud de la fibra.

Los rayos que viajan más alejados de la fibra recorren mayor longitud pero se encuentran menores índices de refracción a medida que se alejan del eje, con lo que el camino óptico es similar al del eje de la fibra. Con la elección correcta del perfil de índice α se puede minimizar la dispersión modal, es decir, el retraso en el tiempo de los modos debido a los diferentes caminos que recorren por el interior de la fibra.

El número de modos soportado por una fibra de índice gradual esta dado por:

$$M \approx \left(\frac{\alpha}{\alpha+2}\right) \frac{2\pi n_1 a^2}{\lambda_0} \Delta$$
(3.9)

De nuevo, el número medio de gránulos a la salida de la fibra es aproximadamente igual a M.

Bajo las condiciones cambiantes del entorno, las velocidades de fase de los modos en la fibra cambian con el tiempo y con respecto a las velocidades de fase de otros modos. Grandes longitudes de fibra son notablemente sensibles a cambios de temperatura y presión, así como a pequeñas vibraciones y otros tipos de movimientos en la fibra, lo que nos permitirá desarrollar este trabajo ya que se realizarán varios experimentos introduciendo pequeñas vibraciones. Además, cuando la longitud de onda de la fuente cambia, los retrasos de fase de los modos propagados también cambian. Cuando esto ocurre, la estructura de speckle al final de la fibra varía. Estos cambios se conocen como ruido modal [1].

3.3.2 Cantidad de modos en fibra óptica

Debido a que el fenómeno de speckle está basado en el fenómeno de interferencia explicado en el capítulo anterior, se puede realizar el cálculo de la cantidad de modos M mediante las características de campos eléctricos y magnéticos, concretamente, haciendo uso de la ecuación de Helmholtz, considerando una onda plana y polarizada linealmente a lo largo de la dirección de propagación z. Todos los modos que viajan

por la fibra óptica tienen velocidades de fase diferentes. Así, dos modos cualquiera, se pueden interferir entre si produciendo un patrón de interferencia. A la salida de la fibra se podrá observar que ocupan dos posiciones espaciales distintas y que ambos tienen diferentes intensidades. 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.

Como ya hemos comentado, la interferencia entre dos modos puede resolverse con las ecuaciones de onda, considerando una fibra cilíndrica a salto de índice y aplicando unas condiciones de contorno. Si suponemos dos modos diferentes su expresiones de campo eléctrico están dadas por;

$$\overrightarrow{E_1}(r,\varphi,z) = \overrightarrow{E_{01}} \exp[j(\omega t - \beta_1 z + \phi_1)]$$
(3.10)

$$\overrightarrow{E_2}(r,\varphi,z) = \overrightarrow{E_{02}} \exp[j(\omega t - \beta_2 z + \phi_2)]$$
(3.11)

donde $\overrightarrow{E_{01}}$ es la amplitud de la onda, r y φ denotan la dirección radial y azimutal, respectivamente. β es la constante de propagación, z la dirección de propagación, ω la frecuencia angular, t el tiempo y ϕ_i la fase del modo. β_i asocia a cada modo propagado con una fase aleatoria ϕ_i . El índice i = 1 ó 2.

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

$$I = \frac{1}{2} Re \{ E \times H * \hat{z} \}$$
(3.12)

La intensidad de un speckle individual está determinada por I_i , por lo tanto, la intensidad total se puede escribir como:

$$I_T = \sum_{i=1}^{N} I_i = contante \tag{3.13}$$

Donde N es el número de speckles. Recordemos que la cantidad de speckle es aproximadamente igual al número de modos ($M \approx N$).

Como ya comentamos anteriormente las expresiones para el campo eléctrico (E) y el campo magnético (H) en el núcleo de una fibra óptica, son soluciones de la ecuación escalar de Helmholtz,

$$E = \sum_{m=0}^{N'} A_m B_{n_m} (U_m R) \cos(n_m \theta) \exp[-i(\beta_m z - \phi_m)] \hat{x}$$
(3.14)

$$H = n_1 \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \sum_{m=0}^{N'} A_m B_{n_m}(U_m R) \cos(n_m \theta) \exp[-i(\beta_m z - \phi_m)] \hat{y}$$
(3.15)

donde N' es el número de modos que viajan por la fibra, β_m es la constante de propagación para el modo m, ϕ_m es la fase asociada al modo m, Y es la admitancia del núcleo de la fibra $n_1 \left(\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/2}$, R es el radio normalizado, n_1 es el índice de refracción del núcleo, U_m es el parámetro modal $a(k^2n_1^2 - \beta_m^2)^2$, donde k es el vector de onda y a el radio de la fibra.

Sustituyendo las ecuaciones (3.14) y (3.15) en (3.12) obtenemos:

$$I = \frac{1}{2}Y \sum_{m=0}^{N'} \sum_{l=0}^{N'} A_m A_l B_{n_m}(U_m R) B_{n_l}(U_l R)$$
$$\times \cos(n_m \theta) \cos(n_l \theta) \exp[-i(\Delta \beta_{ml} z - \Delta \phi_{ml})]$$
(3.16)

donde $\Delta\beta_{ml} y \Delta\phi_{ml}$ representan la diferencia entre las constantes de propagación y la fase de los modos m y l. La exponencial para cualquier par de índices m, l es el complejo conjugado del par l, m. Por lo tanto, podemos escribir estos términos como una función coseno:

$$I = \frac{1}{2}Y \sum_{m=0}^{N'} [A_m^2 B_{n_m}^2 (U_m R) \cos^2(n_m \theta)$$

+2
$$\sum_{l=m+1}^{N'} A_m A_l B_{n_m} (U_m R) B_{n_l} (U_l R) \cos(n_m \theta)$$

×
$$\cos(n_l \theta) \cos(\Delta \beta_{ml} z - \Delta \phi_{ml})] \qquad (3.17)$$

Si la fibra es perturbada por una vibración F(t), de tal manera que modifica el índice de refracción o la longitud de la fibra, la constante de propagación $\Delta\beta_{ml}$ varía. Introduciendo el término F(t) en la ecuación anterior:

$$I = \frac{1}{2}Y \sum_{m=0}^{N'} \{A_m^2 B_{n_m}^2 (U_m R) \cos^2(n_m \theta) + 2 \sum_{l=m+1}^{N'} A_m A_l B_{n_m} (U_m R) B_{n_l} (U_l R) \cos(n_m \theta) \\ \times \cos(n_l \theta) \cos[\Delta \beta_{ml} z - \Delta \phi_{ml} + \gamma_{ml} F(t)]\}$$
(3.18)

donde γ_{ml} es la constante de proporcionalidad.

Utilizando algunas identidades trigonométricas y empleando alguna función de integración, la intensidad puede ser escrita como:

$$\Delta I_T = \sum_{i=1}^n -A_i B_i \phi_i F(t) \sin(\delta_i)$$
(3.19)

donde A_i representa la interacción de un modo consigo mismo, B_i es la interacción entre modos, ϕ_i es la fase de la perturbación. El argumento de las funciones trigonométricas, δ_i , contiene:

$$\delta_i = \Delta \beta_{ml} - \Delta \phi_{ml} \tag{3.20}$$

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. Los términos, $A_{i\nu}$ $B_{i\nu}$ $\phi_{i\nu}$ y δ_i son valores constantes para cualquier valor de i.



Figura 3.5. Formación del patrón de speckle en una fibra multimodo a salto de índice.

3.3.3 Dispersión modal

La dispersión modal, o dispersión intermodal, es la distorsión que se presenta en la señal al transmitirse por fibra óptica. Esto es debido a que los modos de orden superior recorren mayor distancia, por esta razón los rayos de luz llegan en tiempos distintos, generándose un pulso ensanchado y deformado con respecto al original, por lo que determina la capacidad de ancho de banda de las fibras multimodo.

3.3.4 Ruido Modal

En 1978, R.E. Epworth [7] informó sobre una nueva fuente de ruido en sistemas de fibras multimodo, a la cual denominó ruido modal. Este ruido se produce cuando la luz propagada por la fibra sufre una transformación de tal manera que se limita la zona de transporte de la luz en el interior o se limita la propagación de modos. Si la luz coherente es introducida en una fibra multimodo, y si un detector al final de la fibra recoge toda la luz que emerge de esta, (despreciando los modos que se escapan por la cubierta) cuando se produzcan cambios en el entorno que provoquen cambios en el patrón de speckle, el detector no detectará ninguna variación en la potencia total. Para una fibra de bajas pérdidas, toda la potencia introducida en la fibra es detectada, independientemente de las condiciones del entorno. Sin embargo, si el detector solo integra una porción del núcleo a la salida de la fibra, parte de la potencia no será detectada, y el patrón de speckle cambiará bajo las condiciones del entorno, produciendo variaciones en la potencia detectada por el detector. Este caso es ilustrado en la figura 3.6.

W representa la potencia total en el interior de la región D sobre la cual el detector está integrando (detectando).



Figura 3.6: La potencia total W_{τ} se propaga a través del núcleo, representado por el círculo sólido. El área del fotodetector es representado por el círculo discontinuo. La potencia W es detectada en la región D que es el área correspondiente a la superposición de los dos círculos.

$$W = \iint_{D} I(x, y) dx dy$$
(3.21)

La potencia total W_T existente en la fibra permanecerá constante:

$$W_T = \iint_{core} I(x, y) dx dy$$
(3.22)

Se ha ilustrado la forma de formar ruido modal mediante el desalineamiento del detector pero existen muchos otros casos que producen su incremento. Algunos ejemplos son los siguientes:

- Un conector desalineado al unir dos secciones de fibra.
- Un divisor mediante el cual se divide la potencia en dos o más caminos.
- Una conexión entre una fibra con núcleo grande y otra con núcleo pequeño, o entre una fibra con gran apertura numérica y otra con poca apertura.
- Ciertos tipos de dispositivos de filtrado modal.

Destacar que los cambios en las condiciones del entorno han sido mencionados como causa del ruido modal pero la inestabilidad de la frecuencia del láser puede ser también una causa para la formación de ruido.

3.3.5 Dependencia del ruido modal con la frecuencia

La dependencia de la frecuencia del speckle está determinada por la propagación de los tiempos de retraso asociados con los diversos caminos que contribuyen al speckle. El cambio de frecuencia requerida para decorrelar un patrón de speckle en el extremo de una fibra es, por lo tanto, aproximadamente el recíproco de la anchura de la respuesta al impulso de la fibra. La dispersión del material es ignorada y nos centraremos en la dispersión modal que debería ser el efecto más significante de los dos. Un análisis detallado de la frecuencia de decorrelación del speckle en guías de onda se puede encontrar en las referencias [8] y [9].

