

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 986 395**

51 Int. Cl.:

**G01B 9/02** (2012.01)

**G02B 6/26** (2006.01)

**G02B 6/34** (2006.01)

**G01D 5/353** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.07.2019 PCT/IL2019/050742**

87 Fecha y número de publicación internacional: **09.01.2020 WO20008464**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.07.2019 E 19830499 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.04.2024 EP 3818331**

54 Título: **Método y sistema para determinar la perturbación de la rejilla mediante luz modulada**

30 Prioridad:

**04.07.2018 US 201862693941 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:  
**11.11.2024**

73 Titular/es:

**ARIEL SCIENTIFIC INNOVATIONS LTD. (100.0%)  
Kiryat Hamada, PO Box 3  
4070000 Ariel, IL**

72 Inventor/es:

**STERNKLAR, SHMUEL y  
GLASSER, ZIV**

74 Agente/Representante:

**FERNÁNDEZ POU, Felipe**

ES 2 986 395 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

**DESCRIPCIÓN**

Método y sistema para determinar la perturbación de la rejilla mediante luz modulada

5 Campo y antecedentes de la invención

La presente invención, en algunas modalidades de la misma, se refiere a un sistema sensor y, más particularmente, pero no exclusivamente, a un método y un sistema para detección por reflexión de luz modulada, por ejemplo, mediante una rejilla de fibra de Bragg (FBG).

10 Las FBG son un componente bien conocido que se utiliza en los campos de la detección y las comunicaciones por fibra óptica y, típicamente, comprenden un patrón repetitivo escrito en una fibra óptica fotosensible. Cuando se ilumina, una rejilla de Bragg refleja un componente de luz en longitudes de onda dentro de un rango cuya longitud de onda central y ancho de banda dependen de las propiedades de la rejilla (por ejemplo, paso, índice de refracción, longitud de la rejilla). La longitud de onda central y el ancho de banda de este rango se denominan longitud de onda de Bragg y ancho de banda FBG, respectivamente. Una perturbación de la rejilla, por ejemplo por temperatura, presión, deformación, vibración o similares, da como resultado un desplazamiento en la longitud de onda de Bragg (denominado "desplazamiento de Bragg"), que puede detectarse en el espectro reflejado. Luego, este desplazamiento se puede comparar con la longitud de onda de Bragg no perturbada para determinar el alcance de la perturbación.

20 Por tanto, un FBG puede servir como sensor. Los sensores FBG son particularmente útiles como sensores integrados para estructuras inteligentes donde los sensores se pueden usar para la evaluación en tiempo real de temperatura, presión, deformación, vibración y similares. Dado que muchas rejillas pueden escribirse en una longitud de fibra y abordarse mediante el uso de técnicas de multiplexación, los sensores FBG pueden proporcionar capacidades de detección casi distribuidas.

25 Convencionalmente, el desplazamiento en la longitud de onda de Bragg se mide con la ayuda de técnicas de análisis espectral como interferómetros, filtros ópticos sintonizables, láseres sintonizables o elementos de difracción [documento de Chen y otros, "Review of fiber Bragg grating sensor technology", Front. Optoelectron. China 4 204 (2011)].

30 En el campo de las comunicaciones ópticas a larga distancia, se sabe medir la dispersión en una fibra óptica dispersando linealmente pulsos ultracortos en la fibra y mapeando su espectro en el dominio del tiempo. Esto permite mapear la dispersión midiendo el retraso entre dos picos en el perfil temporal del pulso disperso [documento de Tong y otros, "Fibre dispersion or pulse spectrum measurement using a sampling oscilloscope", Electronics Lett. 33(11) 983-985 (1997)].

35 La solicitud publicada en EE.UU. núm. 20020063866 describe la interrogación de sensores de fibra óptica que detectan de forma no intrusiva el flujo de fluido dentro de una tubería. Una serie de pulsos de luz discretos se dirigen a sensores ubicados entre pares de rejillas de Bragg de fibra de baja reflectividad. Los pulsos de luz sucesivos se dividen de modo que uno de los pulsos se retrasa con relación a los otros pulsos. Los pulsos de luz se combinan y se determinan los desplazamientos de fase entre los pulsos.

40 La patente de EE.UU. núm. 5,748,312 describe la detección de deformación entre sensores de rejilla de fibra de Bragg inscritos en una fibra óptica. La deformación se detecta entre los dos sensores de rejilla de fibra de Bragg en base a los tiempos de propagación óptica de la luz reflejada por los sensores de fibra individuales, calculando las diferencias entre los desplazamientos de fase inducidos por sensores sucesivos.

45 La patente de EE.UU. núm. 6,285,806 describe un sensor de fibra óptica con múltiples segmentos para detectar una condición física. Los segmentos están separados por rejillas de Bragg. La luz de una fuente de luz se introduce en el extremo de entrada de la matriz. La luz reflejada por cada uno de los reflectores tiene un desplazamiento de fase que representa los efectos de la condición física en todos los segmentos desde el extremo de entrada hasta ese reflector. La luz de retorno se demultiplexa modulando la entrada de luz con una secuencia de bits pseudoaleatoria y correlacionando la salida con una versión desplazada en el tiempo de la secuencia de bits pseudoaleatoria.

Resumen de la invención

50 La presente invención proporciona un método para determinar la perturbación de una rejilla formada en una fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 1, un sistema para determinar la perturbación de una rejilla formada en una fibra óptica de acuerdo con la reivindicación 12.

55 De acuerdo con un aspecto de algunas modalidades de la presente invención, se proporciona un método para determinar la perturbación de una rejilla formada en una fibra óptica. El método comprende: modular y transmitir un haz de luz a través de la fibra óptica, medir al menos un desplazamiento de fase en una modulación de la luz reflejada por la rejilla y determinar la perturbación de la rejilla en base a el(los) desplazamiento(s) de fase.

- 5 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la modulación se aplica antes de la transmisión. De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la modulación se aplica después de que el haz de luz se refleja en la rejilla. De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la modulación se aplica antes de la transmisión así como también después de que el haz de luz se refleje en la rejilla.
- 10 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la fibra óptica está formada con una pluralidad de rejillas, en donde dos o más de las rejillas se caracterizan por diferentes longitudes de onda de Bragg.
- 15 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el método comprende demultiplexar el haz de luz reflejado en dos o más canales, correspondientes respectivamente a las diferentes longitudes de onda de Bragg, antes de la medición del(los) desplazamiento(s) de fase.
- 20 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el método comprende escanear una frecuencia de la modulación a lo largo de una pluralidad de frecuencias de modulación, en donde el método comprende medir un desplazamiento de fase de la modulación y la magnitud de la modulación de la luz reflejada por las rejillas para cada frecuencia de modulación, y determinar una longitud de onda óptica individual o desplazamiento de frecuencia óptica para cada una de las dos o más rejillas, en base a los desplazamientos de fase de la modulación medidos y las magnitudes de la modulación medidas.
- 25 De acuerdo con la invención, el método comprende dispersar el haz de luz reflejado antes de la medición del(los) desplazamiento(s) de fase.
- De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la dispersión se realiza mediante una rejilla chirriada formada en una fibra óptica.
- 30 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la dispersión se realiza mediante un carrete de fibra óptica.
- De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la medición del desplazamiento de fase se caracteriza por una resolución de fase predeterminada, y la dispersión se caracteriza por un parámetro de dispersión predeterminado que describe el ensanchamiento del pulso por unidad de longitud de onda, en donde una frecuencia de la modulación es al menos una relación entre la resolución de fase y una multiplicación del parámetro de dispersión por un umbral de resolución espectral predeterminado.
- 35 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el umbral de resolución espectral predeterminado es inferior a 0,1 picómetros y la medición del(los) desplazamiento(s) de fase se realiza a una velocidad de muestreo de al menos 1 kHz.
- 40 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la dispersión se caracteriza por un coeficiente de dispersión, en donde el método comprende variar un valor del coeficiente sobre una pluralidad de valores del coeficiente de dispersión, medir un desplazamiento de fase de la modulación y la magnitud de la modulación de la luz reflejada por la rejilla para cada valor del coeficiente de dispersión, y determinar una longitud de onda óptica individual o un desplazamiento de frecuencia óptica para cada una de las dos o más rejillas, en base a los desplazamientos de fase de la modulación medidos y las magnitudes de la modulación medidas.
- 45 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la modulación comprende modulación de radiofrecuencia. De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la modulación comprende modulación sinusoidal.
- 50 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el método comprende amplificar el haz de luz antes de la transmisión.
- 55 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la determinación de la perturbación de la rejilla no se basa en la potencia óptica del haz de luz reflejado.
- De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el método se ejecuta sin determinar una potencia óptica del haz de luz reflejado.
- 60 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la determinación de la perturbación de la rejilla comprende expresar la perturbación como un desplazamiento en una longitud de onda de Bragg que caracteriza la rejilla.
- 65 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el método comprende utilizar el desplazamiento en la longitud de onda de Bragg para calcular al menos una cantidad física que efectúa la perturbación de la rejilla.
- De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la determinación de la perturbación de la rejilla comprende expresar la perturbación como al menos una cantidad física que afecta la perturbación de la rejilla.
- De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la(s) cantidad(es) física(s) se selecciona(n) del grupo que

consiste en temperatura ambiente, presión aplicada a la fibra, deformación de la fibra y movimiento acelerado de la fibra.

5 De acuerdo con un aspecto de algunas modalidades de la presente invención, se proporciona un sistema para determinar la perturbación de una rejilla formada en una fibra óptica. El sistema comprende: un sistema de modulación óptica para modular un haz de luz; un acoplador óptico para acoplar el haz de luz a la fibra óptica y recibir la luz reflejada por la rejilla; y un sistema de análisis óptico y eléctrico configurado para medir al menos un desplazamiento de fase en una modulación de la luz reflejada por la rejilla, y determinar la perturbación de la rejilla en base al(los) desplazamiento(s) de fase.

10 De acuerdo con un aspecto de algunas modalidades la presente invención se proporciona un sistema sensor. El sistema sensor comprende: un sistema de modulación óptica para modular un haz de luz; un acoplador óptico para acoplar el haz de luz a la fibra óptica y recibir la luz reflejada por la rejilla; y un sistema de análisis óptico y eléctrico configurado para medir al menos un desplazamiento de fase en una modulación de la luz reflejada por la rejilla, y determinar al menos una cantidad física que efectúa una perturbación de la rejilla.

15 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la(s) cantidad(es) física(s) se selecciona(n) del grupo que consiste en temperatura ambiente, presión aplicada a la fibra, deformación de la fibra y movimiento acelerado de la fibra.

20 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de modulación óptica está configurado para modular el haz de luz antes de la transmisión. De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de modulación óptica está configurado para modular el haz de luz después de que el haz de luz se refleja en la rejilla. De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de modulación óptica está configurado para modular el haz de luz antes de la transmisión, así como también después de que el haz de luz se refleje en la rejilla.

25 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la fibra óptica está formada con una pluralidad de rejillas, en donde dos o más de las rejillas se caracterizan por diferentes longitudes de onda de Bragg.

30 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de análisis comprende un sistema de demultiplexación óptico para demultiplexar el haz de luz reflejado en dos o más canales, correspondientes respectivamente a las diferentes longitudes de onda de Bragg, antes de la medición del(los) desplazamiento(s) de fase.

35 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de análisis comprende una pluralidad de detectores de luz, uno para cada uno de los canales.

40 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de modulación óptica está configurado para escanear una frecuencia de la modulación a lo largo de una pluralidad de frecuencias de modulación, en donde el sistema de análisis óptico y eléctrico está configurado para medir un desplazamiento de fase de la modulación y una magnitud de la modulación de la luz reflejada en la rejilla para cada frecuencia de modulación, y para determinar una longitud de onda óptica individual o un desplazamiento de frecuencia óptica para cada una de las dos o más rejillas, en base a los desplazamientos de fase de la modulación medidos y las magnitudes de la modulación medidas.

45 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de análisis comprende un único detector de luz.

De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de análisis comprende un dispositivo óptico dispersivo configurado para dispersar el haz de luz reflejado antes de la medición del(los) desplazamiento(s) de fase.

50 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el dispositivo óptico dispersivo comprende una rejilla chirriada formada en una fibra óptica. De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el dispositivo óptico dispersivo comprende un carrete de fibra óptica.

55 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el sistema de análisis comprende un sistema de procesamiento de señales configurado para medir el(los) desplazamiento(s) de fase a una resolución de fase predeterminada, en donde el dispositivo óptico dispersivo está configurado para efectuar la dispersión de acuerdo con un parámetro de dispersión predeterminado que describe el ensanchamiento del pulso por unidad de longitud de onda, en donde el sistema de modulación óptica está configurado para modular el haz de luz a una frecuencia que es al menos una relación entre la resolución de fase y una multiplicación del parámetro de dispersión por un umbral de resolución espectral predeterminado.

60 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el umbral de resolución espectral predeterminado es inferior a 10 picómetros.

65 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el umbral de resolución espectral predeterminado es inferior a

0,1 picómetros, en donde el sistema de procesamiento de señales está configurado para medir el(los) desplazamiento(s) de fase a una velocidad de muestreo de al menos 1 kHz.

5 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el dispositivo óptico dispersivo es controlable, en donde el sistema comprende un controlador de dispersión para controlar el dispositivo óptico dispersivo para variar un valor de un coeficiente de dispersión que caracteriza el dispositivo óptico dispersivo, en donde el sistema de análisis óptico y eléctrico está configurado para medir un desplazamiento de fase de la modulación y una magnitud de la modulación de la luz reflejada desde la rejilla para diferentes valores del coeficiente de dispersión, y determinar una longitud de onda óptica individual o un desplazamiento de frecuencia óptica para cada una de las dos o más rejillas, en base a los desplazamientos de fase de la modulación y magnitudes de la modulación medidas.

10 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el método comprende un amplificador óptico para amplificar el haz de luz antes de la transmisión.

15 De acuerdo con un aspecto de algunas modalidades de la presente invención, se proporciona un método para determinar la perturbación de una pluralidad de rejillas formadas en una fibra óptica. El método comprende: modular y transmitir un haz de luz a través de la fibra óptica, en donde la modulación comprende escanear una frecuencia de la modulación sobre una pluralidad de frecuencias de modulación; medir un desplazamiento de fase de la modulación y la magnitud de la modulación de la luz reflejada por la rejilla para cada frecuencia de modulación; y determinar la perturbación de dos o más de las rejillas en base a los desplazamientos de fase de la modulación medidos y las magnitudes de la modulación medidas.

