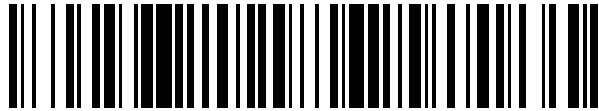


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 622 354**

21 Número de solicitud: 201531736

51 Int. Cl.:

G01D 5/353 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

30.11.2015

43 Fecha de publicación de la solicitud:

06.07.2017

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2016/070851

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ (60.0%)
Plaza de San Diego, s/n
28801 ALCALÁ DE HENARES (Madrid) ES;
CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (20.0%) y
FIBER OPTICS CONSULTING SERVICES AND
TECHNOLOGIES, S.L. (FOCUS, S.L.) (20.0%)**

72 Inventor/es:

**GARCÍA RUIZ, Andrés;
PASTOR GRAELLS, Juan;
MARTÍN LÓPEZ, Sonia;
GONZÁLEZ HERRÁEZ, Miguel;
VILLAFRANCA VELASCO, Aitor y
MARTINS, Hugo Fidalgo**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

54 Título: **SISTEMA Y MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DISTRIBUIDA DE VARIACIONES DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA**

57 Resumen:

Sistema y método de caracterización distribuida de variaciones de índice de refracción de una fibra óptica.

Método y sistema que permiten caracterizar las variaciones locales del índice de refracción entre distintos estados de una fibra óptica por comparación de perfiles de amplitud de una pluralidad de señales ópticas retrodispersadas generadas mediante dispersión Rayleigh por una pluralidad de señales ópticas pulsadas al propagarse por dicha fibra óptica; comprendiendo dichas señales ópticas pulsadas un perfil de frecuencia instantánea variable en el tiempo y constante entre pulsos. La invención proporciona una caracterización de alta resolución espacial, sensibilidad y velocidad, necesitando un único pulso para caracterizar un estado de la fibra óptica en lugar de recurrir a barridos de frecuencia en múltiples pulsos.

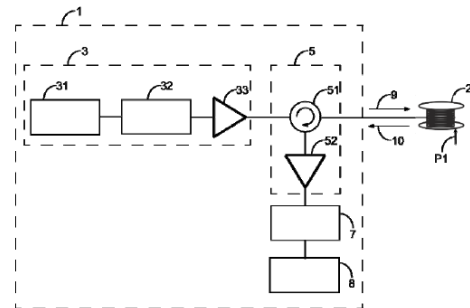


Fig. 1

**SISTEMA Y MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DISTRIBUIDA DE VARIACIONES DE
ÍNDICE DE REFRACCIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA**

DESCRIPCIÓN

5

OBJETO DE LA INVENCION

La presente invención se aplica al campo de las telecomunicaciones y, en particular, al área industrial de la medición y caracterización distribuida de fibras ópticas.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15

La medida de variaciones locales del índice de refracción de una fibra óptica proporciona información útil para la caracterización distribuida de cambios en el estado en la fibra, así como para esquemas de sensado distribuido como la reflectometría en el dominio del tiempo sensible a la fase (OTDR, del inglés 'Optical Time Domain Reflectometry'). Los esquemas OTDR sensibles a la fase, como por ejemplo el que se describe en US 5,194,847 A, se basan en el análisis de la señal dispersada (del inglés 'scattered') generada por dispersión Rayleigh (del inglés 'Rayleigh scattering') al propagarse una luz pulsada por una fibra bajo test. Cuando se produce una perturbación en la fibra, el perfil de dispersión y/o perfil de índice de refracción de la fibra cambia. Esto afecta a las fases relativas de los campos reflejados por cada centro de dispersión y, por lo tanto, al perfil de la fase y la intensidad de la señal dispersada medida se ve modificado. Esta información permite comparar dos estados de la fibra y, por lo tanto, detectar cambios de temperatura, deformaciones o vibraciones a lo largo de ella, tales como los generados por ondas acústicas o intrusos traspasando un perímetro.

20

25

30

Cada estado de la fibra puede ser caracterizado tras el análisis de la señal dispersada generada al propagarse un único pulso de luz pulsada. Esto permite la detección de cambios de estado en la fibra bastante rápidos, con una resolución temporal del orden de la frecuencia de envío de pulsos a la fibra óptica. Dicha frecuencia de envío de pulsos está a su vez limitada por la longitud de la fibra, siendo típicamente del orden de ~1ms para 100km de fibra. Sin embargo, los esquemas OTDR sensibles a la fase tradicionales

no permiten cuantificar el cambio detectado, es decir, pueden detectar que se produce un cambio de temperatura, pero no medir la amplitud de dicho cambio.