Una imagen geométrica de la dirección de los rayos en una fibra de salto de índice puede ayudar en la estimación de la cantidad de dispersión de tiempo modal sufrida por la luz propagada de la entrada a la salida de la fibra. Como se puede observar en la figuras 3.4 y 3.5, el tiempo de propagación más corto se produce cuando los rayos viajan junto al eje de la fibra, sin reflexiones ni del núcleo ni de la cubierta. Si la longitud de la fibra es L, el tiempo de propagación más corto es:

$$t_{min} = \frac{Ln_1}{c} \tag{3.23}$$

El mayor tiempo de propagación se produce cuando el rayo es reflejado desde la interfaz núcleo/cubierta con el ángulo crítico. El ángulo crítico esta relacionado con el ángulo de propagación θ a través de

$$\sin\theta_c = \cos\theta = \frac{n_2}{n_1} \tag{3.24}$$

Por lo tanto el tiempo de propagación más largo viene determinado por

$$t_{max} = \frac{L/\cos\theta}{c/n_1} = \frac{Ln_1^2}{cn_2}$$
(3.25)

La diferencia del tiempo de propagación entre el rayo más rápido y el rayo más lento viene dado por:

$$\Delta t = \frac{Ln_1^2}{cn_2} - \frac{Ln_1}{c} = \frac{Ln_1}{cn_2}(n_1 - n_2) \approx \frac{Ln_1\Delta}{c} = \frac{L}{2cn_1}(NA)^2$$
(3.26)

Por lo tanto, concluimos, que para una fibra de salto de índice, el tiempo de la respuesta al impulso viene dado por la ecuación anterior.

Los caminos seguidos por los rayos en una fibra de índice gradual se pueden ver en la figura 3.1. Al igual que ocurría para la fibra de salto de índice existe una diferencia de tiempo entre el rayo más rápido y el rayo más lento. Desde el punto de vista de la óptica geométrica este tiempo viene dado por [10]:

$$\Delta t \approx \frac{Ln_1 \Delta^2}{2c} = \frac{L}{8n_1^3 c} (NA)^4$$
(3.27)

Mientras que desde un punto de vista electromagnético más riguroso [11]:

$$\Delta t \approx \frac{Ln_1 \Delta^2}{8c} = \frac{L}{32n_1^3 c} (NA)^4$$
(3.28)

Sin embargo, el 70% de la potencia óptica aparece en la primera mitad de este intervalo, por lo tanto, el tiempo de retraso efectivo será menor que el obtenido por la expresión. Una aproximación razonable sería tomar un tiempo de retraso que sea la mitad de este resultado.

3.4 Conclusión

Existen varios tipos de fibras que ofrecen diferentes tipos de modos. Para el caso particular del speckle es necesario que se produzca interferencia, por lo que es importante que exista el mayor número de modos posible. Por lo tanto se utilizarán fibras que transportan una gran cantidad de modos, quedando descartadas aquellas que transportan pocos modos. En el capítulo 5 se mostraran las fibras utilizadas con sus características más importantes, como puede ser el tamaño del núcleo, el índice de refracción o la cantidad de modos que transporta cada fibra.

Capítulo 4

Estado del arte de sensores basados en speckle en fibra óptica

4.1 Introducción

Las fibras ópticas son utilizadas ampliamente en telecomunicaciones, propuestas como un medio de transmisión alternativa para los sistemas de radio. Existen dos tipos de fibras: fibra monomodo y fibra multimodo. En fibra monomodo el diámetro del núcleo es pequeño (\approx 10 μ m) y la señal óptica tiene una velocidad de fase casi constante. Sin embargo, en fibras multimodo el diámetro es mucho mayor (\geq 50 µm) y los modos que se guían a través de ellas tienen diferentes velocidades de fase. En el primer caso, la proyección del haz a la salida de la fibra es un punto uniforme de luz mientras que en el caso de la fibra multimodo se observa un patrón granulado (del anglo-sajón: "speckle", utilizado de ahora en adelante en este documento). El patrón de speckle en fibra óptica, puede ser explicado como el producido por un fenómeno de interferencia entre los modos propagados a través de la fibra. El speckle en fibras ópticas es un problema cuando es utilizada para la transmisión de datos, ya que el speckle es considerado como una fuente de ruido (ruido modal), además de la dispersión modal que limita el ancho de banda y la distancia de los enlaces de comunicación. Por el contrario, estas características tan particulares del fenómeno de speckle son utilizadas en la tecnología de sensores. En efecto, en los últimos años se han realizado varias demostraciones de sensores basados en speckle en fibras multimodo. A continuación, se describen cronológicamente algunas de las aplicaciones más importantes basado en este principio de sensado.

4.2 Sensor de velocidad y distancia [12]

Kitagawa y Hayashi muestran la utilidad del patrón de speckle para la realización de sensores implementando un sensor de velocidad y distancia. Este tipo de sensores son utilizados en robots para medir la distancia, en sistemas de medida en procesos de fabricación, etc.

4.2.1 Descripción teórica

Considerando que el objeto se mueve con una velocidad v y que el haz del láser y la posición a detectar son perpendiculares a la dirección del movimiento se puede decir que la velocidad esta dada por:

$$V = v \left(1 + L/d \right) \tag{4.1}$$

Donde L es la distancia del objeto al detector y d es el radio del frente de onda que forma el láser en la superficie del objeto.



Figura 4.1. Diagrama esquemático del sensor de fibra óptica empleado para medir velocidad y distancia usando speckle dinámico [12].

Antes de continuar con el desarrollo teórico hay que tener en cuenta varias distancias, las cuales se pueden ver en la figura 4.1.

Dado que el haz del láser es dividido en dos se obtendrán dos velocidades V_1 y V_2 dadas por: $V_1=v[1+(d+B)/d]$, $V_2=v[1+(d+B)/(d+A)]$. La medida de las velocidades se realiza por medio de un filtro espacial formado por una array de fibras cuya configuración podemos ver en la figura 4.1. Tal y como se ve en el esquema, las fibras están situadas en intervalos de p/2 y la señal de salida es obtenida realizando la diferencia de intensidades entre fibras alternadas. Debido a esta configuración a la salida del array la señal presenta dos señales de banda estrecha cuyas frecuencias centrales están dadas por [13] [14]:

$$f_1 = \frac{\nu(2d+B)}{pd} \tag{4.2}$$

$$f_2 = \frac{\nu(2d + A + B)}{p(d + A)}$$
(4.3)

Se considera que S_1 es el punto de referencia para la medida de la distancia, es decir, d es la distancia al objeto. De las ecuaciones (4.2) y (4.3) se obtiene que la velocidad v y la distancia al objeto d son:
$$d = \frac{1}{4\left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right)} \left[\frac{f_2}{f_1} (2A + B) - (A + B) + \sqrt{\left\{\frac{f_2}{f_1} (2A + B) - (A + B)\right\}^2 + 8\frac{f_2}{f_1} (1 - \frac{f_2}{f_1})AB} \right]$$

$$v = \frac{p}{4A} \{(A + B)f_1 + (2A - B)f_2 - \sqrt{[(A + B)f_1 + (2A + B)f_2]^2 - 8A^2f_1f_2} \}$$

$$(4.5)$$

Dado que A y B son valores constantes si se hace coincidir la posición del filtro espacial con el punto S2, A sería igual a B. Esto implica una reducción de las ecuaciones anteriores,

$$d = \frac{A}{2\left(\frac{f_1}{f_2} - 1\right)}$$
(4.6)

$$v = \frac{pf_2}{2} \tag{4.7}$$

Esta configuración es muy útil ya que permite calcular la velocidad y la distancia de una forma rápida y sencilla.

Para poder obtener el rango de medida del sistema se tienen en cuenta algunas consideraciones. Las frecuencias centrales de la señal de salida $f_1 \ y \ f_2$, dadas por las ecuaciones 4.2 y 4.3, se deben encontrar en el rango de frecuencias $f_{max} \ge f_1 > f_2 \ge f_{min}$. Por otro lado, el espectro de potencia de la señal de salida se ensancha alrededor de las frecuencias $f_1 \ y \ f_2$ debido a la característica selectiva del filtro espacial. Dado que estas dos frecuencias son muy próximas, el límite para que no se solapen está dado por $f_1 - f_2 = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{2} \approx \Delta f_2$, donde $\Delta f_1 \ y \ \Delta f_2$ son las anchuras totales en el espectro de salida. Para el filtro espacial, $\Delta f_1 = f_1/Q \ y \ \Delta f_2 = f_2/Q$, donde Q es el valor de selectividad del filtro, el cual esta definido por la relación entre las frecuencias centrales y su ensanchamiento, así como por el número total de fibras (2N) que componen el filtro espacial. El valor de selectividad Q esta dado por Q = 1.13N. Por lo tanto, el rango de medida de la distancia esta dado por:

$$\frac{A\left(Q-1\right)}{2} \ge d \ge = \frac{Av}{pf_{max} - 2v} \tag{4.8}$$

El rango de medida de la velocidad de este sensor esta dado por:

$$\frac{pf_{max}}{2} \ge v \ge = \frac{pf_{min}}{2} \tag{4.9}$$

4.2.2 Montaje

Se emplea un láser He-Ne de 25 mW cuyo haz se divide en dos mediante un divisor de haz, el cual esta acoplado a dos fibras monomodo de 6 μ m de diámetro del núcleo que permiten el guiado de la luz hasta la cabeza del sensor. El objeto a caracterizar es iluminado por los dos haces procedentes del láser, de tal manera que, el reflejo del haz producido debido al objeto es recogido por un array de filtros espaciales formado por 20 fibras ópticas de salto de índice cuyo diámetro es de 100 μ m. Para que cada haz converja adecuadamente en cada fibra se han utilizado unas micro-lentes colocadas en la cara externa de la fibra. Con la ayuda de fotodiodos de Si y un analizador de espectros se obtiene el espectro de potencia de la señal de salida y, a partir de las frecuencias obtenidas, se calcula la velocidad y la distancia con las fórmulas desarrolladas teóricamente.

4.2.3 Resultados y conclusiones

Para el caso de la medida de la distancia el error cometido está entre el 2.5% y 4% en un rango de distancia entre 20 y 100 mm. Para el caso de la velocidad se consigue una precisión mejor que el 1% en el rango de 0.1-0.65 m/s.

Estos rangos podrían mejorarse incrementando el intervalo entre los puntos S1 y S2, incrementado el valor de selectividad Q y aumentando el rango de frecuencias de la unidad de procesado.

4.3 Sensor de vibración [15]

Spillman et al., presenta un método de sensado de vibración basado en la detección de los cambios de la distribución espacial de la energía en el extremo de una fibra multimodo. Desarrolla dos tipos de sensores, el primero basado en el procesamiento simple del patrón de speckle utilizando un filtro espacial, y el segundo detectando la luz en la salida de la fibra mediante un CCD y luego procesando los cambios observados debidos a la vibración en la fibra. La importancia del trabajo de Spillman et al., es el desarrollo teórico del efecto de la perturbación en la fibra y su correlación con la variación del patrón de speckle observado en el extremo de la fibra.

Algunas de las aplicaciones en las que emplearon estos dos sensores fueron en detección de vibraciones estructurales, así como para detectar el paso de personas y vehículos sobre una determinada superficie.

4.3.1 Descripción teórica

Antes de comenzar el desarrollo teórico se da por hecho una serie de suposiciones como son:

- La luz utilizada en la fibra es coherente y linealmente polarizada.
- El speckle depende de la interferencia modal de la luz.
- Cada patrón de speckle es proyectado en un fotodetector que permite convertir la luz en una señal eléctrica para poder así extraer información.

La intensidad de un speckle individual está determinada por I_i , por lo tanto, la intensidad total se puede escribir como:

$$I_T = \sum_{i=1}^{N} I_i = contante \tag{4.10}$$

donde N es el número de speckles.