20 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, el método comprende dispersar la luz reflejada por la rejilla mediante el uso de un dispositivo óptico dispersivo controlable, en donde la dispersión comprende controlar el dispositivo óptico dispersivo para variar un valor de un coeficiente de dispersión que caracteriza el dispositivo óptico dispersivo, en donde el método comprende medir el desplazamiento de fase de la modulación y la magnitud de la modulación también para diferentes valores del coeficiente de dispersión.

25 De acuerdo con un aspecto de algunas modalidades de la presente invención, se proporciona un método para determinar la perturbación de una pluralidad de rejillas formadas en una fibra óptica. El método comprende: modular y transmitir un haz de luz a través de la fibra óptica; dispersar la luz reflejada por la rejilla mediante el uso de un dispositivo óptico dispersivo controlable, en donde la dispersión comprende controlar el dispositivo óptico dispersivo para variar un valor de un coeficiente de dispersión que caracteriza el dispositivo óptico dispersivo; medir un desplazamiento de fase de la modulación y una magnitud de la modulación de la luz reflejada por la rejilla para diferentes valores del coeficiente de dispersión; y determinar la perturbación de dos o más de las rejillas en base a los desplazamientos de fase de la modulación medidos y las magnitudes de la modulación medidas.

30 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la modulación se ejecuta antes de la transmisión.

35 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la modulación se ejecuta después de que el haz de luz se refleja en la rejilla.

40 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la modulación se ejecuta antes de la transmisión, así como también después de que el haz de luz se refleje en la rejilla.

45 De acuerdo con algunas modalidades de la invención, la determinación de la perturbación comprende calcular una longitud de onda óptica o un desplazamiento de frecuencia óptica causado por una rejilla respectiva.

50 A menos que se definan de cualquier otra manera, todos los términos técnicos y/o científicos usados en la presente descripción tienen el mismo significado como lo entiende comúnmente un experto en la técnica a la que pertenece la invención. Aunque los métodos y materiales similares o equivalentes a los que se describen en la presente descripción pueden usarse en la práctica o ensayo de modalidades de la invención, los métodos y/o materiales ilustrativos se describen a continuación. En caso de conflicto, la especificación de la patente, que incluye las definiciones, lo controla. Además, los materiales, métodos, y ejemplos son sólo ilustrativos y no se pretende que sean necesariamente limitantes.

55 La implementación del método y/o sistema de modalidades de la invención puede implicar realizar o completar tareas que se seleccionan, de manera manual, automática, o una combinación de las mismas. Por otra parte, de acuerdo con la instrumentación y el equipo real de las modalidades del método y/o sistema de la invención, varias tareas que se seleccionan pueden implementarse por hardware, por software o por el microprograma o por una combinación de los mismos mediante el uso de un sistema operativo.

60 Por ejemplo, el hardware para realizar tareas que se seleccionan de acuerdo con las modalidades de la invención podría implementarse como un chip o un circuito. Como software, las tareas que se seleccionan de acuerdo con modalidades de la invención podrían implementarse como una pluralidad de instrucciones de software que se ejecutan por un ordenador mediante el uso de cualquier sistema operativo adecuado. En una modalidad ilustrativa

de la invención, una o más tareas de acuerdo con modalidades ilustrativas del método y/o sistema como se describió en la presente descripción se realizan mediante un procesador de datos, tal como una plataforma informática para ejecutar una pluralidad de instrucciones. Opcionalmente, el procesador de datos incluye una memoria volátil para almacenar instrucciones y/o datos y/o el almacenamiento no volátil, por ejemplo, un disco duro magnético y/o un medio extraíble, para almacenar instrucciones y/o datos. Opcionalmente, una conexión de red también se proporciona. Una pantalla y/o un dispositivo de entrada del usuario, como un teclado o un ratón opcionalmente también se proporcionan.

Breve descripción de las distintas vistas de las figuras

Algunas modalidades de la invención en la presente descripción se describen, a manera de ejemplo solamente, con referencia a las figuras adjuntas. Con referencia específica ahora a las figuras en detalle, se enfatiza que los detalles mostrados son a manera de ejemplo y para propósitos de descripción ilustrativa de las modalidades de la invención. Con respecto a esto, la descripción tomada con las figuras pone de manifiesto para los expertos en la técnica cómo se pueden poner en práctica las modalidades de la invención.

En las figuras acompañantes, las cuales ilustran una o más modalidades ilustrativas:

La Figura 1 es un diagrama de flujo de un método adecuado para determinar la perturbación de una rejilla formada en una fibra óptica, de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención;

La Figura 2 es una ilustración esquemática de un sistema adecuado para determinar la perturbación de una rejilla formada en una fibra óptica, de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención;

La Figura 3 es una ilustración esquemática de una configuración experimental utilizada en experimentos realizados de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención;

La Figura 4 muestra el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg monitorizado debido a la deformación periódica en un FBG, obtenido en experimentos realizados de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención;

La Figura 5 muestra el análisis de Fourier de ondas ultrasónicas en agua para diferentes valores de potencia de vibración, obtenidos en experimentos realizados de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención;

La Figura 6 muestra el análisis de Fourier de una señal que regresa de un FBG enrollado alrededor de un tensor de fibra piezoeléctrica que vibra a aproximadamente 200 kHz;

La Figura 7 muestra la resolución en función de la velocidad, obtenida en experimentos realizados de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención;

La Figura 8 es un diagrama de flujo de un método adecuado para amplificar un desplazamiento de fase, de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención; y

La Figura 9 es una ilustración de un diagrama de bloques esquemático de un sistema para amplificar un desplazamiento de fase, de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención.

Descripción de las modalidades específicas de la invención

La presente invención, en algunas modalidades de la misma, se refiere a un sistema sensor y, más particularmente, pero no exclusivamente, a un método y un sistema para detección por reflexión de luz modulada, por ejemplo, mediante una rejilla de fibra de Bragg (FBG).

Antes de explicar al menos una modalidad de la invención en detalle, debe entenderse que la invención no es limitativa necesariamente en su aplicación a los detalles de construcción y al arreglo de los componentes y/o métodos establecidos en la siguiente descripción y/o ilustrados En las figuras acompañantes, los cuales ilustran una o más modalidades ilustrativas y/o los Ejemplos. La invención es capaz de otras modalidades o de ser practicada o llevada a cabo en varias formas.

En los sensores FBG convencionales, el desplazamiento de Bragg causado por una perturbación en un FBG normalmente se mide mediante técnicas de análisis espectral como espectrómetros, interferómetros, filtros ópticos sintonizables, láseres sintonizables o elementos de difracción. Los inventores se dieron cuenta de que estas técnicas son complicadas y requieren equipos costosos para lograr una precisión adecuada. Los inventores también se dieron cuenta de que las técnicas que se basan en la necesidad de emplear un barrido de frecuencia láser limitan la velocidad de medición, especialmente si el barrido se realiza mecánicamente. Otros sistemas miden la respuesta temporal de un pulso que pasa a través de un elemento dispersivo. Los inventores descubrieron que este tipo de técnica también requiere herramientas costosas, como moduladores capaces de modular pulsos ultracortos y dispositivos electrónicos de detección rápidos. Los inventores también descubrieron que esta técnica tiene desventajas adicionales, como la necesidad de resolver la respuesta temporal en el dominio de la frecuencia, lo que limita la resolución espectral.

En una búsqueda de una técnica que opcional y preferentemente supere los problemas anteriores, y/o de una técnica que sea opcional y preferentemente más precisa y/o ejecutable a velocidades más altas, los inventores idearon un método y un sistema que adquiere datos del interrogador de la(las) rejilla(s) directamente de la modulación de la luz reflejada por la(s) rejilla(s). Los inventores descubrieron que dicha adquisición directa se

beneficia de muchas ventajas y, al mismo tiempo, supera uno o más de los inconvenientes antes mencionados. En primer lugar, la técnica goza de un alto rechazo de ruido y mediciones de alta velocidad, ya que no requiere un barrido espectral. En segundo lugar, la técnica se puede ejecutar mediante el uso de equipos de costo relativamente bajo en comparación con los equipos necesarios para mediciones rápidas en el dominio del tiempo. En tercer lugar, a diferencia de las técnicas convencionales para resolver la respuesta temporal en el dominio de la frecuencia, para las cuales la resolución está limitada por el efecto de desvanecimiento, la técnica de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención selecciona la frecuencia de trabajo de acuerdo con la periodicidad en el efecto de desvanecimiento, mejorando de esta manera la resolución.

Con referencia ahora a las figuras, la Figura 1 es un diagrama de flujo de un método adecuado para determinar la perturbación de una rejilla formada en una fibra óptica, y la Figura 2 es una ilustración esquemática de un sistema adecuado para determinar la perturbación de una rejilla formada en una fibra óptica, de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención. En una modalidad preferida, el sistema 30 se puede utilizar para ejecutar al menos algunas de las operaciones del método.

Debe entenderse que, a menos que se defina lo contrario, las operaciones descritas más adelante en el presente documento se pueden ejecutar de forma simultánea o secuencial en muchas combinaciones u órdenes de ejecución. En concreto, el orden de los diagramas de flujo no debe considerarse limitante. Por ejemplo, dos o más operaciones, que aparecen en la siguiente descripción o en los diagramas de flujo en un orden particular, se pueden ejecutar en un orden diferente (por ejemplo, en orden inverso) o sustancialmente de forma contemporánea. Además, varias operaciones que se describen a continuación son opcionales y es posible que no se ejecuten.

El método comienza en 10 y opcional y preferentemente continúa hasta 11, en el que se genera un haz de luz, y hasta 12, en el que el haz de luz se modula para proporcionar un haz de luz modulada 34. La luz puede ser luz infrarroja, luz visible o luz ultravioleta de acuerdo como se desee. Preferentemente, la luz es luz infrarroja.

La generación 11 y la modulación 12 pueden ejecutarse mediante un sistema de modulación óptica 40. La modulación puede ser una modulación directa o una modulación externa, y de cualquier tipo conocido en la técnica. Cuando se emplea modulación directa, una fuente de luz 36 recibe una señal de modulación desde un controlador 42 y genera un haz de luz modulado 34. Cuando se emplea modulación externa, la fuente de luz 36 genera un haz de luz no modulado 32 y lo modula mediante un modulador óptico 38 que recibe la señal de modulación del controlador 42. El controlador 42 puede incluir un circuito dedicado para generar la señal de modulación.

La modulación puede realizarse en cualquier rango de frecuencia, tal como, entre otros, radiofrecuencia. Cuando se emplea modulación de radiofrecuencia, la frecuencia de modulación es opcional y preferentemente de aproximadamente 1 kHz a aproximadamente 40 GHz. En diversas modalidades ilustrativas de la invención la modulación es una modulación sinusoidal, pero en algunas modalidades también se contemplan otras formas de onda de modulación sinusoidales. También se contemplan modalidades en las que se emplea una modulación multifrecuencia, por ejemplo, mediante una suma de señales sinusoidales, cada una a una frecuencia diferente. La modulación se puede ejecutar para modular cualquiera de las amplitudes, frecuencias y fases del haz de luz, incluidas modulaciones de dos o más de las amplitudes, frecuencias y fases. En una modalidad preferida, se emplea al menos modulación de amplitud, y en una modalidad más preferida, sólo se emplea modulación de amplitud en donde la frecuencia y la fase no están moduladas.

Las presentes modalidades también contemplan el escaneo de modulación, en donde se escanea una frecuencia de la modulación sobre una pluralidad de frecuencias de modulación. La ventaja de estas modalidades se explica a continuación. Debe entenderse, sin embargo, que no es necesario emplear escaneo de modulación y que el método de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención también se puede practicar cuando la modulación se realiza sin escaneo de frecuencia.

En algunas modalidades opcionales de la presente invención, el método avanza hasta 13, en el que se amplifica el haz de luz 34. Esto puede lograrse opcional y preferentemente mediante un amplificador óptico 50, tal como, entre otros, un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA), un amplificador de fibra dopada con iterbio (YDFA), un amplificador Raman, un amplificador híbrido Raman/dopado con erbio, un amplificador híbrido Raman/dopado con iterbio, un amplificador de fibra codopado con erbio-iterbio, un amplificador de fibra dopado con neodimio, un amplificador de fibra dopado con tulio, y similares.

El método puede proceder a 14 en el que el haz de luz modulado 34 se transmite a través de una fibra óptica 44 que tiene una o más rejillas 46 formadas en ella, y a 15 en el que la luz reflejada por la(s) rejilla(s) 46 se acopla fuera de la fibra óptica 44. La(s) rejilla(s) se pueden fabricar dentro de la totalidad o parte de la sección transversal del núcleo o en la interfaz núcleo-revestimiento de la fibra 44, o en otras secciones de la fibra como se conoce en la técnica. La fibra óptica 44 es opcional y preferentemente una fibra óptica con un sensor FBG o una serie de sensores FBG. La rejilla 46 está constituida para reflejar selectivamente un componente de la luz que tiene longitudes de onda dentro de un ancho de banda de Bragg particular centrado en una longitud de onda de Bragg particular, y para permitir que otros componentes continúen propagándose en la fibra 44. Cuando la fibra óptica 44 tiene una pluralidad de rejillas, cada una de al menos dos de las rejillas, con mayor preferencia cada una de las rejillas formadas en la fibra 44, está

constituida para reflejar selectivamente un componente diferente de la luz. Así, cada rejilla 46 de la fibra 44 se caracteriza por una longitud de onda de Bragg (y un ancho de banda de Bragg correspondiente), en donde al menos dos de las rejillas se caracterizan por una longitud de onda de Bragg diferente. En la Figura 2 se muestra una fibra con N rejillas, caracterizadas por un conjunto de N longitudes de onda de Bragg respectivas diferentes, denotadas como  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ . No es necesario ordenar las rejillas de acuerdo con sus valores  $\lambda$ .

En diversas modalidades ilustrativas de la invención, la fibra óptica 44 se despliega o se incrusta dentro de una estructura tal como, entre otros, un ala de avión, una valla, una pala de turbina eólica, un edificio, un puente, una alcantarilla, un revestimiento de túnel, una tubería, un río, un depósito de control de inundaciones, un pozo y similares.