5 Aunque los sistemas OTDR sensibles a la fase tradicionales están basados exclusivamente en la utilización de luz pulsada a una única frecuencia, existen técnicas recientes que permiten enviar pulsos de luz pulsada con frecuencias distintas. Es el caso del dispositivo de medición de variaciones de temperatura, índice de refracción y birrefringencia que se describe en US 2014/0185037 A1, el cual incorpora una unidad de desplazamiento de frecuencia que permite hacer barrido discreto de frecuencias de los pulsos de la luz pulsada en un rango frecuencial y con un paso previamente definidos. 10 Esto permite la cuantificación con alta resolución de cambios en la fibra, alcanzando una resolución en la medida de cambios de temperatura de hasta 0.01°C. La resolución de la medida está asociada al paso del barrido discreto de frecuencias, mientras el rango de la medida, es decir, la longitud de fibra caracterizada, está asociado al rango frecuencial del barrido discreto de frecuencias. Por lo tanto, una medida de alta resolución en un rango 15 de medida largo requiere un barrido de numerosas frecuencias, con el consiguiente aumento del tiempo de medida. En consecuencia, cualquier cambio que ocurra en la fibra durante el tiempo necesario para realizar el barrido implicará un ruido añadido a la medida final. Además, las medidas de alta resolución necesitan típicamente promediar la señal dispersada correspondiente a cada frecuencia de pulso, lo cual también aumenta el tiempo de medida. Así pues, estos esquemas necesitan un tiempo de medida bastante superior a los esquemas que utilizan pulsos con una sola frecuencia y, por lo tanto, están más adaptados a medidas cuasi-estáticas, típicamente del orden de ~1 minuto. Adicionalmente, la incorporación de una unidad de desplazamiento de frecuencia 20 aumenta también a complejidad del sistema.

Los sistemas OTDR sensibles a la fase tradicionales se basan en la recuperación de exclusivamente la intensidad de la señal dispersada. Sin embargo, esquemas recientes consideran también la fase de la señal dispersada, permitiendo cuantificar la amplitud de los cambios en la fibra. Es el caso, por ejemplo, del dispositivo de detección de ondas 30 acústicas que se describe en US 2014/0255023 A1, que incorpora unidades de detección coherente para caracterizar la fase y la amplitud de la señal dispersada. No obstante, los métodos ya conocidos de recuperación de la fase de la señal dispersada, tales como

separación I/Q (separación en fase y cuadratura), proporcionan una resolución temporal limitada. Dichos métodos se basan en la división de la señal de interés en varios componentes y la introducción de una diferencia de camino óptico (τ) entre dichas componentes divididas antes de volver a recombinarse. La resolución temporal del perfil de variación de fase recuperado queda determinada por la diferencia de camino óptico introducido entre las componentes divididas de la señal. En consecuencia, esta técnica es únicamente adecuada para una predeterminada forma de pulso y resolución espacial. Además, cualquier variación en la diferencia de camino óptico inducida se añade a la fase recuperada, introduciendo así un error. Por esta razón, la diferencia de camino óptico debe de ser controlada con una precisión inferior a la longitud de onda de la frecuencia óptica usada (típicamente alrededor de 1 micrómetro). Estos métodos de recuperación de fase son por lo tanto sensibles a cambios ambientales.

A este problema se suma que los métodos interferométricos de medida de fase y amplitud desarrollados para la medida de perfiles de señal arbitrarios requieren el uso de un oscilador local con una sincronización muy precisa. Esto implica una mayor complejidad de diseño y control, así como un ruido añadido como resultado del ruido de fase del oscilador local. Así pues, los sistemas OTDR sensibles a la fase descritos que tienen en cuenta la fase de la señal dispersada llevan asociados un mayor nivel de complejidad y un mayor nivel de ruido que introduce errores en la medida de variaciones de índice de refracción de la fibra.