Utilizando algunas identidades trigonométricas, empleando alguna función de integración y utilizando algunas ecuaciones, la intensidad puede ser escrita como:

$$\Delta I_T = \sum_{i=1}^n -A_i B_i \phi_i F(t) \sin(\delta_i)$$
(4.11)

donde A_i representa la interacción de un modo consigo mismo, B_i es la interacción entre modos, ϕ_i es la fase de la perturbación. El argumento de las funciones trigonométricas, δ_i , contiene:

$$\delta_i = \Delta \beta_{ml} - \Delta \phi_{ml} \tag{4.12}$$

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. Los términos, A_i , B_i , ϕ_i y δ_i son valores constantes para cualquier valor de i.

Esta expresión representa la salida que se podría esperar de un sensor estadístico. El desarrollo completo ha sido visto en el capítulo 3, referido al speckle en fibras multimodo.

4.3.2 Montaje

Se han realizado dos montajes. En el primer montaje, denominado SMS-A, se ha empleado un láser, una fibra multimodo de salto de índice ($100/140 \mu m$), lentes y un fotodetector. Para comprobar el funcionamiento del sensor se ha fijado la fibra a una barra de acero, a la cual se le aplica una vibración mediante un vibrador lineal comercial.

El segundo montaje, denominado SMS-B, emplea tecnología más compleja ya que a la salida de la fibra, para analizar el patrón de speckle, emplea un array CCD de fotodiodos los cuales permiten guardar y analizar los píxeles de una imagen con ayuda de un circuito aritmético.

4.3.3 Resultados y conclusiones

El SMS-A presenta la ventaja de que es muy simple de implementar y de bajo coste y proporcionaba información precisa sobre las frecuencias de la vibración. También presenta información sobre la fase, con el inconveniente de que tiene una ambigüedad de π . Otro inconveniente es que para el caso de las amplitudes se obtiene información inconsistente.

Como ya se mencionó anteriormente el SMS-B es más costoso debido a su complejidad pero mejora el rendimiento del SMS-A. Se obtiene información muy precisa de la amplitud de las vibraciones. La principal limitación de este sensor es que, al igual que el anterior, presenta una ambigüedad de π en lo relativo a la información de la fase.

4.4 Sensor de desplazamiento [16]

Yu et al., presenta un sensor de desplazamiento basado en el producto interno de la intensidad de los campos de speckle. Para ello, tiene en cuenta las investigaciones llevadas a cabo previamente por Bennett [17], donde mostraba los efectos en el speckle tras una perturbación en la fibra, por Rawson [18] [19], el cual muestra un análisis detallado del modelo de ruido, y por Takai y Asakura [20] [21], los cuales proporcionan un estudio sobre la propiedad de coherencia del speckle en la fibra. Dicho sensor permite detectar desplazamientos sub-micrométricos basándose en los

patrones de intensidad de speckle producidos antes y después de la perturbación.

4.4.1 Descripción teórica

Antes de comenzar con el desarrollo teórico se supone que se emplea una fuente de luz coherente y que todos los modos en la fibra son excitados por igual.

La distribución compleja del speckle en campo lejano es la superposición coherente de la amplitud compleja de todos los modos y esta dada por:

$$A_0(x,y) = \sum_{m=0}^{M} a_{0m}(x,y) \exp\{j[\phi_{0m}(x,y)]\}$$
(4.13)

donde M es el número modal de la fibra y $a_{0m}(x, y)$ y $\phi_{0m}(x, y)$ son las distribuciones de amplitud y fase respectivamente, relativas al modo m. La intensidad del campo de speckle puede ser escrita como,

$$I_0(x,y) = |A_0(x,y)|^2 = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^M a_{0m} a_{0n} \exp[j(\phi_{0m} - \phi_{0n})]$$
(4.14)

Si el estado de la fibra es alterado el campo complejo de speckle a la salida puede escribirse como,

$$A(x,y) = \sum_{m=0}^{M} [a_{0m}(x,y) + \Delta a_m] \exp\{j[\phi_{0m}(x,y) + \Delta \phi_m]\}$$
(4.15)

donde Δa_m y $\Delta \phi_m$ son las desviaciones de amplitud y fase respectivamente. Por lo tanto, la distribución de intensidad del speckle está dada por:

$$I(x, y) = |A(x, y)|^{2} =$$

$$= \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{M} (a_{0m} + \Delta a_{m})(a_{0n} + \Delta a_{n}) \exp[j(\phi_{0mn} + \Delta \phi_{mn})]$$
(4.16)

donde

$$\phi_{0mn} = \phi_{0m} - \phi_{0n} \qquad \Delta \phi_{mn} = \Delta \phi_m - \Delta \phi_n \tag{4.17}$$

Se define el producto interno normalizado (NIP) como,

$$NIP = \frac{\iint I_0(x, y)I(x, y)dxdy}{\left[\iint I_0^2(x, y)dxdy \iint I^2(x, y)dxdy\right]^{1/2}}$$
(4.18)

Que operando se obtiene:

$$NIP = \frac{\sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{M} B_{ij} \exp[j(\Delta \phi_{ij})]}{\left(\sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{M} B'_{ij} \sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{M} B''_{ij}\right)^{\frac{1}{2}}}$$
(4.19)

donde

$$B'_{ij} = \iint \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{M} a_{0m} a_{0n} a_{0i} a_{0j} \exp[j(\phi_{0mn} + \phi_{0ij})] dx dy$$
(4.20)

$$B_{ij}^{\prime\prime} = \iint \sum_{m=0}^{M} \sum_{n=0}^{M} (a_{0m} + \Delta a_m) (a_{0n} + \Delta a_n) (a_{0i} + \Delta a_i) (a_{0j} + \Delta a_j)$$

$$\exp[j(\phi_{0mn} + \phi_{0ij} + \Delta \phi_{mn} + \Delta \phi_{ij}] dx dy$$
(4.21)

Suponiendo que la perturbación del estado de la fibra es en un rango moderado, es decir, todos los modos tienen la misma amplitud antes y después de la perturbación, el NIP puede ser escrito como,

$$NIP = \frac{1}{(M+1)^2} \sum_{i=0}^{M} \sum_{j=0}^{M} \exp[j(\Delta\phi_{ij})]$$
(4.22)

donde la desviación de amplitud Δa_{0m} no se ha tenido en cuenta, ya que se ve que B_{ij}=B_{ij}'=B_{ij}''= constante.

4.4.2 Montaje

El sensor presenta la ventaja de que es robusto y muy fácil de implementar ya que esta formado por un láser que trabaja a una longitud de onda de 0.67 μ m, fibra óptica multimodo de 50 cm de longitud, un atenuador, una lente, un transductor

piezoeléctrico que controla el desplazamiento de la fibra y una cámara CCD conectada a un ordenador que registra los patrones de speckle.

4.4.3 Resultados y conclusiones

Se ha planteado y se ha demostrado la utilidad del sensor de desplazamiento submicrométrico, basado en el producto interno de los patrones de speckle. Se ha conseguido una sensibilidad de 0.1 μ m y un rango dinámico de desplazamiento de aproximadamente 20 μ m. Este sensor puede ser utilizado como base para diferentes aplicaciones como pueden ser medidas de presión, tensión, temperatura, así como para la monitorización de pequeñas estructuras.

4.5 Sensor de desplazamiento/tensión [22]

Zhang y Ansari presentan un método de sensado de desplazamiento el cual permite detectar tensiones internas en estructuras de hormigón. El método esta basado en el análisis de los patrones de speckle, concretamente en como se redistribuyen los modos tras una perturbación. Para ello desarrollan un análisis matemático que permite relacionar la intensidad del speckle antes y después de dicha perturbación.

4.5.1 Descripción teórica

La intensidad espacial del speckle en cualquier punto (x, y) puede ser expresado como [23]:

$$I = \frac{1}{2} Y \sum_{m=1}^{M} \sum_{l=1}^{M} A_m A_l B_{n_m}(U_m R) B_{n_l}(U_l R) \cos(n_m \theta) \cos(n_l \theta)$$
$$\times \exp\{-i[(\beta_m - \beta_l)z - (\phi_m - \phi_l)]\}$$
(4.23)

donde M es el número de modos que viajan por la fibra, R es el radio normalizado del núcleo de la fibra, β_m y β_l son las constantes de propagación y ϕ_m y ϕ_l son las fases aleatorias correspondientes a los modos m y l respectivamente. $Y = n\sqrt{\varepsilon_0/\mu_0}$ es la característica de admitancia del núcleo de la fibra, n es el índice de refracción del núcleo, $U_m = a\sqrt{k^2n^2 - \beta_m^2}$ es el parámetro modal, k=2 π/λ es el número de onda de la luz en el vacío y a es el radio de la fibra. $B_{n_m}(U_m R)$ es una función de Bessel de

primer tipo [24]. Por definición $\Delta\beta_{ml} = \beta_m - \beta_l$ y $\Delta\phi_{ml} = \phi_m - \phi_l$ donde $\Delta\beta_{ml}$ y $\Delta\phi_{ml}$ son la diferencia de la constante de propagación y la diferencia de la fase aleatoria de los modos m y l. Por lo tanto, la ecuación (4.23) puede ser escrita como:

$$I = \frac{1}{2}Y \sum_{m=1}^{M} A_m^2 B_{n_m}^2 (U_m R) \cos^2(n_m \theta)$$

+
$$Y \sum_{m=1}^{M} \sum_{l=m+1}^{M} A_m A_l B_{n_m} (U_m R) B_{n_l} (U_l R)$$

× $\cos(n_m \theta) \cos(n_l \theta) \cos(\Delta \beta_{ml} z - \Delta \phi_{ml})$ (4.24)

Aplicando algunas propiedades trigonométricas y suponiendo que se produce una pequeña perturbación la intensidad será:

$$I' = \frac{1}{2}Y \sum_{m=1}^{M} A_m^2 B_{n_m}^2 (U_m R) \cos^2(n_m \theta)$$

+
$$Y \sum_{m=0}^{M} \sum_{l=m+1}^{M} A_m A_l B_{n_m} (U_m R) B_{n_l} (U_l R) \cos(n_m \theta) \cos(n_l \theta)$$

×
$$[\cos(\Delta \beta_{ml} z - \Delta \phi_{ml}) - \sin(\Delta \beta_{ml} z - \Delta \phi_{ml}) \delta(\Delta \beta_{ml} L)]$$
(4.25)

Por lo tanto, empleando las ecuaciones (4.24) y (4.25) se pueden obtener los cambios producidos por la perturbación,

$$\Delta I = I' - I =$$

$$= Y \sum_{m=1}^{M} \sum_{l=m+1}^{M} -A_m A_l B_{n_m} (U_m R) B_{n_l} (U_l R) \cos(n_m \theta) \cos(n_l \theta)$$

$$\times \sin(\Delta \beta_{ml} z - \Delta \phi_{ml}) \delta(\Delta \beta_{ml} L)$$
(4.26)

Se define la variación de la intensidad absoluta de speckle como,

$$SIV = \iint_{S} |\Delta I| \, dx \, dy \tag{4.27}$$

Y la variación de la intensidad absoluta de speckle normaliza como,

$$\psi_n = NSIV = \frac{\iint_s |\Delta I| \, dx \, dy}{\iint_s I \, dx \, dy} = \frac{1}{C}SIV \tag{4.28}$$

Donde $C = \iint_{S} I \, dx \, dy$, la intensidad total de speckle, es una constante suponiendo una guía de onda sin pérdidas y la conservación de la energía de la luz.