El acoplamiento y desacoplamiento de luz dentro y fuera de la fibra 44 se realiza opcional y preferentemente a través de uno o más acopladores ópticos 48 que proporcionan acoplamiento óptico entre el sistema 40 y la fibra 44, y opcional y preferentemente también entre la fibra 44 y una sistema de análisis óptico y eléctrico mostrado generalmente en 52. En la ilustración esquemática mostrada en la Figura 2, que no debe considerarse limitante, el acoplador óptico 48 se muestra como un circulador óptico que tiene tres o más puertos de entrada/salida (E/S) (se muestran tres en el presente ejemplo), en donde al menos un puerto está en comunicación óptica con el sistema 40 y al menos un puerto está en comunicación óptica con la fibra 44. En la Figura 2, el haz de luz 34 ingresa al circulador 48 a través de su primer puerto (1) y sale a través de su segundo puerto (2) hacia la fibra 44. La luz reflejada por las rejillas 46 se propaga hacia atrás en la fibra 44, entra en el circulador 48 a través de su segundo puerto (2) y sale por su tercer puerto (3). Desde el tercer puerto, la luz reflejada ingresa opcional y preferentemente al sistema 52 para realizar el procesamiento y análisis como se detalla más adelante en la presente descripción.

En algunas modalidades opcionales de la presente invención, la modulación 12 se ejecuta después de que la luz sale de la fibra 44. En estas modalidades, no es necesario realizar la modulación 12 antes de transmitir la luz a la fibra. Sin embargo, las modalidades en las que la modulación 12 se aplica dos o más veces (por ejemplo, antes de que la luz se acople a la fibra, y después de que la luz salga de la fibra).

En algunas modalidades de la presente invención, el método continúa hasta 16 en el que se dispersa el haz de luz reflejado. La operación 16 se ejecuta para aumentar la dispersión de velocidad de grupo (GVD) del haz de luz reflejado. Preferentemente, después de la operación 16, la magnitud del GVD del haz de luz es mayor (por ejemplo, 2 veces o 4 veces u 8 veces o 10 veces mayor) que la magnitud del GVD efectivo combinado de todos los demás componentes en el sistema 52. La operación 16 se realiza opcional y preferentemente mediante un dispositivo óptico dispersivo 54, que en algunas modalidades de la presente invención es un componente del sistema 52. Alternativa, o adicionalmente, la operación 16 también puede realizarse mediante la(s) rejilla(s) de la propia fibra.

Ejemplos representativos de dispositivos ópticos dispersivos adecuados para usarse como dispositivo 54 incluyen, sin limitación, una rejilla chirriada formada en una fibra óptica (por ejemplo, un FBG chirriado, tal como, entre otros, el FBG chirriado comercializado por Teraxion, Canadá), una fibra compensadora de dispersión (DCF) y un carrete de fibra óptica.

Se espera que durante la vida de una patente que venza a partir de esta solicitud se desarrollen muchos dispositivos ópticos relevantes que dispersen la luz y se pretende que el alcance del término dispositivo óptico dispersivo incluya todas esas nuevas tecnologías a priori.

La dispersión proporcionada por el dispositivo óptico dispersivo 54 se caracteriza típicamente por un coeficiente de dispersión  $\tilde{D}$ . El parámetro  $\tilde{D}$  describe la cantidad de ensanchamiento de un pulso óptico que se propaga en el dispositivo óptico dispersivo por unidad de longitud de onda, típicamente en unidades de ps/nm. Adecuados para las presentes modalidades son dispositivos ópticos dispersivos capaces de efectuar dispersión caracterizados por un parámetro de dispersión positivo o negativo  $\tilde{D}$  que tiene un valor absoluto de al menos 100 ps/nm o al menos 300 ps/nm o al menos 1000 ps/nm o al menos 1500 ps/nm o al menos 2000 ps/nm o al menos 2500 ps/nm.

En algunas modalidades de la presente invención, el dispositivo óptico dispersivo 54 es controlable, en donde el coeficiente de dispersión  $\tilde{D}$  se puede variar, por ejemplo, por medio de un controlador de dispersión 55. La variación del coeficiente de dispersión se puede lograr, por ejemplo, efectuando una deformación en el dispositivo 54 (por ejemplo, aplicando deformación o deformación al mismo) y/o cambiando su temperatura. El controlador de dispersión 55 es preferentemente una estructura configurada para aplicar deformación y/o deformación y/o temperatura al dispositivo 45. Las presentes modalidades también contemplan el escaneo de dispersión, en donde el coeficiente de dispersión  $\tilde{D}$  se escanea sobre una pluralidad de coeficientes de dispersión. La ventaja de estas modalidades se explica a continuación. Debe entenderse, sin embargo, que no es necesario emplear escaneo de dispersión, y que el método de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención también se puede practicar cuando el dispositivo óptico dispersivo 54 se caracteriza por un valor fijo del coeficiente de dispersión.

Cuando la fibra 44 comprende dos o más rejillas 46, el método opcional y preferentemente pasa a 17, en el que se aplica una demultiplexación al haz de luz reflejado. La demultiplexación 17 se ejecuta preferentemente para proporcionar dos o más canales ópticos separados espacialmente, correspondiendo cada uno de ellos a una

longitud de onda de Bragg que caracteriza una rejilla diferente de fibra 44. La demultiplexación 17 se puede ejecutar mediante el uso de un sistema de demultiplexación óptico 56, que también puede ser un componente del sistema 52. El sistema de demultiplexación 56 puede ser de cualquier tipo, incluyendo, sin limitación, una rejilla de guía de ondas dispuesta, una fibra de cristal fotónico y similares. En la Figura 2 se muestra un sistema de demultiplexación óptico que produce N canales, correspondiendo cada uno de ellos a una longitud de onda de Bragg del conjunto antes mencionado  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ .

Debe entenderse que no es necesario demultiplexar la luz reflejada incluso cuando la fibra 44 comprende una pluralidad de rejillas 46. Por ejemplo, cuando se emplea el escaneo de modulación, la multiplicidad de frecuencias de modulación puede proporcionar suficiente información con relación a la contribución de más de una rejilla, como se explica con más detalle a continuación. Otro ejemplo es cuando se emplea el escaneo de dispersión, en cuyo caso la multiplicidad de valores de los coeficientes de dispersión puede proporcionar información suficiente con relación a la contribución de más de una rejilla, como se explica con más detalle a continuación.

En 18, la luz se convierte preferentemente en señales eléctricas, por ejemplo, mediante el uso de un detector óptico (por ejemplo, un selector que tiene un único sensor óptico), o una serie de detectores ópticos 58 (uno para cada canal óptico, en modalidades en las que la luz se demultiplexa en el canal), y en 19 se miden al menos desplazamientos de fase en una modulación de la luz reflejada desde la(s) rejilla(s) 46, por ejemplo, mediante un sistema de procesamiento de señales 60, como se ilustra en la Figura 2. En algunas modalidades de la presente invención, el funcionamiento 19 también incluye medir la magnitud de la señal.

Los presentes inventores descubrieron que el desplazamiento de fase de la modulación es indicativo de una perturbación en la rejilla y, por lo tanto, puede mejorar la detección ya que el desplazamiento de fase se determina directamente a partir de la modulación de la luz, sin la necesidad de determinar una respuesta en el dominio del tiempo de la señal.

Los desplazamientos de fase de la modulación pueden determinarse mediante el sistema de procesamiento 60 mediante el uso de cualquier técnica conocida en la técnica. Un ejemplo representativo de una técnica adecuada para determinar un desplazamiento de fase se proporciona en la sección de Ejemplos que sigue (ver Ejemplo 2). Alternativa, o adicionalmente, el sistema de procesamiento de señales 60 puede comprender un analizador de red y/o un analizador de espectro. Cuando el sistema de procesamiento 60 comprende un analizador de red, puede servir tanto para procesar las señales eléctricas proporcionadas por el conjunto de detectores 58 para determinar los desplazamientos de fase, como para generar la señal de modulación que es recibida por la fuente de luz 36 o el modulador 38. Así, el mismo analizador de red puede servir como controlador 42 y como sistema de procesamiento de señales 60.

En modalidades en las que la fibra tiene una pluralidad de rejillas y se emplea escaneo de modulación, el desplazamiento de fase, longitud de onda o frecuencia individual causado por cada una de las rejillas se puede determinar a partir de la información proporcionada por la multiplicidad de frecuencias de modulación. En estas modalidades, el método mide preferentemente, para cada frecuencia de modulación, el desplazamiento de fase global y la magnitud global de la luz reflejada. Esto proporciona una pluralidad de desplazamientos de fase globales y una pluralidad de magnitudes globales. Cada desplazamiento de fase global y magnitud global describe una onda formada por una pluralidad de ondas parciales, correspondientes respectivamente a la pluralidad de rejillas en la fibra. Por lo tanto, cada desplazamiento de fase global y magnitud global transporta información sobre los desplazamientos de fase, longitud de onda o frecuencia individuales causados por las rejillas de la fibra. De acuerdo con algunas modalidades de la presente invención, el número de frecuencias de modulación diferentes que se emplean es suficiente para extraer los desplazamientos de fase, longitud de onda o frecuencia individuales, y opcionalmente también las magnitudes individuales, de los desplazamientos de fase globales y la magnitud global. Esto se puede hacer, por ejemplo, resolviendo un conjunto de ecuaciones, donde las incógnitas son los desplazamientos de fase, longitud de onda o frecuencia individuales, y los coeficientes y términos conocidos son los desplazamientos de fase globales y las magnitudes globales. Los inventores descubrieron que para una fibra que tiene N rejillas, es suficiente emplear N/2 frecuencias de modulación diferentes. En la sección de Ejemplos siguiente se proporciona un ejemplo representativo de un conjunto de ecuaciones y una técnica para resolver automáticamente estas ecuaciones (consulte el Ejemplo 3).

En modalidades en las que la fibra tiene una pluralidad de rejillas y se emplea escaneo de dispersión, el desplazamiento de fase, longitud de onda o frecuencia individual causado por cada una de las rejillas se puede determinar a partir de la información proporcionada por la multiplicidad de valores del coeficiente de dispersión. En estas modalidades, el método mide preferentemente, para cada valor del coeficiente de dispersión, el desplazamiento de fase global y la magnitud global de la luz reflejada. Esto proporciona una pluralidad de desplazamientos de fase globales y una pluralidad de magnitudes globales, como se detalla más arriba en la presente descripción. De acuerdo con algunas modalidades de la presente invención, el número de diferentes coeficientes de dispersión que se emplean es suficiente para extraer los desplazamientos de fase, longitud de onda o frecuencia individuales, y opcionalmente también las magnitudes individuales, a partir de los desplazamientos de fase globales y la magnitud global. Esto se puede hacer, por ejemplo, resolviendo un conjunto de ecuaciones, como se detalla más arriba en la presente descripción y se ejemplifica a continuación.

En algunas modalidades de la presente invención, el sistema 60 también recibe una señal desde un detector de luz de referencia 62. El detector de luz de referencia 62 puede recibir un haz de luz que se refleja en la(s) rejilla(s) pero no se somete a dispersión y/o demultiplexación adicional. Por ejemplo, se puede colocar un divisor de haz 57 en la trayectoria óptica del haz de luz que sale de la fibra 44 de manera que un haz continúe como se detalla más arriba en la presente descripción y otro haz, que sirve como haz de referencia, se dirige al detector 62.

Desde 19 el método puede pasar a 20, en el que se determina la perturbación de la rejilla en base a los desplazamientos de fase. Por ejemplo, supongamos que el sistema 40 proporciona un haz de luz que está modulado sinusoidalmente de acuerdo con  $\cos(\Omega t)$ , donde  $\Omega$  es la frecuencia de modulación angular (por ejemplo, dentro de un rango de radiofrecuencia). El dispositivo óptico dispersivo 54 dispersa la luz de modo que cada componente llegue por separado al sistema de demultiplexación óptico 56. Supongamos además que cuando la fibra 44 no está perturbada, el componente de luz reflejado desde la  $i$ -ésima rejilla sale del dispositivo óptico dispersivo 54 adquiriendo una fase de modulación general  $\phi_i$ , de modo que se modula de acuerdo con  $\cos(\Omega t + \phi_i)$ . El sistema 56 dirige cada componente a un canal separado, en donde el componente de luz reflejado desde la  $i$ -ésima rejilla se dirige al  $i$ -ésimo canal óptico. El detector óptico respectivo convierte el  $i$ -ésimo canal óptico en una señal eléctrica que a su vez es procesada por el sistema de procesamiento de señales 60 para determinar sus parámetros de modulación.

Supongamos ahora que se produce una perturbación en la  $i$ -ésima rejilla de modo que refleja selectivamente el componente de luz en la longitud de onda  $\lambda_i + \Delta\lambda_i$ , donde  $\lambda_i$  es la longitud de onda (dentro del rango óptico) del componente de luz que se habría reflejado en la  $i$ -ésima rejilla si esta rejilla no hubiera sido perturbada. Después de la dispersión mediante el dispositivo óptico dispersivo 54, el  $i$ -ésimo componente adquiere una fase de modulación  $\phi_i + \Delta\phi_i$  de modo que se module de acuerdo con  $\cos(\Omega t + \phi_i + \Delta\phi_i)$ . Por tanto, el desplazamiento de fase óptica  $\Delta\phi_i$  en la modulación es un proxy del desplazamiento de la longitud de onda óptica  $\Delta\lambda_i$  (o, equivalentemente, un desplazamiento de frecuencia óptica  $\Delta f_i = c\Delta\lambda_i / \lambda_i^2$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz).

Cuando se emplea el sistema de demultiplexación 56, el sistema de demultiplexación 56 dirige este componente al  $i$ -ésimo canal óptico, el detector óptico respectivo convierte este componente en una señal eléctrica recibida por el sistema de procesamiento de señales 60. Cuando el sistema de procesamiento de señales 60 determina que la fase de la señal generada por el  $i$ -ésimo detector está desplazada, el método determina que se produjo una perturbación en la  $i$ -ésima rejilla.

Alternativamente, el sistema de procesamiento de señales 60 puede determinar el valor del desplazamiento de la longitud de onda óptica  $\Delta\lambda_i$  sin demultiplexar y sin medir su proxy de desplazamiento de fase de la modulación, por ejemplo, empleando escaneo de modulación como se describió en la presente descripción. Cuando el sistema de procesamiento de señales 60 determinó que  $\Delta\lambda_i$  es distinto de cero, el método determina que la perturbación ocurrió en la  $i$ -ésima rejilla.

Por lo tanto, el método y el sistema determinan opcional y preferentemente con éxito la perturbación en base al desplazamiento de fase, sin depender de la potencia óptica del haz de luz reflejado. Esto es diferente a las técnicas convencionales que requieren operaciones complicadas de procesamiento de potencia óptica para determinar la perturbación.