Son también conocidos en el estado de la técnica sistemas basados en el análisis en el dominio del tiempo de la dispersión de Brillouin (del inglés 'Brillouin Optical Time Domain Analysis — BOTDA') para la caracterización distribuida de variación de índice de refracción de una fibra óptica, típicamente asociados a la medición distribuida de temperatura. Es el caso, por ejemplo, del sistema descrito en WO 1998/027406 A1. La principal ventaja de estos métodos frente a los OTDR sensibles a fase es la posibilidad de realizar medidas absolutas de temperatura a lo largo de la fibra. Por otro lado, en este caso, se realiza un barrido discreto en frecuencias que requiere típicamente un promediado de unas 100-1000 señales dispersadas por cada una de las frecuencias del barrido, lo cual supone un importante incremento en el tiempo de muestreo de las temperaturas. Además, la resolución en temperaturas es del orden del grado centígrado,

que puede resultar insuficiente en algunos escenarios exigentes.

Recientemente, se han desarrollado técnicas BOTDA que permiten la caracterización distribuida de deformaciones en una fibra óptica sin barridos discretos en frecuencia. Es el caso del dispositivo de medición de deformaciones dinámicas que se describe en US 2013/0308682 A1. Sin embargo, estos sistemas permiten la caracterización de un rango de deformaciones específico y limitado. Además el promedio de la señal dispersada de la fibra sigue siendo necesario, lo cual limita la resolución temporal del sistema.

Finalmente, existen sistemas basados en reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR, del inglés 'Optical Frequency Domain Reflectometry') que permiten la recuperación de información de la fibra con alta resolución espacial. Tal es el caso, por ejemplo, del dispositivo de obtención de información espacial de una fibra descrito en US 6,160,826 A1. La tecnología OFDR presenta una resolución espacial inversamente proporcional al rango de barrido de frecuencias del láser, mientras que la longitud de fibra a monitorizar es inversamente proporcional a la variación mínima de frecuencia sobre la cual se garantiza buena linealidad. Dada la dificultad de mantener una buena linealidad para variaciones pequeñas de frecuencia en un amplio rango de barrido de frecuencias, una mayor resolución espacial implica una caracterización de fibra óptica de menor alcance. Además, dada la necesidad de batir la señal recibida de la fibra con un oscilador local, la longitud de coherencia de la fuente de luz utilizada tiene que ser mayor que el orden del tamaño de la fibra. En este caso, han sido alcanzadas resoluciones espaciales de decenas de micrómetros, pero el rango de sensado está limitado a unos pocos centenares de metros.

Por lo tanto, todavía existe la necesidad en el estado del arte de una técnica de caracterización distribuida de fibra óptica capaz de medir variaciones del índice de refracción en un rango de medida largo y con alta resolución temporal. Adicionalmente, se requiere flexibilidad de resolución espacial, flexibilidad en el rango de amplitud de las variaciones del índice de refracción, baja complejidad, alta sensibilidad y reducido impacto de los cambios ambientales.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención soluciona los problemas mencionados al divulgar un sistema y un método de medición distribuida de variaciones locales del índice de refracción de fibras ópticas, siendo las variaciones locales del índice de refracción medidas entre dos estados de la fibra óptica mediante comparación de dos perfiles de amplitud de la dispersión Rayleigh generados por pulsos de luz de frecuencia instantánea variable en el tiempo y constante entre pulsos. Es decir, pulsos con chirp, siendo dicho chirp constante entre pulsos.

10

En un primer aspecto de la invención, se presenta un sistema de caracterización distribuida de las variaciones locales de índice de refracción de una fibra óptica que comprende:

15

-Medios de emisión que generan al menos dos señales ópticas pulsadas con un mismo perfil de frecuencia instantánea, siendo dicho perfil de frecuencia instantánea variable a lo largo de un mismo pulso. Preferentemente, el perfil de frecuencia instantánea variable comprende una rampa de incremento lineal. También preferentemente, cada señal óptica pulsada comprende al menos un pulso de perfil de amplitud mayormente rectangular. Los medios de emisión están además adaptados para transmitir secuencialmente al menos dos señales ópticas pulsadas a través de un primer extremo de la fibra óptica, de modo que cada señal óptica pulsada caracteriza un estado de dicha fibra.