4.5.2 Montaje

Tal y como se puede ver en la figura 4.2 se trata de un montaje sencillo. Como fuente de luz se utiliza un diodo láser que trabaja a una longitud de onda de 670 µm. Para acoplar la luz de la fuente a la fibra multimodo se emplea una fibra monomodo, lo que permite minimizar la sensibilidad debido a factores medioambientales y garantizar el ángulo de incidencia correcto. Para digitalizar los patrones de speckle, al igual que en otros trabajos, se emplea una cámara CCD. Una vez digitalizados los patrones se emplean diferentes técnicas de procesado para poder obtener los resultados deseados. En la práctica se ha empleados varios sensores (fibra) con diferentes longitudes y, para contrastar resultados, se ha utilizado un sensor comercial (LVDT).



Figura 4.2. Ensamblaje del sensor [22]

4.5.3 Resultados y conclusiones

Las pruebas realizadas validan la teoría desarrollada previamente, la cual es consistente con los resultados obtenidos por ordenador. Se ha obtenido un error relativo máximo del 1.37% con un nivel de confianza del 95.42%, lo cual es bastante aceptable. El sensor propuesto puede ser utilizado para la monitorización de la salud de cementos compuestos así como para estructuras que estén formadas por este

material. El único inconveniente es que tiene un rango dinámico reducido lo que implica que su uso esta limitado para pequeños desplazamientos.

4.6 Sensor de flujo sanguíneo [25]

Dietsche et al., presentan un método de sensado que permite la medida del flujo sanguíneo de venas y arterias en tejidos profundos. Para ello utilizaron lo que se denomina espectroscopia de onda difusa (DWS), que es una técnica que permite obtener la función autocorrelación de las fluctuaciones temporales de la intensidad de luz en los patrones de speckle. Esta técnica es muy interesante ya que permite sondear un determinado tejido de forma no invasiva a profundidades de varios centímetros [26]. Algunas de las aplicaciones en las que se ha testeado dicho sensor son:

- Oxímetro de pulso en un dedo: Es un dispositivo, que detectando la cantidad de oxihemoglobina y hemoglobina reducida, permite medir la saturación de oxígeno de la sangre de un paciente.
- Flujo sanguíneo a través de la vena cubital y de la parte izquierda de la frente.

4.6.1 Descripción teórica

La técnica DWS mide la función autocorrelación $g^{(2)}(r,\tau) = \langle I(r,t)I(r,t+\tau)\rangle/\langle I(r,t)\rangle^2$ de las fluctuaciones temporales de la intensidad de luz del patrón de speckle en una posición r. La función de autocorrelación del campo eléctrico dispersado E(r,t), $g^{(1)}(r,\tau) = \langle E^*(r,t)E(r,t+\tau)\rangle/\langle |E(r,t)|^2\rangle$, esta relacionada con $g^{(2)}(r,\tau)$ por la relación de Siegert $g^{(2)}(r,\tau) = 1 + \beta |g^{(1)}(r,\tau)|^2$ (siendo β el factor de coherencia) y ofrece información de los desplazamientos dentro de una muestra, permitiendo, por ejemplo, discriminar movimiento difusivo de movimiento subdifusivo, detección de flujo, o incluso para detectar heterogeneidades dinámicas.

La función autocorrelación implementada en el ordenador está dada por:

$$\langle g_j^{(1)}(\tau) \rangle_N = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (g_{i,j}^{(2)}(\tau) - 1) / \beta_i \right]^{1/2}$$
 (4.29)

donde $g_{i,j}^{(2)}(\tau)$ son las funciones normalizadas de autocorrelación, guardadas antes de ser introducidas al ordenador por el buffer de un correlador. N es el número de muestras.

4.6.2 Montaje

El funcionamiento de este sensor se basa en la medida de las funciones de autocorrelación DWS. Para llevar esto a cabo se emplea un láser que opera a una longitud de onda (λ) de 802 nm y cuya longitud de coherencia es de aproximadamente 100 m. El haz procedente del láser es transportado hacia la piel con una fibra multimodo a salto de índice de 50 µm de diámetro de núcleo y cuya longitud es de 2 m. Para mejorar la SNR de la señal DWS y para proteger la piel a analizar se utiliza un expansor de haz que consiste en una placa de vidrio. El haz reflejado es recogido por receptores formados por un máximo de 32 fibras monomodo, las cuales tienen una longitud de 4 m. Para evitar el contacto con la piel y facilitar el acoplo del haz a través del pelo se ha utilizado una punta con forma de embudo, la cual se enrosca al conjunto de fibras, y en cuyo extremo se ha colocado una lente convexa. Estas fibras son aisladas con un material especial y guiadas a un detector formado por un array de fotodiodos de avalancha (APD). Por último, la señal de salida de cada fotodetector es enviada a un correlador de 32 canales que permite la computación paralela de 32 funciones de autocorrelación.

Tras realizar mediciones en el dedo índice, en la vena cubital y en la frente, se obtiene como resultado que la detección DWS multispeckle permite medir variaciones del pulso en tejidos dinámicos.

4.6.3 Resultados y conclusiones

En comparación con la detección multispeckle de una cámara, la resolución en tiempo real es similar, pero debido al uso de APDs y al correlador multicanal ofrece una resolución superior en tiempo de retraso, es decir, permite monitorizar patrones de speckle a mayor velocidad. Los receptores de fibra permiten recoger la luz dispersada de muestras que no se puede acceder con facilidad, lo que permite su uso en aplicaciones endoscópicas. Sin embargo, los APDs también tienen algunos inconvenientes como es el tiempo muerto y un considerable afterpulsing.

La resolución temporal y su alta sensibilidad hacen que el método sea atractivo para la medicina, como puede ser, la monitorización de la perfusión en áreas de la corteza cerebral.

4.7 Conclusión

En este capítulo se han mostrado algunos sensores que utilizan la correlación del patrón de speckle para realizar medidas sobre diferentes tipos de parámetros, ya sean físicos o biológicos. Para ello se requiere conocer las propiedades de la fibra, las cuales no existen de manera específica con referencia al patrón de speckle. Por lo tanto, en este trabajo se caracterizará y se analizará como se comporta la fibra con respecto al patrón de speckle.

Capítulo 5

Trabajos experimentales y resultados obtenidos

5.1 Introducción

En este capítulo se describen los trabajos experimentales y los resultados obtenidos en la caracterización del patrón de speckle en fibras ópticas multimodo. En todas las experiencias se utiliza una fuente láser, altamente coherente como el láser He-Ne (λ =632.8 nm) o de baja coherencia como los diodos láseres (λ =620 nm). Las fibras ópticas multimodo utilizadas son de material de plástico (PMMA), conocidas como fibras ópticas plásticas (POF). En la Tabla 5.1 se describe las características de estas fibras.

5.2 Procedimiento de caracterización

La fuente de luz es acoplada directamente en el extremo de entrada de la fibra, la cual se mantiene fija durante las pruebas y medidas experimentales. El extremo de salida de la fibra se encuentra fijado a la cámara CCD mediante un dispositivo de plástico adaptado a la longitud de focalización de la lente. Obteniendo de esta manera una mancha de luz aproximadamente centrado sobre la superficie del CCD. La cámara CCD captura una secuencia de imágenes en el tiempo y es almacenado en un archivo de vídeo en el ordenador. Los datos almacenados en el ordenador son procesados mediante un programa diseñado en Matlab y generará una señal a partir de las imágenes del patrón de speckle registrados en el tiempo. En la figura 5.1 se muestra el esquema del procedimiento de caracterización. La cámara CCD es de tipo webcam con una resolución máxima de 640x480 con una tasa de hasta 30 frames por segundo, lo que es suficiente para nuestro propósito. Esta es conectada al ordenador a través del puerto USB.



Figura 5.1. Esquema del procedimiento de caracterización del patrón de speckle.

5.2.1 Fibras ópticas plásticas

En los experimentos llevados a cabo se han utilizado fibras ópticas plásticas multimodo de diferentes diámetros de núcleo. Son fibras fuertemente multimodales desde la centena de modos hasta varios millones de modos. El interés de utilizar este tipo de fibras es por su excelente flexibilidad y adaptabilidad, y particularmente por su bajo costo. En la Tabla 5.1 se muestran algunas de sus características. El número de modos han sido calculados en referencia a la longitud del láser de He-Ne, λ = 632,8 nm.

Un resumen de las características de estas fibras:

- Fibra de 1 mm: Este tipo de fibra tiene un núcleo relativamente grande con respecto a los otros dos tipos de ondas. Debido al diámetro de este se propagan a través de la fibra un elevado número de modos, lo que hace que la fibra sea bastante sensible a efectos externos, como pueden ser vibraciones y aspectos medioambientales. El tamaño de los gránulos del patrón de speckle a la salida se caracterizan por tener un tamaño bastante pequeño. Cabe destacar que debido al número tan elevado de modos, el ruido modal tiene bastante influencia en la fibra. Una ventaja de esta fibra es que es bien robusta por el diámetro del núcleo.
- Fibra de 250 μm: Este tipo de fibra es similar a la explicada anteriormente, con la diferencia de que esta muestra un tamaño de núcleo menor. Debido a esto, el número de modos es más reducido, por lo que a la salida se puede observar un patrón de speckle con menos gránulos y de un tamaño mayor. Una desventaja es su diámetro, la cuarta parte del anterior por lo que la hace más frágil.
- Fibra de 50 μm: Se trata de una fibra con un diámetro muy pequeño, lo que provoca que sea difícil inyectarle la luz del láser en su entrada. Este tipo de fibra, debido al reducido tamaño del núcleo, presenta una cantidad de modos bastante pequeña a la salida de la fibra. El patrón de speckle esta formado por pocos modos y con un tamaño bastante grande comparado con las dos fibras anteriores. Es una fibra un poco más robusta que la de 250 μm de núcleo por que tiene un diámetro total de 500 μm.

Estas fibras son bastante utilizadas en comunicaciones de cortas distancias y en aplicaciones de sensores ópticos, y se encuentran disponibles comercialmente.

| Material del núcleo | Diámetro del núcleo (µm) | Índice de refracción (n_{co}) | Apertura Numérica | Cantidad de modos |
|----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------|
| PMMA (salto de índice) | 980 | 1.49 | 0.5 | 3.082.691 |
| PMMA (salto de índice) | 240 | 1.49 | 0.5 | 184.884 |
| GI-POF (índice gradual) | 50 | 1.342 – 1.358 | 0.2 | 665 |

Tabla 5.1. Fibras ópticas plásticas utilizadas para la obtención del patrón de speckle

5.2.2 Procesado de imágenes

La herramienta empleada para el procesamiento de imágenes es el MATLAB. Se trata de un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C/C++ o Java[™].

Ayudándonos de esta potente herramienta se ha desarrollado una función para el procesado de las imágenes, la cual implementa el método de las diferencias y un conjunto de filtros.

Los métodos basados en diferencias son la forma más intuitiva y simple de comprobar la diferencia entre cuadros de speckle. Consiste en realizar la diferencia entre dos cuadros y hallar su valor absoluto, lo cual registra los cambios de intensidad para cada pixel en dos instantes. Así, las zonas más oscuras o más brillantes de la imagen diferencia denotarán poca o mucha actividad, respectivamente. El modelo de diferencias implementado responde a la siguiente fórmula:

$$D(k) = \sum_{k=1}^{N} |I(k+1) - I(k)|$$
(5.1)

Donde I(k + 1) y I(k) representan la diferencia entre dos imágenes consecutivas, cuyo resultado es almacenado en el vector D(k). Gracias a este modelo se puede analizar la variación del patrón de speckle a lo largo del tiempo.