La perturbación determinada en 20 se puede expresar en más de una manera. En algunas modalidades, la perturbación se expresa como un desplazamiento en la longitud de onda de Bragg respectiva ( $\Delta\lambda_i$ , en el ejemplo anterior). El desplazamiento de Bragg se puede determinar, por ejemplo, mediante el uso de una tabla de búsqueda generada empíricamente que relaciona entre el desplazamiento de fase de la modulación  $\Delta\phi_i$  y el desplazamiento de Bragg  $\Delta\lambda_i$ . A partir del valor expresado del desplazamiento de Bragg, el método puede determinar un valor de una cantidad física que efectúa la perturbación de la rejilla, por ejemplo, como se conoce en la técnica de los sensores FBG.

También se contemplan modalidades en las que la perturbación se expresa como el valor de la cantidad física sin determinar realmente el desplazamiento de Bragg. El valor de la cantidad física se puede determinar mediante el uso de una tabla de búsqueda generada empíricamente que relaciona el desplazamiento de fase de la modulación y el valor de la cantidad física.

Ejemplos representativos de cantidades físicas que pueden determinarse incluyen, sin limitación, temperatura ambiente, presión aplicada a la fibra, deformación de la fibra, movimiento acelerado de la fibra (por ejemplo, vibración). Otra cantidad física que se contempla es la profundidad de la rejilla respectiva que se puede determinar en base a la presión aplicada a la misma.

Los presentes inventores descubrieron que la resolución de la detección del desplazamiento de Bragg (por lo tanto también del valor de la cantidad física a determinar) puede mejorarse mediante una selección juiciosa de la frecuencia de la modulación y/o la resolución de la medición del desplazamiento de fase de la modulación. Específicamente, denota la resolución de la medición del desplazamiento de fase de la modulación por  $\Delta\phi_{res}$ , el parámetro de dispersión que caracteriza la dispersión por  $\tilde{D}$ , y la frecuencia angular de modulación por  $\Omega$ , al menos

uno de  $\Omega$ ,  $\Delta\phi_{\text{res}}$  y  $\dot{D}$  se seleccionan preferentemente para satisfacer la relación:  $\Delta\phi_{\text{res}}/(\dot{D}\times\Omega) \leq \Delta\lambda_{\text{res}}$ , donde  $\Delta\lambda_{\text{res}}$  es un umbral de resolución espectral predeterminado. Por ejemplo, para un sistema de procesamiento de señales 60 capaz de medir la fase en una fase de resolución de  $\Delta\phi_{\text{res}}$ , y el dispositivo óptico dispersivo 54 capaz de efectuar una dispersión caracterizada por un coeficiente de dispersión, el parámetro de dispersión de  $\dot{D}$ , el controlador 42 puede configurarse para generar una señal de modulación caracterizada por una frecuencia de modulación angular  $\Omega$  que es al menos  $\Delta\phi_{\text{res}}/(\dot{D}\times\Delta\lambda_{\text{res}})$ .

Típicamente, pero no necesariamente,  $\Delta\lambda_{\text{res}}$  es inferior a 10 picómetros o inferior a 1 picómetro o inferior a 0,1 picómetros o inferior a 0,05 picómetros, por ejemplo, 0,01 o menos.

Los inventores descubrieron que la mejora en la resolución espectral  $\Delta\lambda_{\text{res}}$  (de ahí también la mejora en la capacidad de determinar el valor de la cantidad física) se puede lograr sin o con un pequeño compromiso en la velocidad de la medición. La velocidad de la medición se expresa típicamente en términos de la velocidad de muestreo empleada por el sistema de procesamiento de señales 60 para determinar los desplazamientos de fase de la modulación. De acuerdo con algunas modalidades preferidas de la presente invención al menos uno de  $\Omega$ ,  $\Delta\phi_{\text{res}}$  y  $\dot{D}$  se selecciona para proporcionar una resolución espectral de  $\Delta\lambda_{\text{res}}$  de menos de 0,1 picómetros o menos de 0,05 picómetros, por ejemplo, 0,01 o menos, a una velocidad de muestreo del sistema de procesamiento de señales 60 que es de al menos 1 kHz o al menos 10 kHz o al menos 100 kHz o al menos 1 MHz o al menos 10 MHz.

El método termina en 21.

Como se usa en la presente el término "aproximadamente" se refiere a  $\pm 10\%$ .

La palabra "ilustrativo" se usa en la presente descripción significa "que sirve como un ejemplo, instancia, o ilustración". Cualquier modalidad que se describe como "ilustrativa" no necesariamente debe interpretarse como preferida o ventajosa sobre otras modalidades y/o para excluir la incorporación de características a partir de otras modalidades.

La palabra "opcionalmente" se usa en la presente descripción significa "se proporciona en algunas modalidades y no se proporciona en otras modalidades". Cualquier modalidad particular de la invención puede incluir una pluralidad de características "opcionales" a menos que tales características den lugar a conflicto.

Los términos "comprende", "que comprende", "incluye", "que incluye", "que tiene" y sus conjugaciones significa "que incluye, entre otros".

La expresión "que consiste de" significa "que incluye y limitado a".

El término "consiste esencialmente en" significa que la composición, método o estructura pueden incluir ingredientes adicionales, pasos y/o partes, pero sólo si los ingredientes adicionales, pasos y/o partes no alteran materialmente las características básicas y novedosas de la composición de la invención, método o estructura que se reivindica.

Como se usa en la presente, las formas singulares "uno", "una", "el" y "la" incluyen los referentes en plural a menos que el contexto claramente lo dicte de cualquier otra manera. Por ejemplo, el término "un compuesto" o "al menos un compuesto" puede incluir una pluralidad de compuestos, que incluye mezclas de los mismos.

A lo largo de esta solicitud, diversas modalidades de esta invención se pueden presentar en un formato de rango. Se debe entender que la descripción en formato de rango es solamente para conveniencia y brevedad, y no debe interpretarse como una limitación inflexible en el alcance de la invención. En consecuencia, la descripción de un rango debe considerarse describir específicamente todos los posibles subrangos, así como también valores numéricos individuales dentro de ese rango. Por ejemplo, la descripción de un rango tal como de 1 a 6 se debe considerar describir específicamente subrangos tales como de 1 a 3, de 1 a 4, de 1 a 5, de 2 a 4, de 2 a 6, de 3 a 6, etc., así como también los números individuales dentro de ese rango, por ejemplo, 1, 2, 3, 4, 5, y 6. Esto se aplica independientemente de la amplitud del rango.

Cada vez que un rango numérico se indica en la presente descripción, se entiende que incluye cualquier número que se cite (fraccional o integral) dentro del rango que se indica. Las frases "que van/oscila entre" el primer número que se indica y el segundo número que se indica y "que van/oscila desde" el primer número que se indica "a" el segundo número que se indica se usan en la presente descripción de forma intercambiable y se entiende que incluye el primer y el segundo número que se indica y todos los números fraccionarios e integrales entre los mismos.

Se aprecia que ciertas características de la invención, las cuales, por claridad, se describen en el contexto de modalidades separadas, pueden además proporcionarse en combinación en una sola modalidad. A la inversa, diversas características de la invención, que por brevedad, se describen en el contexto de una única modalidad, además pueden proporcionarse por separado o en cualquier subcombinación adecuada o como adecuada en cualquier otra modalidad descrita de la invención. Ciertas características que se describen en el contexto de diversas modalidades no deben considerarse características esenciales de estas modalidades, a menos que la modalidad

sea inoperante sin esos elementos.

Diversas modalidades y aspectos de la presente invención como se delineó anteriormente y como se reivindicó en la sección de reivindicaciones a continuación encuentran apoyo experimental en los siguientes ejemplos.

### Ejemplos

Ahora se hace referencia a los siguientes ejemplos, que junto con las descripciones anteriores ilustran algunas modalidades de la invención de forma no limitativa.

#### Ejemplo 1

##### Estudio experimental

Este ejemplo demuestra un interrogador FBG de alta velocidad y alta sensibilidad basado en medición de desplazamiento de fase de radiofrecuencia (RF). Mediante el uso de una fuente modulada sinusoidalmente y un elemento de dispersión cromática, los desplazamientos de la longitud de onda de Bragg se convierten directamente en desplazamientos de fase de RF. Se demuestran velocidades de interrogación de más de 1 MHz con una sensibilidad espectral de menos de 1 pm y una sensibilidad de menos de 0,01 pm a una velocidad de 100 Hz. La excelente relación resolución-velocidad se demuestra en un rango de velocidad de 5 órdenes de magnitud. Se demuestra una sensibilidad general frente a una dependencia de la velocidad de 0,34 fm/√Hz, que equivale a 0,3 nanodeformación/√Hz. Este ejemplo utiliza mediciones directas de desplazamiento de fase de RF como base para la interrogación de desplazamientos de la longitud de onda en un sensor FBG. Se demuestra el potencial único de este método para lograr una excelente relación resolución-velocidad, por ejemplo, una velocidad de 10 MHz con una resolución espectral de 1 pm.

Una fuente de luz es modulada por una señal de RF sinusoidal en la frecuencia  $f_{mod} = \Omega/2\pi$  e índice de modulación  $m$ , dando una potencia:

$$P(t) = P_0[1 + m \cos(\Omega t)] = P_0 + P_{AC}(t) \quad (1)$$

donde  $P_0$  y  $P_{AC}(t)$  son la potencia promedio y la envolvente de la señal respectivamente. Después de pasar por un medio dispersivo con un coeficiente de dispersión  $D$  [ps/nm/km] y longitud  $L$ , la señal adquiere un retardo de grupo  $\tau_g$  que se puede expresar como una fase adicional  $\phi$  en el término AC:

$$P_{AC,env}(t) = P_0 \cos[\Omega(t - \tau_g)] = P_0 \cos(\Omega t - \phi) \quad (2)$$

Dado que el retardo de grupo depende de la longitud de onda de la portadora, un ligero desplazamiento  $\Delta\lambda$  de la longitud de onda central provocará un desplazamiento en la fase de RF  $\Delta\phi$  que se puede expresar aproximadamente como:

$$\Delta\phi \approx \Omega \tilde{D} \Delta\lambda \quad (3)$$

Midiendo  $\Delta\phi$ ,  $\Delta\lambda$  se determina. El desplazamiento de fase mínimo detectable  $\Delta\phi_{res}$  está limitado por el ruido de fase que acompaña a la señal. Por lo tanto, la resolución espectral se define como:

$$\Delta\lambda_{res} = \Delta\phi_{res} / \Omega \tilde{D} \quad (4)$$

de modo que la resolución espectral mejora para valores más bajos de resolución de desplazamiento de fase, mayor frecuencia de modulación de RF y mayor dispersión.

La configuración experimental utilizada en esta demostración se ilustra en la Figura 3. Un diodo superluminiscente (SLED) en la banda C se modula directamente con una señal de RF de un analizador de redes vectorial (VNA) que tiene un filtro de RF sintonizable. En el presente ejemplo, la frecuencia de modulación fue  $f_{mod}=923$  MHz. La luz modulada se amplificó mediante un EDFA y se dirigió con un circulador a un canal de detección que tenía tres FBG con diferentes longitudes de onda de Bragg. La luz reflejada se dirigió a un componente de dispersión, que era un módulo de compensación de dispersión (DCM) que constaba de un circulador y un FBG chirriado (Teraxion DCML-C0100-160k) que tenía un parámetro de dispersión  $\tilde{D} = -2680$  ps/nm (utilizado para los primeros tres experimentos descritos a continuación), o una fibra compensadora de dispersión (DCF), un parámetro de dispersión con  $DL = -680$  ps/nm (utilizado para una parte del cuarto experimento que se describe a continuación). Un demultiplexor dividió la luz en tres regímenes espectrales correspondientes a las longitudes de onda de Bragg de los tres FBG, y luego las señales detectadas se enrutaron de regreso al VNA para medir el desplazamiento de fase de RF. La potencia óptica promedio detectada fue de aproximadamente -16 dBm.

En un primer experimento se demostró el rendimiento del sistema en condiciones de deformación débil. Uno de los FBG se tensó periódicamente con una etapa mecánica motorizada de alta precisión a una frecuencia de aproximadamente 1 Hz, y la señal se muestreó a una velocidad de 10 Hz. La deformación pk-pk en la FBG fue de aproximadamente 0,09  $\mu\epsilon$ , lo que dio un desplazamiento espectral de aproximadamente 0,1 pm en la longitud de onda de Bragg. La señal de salida se muestra en la Figura 4, lo que demuestra la capacidad del sistema de las presentes modalidades para adquirir señales de deformación débiles con buena SNR. La capacidad de resolución mostrada es inferior a 0,1 pm. En este experimento, el ancho de banda de frecuencia intermedia ( $IF_{BW}$ ) del VNA se estableció en  $IF_{BW}=10$  Hz, permitiendo una velocidad de adquisición de aproximadamente 10 muestras por segundo, ya que la velocidad de muestreo del VNA es proporcional al  $IF_{sw}$ .

Un segundo experimento demostró la respuesta del sistema en una región ultrasónica entre 20-100 kHz. Se sumergió un segundo FBG en un recipiente lleno de agua, junto con una sonda ultrasónica (Sonics Vibra-Cell) que proporciona una vibración fija a 20 kHz. La transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal adquirida se muestra en la Figura 5 para tres valores diferentes de la intensidad de la onda ultrasónica. En la Figura 5, la línea verde corresponde al 20 % de potencia ultrasónica, la línea roja corresponde al 60 % de potencia ultrasónica y la línea negra corresponde al 80 % de potencia ultrasónica. Las líneas rojas y negras están desplazadas para mayor claridad. Tenga en cuenta que a medida que aumenta la intensidad aparece el segundo armónico a 40 kHz, y a mayor intensidad aparecen otras frecuencias, debido a la no linealidad de la sonda. Los valores de desplazamiento de la longitud de onda del eje y ( $\Delta\lambda$ ) se refieren únicamente al experimento de nivel de baja intensidad (20 %), los demás están en la misma escala, pero desplazados para mayor claridad. La adquisición de velocidad fue de unos 70 kHz para el experimento de bajo nivel y de unos 96 kHz para los niveles más altos, con el fin de registrar las vibraciones armónicas más altas.