20

25

-Medios de recepción que reciben las señales ópticas retrodispersadas generadas por dispersión Rayleigh al propagarse las señales ópticas pulsadas por la fibra óptica. Los medios de recepción están conectados al mismo extremo de la fibra que los medios de emisión, por ejemplo, a través de un circulador óptico.

30

-Medios de detección que miden, al menos, el perfil de amplitud de las señales ópticas retrodispersadas. En una primera opción preferente, un único fotodetector de intensidad mide el perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada, mientras que el perfil de amplitud y frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada son parámetros fijos almacenados en una memoria del sistema, y por lo tanto no medidos directamente. En

una segunda opción preferente, un único detector coherente mide el perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada y el perfil de amplitud y frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada. Medios de guiado de luz, tales como combinadores, conmutadores y/o retardos ópticos son incorporados al sistema para alimentar la señal óptica pulsada y la señal óptica retrodispersada en una entrada del detector coherente sin superposición temporal entre ambas señales. En una tercera opción preferente, un detector coherente mide el perfil de amplitud y frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada y un fotodetector de intensidad mide el perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada.

-Medios de computación que calculan las variaciones locales de índice de refracción ocurridas entre distintos estados de la fibra óptica en función de los perfiles de amplitud de la señal óptica retrodispersada correspondientes a cada estado de la fibra y el perfil de frecuencia instantánea de las señales ópticas pulsadas.

Preferentemente, los medios de emisión del sistema comprenden además medios de estabilización en frecuencia que reducen las derivas de frecuencia de la señal óptica pulsada y minimizan el error de la medida de las variaciones locales de índice de refracción de la fibra.

Preferentemente, los medios de emisión del sistema comprenden adicionalmente medios de sintonización que modifican dinámicamente la longitud de pulso y la pendiente del perfil de frecuencia instantánea de las señales ópticas pulsadas, permitiendo variar la resolución espacial, la sensibilidad a las variaciones locales de índice de refracción de la fibra, y el error del sistema.

Preferentemente, el sistema comprende además medios de amplificación distribuida, tales como amplificación Raman, que amplifica la señal óptica pulsada dentro de la fibra óptica. Puesto que la distancia máxima de medida está limitada por la potencia de los pulsos propagados, esta configuración permite caracterizar mayores longitudes de fibra.

Preferentemente, los medios de computación están adaptados para introducir en el cálculo de las variaciones locales de índice de refracción de la fibra bajo test información de calibración proporcionada por las variaciones locales de índice de refracción de una fibra óptica de calibración. Esta opción permite distinguir entre variaciones locales de

índice de refracción de la fibra y variaciones y/o ruidos en los perfiles de amplitud y frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada, logrando así reducir los errores de la medición.

5 Preferentemente, los medios de emisión del sistema comprenden además medios de control de polarización para controlar el estado de polarización de las señales ópticas pulsadas. De acuerdo con una primera opción preferente, los medios de control de polarización determinan el estado de polarización de la luz (es decir, elegir si la luz está despolariada, polarizada linealmente y en qué eje, etc.) para optimizar el sistema según
10 la medida pretendida y las características de la fibra bajo test, reduciendo los errores. De acuerdo con una segunda opción preferente, los medios de control de polarización generan pulsos con polarizaciones ortogonales para realizar medidas de birrefringencia o variaciones locales de índice de refracción de la fibra en distintos ejes de polarización. De acuerdo con una tercera opción preferente, los medios de control de polarización generan
15 simultáneamente dos pulsos de polarizaciones ortogonales, siendo dichos pulsos incoherentes entre sí, permitiendo igualmente realizar medidas de birrefringencia o variaciones locales de índice de refracción de la fibra en distintos ejes de polarización. El sistema puede comprender componentes ópticos específicos para mantener el estado de polarización de la luz, tales como circuladores ópticos mantenedores de polarización.
20 Nótese que no es necesario ningún elemento de discriminación de polarización en recepción. La medida de birrefringencia se realiza a través de la comparación de dos medidas auxiliares para dos ejes de polarización ortogonales, siendo cada medida auxiliar realizada mediante correlación de perfiles de intensidad de las señales reflejadas tal y como se describe para cualquier otra medida de variaciones locales de índice de refracción del sistema.
25