Para el caso del filtrado se han empleado filtros butterworth paso bajo y paso banda, en función del objetivo del experimento. La elección de implementar filtros butterworth es debido a su respuesta. Una característica destacada de este tipo de filtro es que muestra una respuesta plana en este intervalo, al contrario de lo que ocurre con otro tipo de filtros como puede ser el chebyshev, en el cual puede aparecer cierto rizado. La forma de implementar un filtro butterworth paso bajo es la siguiente:

$$[N, Wn] = BUTTORD(Wp, Ws, Rp, Rs)$$
(5.2)

donde N es el orden más bajo posible del filtro digital, el cual tiene unas perdidas no superiores a Rp dBs en la banda de paso y al menos Rs dBs fuera de la banda. Wp y Ws son las frecuencias límite de la banda de paso y de la banda de rechazo, normalizadas entre 0 y 1, siendo 1 la frecuencia de Nyquist (fs/2). Wn es la frecuencia natural o frecuencia a 3 dB expresada en rad/seg [27].

Una vez obtenida la frecuencia Wn y el orden del filtro se obtiene la función de transferencia de la siguiente forma:

Para implementar un filtro paso banda las instrucciones son las mismas con la diferencia de que ahora Wp y Ws son dos vectores formados por dos frecuencias cada uno:

$$W_p = [W_1, W_2] \qquad W_s = [W_3, W_4]$$
 (5.4)

Como se puede ver en la figura 5.2, W_1 y W_2 representan los límites de la banda de paso y W_3 y W_4 los límites de la banda de rechazo.



Figura 5.2. (a) Representación de los parámetros de un filtro paso bajo. (b) Representación de los parámetros de un filtro paso banda.

5.3 Caracterización de la vibración

La vibración es un parámetro físico de mucho interés industrial y de seguridad. Existen muchos tipos de vibraciones que se pueden dar en diferentes circunstancias, ya sean sísmicas por el movimiento de tierra, de estructuras, de dispositivos o aparatos como un motor, etc. Además de tener diferentes frecuencias, conocidas o aleatorias, tienen una amplitud. El objetivo de esta experiencia es conocer si a partir de registrar el patrón de speckle en el tiempo podemos extraer una señal que relacione la frecuencia obtenida con la frecuencia de la señal perturbadora. Para este fin, se genera una onda mecánica a través de un altavoz controlado en frecuencia en un tramo de la fibra (figura 5.3).

Para la implementación se han utilizado dos fuentes coherentes diferentes, un láser He-Ne, que trabaja a una longitud de onda de 632,8 nm, y un diodo láser de baja coherencia que trabaja a una longitud de onda de 620 nm. Además se ha utilizado un pequeño altavoz de unos 8 cm de diámetro, fibra óptica plástica de diferentes longitudes y grosores, una webcam y un ordenador para poder almacenar y procesar los patrones de speckle.



Figura 5.3. Montaje experimental para la medida de vibración.

Resultados

Al altavoz se le puede introducir, con ayuda del generador de señal, señales triangulares, sinusoidales o rectangulares. En función del tipo de entrada la respuesta del sistema es diferente, por lo que, se va a proceder a analizar el patrón de speckle para todos las formas de onda. Se toman muestras para diferentes frecuencias y se emplean tres tipos de fibra, 1 mm, 250 µm y 50 µm, además de filtros paso bajo en el procesado de la señal.

Debido a que la frecuencia de la perturbación es conocida, se ha utilizado un filtro concreto para cada frecuencia, para así obtener el mejor resultado posible. En el caso de que se obtengan buenos resultados, se intentaría implementar un filtro genérico para todas las frecuencias. Cabe destacar que, para todas las medidas, la amplitud del generador es máxima y no se varía en ningún momento. Las muestras tomadas son de una duración de 30 segundos, aplicando la perturbación pasados aproximadamente 5 segundos. Como primer caso, se analiza la diferencia que existe en emplear a la entrada un láser He-Ne (fuente altamente coherente) y un diodo láser (fuente de baja coherencia), utilizando fibra de 1 mm. Después se analiza el patrón de speckle para todos los tipos de fibras, utilizando como fuente coherente el diodo láser.

A. Resultados con fibra de 1 mm (Láser He-Ne)

A.1. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 0,5 Hz. Como se puede observar en la figura 5.5, las señales obtenidas no son perfectas, como son las que se pueden obtener a la salida del generador, sin embargo, podemos decir que, las frecuencias de las señales obtenidas, se corresponden con una frecuencia de 0,5 Hz, salvo en el caso de la señal triangular. Un detalle importante es que, aunque la amplitud del generador ha permanecido constante, la amplitud de la señal obtenida varía aleatoriamente. Se aprecia también el paso de la posición de reposo (nivel de señal bajo) a la posición de fibra perturbada por la vibración, en torno a los 5 segundos. Además las medidas se han realizado sobre una fibra de 2 m de longitud, la cual estaba enrollada en un tubo de PVC de unos 10 cm de diámetro, con el fin de mantener fija la fibra a la hora de medir y evitar así, la introducción de ruido. En la figura 5.4 se puede apreciar el aspecto que muestra un patrón de speckle para una fibra de 1 mm y un láser de He-Ne. Como se mostró en una tabla anterior, está formado por varios millones de modos, los cuales muestran un tamaño considerablemente pequeño.



Figura 5.4. Patrón de speckle característico de una fibra de 1 mm utilizando un láser de He-Ne.



Figura 5.5. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 0.5 Hz con diferentes tipos de onda.

A.2. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 1 Hz. En este segundo caso, para una perturbación de 1 Hz (figura 5.6), la frecuencia de las señales obtenidas tras el procesado, coincide con la frecuencia de la perturbación a la que se somete la fibra. Con respecto a las formas de onda obtenidas en el caso anterior, vemos que han variado, pareciéndose más a una sinusoide, con amplitudes aleatorias pero más o menos constantes. Para el caso de la señal triangular, contrastando las gráficas para las frecuencia de 0,5 Hz y 1 Hz, se puede observar como al aumentar la frecuencia ha mejorado ligeramente la amplitud, al contrario que para el caso de la sinusoide y la onda rectangular. Un concepto importante es que, a pesar de que a la salida del generador se tiene una onda rectangular o triangular, los resultados obtenidos tras el procesado muestran una señal sinusoidal. Esto es debido a que no se realiza una transformación lineal, si no que se va transformando en diferentes tipos de onda, onda eléctrica a la salida del generador, onda acústica a la salida del altavoz, onda óptica a través de la fibra y onda eléctrica a la salida de la cámara (figura 5.3).



Figura 5.6. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 1 Hz con diferentes tipos de onda.

A.3. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 2 Hz. Tal y como se puede observar en la figura 5.7, para la frecuencia de 2 Hz, las formas de onda para los tres tipos de perturbaciones son bastante similares entre sí, tanto en amplitud como en frecuencia. La amplitud, a pesar de ser aleatoria, muestra unos resultados bastante constantes, es decir, sin mucha diferencia entre las amplitudes de la propia onda. Como ocurría para casos anteriores, la frecuencia de la señal obtenida tras el análisis mediante Matlab, coincide con la frecuencia de la vibración aplicada a la fibra mediante el altavoz. En cualquiera de las tres gráficas se puede observar el aumento de la frecuencia, ya que la onda no se aprecia tan claramente como antes, donde la frecuencia era menor.



Figura 5.7. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 2 Hz con diferentes tipos de onda.

A.4. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 5 Hz. Por último, para la frecuencia de 5 Hz, se puede decir que las señales obtenidas muestran una frecuencia correcta, es decir, se corresponde con la vibración aplicada con al altavoz. Sin embargo, la amplitud de las señales muestra un aspecto diferente al resto de las frecuencias analizadas previamente (figura 5.8). Se puede ver que parecen señales moduladas en amplitud. Una explicación a este fenómeno es que, una parte de la vibración obtenida a la salida de la fibra óptica es reflejada hacia el interior de nuevo, produciendo interferencia entre la señal propagada y la señal reflejada. Este fenómeno podría ser objeto de estudio en futuras experiencias, con el fin de saber a ciencia cierta de que manera afecta la señal reflejada a la señal propagada en las fibras ópticas plásticas.



Figura 5.8. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 5 Hz con diferentes tipos de onda.

A.5. Comparación de resultados. En la figura 5.9 se presentan los resultados cuando la fibra de 1 mm es perturbada con una onda rectangular a las frecuencias de 0,5, 1, 2 y 5 Hz. Tal como se ha comentado anteriormente, las frecuencias de las señales se corresponden bastante bien con las frecuencias del generador aplicadas al altavoz. Sin embargo, las amplitudes varían aleatoriamente, y además disminuyen a medida que aumenta la frecuencia. En la figura 5.9 (a)-(d) se observa sobre la envolvente una ligera modulación que se hace más importante cuando la frecuencia aumenta. A pesar que el fenómeno de propagación es bastante complejo en la fibra, la sobre-modulación podría deberse a efectos de interferencia de segundo orden. Es decir, una parte de la intensidad de luz en el extremo de salida retorna en sentido contrario por la misma fibra, generando nuevas interferencia entre modos. Recordemos que en incidencia normal en una fibra de vidrio, el coeficiente de reflectancia es del 4%.



Figura 5.9: Comparación de resultados obtenidos con frecuencias de vibración de 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz y 5 Hz, aplicados a una fibra de 1 mm de diámetro y utilizando una onda rectangular.

B. Resultados con fibra de 1 mm (Diodo Láser)

B.1. Resultado cuando se aplica una frecuencia de 1 Hz. En la figura 5.11 se puede observar que, tras aplicar una onda cuadrada como perturbación, la señal a la salida es muy irregular. Al igual que en otros casos, la amplitud de la señal producida por el generador permanece constante, sin embargo, a la salida se muestra una señal de amplitud aleatoria. A diferencia de otros casos, la perturbación comienza a los 15 segundos aproximadamente, la cual se puede apreciar por el cambio de la amplitud de la señal de 0,2 hasta 1. Destacar que se ha usado una fibra de 2 metros de longitud y se ha colocado de la manera más recta posible, sin hacer ninguna curvatura significativa. Debido a la forma de onda obtenida tras el procesado no se ha podido obtener la frecuencia de la perturbación aplicada por el altavoz a la fibra óptica.



Figura 5.10. Patrón de speckle característico de una fibra de 1 mm utilizando un diodo láser.



Figura 5.11: Señal procesada tras aplicar una vibración de 1 Hz con una onda rectangular.

B.2. Resultado cuando se aplica una frecuencia de 5 Hz. En la figura 5.12 se puede ver que, al igual que ocurre para el láser de He-Ne, a medida que aumenta la frecuencia la amplitud de la señal disminuye. Al igual que ocurre para el caso anterior, no es posible obtener la frecuencia de la perturbación de la señal procesada en Matlab.

B.3. Comparación de resultados. En la figura 5.13 se muestra una comparación gráfica de las señales obtenidas con los dos tipos de fuente. La principal diferencia es que, el láser es altamente coherente y, sin embargo, el diodo láser es de baja coherencia. Esto se puede observar en gran medida en la amplitud de la señal, que a igualdad de condiciones tanto de longitud de fibra como de frecuencia, la señal obtenida del diodo láser es mucho más débil. Esto implica que las variaciones en el speckle no sean tan perceptibles y sea más difícil de obtener una relación entre la frecuencia de la perturbación y la frecuencia obtenida tras realizar el procesado mediante Matlab.