La Figura 6 muestra los resultados de un tercer experimento, donde se enrolló un tercer FBG alrededor de un tensor de fibra piezoeléctrica (Optiphase) impulsado por una señal sinusoidal a 200 kHz. La velocidad de adquisición se estableció en aproximadamente 1,4 MHz. Un gráfico de la señal FFT muestra el pico de 200 kHz, correspondiente a un desplazamiento de aproximadamente 3,5 pm en la longitud de onda de Bragg, con una SNR de aproximadamente 7.

A lo largo de estos experimentos no se observó ninguna interferencia entre las señales de RF de las diferentes reflexiones de FBG, lo que permitió una detección limpia de cada sensor de FBG.

En un cuarto experimento, que consistió en cuatro ejecuciones diferentes, la dependencia general de la resolución del sistema del  $IF_{BW}$  (que limita la velocidad de la medición) se caracterizó para diferentes valores del parámetro D y/o de la frecuencia de modulación  $f_{mod}$ . En cada ejecución experimental, el  $IF_{BW}$  del VNA se aumentó gradualmente y se midió la resolución mínima del desplazamiento de la longitud de onda (SNR = 1), mediante el uso del mismo tercer FBG utilizado en el tercer experimento. Los resultados se muestran en la Figura 7. En la primera ejecución, se utilizó una fibra compensadora de dispersión (DCF) estándar con  $\tilde{D} = -680$  ps/nm (puntos azules en la Figura 7). En la segunda ejecución, el DCF fue reemplazado por el DCM usado anteriormente ( $D = -2680$  ps/nm, puntos rojos en la Figura 7). Para ambas ejecuciones la  $f_{mod}$  era de 133 MHz. En la tercera y cuarta ejecución, el DCM permaneció y la frecuencia de modulación se aumentó primero a 913 MHz (puntos verdes en la Figura 7) y luego se redujo a 635 MHz (puntos negros en la Figura 7). En el presente ejemplo, se prefirió esta última frecuencia, lo que proporciona 17 dB más de potencia de RF. Las líneas sólidas en la Figura 7 se ajustan a una resolución proporcional a la raíz cuadrada de la velocidad.

Como se demuestra en la Figura 7, para cualquier parámetro de dispersión dado  $\tilde{D}$  y frecuencia de modulación, el equilibrio entre velocidad y sensibilidad depende sólo de la  $IF_{BW}$ . Aumentar el coeficiente de dispersión en un factor de 4, por ejemplo, reemplazando el DCF (línea azul) con el DCM (línea roja), mejora el rendimiento general en el mismo factor que predice la ecuación 4. El aumento de la  $f_{mod}$  en un factor de 8 (línea roja a línea verde) mejoró la sensibilidad en un factor inferior de 5,3. Se supone que esto se debe a una combinación de un aumento del ruido de fase con el aumento de la frecuencia, así como también a la dependencia combinada de RF de los distintos componentes del sistema. Esto se confirma en la ejecución final a 635 MHz (línea negra), donde el rendimiento del sistema alcanzó su punto máximo debido a la respuesta general de RF del sistema. Esto sugiere que las prestaciones descritas en este ejemplo se pueden mejorar aún más.

Este ejemplo demuestra una sensibilidad general frente a una dependencia de la velocidad de aproximadamente  $0,34 \frac{fm}{\sqrt{Hz}}$ , que en términos de medición de deformación equivale a  $0,3 \frac{n\epsilon}{\sqrt{Hz}}$ . Estos resultados superan a los interrogadores FBG convencionales. La técnica de las presentes modalidades es robusta y puede usarse para mediciones dinámicas así como también para monitoreo cuasiestático sin la necesidad de técnicas de compensación adicionales que aumentan el costo y la complejidad. Debido a su dependencia de mediciones en el dominio de la frecuencia y procesamiento electrónico de RF, la técnica de las presentes modalidades es más flexible que los métodos convencionales, particularmente aquellos que se basan en mediciones en el dominio del tiempo. Este ejemplo demuestra que el punto de funcionamiento se puede seleccionar en cualquier lugar de la región entre sensibilidad ultraalta o velocidad ultraalta, ajustando el ancho de banda del filtro de RF u otros parámetros de procesamiento de señales equivalentes.

El rango dinámico espectral (relación entre el ancho de banda espectral y la resolución) de la técnica ejemplificada es de aproximadamente 35 dB para una resolución de fase de 2 mrad, dentro de la restricción de ambigüedad de fase  $2\pi$ . En cuanto al rango de longitud de onda medible, la flexibilidad de la técnica de las presentes modalidades es una ventaja, ya que al disminuir la frecuencia de modulación disminuye la relación de desplazamiento de la longitud de onda a desplazamiento de fase (ver ecuación 3), lo que permite mediciones de rango de longitud de onda grandes. En algunas modalidades de la presente invención, la fase se puede desenvolver mediante procesamiento de señales digitales si la velocidad de muestreo es al menos dos veces más rápida que la velocidad de medición de la señal, lo que permite un aumento del rango dinámico. El gran rango dinámico espectral y la medición flexible del rango de longitud de onda permiten interrogaciones de alta velocidad y alta resolución. Otra ventaja de la técnica ejemplificada es que las fluctuaciones de la fuente de alimentación no afectan la medición. Esta característica es particularmente útil para fuentes de luz de emisión espontánea amplificada (ASE), como un SLED, donde el espectro de banda ancha parece ser estable durante una escala de tiempo larga, pero fluctúa en escalas de tiempo de RF.

Una ventaja adicional de la técnica de las presentes modalidades es la capacidad de interrogar simultáneamente sensores FBG en cascada enrutando las diferentes regiones espectrales de cada sensor FBG a diferentes detectores (por ejemplo, mediante el uso de un demultiplexor) y midiendo todos los desplazamientos de fase en paralelo. Esta capacidad es particularmente útil para aplicaciones como el monitoreo del estado de la máquina, especialmente a velocidades de muestreo de MHz.

## Ejemplo 2

### Medición de desplazamiento de fase ejemplificada

La Figura 8 es un diagrama de flujo de un método adecuado para amplificar un desplazamiento de fase de una señal con relación a una señal de referencia, de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención. El método es adecuado para mejorar la resolución de la medición del desplazamiento de fase. El desplazamiento de fase se puede amplificar mediante un factor predeterminado hasta un valor que esté dentro de la resolución de detección de un detector de desplazamiento de fase. El desplazamiento de fase amplificado puede entonces medirse mediante el detector de desplazamiento de fase como se conoce en la técnica, y el resultado de la medición puede dividirse por el factor predeterminado, permitiendo de esta manera la determinación del desplazamiento de fase no amplificado incluso si su extensión es menor que la resolución disponible del detector de desplazamiento de fase.

El método comienza en 600 y continúa hasta 601 en el que se genera o recibe una señal S, y hasta 602 en el que se emite una señal de referencia  $S_{ref}$  que se genera o se recibe. Por ejemplo, una de las señales (por ejemplo, la señal S) puede ser la señal reflejada por la(s) rejilla(s) en la fibra de las presentes modalidades, y la otra señal (por ejemplo, la señal  $S_{ref}$ ) se puede recibir a través de una trayectoria que no le permite interactuar con las rejillas. El método continúa hasta 603 en el que se varía la modulación de al menos una de las señales. La variación es opcional y preferentemente con respecto a la amplitud de la modulación de manera que las amplitudes de la modulación de la señal y la señal de referencia estén suficientemente cercanas entre sí. Preferentemente, una relación entre las amplitudes de la modulación de la señal y la señal de referencia es de aproximadamente 0,9 a aproximadamente 1,1, o de aproximadamente 0,95 a aproximadamente 1,05, o de aproximadamente 0,99 a aproximadamente 1,01, o de aproximadamente 0,995 a aproximadamente 1,005, o de aproximadamente 0,999 a aproximadamente 1,001 o desde aproximadamente 0,9995 a aproximadamente 1,0005 o desde aproximadamente 0,9999 a aproximadamente 1,0001. La variación es opcional y preferentemente también con respecto a la fase de modulación, de manera que la diferencia de fase  $\theta_{in}$  entre la fase  $\theta_1$  de la señal de referencia y la fase  $\theta_2$  de la señal es suficientemente pequeña o suficientemente cercana a  $\pi$  radianes, como se detalla más arriba en la presente descripción. Opcionalmente, una de las señales S y  $S_{ref}$  se genera mediante operaciones seleccionadas del método 100 para garantizar que la diferencia de fase  $\theta_{in}$  es suficientemente pequeña o suficientemente cercana a  $\pi$  radianes. La(s) amplitud(es) y fase(es) empleadas para la variación de la modulación pueden seleccionarse mediante el método o almacenarse o codificarse en un circuito que varía la modulación.

El método preferentemente continúa hasta 604 en el cual se forma una señal de salida  $S_{out}$  que es una combinación lineal de las señales. Esto se puede hacer electrónicamente, mediante el uso de un circuito eléctrico u ópticamente mediante el uso de un conjunto óptico. La combinación 604 se puede realizar directamente, por ejemplo, mediante el uso de un circuito sumador de señales, o indirectamente, por ejemplo, mediante multiplicación de señales seguida de extracción de componentes de señales que son linealmente proporcionales a cada una de las señales, como se detalla más arriba en la presente descripción.

La combinación lineal se puede escribir generalmente como  $S_{out} = p(S + qS_{ref})$ , donde p es un parámetro de normalización, q es un coeficiente de combinación lineal y S y  $S_{ref}$  son, respectivamente, la señal y la señal de referencia que siguen a la variación de la modulación 603. El parámetro de normalización pag se puede establecer en cualquier número, por ejemplo, 1. El coeficiente de combinación lineal refleja la relación de peso de las dos señales y se selecciona opcional y preferentemente en base al signo de  $\cos(\theta_{in})$ , donde  $\theta_{in}$  es la diferencia de fase entre las fases de modulación de las señales.

Generalmente,  $q$  es aproximadamente 1 cuando  $\cos(\theta_{in})$  es negativo y aproximadamente -1 cuando  $\cos(\theta_{in})$  es positivo. Esto se puede escribir matemáticamente como  $q \approx \text{NINT}(\cos(\theta_{in}))$ , donde NINT es la función entera más cercana y el signo  $\approx$  debe entenderse dentro del 10 %. En otras palabras,  $q$  opcional y preferentemente satisface las condiciones  $\text{sign}(q) = -\text{sign}(\cos(\theta_{in}))$  y  $0,9 \leq |q| \leq 1$ .

Los presentes inventores descubrieron que el procedimiento anterior puede garantizar que la diferencia de fase de la señal de salida con relación a la referencia ( $\theta_{out} - \theta_1$ ) se amplifica en relación con la diferencia de fase  $\theta_{in}$ . Se encontró que el grado de amplificación puede alcanzar el valor de  $1/\alpha$ , donde  $\alpha$  es el valor absoluto de la diferencia entre 1 y la relación entre las amplitudes de la modulación de las señales. De acuerdo con algunas modalidades de la presente invención  $\alpha$  puede ser a lo máximo 0,1 o a lo máximo 0,05 o a lo máximo 0,01 o a lo máximo 0,005 o a lo máximo 0,0001 o menos, de modo que  $\theta_{out}$  puede ser 10 veces más grande o 20 veces más grande o 100 veces más grande o 200 veces más grande o 1000 veces más grande o 2000 veces más grande o 10 000 veces más grande que  $\theta_{in}$ , donde  $\theta_{out}$  es la fase de  $S_{out}$ .

En algunas modalidades de la presente invención, el método continúa hasta 605 en el que se mide la fase de la señal de salida con relación a la señal de referencia. Esto se puede hacer mediante el uso de cualquier técnica de medición de fase conocida en la técnica. Ejemplos representativos que incluyen, entre otros, detectores de fase que están disponibles comercialmente en Mini-Circuits®, EE.UU. y On Semiconductors®, EE.UU.

En algunas modalidades de la presente invención, el método continúa hasta 606 en el que se mide un cambio en el tiempo de la fase de la señal de salida con relación a la señal de referencia. La operación 606 se puede ejecutar independientemente de que se conozca o no la fase de la señal de salida, ya que se puede medir un cambio en una fase de una señal incluso cuando no se conoce la fase de la señal en sí. Por lo tanto, en algunas modalidades se ejecuta 605 y no se ejecuta 606, en algunas modalidades se ejecutan tanto 605 como 606, en algunas modalidades no se ejecuta 605 y se ejecuta 606, y en algunas modalidades no se ejecuta ni 605 ni 606.

El método termina en 607.

Una vez que se mide el cambio de la fase, se puede multiplicar por  $\alpha$  para determinar el desplazamiento de fase no amplificado.

La Figura 9 es una ilustración de un diagrama de bloques esquemático de un sistema 700 para amplificar un desplazamiento de fase de una señal con relación a una señal de referencia, de acuerdo con algunas modalidades de la presente invención. El sistema 700 está configurado opcional y preferentemente para ejecutar una o más operaciones del método 600 anterior. El sistema 700 comprende un circuito de modulación 702, configurado para variar la modulación de al menos una de las señales como se detalla más arriba en la presente descripción. Las amplitudes y fases empleadas para la variación de la modulación realizada por el circuito 702 pueden seleccionarse mediante el sistema 700, por ejemplo, mediante el uso de un circuito de selección de amplitud, o almacenarse o codificarse en el circuito 702.

El sistema 700 también puede comprender un combinador de señales 704, configurado para formar una señal de salida  $S_{out}$  que es una combinación lineal de las señales, como se detalla más arriba en la presente descripción. En algunas modalidades, el combinador 704 comprende un circuito sumador de señales. Estas modalidades son útiles cuando el coeficiente de combinación lineal es positivo (por ejemplo,  $q=1$ ). En algunas modalidades, el combinador 704 comprende un circuito sustractor de señales. Estas modalidades son útiles cuando el coeficiente de combinación lineal es negativo (por ejemplo,  $q=-1$ ). En algunas modalidades, el combinador 704 comprende un circuito multiplicador de señales. Estas modalidades son útiles cuando la combinación lineal se obtiene mediante multiplicación seguida de extracción de componentes lineales como se detalla más arriba en la presente descripción.

En alguna modalidad, el combinador 704 es un conjunto óptico configurado para realizar una combinación lineal de dos señales como se conoce en la técnica.

En algunas modalidades de la presente invención, el sistema 700 comprende un circuito detector 706, que puede configurarse como detector de fase para medir una fase de la señal de salida con relación a la señal de referencia, o como un detector de cambio de fase para medir un cambio de fase de la señal de salida a lo largo del tiempo, o como un detector de fase combinado y un detector de cambio de fase para medir tanto la fase como su cambio.