Preferentemente, los medios de computación realizan medidas adicionales de caracterización distribuida de la fibra óptica basadas en la luz retrodispersada generada por dispersión Rayleigh al propagarse pulsos de alta coherencia en una fibra bajo test,
30 como, por ejemplo la monitorización distribuida de vibraciones a lo largo de la fibra por un OTDR sensible a la fase. Los medios de computación pueden estar asimismo configurados para corregir dichas medidas adicionales utilizando la información de variación local de índice de refracción medida por el propio sistema. Las medidas

adicionales pueden estar asociadas a cualquier técnica de sensado distribuido del estado del arte que requiera la medida de perfiles de amplitud de luz retrodispersada, pudiendo requerir o no información de frecuencia instantánea de las señales involucradas. Dichas medidas adicionales utilizan los perfiles de amplitud (y, si es necesario, frecuencia instantánea) de la luz retrodispersada ya adquiridos para medir las variaciones locales de índice de refracción de la fibra, y por lo tanto no implican la medición de ninguna señal o parámetro adicionales, pudiendo ejecutarse de modo paralelo y sin interferir con las medidas de variaciones locales de índice de refracción de la fibra.

10 En un segundo aspecto de la invención, se presenta un método de medición distribuida de variaciones locales del índice de refracción de una fibra óptica que comprende:

-Generar y transmitir señales ópticas pulsadas de alta coherencia con un perfil de amplitud preferentemente rectangular y un mismo perfil de frecuencia instantánea variable en el tiempo a través de una fibra bajo test. El perfil de frecuencia instantánea presenta preferentemente una variación lineal a lo largo del pulso. Nótese que cada señal óptica pulsada puede estar formada por un único pulso o comprender una pluralidad de pulsos. Asimismo, nótese que las medidas realizadas por el método de la invención son medidas relativas entre al menos dos estados de la fibra, requiriéndose por lo tanto un mínimo de dos señales ópticas pulsadas consecutivas, pero pudiendo extenderse a cualquier número mayor de señales ópticas pulsadas.

-Recibir las señales ópticas retrodispersadas generadas mediante dispersión Rayleigh en la fibra óptica. La transmisión y la recepción se realizan en un mismo extremo de la fibra.

25 -Medir los perfiles de amplitud de las señales ópticas retrodispersadas utilizando un fotodetector de intensidad o detector coherente, cuya salida sirve de entrada a un medio de digitalización, tal como un osciloscopio.

30 -Dependiendo de la opción preferente escogida, el método puede comprender o bien medir los perfiles de amplitud y frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada mediante un detector coherente, o bien utilizar los perfiles de amplitud y frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada conocidos.

-Calcular las variaciones locales de índice de refracción de la fibra ocurridas entre distintos estados de la fibra, utilizando al menos información de los perfiles de amplitud de las señales ópticas retrodispersadas correspondientes a cada estado de la fibra y del perfil de frecuencia instantánea común a las señales ópticas pulsadas. A pesar de que el método puede implementarse obteniendo el perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada correspondiente a cada estado de la fibra con un único pulso, el método preferentemente comprende obtener el perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada correspondiente a cada estado de la fibra promediando múltiples pulsos, para mejorar la relación señal a ruido.

5

Preferentemente, el paso de calcular las variaciones locales de índice de refracción de la fibra comprende:

10

-Calcular una correlación local entre los perfiles de amplitud de las señales ópticas retrodispersadas correspondientes a distintos estados de la fibra, obteniendo así un perfil de desplazamiento local entre dichos perfiles.

15

-Calcular las variaciones locales de índice de refracción de la fibra multiplicando el perfil de desplazamiento local por un factor derivado del perfil de frecuencia instantánea. Más preferentemente, dicho factor depende de la pendiente y frecuencia central del perfil de frecuencia instantánea de los pulsos y del valor medio del índice de refracción de la fibra.

20

Preferentemente, el método adicionalmente comprende almacenar múltiples perfiles de amplitud de las señales ópticas retrodispersadas y optimizar una selección de perfiles a comparar en función de la velocidad de las variaciones locales del índice de refracción y la velocidad de adquisición de los perfiles de amplitud.

25

Finalmente, en un tercer aspecto de la invención, se presenta un programa de ordenador que comprende el código de programa de ordenador necesario para implementar el método del segundo aspecto de la invención, al ejecutarse en un procesador digital de la señal, un circuito integrado específico de la aplicación, un microprocesador, un microcontrolador o cualquier otra forma de hardware programable. Nótese que cualquier opción preferente e implementación particular del dispositivo de la invención puede ser

30

aplicado al método y al programa de ordenador de la invención, y viceversa.