Figura 5.12. Señal procesada tras aplicar una vibración de 5 Hz con una onda rectangular.



Figura 5.13: Comparación de resultados obtenidos con frecuencias de vibración de 1 Hz y 5 Hz para un láser de He-Ne y un diodo láser. Las fuentes se han aplicados a una fibra de 1 mm de diámetro utilizando una onda rectangular como perturbación.

C. Resultados con fibra de 250 µm (Diodo Láser)

C.1. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 0,5 Hz. En este caso se ha reducido el tamaño del núcleo, lo que implica una reducción de los modos transportados por la fibra. Como se hizo anteriormente, se han colocado 2 metros de fibra de la manera más recta posible. En la figura 5.14 se pueden observar los resultados obtenidos, los cuales pueden ser comparados únicamente con la fibra de 1 mm y la misma frecuencia de perturbación (figura 5.5). Se puede apreciar que las respuestas son casi planas para los tres tipos de onda, siendo la triangular el peor caso, como ocurre en el caso del láser de He-Ne y la fibra de 1 mm.



(c) Onda rectangular de 0,5 Hz

Figura 5.14. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 0 ,5 Hz con diferentes tipos de onda.



Figura 5.15: Patrón de speckle característica de una fibra de 250 µm utilizando un diodo láser.

C.2. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 1 Hz. Para esta frecuencia, tal y como se muestra en la figura 5.16, al aumentar la frecuencia los resultados mejoran ligeramente para el caso de la señal triangular y disminuye un poco la amplitud para el caso de las señal sinusoidal y rectangular.



Figura 5.16. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 1 Hz con diferentes tipos de onda.

Es evidente, que con estas ondas tan irregulares no se puede obtener ninguna frecuencia para ningún tipo de onda, al contrario de lo que ocurría en el caso de la fibra de 1 mm y el láser de He-Ne, donde se obtenían las frecuencias correctamente para todos los tipos de onda y frecuencias. Si se compara el resultado con el obtenido con el diodo láser y la fibra de 1 mm (únicamente la onda rectangular), (figura 5.13b), a pesar de que las ondas son irregulares para los dos casos, la amplitud en el caso de la fibra de 1 mm es mayor.

C.3. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 2 Hz. A pesar de que se ha aumentado la frecuencia al doble, los resultados son muy similares a la frecuencia de 1 Hz (figura 5.17). Para el caso de la onda rectangular se puede observar que disminuido la amplitud de la onda, sin embargo, para los otros dos tipos de onda la amplitud prácticamente es igual. Recordar que en ningún momento se cambia la amplitud de la onda del generador con el fin de poder contrastar los resultados.



Figura 5.17. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 2 Hz con diferentes tipos de onda.

C.4. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 5 Hz. En la figura 5.18 se puede observar que, al aumentar la frecuencia, los tres tipos de onda muestran un comportamiento similar a lo largo del tiempo.

C.5. Comparación de resultados. A modo de resumen, en la figura 5.19 se muestran los resultados para una onda rectangular a todas las frecuencias. Como ocurría para la fibra de 1 mm a medida que aumenta la frecuencia la amplitud de la señal disminuye ligeramente. Sin embargo, no se llega apreciar el efecto de sobre-modulación que aparecía en el caso del láser de He-Ne (figura 5.9).

Otro aspecto importante es que, para este diámetro de fibra y, en comparación con el diodo láser y la fibra de 1 mm, tampoco se ha conseguido obtener relación con la frecuencia de perturbación de la fibra, algo lógico si se tiene en cuenta que a través de la fibra óptica viajan un menor número de modos.



Figura 5.18. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 5 Hz con diferentes tipos de onda.



Figura 5.19: Comparación de resultados obtenidos con frecuencias de vibración de 0,5Hz, 1 Hz, 2 Hz y 5 Hz, aplicados a una fibra de 250 µm de diámetro y utilizando una onda rectangular.

D. Resultados con fibra de 50 µm (Diodo láser)

D.1. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 0,5 Hz. En la figura 5.21 se puede apreciar que, las ondas para la perturbación triangular y sinusoidal, son similares entre si, a pesar de ser diferentes tipos de onda. Las tres muestran un comportamiento similar ya que únicamente se observa el cambio del estado de reposo al estado de perturbación y la baja amplitud que muestran ambas señales tras el procesado. En ninguno de los casos, es posible obtener una relación entra la onda aplicada al sistema y la onda obtenida a la salida.



Figura 5.20: Patrón de speckle característico de una fibra de 50 μm utilizando un diodo láser.



Figura 5.21. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 0.5 Hz con diferentes tipos de onda.

D.2. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 1 Hz. Comparando la figura 5.22 con la mostrada anteriormente para la frecuencia de 0,5 Hz, se puede ver que, para el caso de todas las perturbaciones aplicadas por el altavoz, el resultado es ligeramente mejor, ya que se obtienen tipos de onda con un aspecto más claro, es decir, la onda no es tan plana como para el caso anterior. A pesar de ello, la señal no guarda ninguna relación con la perturbación aplicada.

D.3. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 2 Hz. Para este caso (figura 5.23) los resultados son muy parecidos que para la frecuencia anterior. La única diferencia es que se puede ver el aumento de la frecuencia en las formas de onda.





(c) Onda rectangular de 1 Hz

Figura 5.22. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 1 Hz con diferentes tipos de onda.



Figura 5.23. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 2 Hz con diferentes tipos de onda.

D.4. Resultados cuando se aplica una frecuencia de 5 Hz. Tal y como se muestra en la figura 5.24, a pesar de aumentar la frecuencia, los resultados no varían demasiado con respecto a los datos anteriores. Al igual que ocurría en otros casos no es posible obtener la frecuencia de ninguna de las salidas obtenidas, pues muestran unas formas de onda muy irregulares. Si comparamos estos resultados con lo de frecuencias anteriores se puede observar el fenómeno comentado para otros tipos de fibra, al aumentar la frecuencia de la señal perturbadora disminuye la amplitud de la señal procesada.



Figura 5.24. (a), (b) y (c): Señales procesadas tras aplicar una vibración de 5 Hz con diferentes tipos de onda.

D.5. Comparación de resultados. En la figura 5.25 se muestran los resultados para una perturbación rectangular a distintas frecuencias. Se puede observar que la amplitud es aleatoria en todos los casos, y que en ningún caso es posible medir la frecuencia. En la fibra de 1 mm y empleando un láser de He-Ne se podía observar un efecto de sobre-modulación que para el diodo láser y este tipo de fibra no se aprecia.

Esta fibra muestra poca sensibilidad ya que se caracteriza por tener un núcleo bastante pequeño en comparación con otros tipos de fibra, lo cual implica que el número de modos que viajan a través de la fibra sean solo varios cientos (tabla 5.1). Al existir pocos modos el tamaño de los gránulos de speckle a la salida son mayores, lo que implica que, ante vibraciones, los cambios sean menos perceptibles a la salida.



Figura 5.25. Comparación de resultados obtenidos con frecuencias de vibración de 0,5Hz, 1 Hz, 2 Hz y 5 Hz, aplicados a una fibra de 50 µm de diámetro y utilizando una onda rectangular.
5.4 Medida de perturbaciones simultáneas en la fibra

En la experiencia anterior se ha analizado el patrón de speckle para una única fuente de vibración, utilizando un altavoz. Aprovechando el montaje, para este nuevo análisis, se añade un altavoz adicional. El objetivo de este segundo experimento es intentar discernir las vibraciones de cada uno de los altavoces, empleando para ello filtros paso bajo y paso banda.

El sistema es similar al anterior, con la diferencia que se ha añadido un altavoz adicional, de dimensiones similares. Como fuente coherente se emplea un diodo láser que trabaja a una longitud de onda de 620 nm. En este caso únicamente se ha empleado fibra de 1 mm, por tratarse de una fibra más sensible ante las perturbaciones. Como se ha hecho para experiencias anteriores, se han aplicado filtros específicos para cada frecuencia. En este caso se ha aplicado un filtro paso bajo para la frecuencia baja y un filtro paso banda para la más alta. Destacar que se ha utilizado para todos lo casos fibra de 2 metros de longitud y se ha colocado de la forma mas recta posible, evitando curvaturas pronunciadas que provoquen la pérdida de modos, y por tanto, pérdida de información.



Figura 5.26. Esquema del sistema implementado para la medida de vibraciones simultaneas.

A. Resultados con frecuencias de perturbación de 0,5 Hz y 3 Hz.

A.1. Resultados cuando se aplican dos ondas cuadradas. Como se puede observar en la figura 5.27 los resultados obtenidos no son los esperados. En el caso de la señal de 0,5 Hz la señal que se obtiene es bastante deforme, pues es casi plana en la zona de la vibración. En el caso de la perturbación a 3 Hz se obtiene una señal con amplitud aleatoria pero sin embargo mantiene una frecuencia constante. El único inconveniente es que la frecuencia de la señal obtenida no se corresponde con la de la vibración, ya que es de 3,3 Hz.



Figura 5.27. (a) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso bajo. (b) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso banda.



Figura 5.28. Espectro de la señal para dos señales cuadradas de 0,5 Hz y 3 Hz a la entrada.

Para comprobar la veracidad de los resultados se analiza el espectro de la señal antes de ser procesada (figura 5.28). Como se puede ver en el espectro existe señal para las frecuencias de 1 Hz, 2,37 Hz y 3,57 Hz, por lo que se puede decir que las señales obtenidas tras el procesado no se corresponden con las frecuencias de las perturbaciones aplicadas a la fibra. En el caso de la señal de 3,3 Hz obtenida, se puede decir que se ha obtenido parte de la señal adyacente (3,57 Hz) que aparece en el espectro.

A.2. Resultados cuando se aplican dos ondas sinusoidales. En la experiencia de una única vibración se pudo sacar como conclusión que, dependiendo del tipo de señal de la perturbación, los resultados eran diferentes, de aquí que se analicen dos ondas sinusoidales. En la figura 5.29a se ve que la forma de onda es muy irregular, apenas existe una forma de onda clara. Sin embargo, para el caso de la figura 5.29b, a pesar de que la amplitud de la señal es variante con el

tiempo, la frecuencia de dicha señal se corresponde con los 3 Hz introducidos por el altavoz. En la figura 5.30 se pueden ver el espectro de la señal en el cual se ha obtenido diferentes señales a distintas frecuencias. A diferencia de las señales cuadradas, aparece señal en 3 Hz, sin embargo, sigue sin existir señal a 0,5 Hz. No obstante, las únicas frecuencias claras que existen son a 1,2 Hz y 6 Hz siendo el resto ruido.



Figura 5.29: (a) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso bajo. (b) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso banda.



Figura 5.30. Espectro de la señal para dos señales sinusoidales de 0,5 Hz y 3 Hz a la entrada.

A.3. Resultados cuando se aplica una onda sinusoidal (0,5 Hz) y una onda cuadrada (3 Hz). Es posible que exista interferencia entre los mismos tipos de onda, así que se ha analizado otro caso, pero esta vez, combinando dos perturbaciones. En el primer caso (figura 5.31a), la señal tras ser analizada aparece casi plana, con una forma muy similar a los dos casos anteriores. En el segundo caso, (figura 5.31b), la señal muestra una frecuencia de 2,94 Hz, que es una medida muy próxima a los 3 Hz. En la figura 5.32 se muestra el espectro, y



Figura 5.31: (a) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso bajo. (b) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso banda.