### Ejemplo 3

Cálculo de desplazamientos de fase resolviendo un sistema de ecuaciones.

Este ejemplo describe una técnica para calcular numéricamente el desplazamiento de la longitud de onda causado por cada rejilla, escaneando la frecuencia de modulación. La ventaja de esta técnica es que no necesita un elemento físico (como un demultiplexor) para separar los canales. Dado que la luz reflejada por las rejillas (y opcional y preferentemente que pasa a través del dispositivo óptico dispersivo) es una suma de las diferentes señales que regresan de las diferentes rejillas, la señal total en la frecuencia de modulación  $\Omega$  se puede escribir como:

$$a_1 e^{i\Delta\varphi_1} + a_2 e^{i\Delta\varphi_2} + \dots + a_N e^{i\Delta\varphi_N} = b e^{i\xi}$$

5 donde  $a_i$  and  $\Delta\varphi_i \equiv \check{D}\Omega\Delta\lambda_i$  son respectivamente la magnitud y el desplazamiento de fase reflejados en la  $i$ -ésima rejilla, y  $b$  y  $S$  son respectivamente la magnitud global y el desplazamiento de fase global de la señal total medida por un detector óptico que tiene un solo sensor óptico.

10 Suponiendo que las magnitudes  $a_i$  se conocen a partir de mediciones preliminares, mediante el escaneo de diferentes frecuencias de modulación  $\Omega_i$  (preferentemente al menos  $N/2$ , donde  $N$  es el número de rejillas en la fibra), se puede obtener un sistema de  $N$  ecuaciones con  $N$  incógnitas (los desplazamientos de longitud de onda de Bragg  $\Delta\lambda_i$ ). El escaneo puede ser en serie o en paralelo. El escaneo en paralelo se puede lograr modulando simultáneamente la señal de RF con varias frecuencias y midiendo, por ejemplo, mediante un sistema de procesamiento de señales, cada frecuencia por sí misma simultáneamente, por ejemplo, mediante el uso de filtros de RF. Un sistema adecuado de  $N$  ecuaciones se puede escribir como:

$$15 \quad \sum_{i=1}^N a_{i,\Omega_1} \cos(\check{D}\Omega_1\Delta\lambda_i) = b(\Omega_1) \cos(\xi(\Omega_1))$$

$$20 \quad \sum_{i=1}^N a_{i,\Omega_1} \sin(\check{D}\Omega_1\Delta\lambda_i) = b(\Omega_1) \sin(\xi(\Omega_1))$$

$$25 \quad \sum_{i=1}^N a_{i,\Omega_2} \cos(\check{D}\Omega_2\Delta\lambda_i) = b(\Omega_2) \cos(\xi(\Omega_2))$$

$$30 \quad \sum_{i=1}^N a_{i,\Omega_2} \sin(\check{D}\Omega_2\Delta\lambda_i) = b(\Omega_2) \sin(\xi(\Omega_2))$$

$$35 \quad \sum_{i=1}^N a_{i,\Omega_{N/2}} \cos(\check{D}\Omega_{N/2}\Delta\lambda_i) = b(\Omega_{N/2}) \cos(\xi(\Omega_{N/2}))$$

$$40 \quad \sum_{i=1}^N a_{i,\Omega_{N/2}} \sin(\check{D}\Omega_{N/2}\Delta\lambda_i) = b(\Omega_{N/2}) \sin(\xi(\Omega_{N/2}))$$

45 Una solución o solución parcial de este sistema de ecuaciones puede proporcionar los valores de  $\Delta\lambda_i$ ,  $i=1, 2, \dots, N$ . Este sistema de ecuaciones se puede resolver automáticamente mediante el uso de cualquier técnica conocida en la técnica. Los ejemplos representativos incluyen, entre otros, el método de 'región de confianza' [26] y la técnica 'Levenberg-Marguardt' [27,28].

50 Aunque la invención se ha descrito junto con las modalidades específicas de la misma, es evidente que muchas alternativas, modificaciones y variaciones serán evidentes para los expertos en la técnica. En consecuencia, se pretenden abarcar todas estas alternativas, modificaciones y variaciones como que caen dentro del alcance de las reivindicaciones anexas.

55 Referencias

1. J. Chen, B. Liu and H. Zhang, "Review of fiber Bragg grating sensor technology", Front. Optoelectron. China 4 204 (2011).
2. Y. C. Tong, L. Y. Chan and H. K. Tsang, "Fibre dispersion or pulse spectrum measurement using a sampling oscilloscope", Electronics Lett. 33(11) 983-985 (1997).
3. H. Chi and J. Yao, "Fiber chromatic dispersion measurement based on wavelength-to-time mapping using a femtosecond pulse laser and an optical comb filter," Optics Communications 280(2) 337-342 (2007).
4. Y. Wang, M. Han and A. Wang, "High-speed fiber-optic spectrometer for signal demodulation of interferometric fiber-optic sensors," Opt. Lett. 31 2408-10 (2006).
5. H.Y. Fu, H.L. Liu, X. Dong, H.Y. Tam, P.K.A. Wai and C. Lu, "High-speed fibre Bragg grating sensor interrogation using dispersion compensation fiber," Electronics Lett. 44 (10) 618-619 (2008).

6. J. Chou, B. Jalali and D. R. Solli, "Amplified wavelength-time transformation for real-time spectroscopy," *Nature Photonics* 2 (1) 48-51 (2008).
7. P. V. Kelkar, F. Coppinger, A. S. Bhushan and B. Jalali, "Time-domain optical sensing," *Electronics Letters* 35 (19) 1661-2 (1999).
- 5 8. J. Chou, Y. Han and B. Jalali, "Time-wavelength spectroscopy for chemical sensing. *IEEE Photonics Tech. Lett.* 16 (4) 1140-2 (2004).
9. G. Herink, B. Jalali, C. Ropers and D. R. Solli, "Resolving the build-up of femtosecond mode-locking with single-shot spectroscopy at 90MHz frame rate," *Nature Photonics* 10 321-326 (2016).
- 10 10. J. Hervas, C. R. Fernandez-Pousa, D. Barrera, D. Pastor, S. Sales and J. Capmany, "An interrogation technique of FBG cascade sensors using wavelength to radio-frequency delay mapping," *J. Lightwave Technol.* 33 (11) 2222-7 (2015).
11. J. C. Bellido and C. R. Fernandez-Pousa, "Spectral Analysis Using a Dispersive Microwave Photonics Link Based on a Broadband Chirped Fiber Bragg Grating," *J. Lightwave Technol.* 33 (20) 4207-14 (2015).
12. J. Park, W.V. Sorin and K.Y. Lau, "Elimination of the fibre chromatic dispersion penalty on 1550nm millimeter-wave optical transmission," *Electronics Lett.* 33 512-3 (1997).
- 15 13. B. Costa, D. Mazzone, M. Puleo, and E. Vezzoni, "Phase shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using LED's," *IEEE J. Quantum Electron.* QE-18 (10) 1509-1515 (1982).
14. W. W. Morey, J. R. Dunphy and G. Meltz, "Multiplexing fiber Bragg grating sensors," *J. Fiber and Integrated Optics* 10 351-360 (1992).
- 20 15. C. Wang and J. Yao, "Ultrafast and ultrahigh-resolution interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy," *J. Lightwave Technol.* 29 (19), 2927-2933 (2011).
16. Lei, M., Zou, W., Li, X. & Chen, J. Ultrafast FBG interrogator based on time-stretch method. *IEEE Photon. Technol. Lett.* 28, 778-781 (2016).
- 25 17. A. Ikeda, T. Nomura, Y.H. Matsuda, S. Tani, Y. Kobayashi, H. Watanand, K. Sato, "High-speed 100 MHz strain monitor using fiber Bragg grating and optical filter for magnetostriction measurements under ultrahigh magnetic fields," *Rev. Sci. Instrum.* 88 083906 (2017).
18. H. Fu, W. Zhang, C. Mou, X. Shu, L. Zhang, S. He and I. Bennion, "High-Frequency Fiber Bragg Grating Sensing Interrogation System Using Sagnac-Loop-Based Microwave Photonic Filtering," *IEEE Photonics tech. Lett.* 21 (8) 519 (2009).
- 30 19. J. Zhou, L. Xia, R. Chengy, Y. Wen and J. Rohollahnejad, "Radio-frequency unbalanced M-Z interferometer for wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors," *Opt. Lett.* 41 (2) 313-316 (2016).
20. H. Xia, C. Wang, S. Blais, and J. Yao, "Ultrafast and Precise Interrogation of Fiber Bragg Grating Sensor Based on Wavelength-to-Time Mapping Incorporating Higher Order Dispersion," *J. Lightwave Technol.* 28 (3) 254-261 (2010).
- 35 21. A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, " High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," *Electronics Lett.* 28 (3) 236-238 (1992).
22. X Dong, LY Shao, HY Fu, HY Tam and C. Lu, "FBG sensor interrogation based on RF signal measurement," *Proc. of SPIE* 7004 700423 (2008).
- 40 23. J. Frieden, J. Cugnoni, J. Botsis, T. Gmür and D. Coric, "High-speed internal strain measurements in composite structures under dynamic load using embedded FBG sensors," *Compos. Struct.* 92 1905-1912 (2010).
24. A. A. Giordana, E. E. Sicre and R. Duchowicz, "Simple wavelength-to-phase mapping FBG's interrogation method," *Optics and Lasers in Engineering* 55 221-225 (2014).
25. R. D. Sante, "Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications," *Sensors* 15 18666-18713 (2015).
- 45 26. Y. Yuan, "Recent Advances in Trust Region Algorithms." *Math. Program.* 151 249-281 (2015).
27. K. Levenberg, "A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares," *Quart. Appl. Math.* 2 164-168 (1944).
28. D. Marquardt, "An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters," *SIAM J. Appl. Math.* 11 431-441 (1963).
- 50

## REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método (10) para determinar la perturbación de una rejilla (46) formada en una fibra óptica (44), comprendiendo el método:
- 10 modular (12) y transmitir (14) un haz de luz (34) a través de la fibra óptica (44), midiendo (19) al menos un desplazamiento de fase  $\Delta\phi_i$  en una modulación de la luz reflejada por la rejilla (46) para convertir directamente un desplazamiento de la longitud de onda de dicho haz de luz (34) en dicho desplazamiento de fase en dicha modulación, y determinar (20) la perturbación de la rejilla (46) en base a la dicha en al menos un desplazamiento de fase;
- 15 en donde dicho desplazamiento de fase  $\Delta\phi_i$  se define como una diferencia entre una fase de modulación general  $\phi_i + \Delta\phi_i$  adquirido por dicho haz de luz (34) cuando la rejilla (46) está perturbada y una fase de modulación global  $\phi_i$  que habría sido captada por dicho haz de luz (34) si la rejilla (46) no hubiera estado perturbada; y
- en donde el método comprende dispersar (16) dicho haz de luz reflejado (34) antes de dicha medición (19) de dicho al menos un desplazamiento de fase  $\Delta\phi_i$ .
2. El método (10) de la reivindicación 1, en donde dicha modulación (12) se ejecuta antes de dicha transmisión (14).
- 20 3. El método (10) de cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, en donde dicha modulación (12) se ejecuta después de que dicho haz de luz (34) se refleje en la rejilla (46).
4. El método (10) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde la fibra óptica (44) está formada con una pluralidad de rejillas (46) y en donde al menos dos de dichas rejillas (46) se caracterizan por diferentes longitudes de onda de Bragg ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ).
- 25 5. El método (10) de acuerdo con la reivindicación 4, que comprende además demultiplexar (17) dicho haz de luz reflejado (34) en al menos dos canales, correspondientes respectivamente a dichas diferentes longitudes de onda de Bragg ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ), antes de dicha medición (19) de dicho al menos un desplazamiento de fase.
- 30 6. El método (10) de acuerdo con la reivindicación 4, en donde dicha modulación (12) comprende escanear una frecuencia de dicha modulación a lo largo de una pluralidad de frecuencias de modulación, en donde el método comprende medir (19) un desplazamiento de fase de la modulación y la magnitud de la modulación de la luz reflejada en dicha al menos dos rejillas para cada frecuencia de modulación, y determinar (20) una longitud de onda óptica individual o un desplazamiento de frecuencia óptica para cada una de dichas al menos dos rejillas, en base a dichos desplazamientos de fase de la modulación medidos y las magnitudes de la modulación medidas.
- 35 7. El método (10) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-6, en donde dicha medición (19) de dicho al menos un desplazamiento de fase se caracteriza por una resolución de fase predeterminada, y dicha dispersión (16) se caracteriza por un parámetro de dispersión predeterminado que describe el ensanchamiento del pulso por unidad de longitud de onda, y en donde una frecuencia de dicha modulación es al menos una relación entre dicha resolución de fase y una multiplicación de dicho parámetro de dispersión por un umbral de resolución espectral predeterminado.
- 40 8. El método (10) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-6, en donde dicha dispersión (16) se caracteriza por un coeficiente de dispersión, en donde el método comprende variar un valor de dicho coeficiente sobre una pluralidad de valores del coeficiente de dispersión, medir un desplazamiento de fase de la modulación y magnitud de la modulación de la luz reflejada por la rejilla para cada valor de dicho coeficiente de dispersión, y determinar (20) una longitud de onda óptica individual o un desplazamiento de frecuencia óptica para cada una de dichas al menos dos rejillas, en base a dichos desplazamientos de fase de la modulación medidos y las magnitudes de la modulación medidas.
- 45 9. El método (10) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-8, en donde dicha determinación (20) de la perturbación de la rejilla (46) comprende expresar la perturbación como un desplazamiento en una longitud de onda de Bragg ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ) que caracteriza la rejilla (46).
- 50 10. El método (10) de acuerdo con la reivindicación 1, en donde dicha determinación (20) de la perturbación de la rejilla (46) comprende expresar la perturbación como al menos una cantidad física que efectúa la perturbación de la rejilla (46).
- 55 11. El método (10) de acuerdo con la reivindicación 10, en donde dicha al menos una cantidad física se selecciona del grupo que consiste en temperatura ambiente, presión aplicada a la fibra (44), deformación de la fibra (44) y movimiento acelerado de la fibra (44).
- 60 12. Un sistema (30) para determinar la perturbación de una rejilla (46) formada en una fibra óptica (44),
- 65

comprendiendo el sistema (30):