5 Con el sistema, método y programa de ordenador de la invención, se proporciona una medida de variaciones locales de índice de refracción de la fibra de alta resolución espacial, alta sensibilidad y alta velocidad. La resolución y sensibilidad son además controlables cambiando la longitud de pulso y la pendiente del perfil de frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada. El rango de medida, es decir las distancias de fibra óptica caracterizables, está limitado únicamente por la intensidad de la señal óptica pulsada, permitiendo incorporar sistemas de amplificación distribuida. La fibra óptica bajo 10 test se caracteriza de manera continua, permitiendo la medida de variaciones locales de índice de refracción con respecto a un estado inicial de la fibra a lo largo del tiempo y los resultados se pueden proporcionar en tiempo real. Adicionalmente, se puede realizar cualquier medida conocida en el estado del arte basada en retrodispersión de señales ópticas pulsadas, pudiendo ser además dicha medida corregida utilizando la información de variación de índice de refracción obtenida. Estas y otras ventajas resultarán aparentes 15 a la luz de la descripción detallada de la invención.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

20

Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, de acuerdo con un ejemplo preferente de realización práctica de la misma, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se 25 ha representado lo siguiente:

25

La figura 1 muestra un esquema donde se aprecian los componentes principales de una realización preferente del sistema de la invención, así como la fibra óptica sobre la que se aplica dicho sistema.

30

La figura 2 muestra un esquema donde se aprecian de los perfiles de amplitud y frecuencia instantánea de una señal pulsada de ejemplo empleada por una implementación particular de la invención.

La figuras 3a y 3b ejemplifican la convolución entre un pulso de la señal óptica pulsada y dos secciones de la fibra óptica mediante un diagrama de la fibra óptica y unas gráficas.

5 La figura 4 muestra una serie de gráficas donde se aprecia el principio de funcionamiento del sistema, ilustrando un desplazamiento local del perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada correspondiente a una variación local del índice de refracción.

10 La figura 5 muestra un diagrama con mayor detalle una implementación particular de la fuente continua láser coherente sintonizable que incorpora estabilización en frecuencia.

La figura 6 presenta un diagrama que muestra una realización alternativa del sistema de la invención que incorpora amplificación distribuida para aumentar la distancia de caracterización.

15

La figura 7 ejemplifica una realización más alternativa del sistema de la invención que incluye una sección de fibra cuyas variaciones locales de índice de refracción son conocidas.

20 La figura 8 presenta una realización aún más alternativa del sistema de la invención que incorpora medios para controlar el estado de polarización de la señal óptica pulsada.

La figura 9 representa muestra una realización todavía más alternativa del sistema de la invención de la invención que incorpora medios de computación que permiten realizar cualquier medida conocida en el estado del arte con un OTDR sensible a la fase.

25

La figura 10 representa una aplicación particular de la realización en la figura 9, que permite medir perturbaciones, como por ejemplo vibraciones, compensando el ruido introducido por las derivas de frecuencia de la señal óptica pulsada y/o variaciones locales de índice de refracción de la fibra.

30

La figura 11 representa una implementación particular de la invención que utiliza pulsos de intensidad óptica variable para medida distribuida de índice de refracción no lineal.

La figura 12 representa una realización particular del sistema de la invención con un único detector coherente para medir tanto la señal pulsada como la señal óptica retrodispersada.

5

La figura 13 representa una realización particular del sistema de la invención con un detector coherente para medir la señal óptica pulsada y un fotodetector de intensidad para medir la señal óptica retrodispersada.

10 **REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION**

En este texto, el término "comprende" y sus derivaciones (como "comprendiendo", etc.) no deben entenderse en un sentido excluyente, es decir, estos términos no deben interpretarse como excluyentes de la posibilidad de que lo que se describe y define pueda incluir más elementos, etapas, etc.

15

A la vista de esta descripción y figuras, el experto en la materia podrá entender que la invención ha sido descrita según algunas realizaciones preferentes de la misma, pero que múltiples variaciones pueden ser introducidas en dichas realizaciones preferentes, sin salir del objeto de la invención tal y como ha sido reivindicada. Asimismo, las descripciones de funciones y elementos perfectamente conocidos en el estado del arte pueden haber sido omitidos por claridad y concisión.