Figura 5.32. Espectro de la señal de salida para una señal sinusoidal de 0,5 Hz y una señal cuadrada de 3 Hz a la entrada.

como ocurría para el caso anterior, en 0,5 Hz no aparece señal. Sin embargo, aparece un pico en 2,93 Hz, próximo a 3 Hz. El resto de señal aparece aproximadamente en 1 Hz, 6,16 Hz, 7,2 Hz y 8,3 Hz. Una diferencia con respecto al caso de las dos señales sinusoidales es que el espectro no es tan claro, apareciendo demasiado ruido a lo largo de todo el eje de frecuencias.

A.4. Conclusiones. Como conclusión, podemos decir que para ninguna de las tres combinaciones de la perturbación se ha conseguido obtener la señal de 0,5 Hz. Para el caso de la señal de 3 Hz, se ha conseguido obtener la frecuencia correcta tras el procesado o una frecuencia próxima a ella. Sin embargo, a pesar de ello, observando el espectro se puede decir que únicamente se ha obtenido ruido. Cabe destacar que aunque la amplitud de la perturbación ha permanecido constante durante todas las medidas, el resultado después de procesar las muestras de los patrones de speckle muestran amplitudes

aleatorias. Para comprobar que al menos se puede obtener una de las frecuencias y que no se trata de ruido, se procede a realizar el mismo análisis pero para dos frecuencias un poco mayores, concretamente, 1 Hz y 5 Hz.

B. Resultados con frecuencias de perturbación de 1 Hz y 5 Hz.

B.1. Resultados cuando se aplican dos ondas cuadradas. Para el caso de baja frecuencia, 1 Hz, la forma de onda sigue sin ser muy precisa, por lo que no se puede obtener dicha frecuencia (figura 5.33a). Sin embargo, para la frecuencia mas alta, la de 5 Hz, como ocurría para otros casos, se obtiene una frecuencia, pero ligeramente desviada, 4,83 Hz. También se puede observar que la amplitud varía a lo largo del tiempo, a pesar de que la perturbación provocada por el altavoz es constante. En la figura 5.34, correspondiente al espectro, se puede observar que hay señal a las frecuencias de 2,34 Hz, 4,83 Hz, 5,66 Hz y 7,26 Hz. Teniendo en cuenta esto, se comprueba el hecho de no haber podido obtener la frecuencia de 1 Hz, y si la de 4,83 Hz, muy próxima a 5 Hz.



Figura 5.33: (a) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso bajo. (b) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso banda.



Figura 5.34. Espectro de la señal de salida para una señal cuadrada de 1 Hz y una señal cuadrada de 5 Hz a la entrada.

B.2. Resultados cuando se aplican dos ondas sinusoidales. En la figura 5.35a se observa que para el caso de la frecuencia baja, 1 Hz, la forma de onda sigue siendo irregular a pesar de haber cambiado de ondas rectangulares a ondas sinusoidales. En la figura 5.35b, se puede observar el mismo resultado que para la combinación de ondas anteriores, una señal de 4,8 Hz. Si se observa la figura 5.36, aparece señal a las mismas frecuencias, con la diferencia de que ahora, la potencia de todas las señales es mucho más débil (0,7 Hz, 2,34 Hz, 4,8 Hz, 5,6 Hz y 7,26 Hz). Se puede observar que la única señal destacada es a la frecuencia de 2,34 Hz, siendo el resto ruido.



Figura 5.35: (a) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso bajo. (b) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso banda.



Figura 5.36. Espectro de la señal de salida para una señal sinusoidal de 1 Hz y una señal sinusoidal de 5 Hz a la entrada.

B.3. Resultados cuando se aplica una onda sinusoidal (1 Hz) y una onda cuadrada (5 Hz). Atendiendo a los resultados de la figura 5.37, podemos decir que no existe ninguna diferencia con respecto a los casos anteriores a pesar de haber cambiado los tipos de onda de la perturbación. Sin embargo, en el espectro, se puede observar que hay señal en los 0,93 Hz, y en los resultados no se obtiene una forma de onda clara. Esto podría ser debido a que existe señal más fuerte a frecuencias más bajas, la cual enmascara los 0,93 Hz, pues el filtro recoge todas las ondas inferiores a 1,1 Hz, al tratarse de un filtro paso bajo. También es importante destacar que las señales son muy débiles salvo para la frecuencia de 5,6 Hz.



Figura 5.37: (a) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso bajo. (b) Señal obtenida tras filtrar la muestra mediante el filtro paso banda.



Figura 5.38. Espectro de la señal de salida para una señal sinusoidal de 1 Hz y una señal rectangular de 5 Hz.

B.4. Conclusión. Como conclusión podemos decir que para todos los casos ha sido imposible obtener la frecuencia inferior de las perturbaciones. Sin embargo, para el caso de la frecuencia superior, a pesar de haber conseguido aproximarse bastante a la frecuencia correcta, se ha podido ver en el espectro que prácticamente todo lo obtenido es ruido. Otro dato importante es que, en todos los espectros han aparecido señales a diversas frecuencias. Tal y como se explicó en la experiencia anterior, existe cierta parte de la señal que es reflejada de nuevo hacia el interior de la fibra, lo que provoca nueva interferencia entre modos. Al existir además dos vibraciones simultáneas el fenómeno de interferencia es mayor, lo que provoca que sea complicado analizar esta situación.

En futuros trabajos se puede analizar esta misma experiencia pero tomando un tramo de fibra mayor, con el objetivo de intentar reducir el ruido, el cual nos impide obtener la frecuencia correctamente.

5.5 Medida del contraste

Se trata de una medida de intensidades, máxima y mínima, sobre el patrón de speckle en la salida de la fibra. Como el fenómeno de speckle es debido a la interferencia modal, se trata de verificar si con el método de extracción de señal podamos tener una información sobre el contraste, esto es realizando medidas experimentales en función de la distancia. Recordemos que la interferencia intermodal es totalmente aleatoria, por lo que podemos adelantar una situación de baja coherencia.

La visibilidad o contraste es definida como:

$$V = \frac{Imax - Imin}{Imax + Imin}$$
(5.5)

La visibilidad puede tomar valores entre 0 y 1, siendo cero cuando no existe contraste y la muestra es completamente homogénea, es decir, no aparecen gránulos. Esto indica que nos encontramos fuera de la longitud de coherencia de la fuente.

A diferencia de los montajes anteriores, este es muy sencillo de implementar, ya que en este caso no se provoca ninguna perturbación en la fibra, por lo que se prescinde de los altavoces y generadores de señal. Se utiliza como fuente coherente un diodo láser (λ =620 nm), fibra óptica de plástico de 1 mm, una webcam y un ordenador.

Al no existir perturbación en la fibra óptica, el patrón de speckle es estático, es decir, no varía a lo largo del tiempo. Las medidas a realizar consisten en medir este patrón de speckle estático para diferentes longitudes de fibra. Es decir a partir de una longitud determinada, se corta la fibra del lado de la fuente. Concretamente, se almacenan patrones de speckle para unas longitudes que van desde 28 metros a 2 metros. Se tratan de bastantes metros de fibra por lo que se ha enrollado en un tubo de PVC para realizar las medidas.



Figura 5.39. Sistema implementado para la medida del contraste.

Resultados

Para analizar el contraste se han tomado muestras de diferentes tamaños al patrón de speckle. De este modo se puede observar como afectan en la medida de este parámetro u otros que se puedan medir posteriormente. En la figura 5.40 se pueden ver dichas muestras. En todas las gráficas se ha representado el contraste medio frente a la distancia además de una línea de ajuste, que no es más que una aproximación través de mínimos cuadrados.



Figura 5.40. Muestras tomadas sobre el patrón de speckle.

Como se puede observar en la figura 5.41 el contraste de todas las muestras tienen la misma tendencia ascendente, sin embargo muestran diferencias en cuanto al contraste medio total.



Figura 5.41. Contraste medio del patrón de speckle para diferentes distancias con una fibra de 1 mm.

Atendiendo a la fórmula de la visibilidad los resultados no son muy coherentes, ya que, las curvas tendrían que seguir una tendencia descendente, pues a 28 metros, al estar más próximo a la longitud de coherencia de la fuente, se tiene que obtener menor contraste (más homogéneo) que a la distancia de 2 metros. Estos errores son debidos a que la cámara, en función de la luz que recibe, ajusta automáticamente el nivel de exposición.

Debido al posible problema con el nivel de exposición, se realiza el mismo procesado con la diferencia de que se toman muestras con el nivel de exposición fijo.

Como se puede observar en la figura 5.42, los resultados han mejorado ligeramente, ya que no muestran tanta pendiente como en el caso anterior. Sin embargo, a pesar de que se ha ajustado el nivel de exposición a un valor fijo, el único resultado coherente es el mostrado para la muestra 3, ya que muestra una tendencia ligeramente descendente, que se corresponde con la teoría expuesta al comienzo de esta experiencia.

Debido a que los resultados no son los esperados se modifica el código, con el objetivo de obtener unas curvas que muestren unos resultados más coherentes.

Tal y como se puede observar en la figura 5.43 los resultados han mejorado. Además de la muestra 2, las muestras 1 y 4 también muestran ahora una tendencia descendente. Cabe destacar que la muestra 1, a pesar de parecer correcta es errónea, ya que al ir recortando metros a la fibra óptica llega más intensidad a la cámara y en el centro del patrón se va formando una mancha de color blanco (debido a la cantidad de luz que recoge la cámara), de tal forma que, la muestra toma parte de esta por estar muy centrado en el patrón de speckle.



Figura 5.42. Contraste medio del patrón de speckle para diferentes distancias con una fibra de 1 mm y con el nivel de exposición de la cámara con un valor fijado.



Figura 5.43. Contraste medio del patrón de speckle para diferentes distancias con una fibra de 1 mm tras la modificación del código del procesado.

Como conclusión podemos decir que, dependiendo de donde se tome la muestra, el resultado puede variar ligeramente. Viendo lo ocurrido para la muestra número 1, lo más propicio es tomarla escorada hacia un lado del patrón, no tan centrada en el patrón de speckle. En el caso del contraste medio se puede ver que existe diferencia entre todas ellas, mostrando más contraste la muestra 3. Esto es debido a que la muestra 3 toma más gránulos oscuros que el resto de muestras, donde el contraste se realiza entre gránulos de similar intensidad. Sin embargo, a pesar de mostrar una pendiente descendente, esta es muy leve, permanece casi constante (entre 0.75-0.9). Esto nos índica que aún no nos encontramos próximos a la longitud de coherencia de la fuente, es decir, el límite a partir del cual no aparecería el fenómeno de speckle al no mantenerse la propiedad de coherencia, necesaria para que se produzca la interferencia, propiedad que origina el speckle.

Por último, en la figura 5.44 se puede observar el valor medio del contraste, pero realizando la media de todas las muestras tomadas. Al igual que ocurría para la mayoría de los casos individuales de cada muestra la pendiente es descendente. Como ya se ha comentado anteriormente, no estaría próxima la longitud de coherencia de la fuente debido al contraste medio tan elevado.



Figura 5.44. Contraste medio del patrón de speckle tras realizar la media de todas las muestras.