- 5 un sistema de modulación óptica (40) para modular un haz de luz (34);  
un acoplador óptico (48) para acoplar dicho haz de luz (34) en la fibra óptica (44) y recibir la luz reflejada por  
la rejilla (46); y  
un sistema de análisis óptico y eléctrico (52) configurado para medir al menos un desplazamiento de fase en  
una modulación de la luz reflejada por la rejilla (44) para convertir directamente un desplazamiento de la  
longitud de onda de dicho haz de luz (34) en dicho desplazamiento de fase  $\Delta\phi_i$  en dicha modulación, y  
determinar la perturbación de dicha rejilla (46) en base a dicho al menos un desplazamiento de fase;  
10 en donde dicho desplazamiento de fase  $\Delta\phi_i$  se define como una diferencia entre una fase de modulación  
general  $\phi_i + \Delta\phi_i$  adquirido por dicho haz de luz (34) cuando la rejilla (46) está perturbada y una fase de  
modulación global  $\phi_i$  que habría sido captada por dicho haz de luz (34) si la rejilla (46) no hubiera estado  
perturbada; y  
15 en donde el sistema (30) comprende un dispositivo óptico dispersivo (54) configurado para dispersar dicho  
haz de luz reflejado (34) antes de dicha medición de dicho al menos un desplazamiento de fase  $\Delta\phi_i$ .
13. El sistema (30) de acuerdo con la reivindicación 12, en donde la fibra óptica (44) está formada con una pluralidad  
de rejillas (46) y en donde al menos dos de dichas rejillas (46) se caracterizan por diferentes longitudes de onda  
de Bragg ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ).
- 20 14. El sistema (30) de acuerdo con la reivindicación 13, en donde dicho sistema de análisis (52) comprende un  
sistema de demultiplexación óptico (56) para demultiplexar dicho haz de luz reflejado (34) en al menos dos  
canales, correspondientes respectivamente a dichas diferentes longitudes de onda de Bragg ( $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ ),  
antes de dicha medición de dicho al menos un desplazamiento de fase  $\Delta\phi_i$ .
- 25 15. El sistema (30) de acuerdo con la reivindicación 14, en donde dicho sistema de modulación óptica (40) está  
configurado para escanear una frecuencia de dicha modulación sobre una pluralidad de frecuencias de  
modulación  $\Omega_i$ , en donde dicho sistema de análisis óptico y eléctrico (52) está configurado para medir un  
desplazamiento de fase de la modulación  $\Delta\phi_i$  y de la magnitud de la modulación  $a_i$  de luz (34) reflejada en la  
rejilla (46) para cada frecuencia de modulación  $\Omega_i$ , y para determinar un desplazamiento de la longitud de onda  
30 óptica individual  $\Delta\lambda_i$  o un desplazamiento de la frecuencia óptica  $\Delta f_i$  para cada una de dichas al menos dos  
rejillas (46), en base a dichos desplazamientos de fase de la modulación medidos  $\Delta\phi_i$  y de las magnitudes de la  
modulación medidas  $a_i$ .