20

La Figura 1 muestra los componentes principales de una primera implementación particular del sistema (1) de la invención, el cual implementa los pasos de una realización particular del método de la invención. Se presenta también una fibra óptica (2) que ejemplifica un posible escenario de operación. El sistema (1) comprende medios de emisión (3) que generan señales ópticas pulsadas (9) de alta coherencia, comprendiendo cada señal óptica pulsada (9) uno o más pulsos (91) con un perfil de amplitud rectangular y un perfil de frecuencia instantánea (92) lineal de pendiente y frecuencia central ν_0 conocidas.

25

30

Los medios de emisión (3) comprenden una fuente continua láser coherente

sintonizable (31), medios de modulación externos (32) que convierten la luz continua en luz pulsada, y medios de control de potencia (33) que adaptan la potencia óptica de salida al rango de medida deseado, evitando no linealidades. La fuente continua láser coherente sintonizable (31) puede ser constituida por un láser controlado por un controlador de corriente y temperatura, la cual determina su frecuencia central ν_0 , y al cual se aplica además un voltaje de radiofrecuencia, el cual permite hacer barridos continuos y repetitivos en frecuencia alrededor de ν_0 , con pendientes controlables. Sincronizando los medios de modulación externos (32) con la fuente continua láser coherente sintonizable (31), se puede elegir una parte específica de la señal emitida por dicha fuente. Ajustando la pendiente de la frecuencia instantánea de los pulsos de señales ópticas pulsadas (9), se puede ajustar la sensibilidad a variaciones locales del índice de refracción de la fibra óptica (2), y ajustando la longitud de los pulsos se puede ajustar la resolución espacial del sistema. Los medios de control de potencia (33) pueden comprender un amplificador óptico, tal como un amplificador dopado con erbio; seguido por un filtro óptico centrado en la longitud de onda central del espectro de los pulsos, tal como un multiplexor por división en longitud de onda (WDM, del inglés 'Wavelength Division Multiplexer') o un filtro basado en red de Bragg (FBG, del inglés 'Fibre Bragg Grating') trabajando en reflexión, seguido de un atenuador óptico variable. La banda de transmisión del filtro permite el paso del espectro de los pulsos filtrando el ruido introducido por el amplificador y el atenuador óptico variable permite ajustar la potencia óptica de salida. Obsérvese que pueden ser aplicados otros medios de emisión alternativos conocidos en el estado del arte para la generación de la señal óptica pulsada de la presente invención dentro del alcance reivindicado.

Las señales ópticas pulsadas (9) que comprenden al menos una primera señal óptica pulsada y una segunda señal óptica pulsada, generadas se introducen en un primer extremo de la fibra óptica (2). Cada señal óptica pulsada (9), es decir la primera señal óptica pulsada y la segunda señal óptica pulsada, genera respectivamente una señal óptica retrodispersada (10) al propagarse dentro de la fibra óptica 2 mediante efecto Rayleigh. Las señales ópticas retrodispersadas (10) son recibidas por unos medios de recepción (5) en el mismo primer extremo de la fibra óptica (2) usado para la transmisión. Para este propósito, los medios de recepción (5) comprenden un circulador óptico (51) de tres puertos de tal manera que la señal óptica pulsada (9) es

recibida por los medios de emisión (3) en un primer puerto y transmitida a la fibra óptica (2) a través de un segundo puerto. La señal óptica retrodispersada (10) es recibida en el segundo puerto y transmitida a un fotodetector de intensidad (7) a través del tercer puerto del circulador óptico (51). Dicho fotodetector de intensidad (7) mide el perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada (10). Nótese que cualquier técnica de guiado de luz conocida en el estado del arte, que logre una distribución equivalente de las señales, podría ser utilizada de forma alternativa. Además, los medios de recepción (5) pueden comprender cualquier etapa de acondicionamiento de señal y/o de amplificación (52).