5.6 Medida del patrón de speckle en función de la distancia

En este experimento se han realizado medidas de vibración con el objetivo de intentar obtener alguna relación entre la vibración y la distancia a la que se realiza. El proceso se ha llevado a cabo con una fibra plástica de 1 mm y un altavoz a una frecuencia de 2 Hz. Como en los casos anteriores, se ha utilizado como fuente de luz, un diodo láser que trabaja a una longitud de onda de 620 nm.

Tal y como se puede observar en la figura 5.45, se ha ido variando de posición el altavoz con respecto a la posición de la cámara, de tal manera que se ha ido capturando el patrón de speckle para distancias desde 5 metros hasta 1 metro. La perturbación de la fibra se ha realizado con un único altavoz, el cual se ha conectado a un generador de señal con amplitud y frecuencia constante. La fibra, en vez de estar enrollada en un tubo de PVC, se ha colocado de forma lo más recta posible para evitar la pérdida de modos.

Resultados

En la figura 5.46 se presentan los resultados obtenidos luego del procesado de las imágenes según el procedimiento de las diferencias.

Cabe destacar que el resultado no ha sido normalizado, ya que en ese caso no se podría saber la amplitud real de la señal, y puede ser interesante a la hora de buscar una relación con la distancia a la que se ha realizado la perturbación. En cada gráfica se muestra una línea roja, la cual indica el valor medio en el intervalo de vibración, y un parámetro denominado amplitud, que indica la diferencia entre el valor máximo y mínimo para dicho intervalo.



Figura 5.45. Sistema implementado para la medida del patrón de speckle en función de la distancia de la perturbación.



Figura 5.46. Resultados obtenidos del patrón de speckle en función de la distancia a la que se aplica la perturbación.

De los resultados obtenidos podemos deducir lo siguiente:

- 1. La posición de reposo (nivel bajo) se diferencia bien de la posición de perturbación (nivel alto). Además se puede deducir la duración de la perturbación en todos los casos (figura 5.46).
- 2. A medida que la perturbación se acerca al extremo de salida, es decir se acerca hacia la cámara CCD, la amplitud de la señal de perturbación aumenta. Esto es

coherente con la respuesta de la fibra, los modos de orden superior que son los más afectados, serán más débiles cuando la perturbación este más alejada del extremo de salida de la fibra. Se podría deducir, a partir de estas medidas, que la perturbación depende de la distancia del extremo de salida de la fibra, por lo que se podría diseñar sensores de tipo distribuido para un determinado tipo de parámetro físico (figura 5.46 y figura 5.47).

3. Los resultados mostrados son reproductibles, y por lo tanto, podrían aplicarse en técnicas de sensado distribuido a condición de profundizar los trabajos experimentales y el estudio teórico de los fenómenos que se producen o intervienen.



Figura 5.47. Variación de la amplitud en función de la distancia a la cámara CCD.

Capítulo 6

Conclusiones y líneas futuras

Las conclusiones y principales aportaciones del trabajo que se describe en esta memoria, pueden resumirse en los siguientes puntos:

- En el capítulo 1 se ha realizado una introducción de como surgió el fenómeno de speckle y una breve descripción de porque surge lo que se conoce como interferometría de speckle.
- En el capítulo 2 se ha mostrado una introducción al fenómeno de speckle. Para ello se ha efectuado una descripción del fenómeno, además de mostrar mediante figuras, los métodos de obtención y las condiciones necesarias para que se produzca el patrón de speckle. Por último, se han explicado sus propiedades y los tipos de speckle existentes.
- Una vez explicadas las principales características del patrón de speckle, el capítulo 3 se ha centrado el estudio en las fibras multimodo. Para ello, se ha explicado un concepto muy importante, el concepto de modo, lo que permite entender el comportamiento de la luz a través de este tipo de fibra. También se han explicado otras características para este tipo de medio, como son el ruido modal, la dispersión, etc.
- En el capítulo 4 se ha mostrado el estado del arte de sensores basados en speckle, es decir, un análisis de la situación actual de los sensores. Para ello, se han escogido algunos de los artículos más importantes desde la aparición del fenómeno de speckle.
- El capítulo 5 se corresponde con la última parte, la parte experimental. Se han analizado diferentes situaciones, en las cuales, con ayuda de diversos instrumentos, se ha aplicado una perturbación a la fibra y se ha medido sus correspondientes características. Como principales conclusiones de este estudio se puede decir:
 - a) Como principal conclusión y más importante, se observó que se puede obtener las características de una determinada vibración, con ayuda de fibra ópticas plásticas y un conveniente procesado del patrón de speckle.
 - b) Como primera experiencia se introdujo a la entrada una única vibración. Para el caso del láser de He-Ne y la fibra de 1 mm, se obtuvo correctamente la frecuencia de la perturbación tras ser analizado el patrón de speckle. Con el fin de abaratar costes y de investigar con otro tipo de fuente coherente, se utilizó el diodo láser. Los resultados obtenidos en torno a la frecuencia de la perturbación no han sido los esperados para ninguno de los grosores

de fibra, debido en gran medida a que se trata de una fuente de baja coherencia.

- c) Como segunda experiencia se introdujeron dos vibraciones, lo que aun ha complicado más el análisis. A pesar de ello se consiguió obtener una de las señales en algunos caso, pero tratándose en todos los casos de ruido.
- d) En la siguiente experiencia se analizó el contraste, con el objetivo de detectar la longitud de coherencia de la fuente y ver como variaba dicho contraste con la reducción de la longitud de la fibra. Los resultados fueron bastante coherentes con la teoría, mostrando una pendiente descendente para la mayoría de los recortes realizados sobre el patrón de speckle.
- e) Por último, se analizó el patrón de speckle en función de la distancia. Como conclusión podemos decir que, a medida que la vibración es más próxima a la cámara, la amplitud de la señal es mayor.

A continuación se muestran algunas posibles líneas futuras:

- Como continuación de este trabajo se puede mejorar el sistema de adquisición de imágenes, utilizando una cámara de mayor velocidad y resolución que permita obtener mejores resultados.
- Empleo de otras técnicas a la hora de procesar los patrones de speckle con el objetivo de contrastar y mejorar los resultados previamente mostrados en este trabajo, principalmente los referidos al diodo láser.
- Diseño de sensores de tipo distribuido para un determinado tipo de parámetro físico.
- Caracterización de diferentes parámetros como puede ser la temperatura, nivel de ruido, etc.
- Aplicación del sistema de procesado y análisis a un caso real como puede ser:
 - Sensor de vibración: medida del pulso arterial, medida de vibraciones en estructuras de ingeniería civil o entornos industriales, etc.
 - Sensor de seguridad y protección: detector de presencia y lugar.

Referencias

- [1] J.W. Goodman, Speckle phenomena in optics: theory and applications, Roberts & Co., Englewood, Colo., (2007).
- [2] K.J. Gasvik, Optical Metrology, Wiley, (2002).
- [3] A. Soto, Detección de micro-desplazamientos en sistemas cilíndricos utilizando interferometría panorámica, (2008).
- [4] «http://physics.tutorvista.com/waves/constructive-interference.html#».
- [5] L. I. Goldfischer, "Autocorrelation function and power spectral density of laser produced speckle patterns,", J. Opt. Soc. Am. 55, 247-253 (1965).
- [6] Gerd Keiser, "Optical Fiber Communications", 3rd Edition, McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Series, USA, (2000).
- [7] R.E. Epworth, The phenomenon of modal noise in analog and digital optical fibre systems. In Proceedings of the Fourth European Conference on Optical Communications, pages 492–501, Genoa, Italy, September, (1978).
- [8] A.J. Weierholt, E.G. Rawson y J.W. Goodman, Frequency-correlation properties of optical waveguide intensity patterns, J.Opt.Soc.Am. A, 1:201–205, (1984).
- [9] E.G. Rawson, J.W. Goodman y R.E. Norton, Frequency dependence of modal noise in multimode optical fibers, J. Opt. Soc. Am., 70:968–976, (1980).
- [10] A. Ghatak and K. Thyagarajan, Graded index optical waveguides: a review. In E.Wolf, editor, Progress in Optics, pages 1–109, North Holland, (1980).
- [11] D. Golge and E.A. Marcatili, Multimode theory of of graded-core fibers. Bell Syst. Tech. J., 52: 1563 – 1578, (1973).
- [12] Kitagawa, Y., and Hayashi, A., "Fiber-optic sensor for distance and velocity measurements using speckle dynamics", Applied Optics, 24, 955-959, (1985).
- [13] A. Hayashi and Y. Kitagawa, "Image Velocity Sensing Using an Optical Fiber Array," Appl. Opt. 21, 1394 (1982).
- [14] A. Hayashi and Y. Kitagawa, "2-D Image-Velocity Sensor with a Pair of Optical Fiber Arrays," Trans. IECE Jpn. J66-C, 717 (1983).
- [15] Spillman, W.B.Jr., Kline, B.R., Maurice, L.B., and Fuhr, P.L., "Statistical-mode sensor for fiber optic vibration sensing uses", Applied Optics, 28, 3166-3176, (1989).

- [16] Yu, F.T.S., Wen, M., Jing, S., and Uang, C.M., "Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields", Applied Optics, 32, 4685-4689, (1993).
- [17] K. D. Bennett, J. C. McKeeman y R. G. May, "Full field analysis of mode domain sensor signals for structure control", in Fiber Optic Smart Structures and Skins, E. Udd, ed., Proc.Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 986, 85-89 (1988).
- [18] E. G. Rawson, J. W. Goodman y R. E. Norton, "Frequency dependence of modal noise in multimode optical fibers", J.Opt. Soc. Am. 70, 968-976 (1980).
- [19] J. W. Goodman y E. G. Rawson, "Statistics of modal noise in fibers: a case of constrained speckle", Opt. Lett. 6, 324-326 (1981).
- [20] N. Takai and T., Asakura, "Statistical properties of laser speckles produced under illumination from a multimode optical fiber," J. Opt. Soc. Am. A 2, 1281-1290 (1985).
- [21] N. Takai, "Spatial coherence properties of light from optical fibers," in Statistical Optics, G.
 M. Morris, ed., Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng. 976, 143-149 (1988).
- [22] Zhang, Z., and Ansari, F., "Fiber-optic laser speckle-intensity crack sensor for embedment in concrete", Sensors and Actuators A-126, 107–111, (2006).
- [23] W.B. Spillman, B.R. Kline, Statistical-mode sensor for fiber optic vibration sensing uses, Appl. Opt. 28 (15) (1989) 3166–3176.
- [24] A.W. Snyder, J.D. Love, Optical Waveguide Theory, Chapman & Hall, London, (1983).
- [25] Dietsche, G., Ninck, M., Ortolf, C., Li, J., Jaillon, F., and Gisler, T., "Fiber-based multispeckle detection for time-resolved diffusing-wave spectroscopy: characterization and application to blood flow detection in deep tissue", Applied Optics, 46,.
- [26] F. Jaillon, S. E. Skipetrov, J. Li, G. Dietsche, G. Maret, and T. Gisler, "Diffusing-wave spectroscopy from head-like tissue phantoms: influence of a non-scattering layer," Opt. Express 14, 10181–10194 (2006).
- [27] «http://www.ctr.unican.es/asignaturas/instrumentacion_2_IT/Dise%F10%20de%20Filtros %20con%20Matlab.pdf».
- [28] B. Moslehi, J.W. Goodman y E.G. Rawson, Bandwidth estimation for multimode optical fibers, Appl. Opt., 22:995–999, (1983).