35

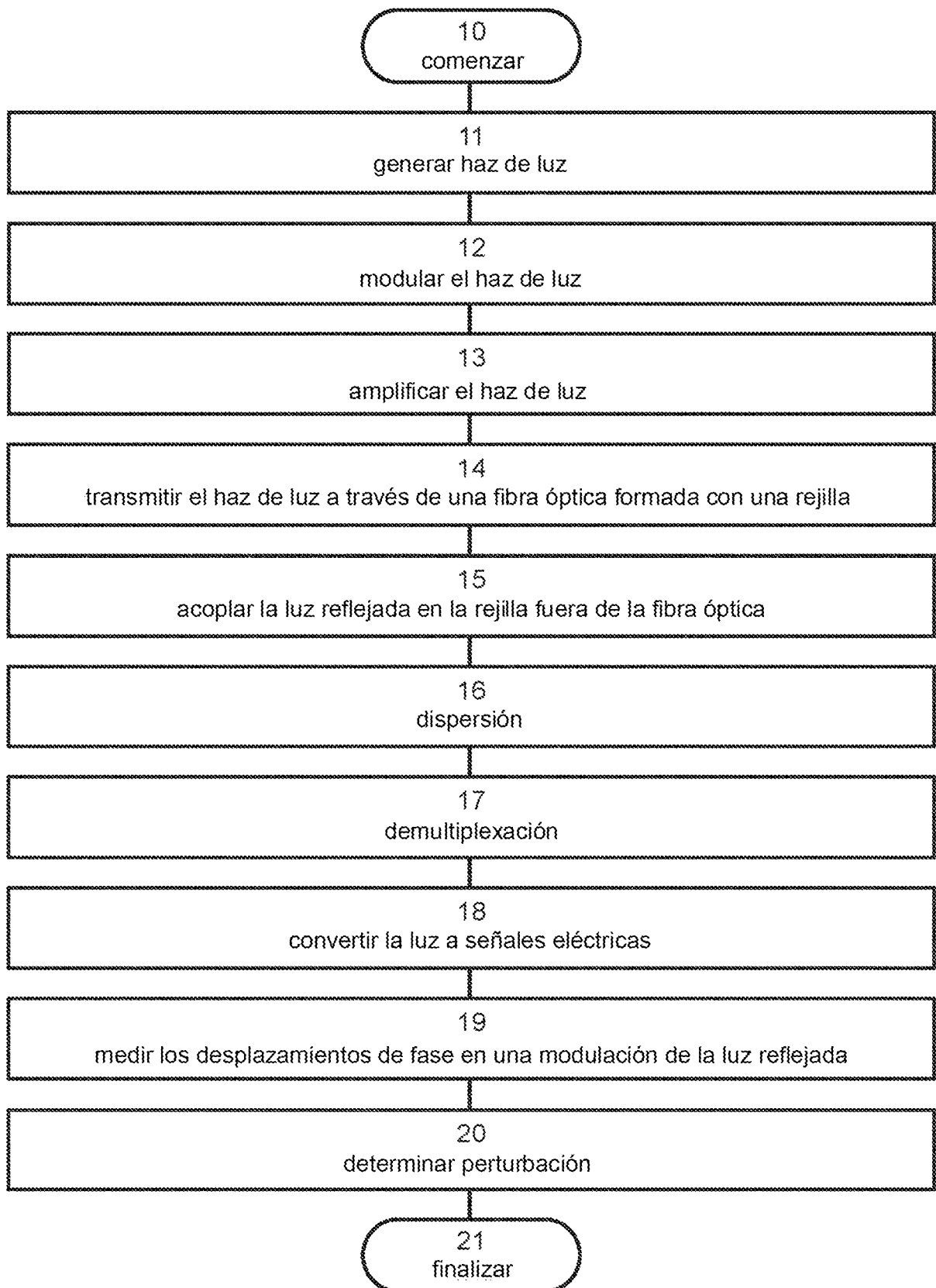


Figura 1

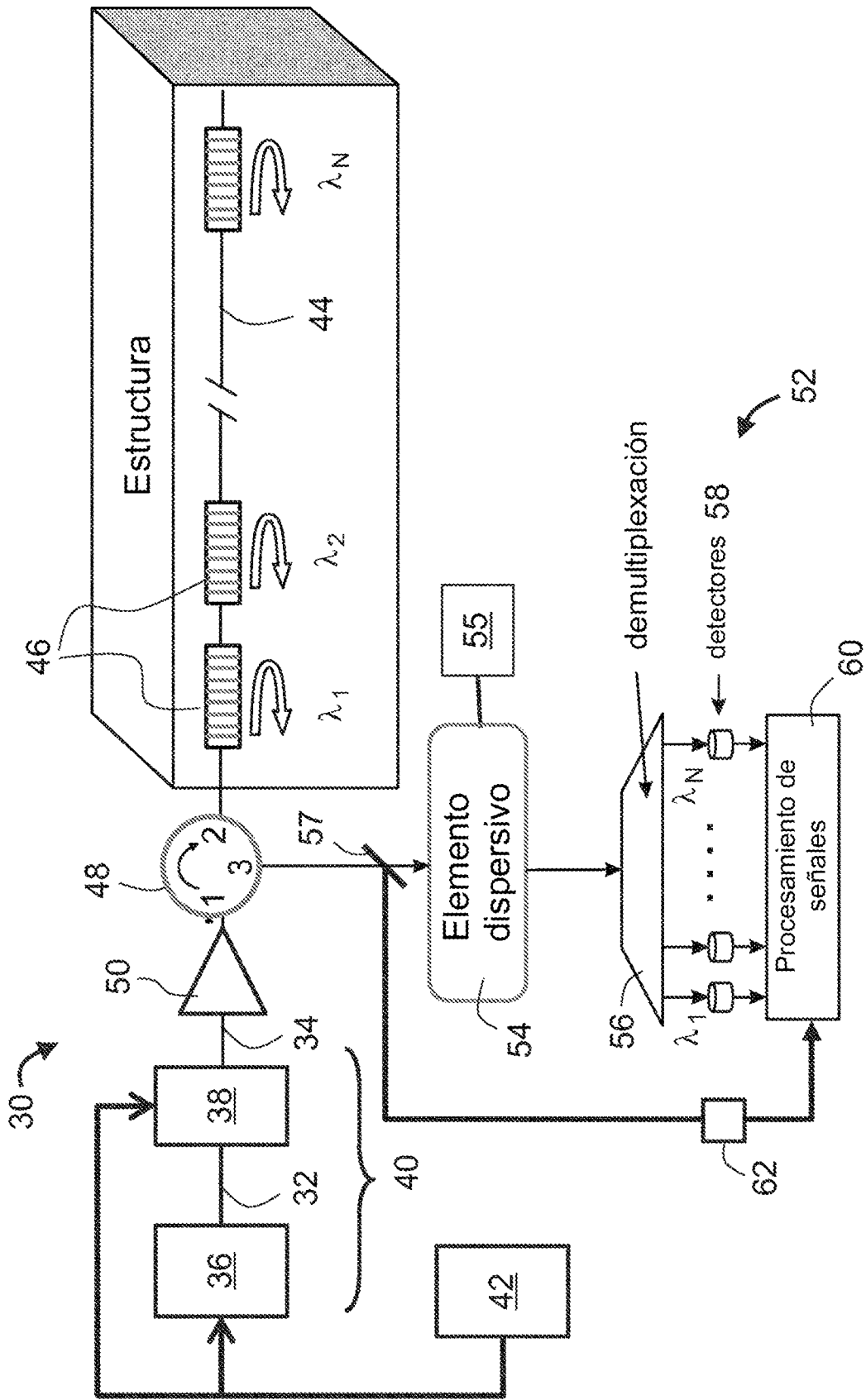


Figura 2

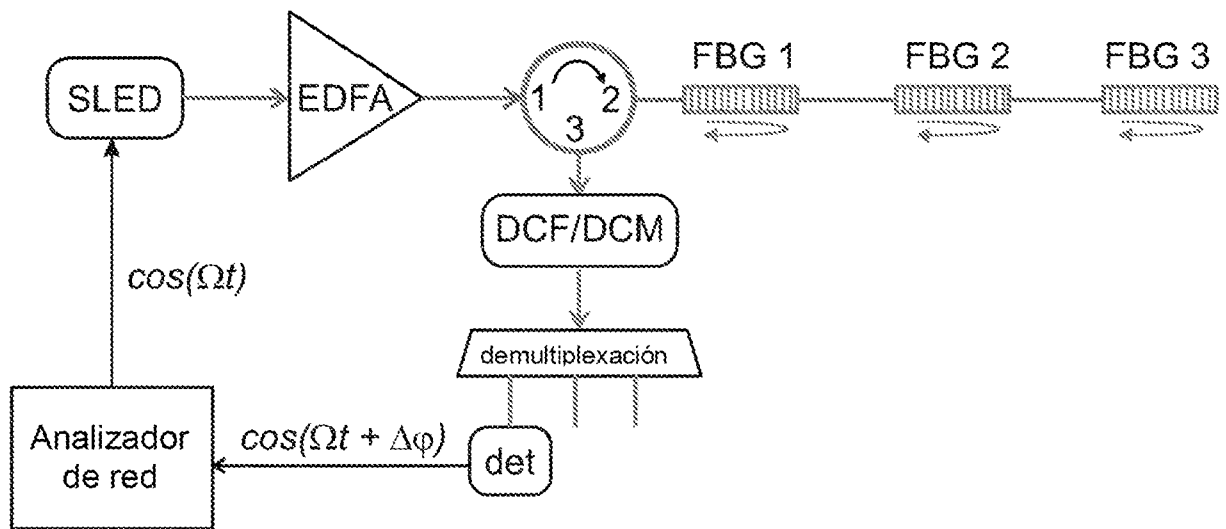


Figura 3

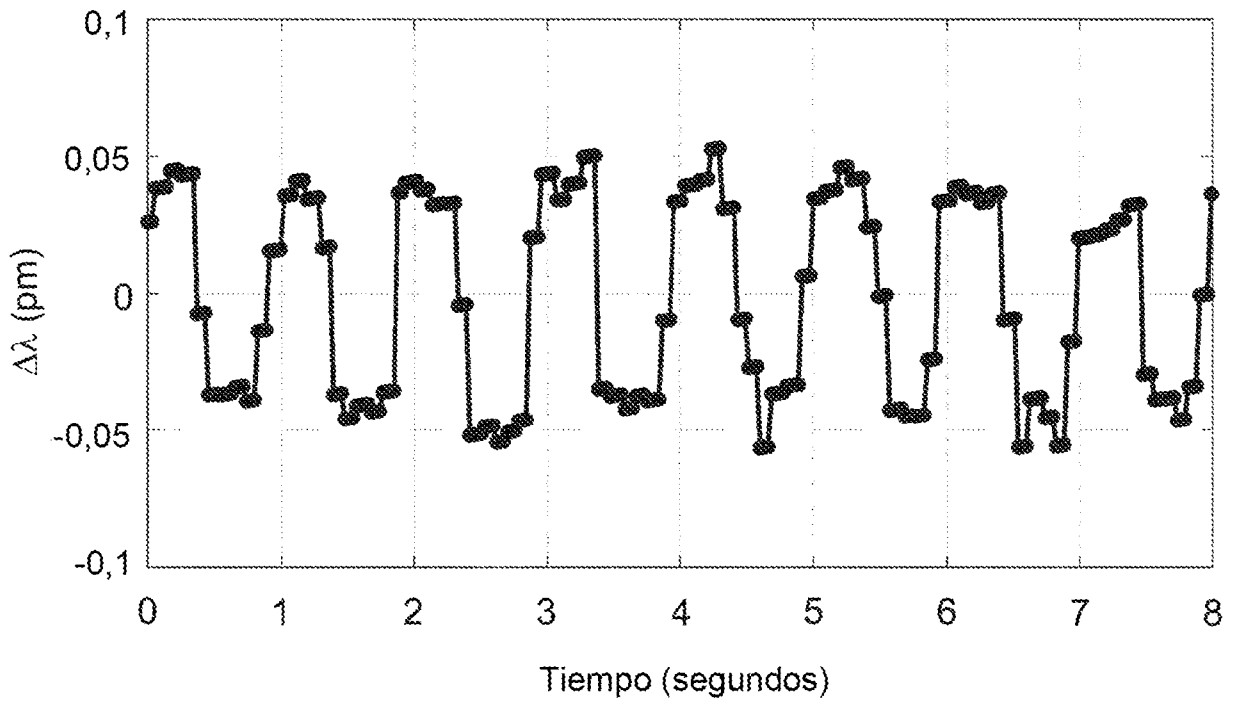


Figura 4

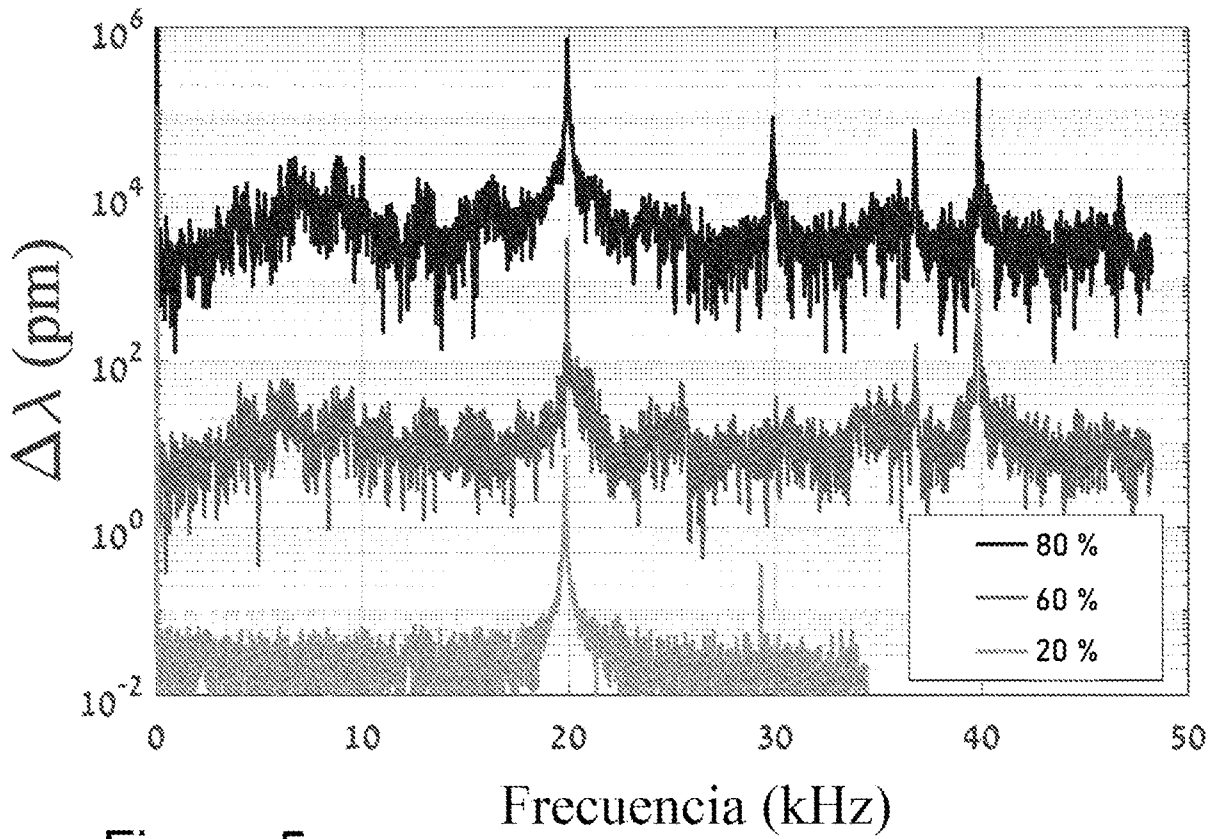


Figura 5

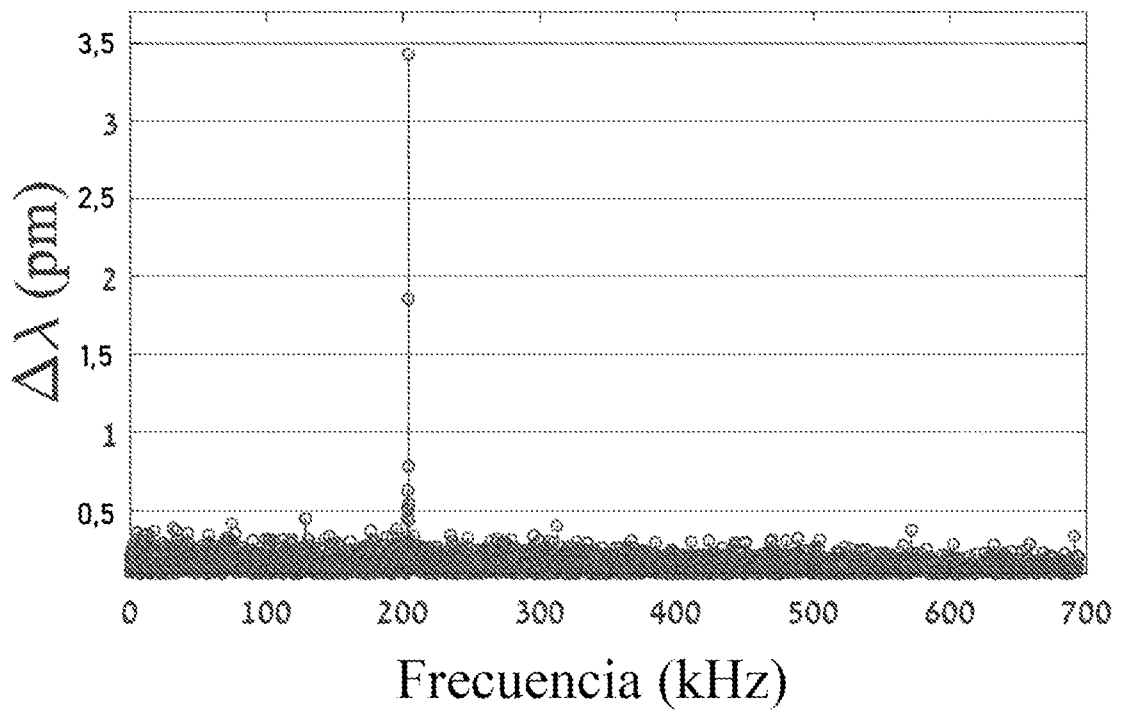


Figura 6

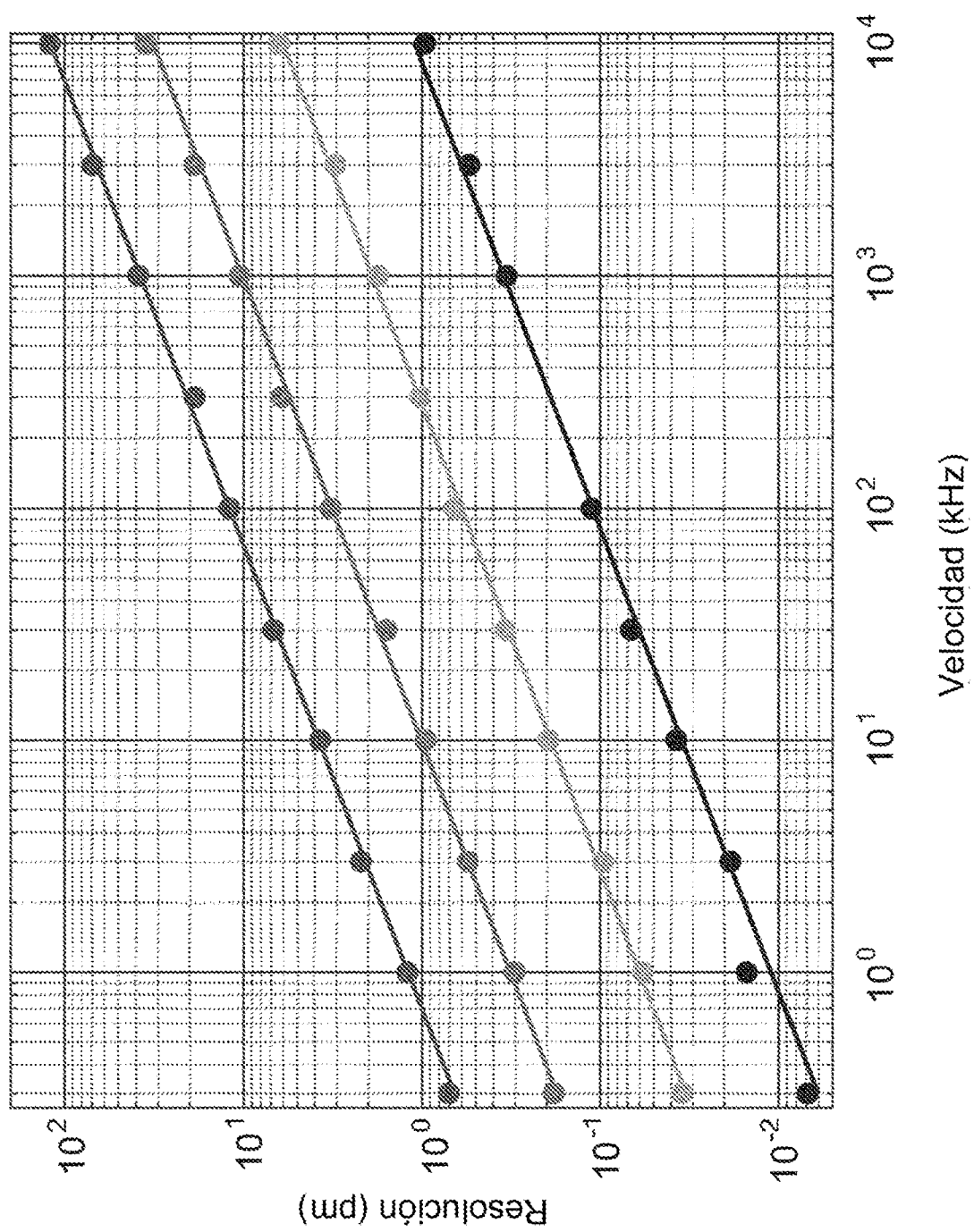


Figura 7

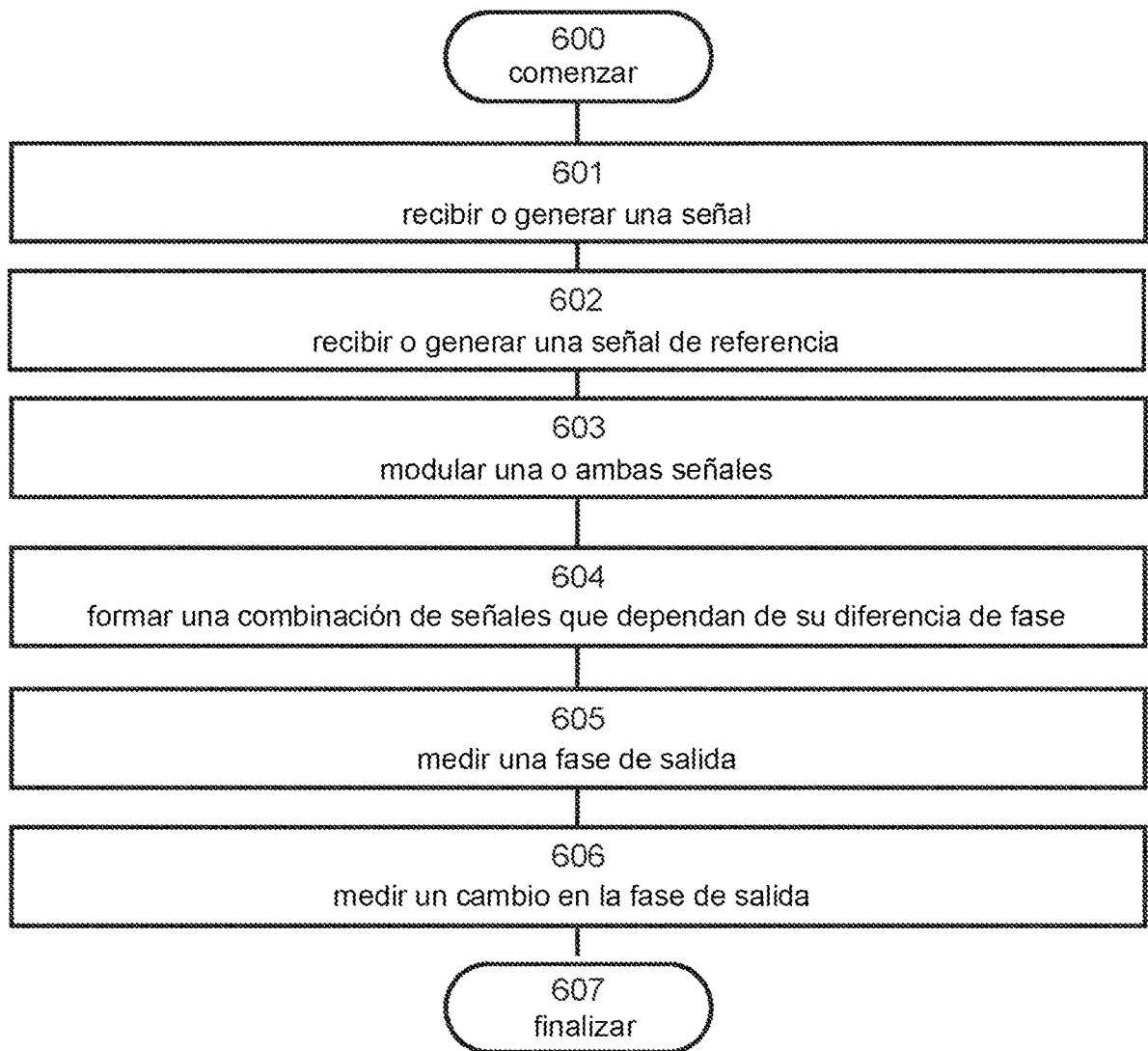


Figura 8