10

El sistema comprende también medios de computación (8) que determinan las variaciones locales del índice de refracción de la fibra óptica (2) en función de, al menos, el perfil de frecuencia instantánea (92) de los pulsos (91) generados y de los perfiles de amplitud medidos de la señal óptica retrodispersada (10). En cada instante de tiempo, la fibra óptica (2) presenta un estado al cual corresponde un perfil de índice de refracción local. A lo largo del tiempo, la fibra óptica (2) puede cambiar de estado debido a perturbaciones P1, generando el correspondiente cambio en el perfil de índice de refracción local. Determinando y comparando los perfiles de amplitud de la señal óptica retrodispersada (10) generados durante cada estado por señales ópticas pulsadas (9) iguales, los medios de computación determinan las variaciones locales del índice de refracción entre los distintos estados. La sensibilidad de dicha determinación depende de la pendiente de la frecuencia instantánea de las señales ópticas pulsadas (9), mientras que la resolución espacial es típicamente del mismo orden de magnitud que la longitud de los pulsos (91). El rango de sensado, es decir, las distancias caracterizables por el sistema, está limitado únicamente por la intensidad de la señal óptica retrodispersada (10). El ruido de la medida puede ser reducido promediando múltiples medidas de un mismo estado de la fibra óptica (2) obtenidas bajo las mismas condiciones (esto es, pulsos de señal óptica pulsada (9) iguales y sin alterar el estado de la fibra óptica).

30

La figura (2) presenta con mayor detalle la señales ópticas pulsadas (9) generadas por los medios de emisión (3). Cada señal óptica pulsada (9) comprende uno más pulsos (91) de longitud τ_p , separados por una duración τ_T . Cada pulso (91) presenta

un perfil de amplitud rectangular y un perfil de frecuencia instantánea (92) en forma de rampa con una pendiente constante. En este caso, la frecuencia central y la pendiente que definen el perfil de frecuencia instantánea (92) son conocidos, estando típicamente almacenados en una memoria accesible por unos medios de computación (8). Debe garantizarse que la longitud de coherencia de la fuente de luz coherente sintonizable (31) sea mayor que la longitud del pulso. Además, el tiempo entre los pulsos τ_T debe verificar la ecuación 1:

$$2nL/c \leq \tau_T \quad \text{Ecuación 1}$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, L es la longitud de la fibra óptica (2), y n es el índice medio de refracción de la fibra óptica (2) a la frecuencia central ν_0 de la fuente de luz (31). Se considera típicamente despreciable la dependencia de $n(z)$ en la frecuencia a lo largo del contenido espectral de un pulso (91). Esto asegura que únicamente la señal generada a partir de un pulso se recupera de la fibra en un mismo instante, evitando así la superposición de señales de diferentes regiones de la fibra óptica (2).

La propagación, a lo largo de fibra óptica (2) de un pulso $P(t,z)$ de la señal óptica pulsada (9) con un perfil de intensidad rectangular, de amplitud E_0 y longitud τ_p , y un perfil de frecuencia instantánea lineal, $\nu(t) = \nu_0 + (\Delta\nu/2 - \Delta\nu * [t/\tau_p])$, es decir, con contenido espectral $\Delta\nu$ alrededor de una frecuencia central ν_0 , y pendiente de frecuencia instantánea $\Delta\nu/\tau_p$ puede ser descrita por la ecuación 2:

$$P(t,z) = E_0 \cdot \text{rect} \left[\left(t - \int_0^z n(z) dz / c \right) / \tau_p \right] \cdot e^{i2\pi\nu_0(t - \int_0^z n(z) dz / c)} \cdot e^{i2\pi(\Delta\nu/2 - \Delta\nu * (t - \int_0^z n(z) dz / c) / \tau_p)(t - \int_0^z n(z) dz / c)}$$

Ecuación 2

donde t es el tiempo, z es la posición a lo largo de la fibra óptica (2) ($z=0$ en la entrada de la fibra conectada a los medios de recepción (5) y $\text{rect}(x)=1$ cuando $0 \leq x \leq 1$ y cero en otro caso. Se considera que $t=0$ cuando la parte frontal del pulso entra en la fibra óptica (2) (en $z=0$). $n(z)$ es el índice de refracción local de la fibra óptica (2) en z a la frecuencia central ν_0 de la fuente de luz (31). Nótese que, si ν_0 está lejos de

frecuencias de resonancia de la fibra óptica (2) y Δv no es excesivamente grande, se puede considerar despreciable la dependencia de $n(z)$ en la frecuencia v a lo largo del contenido espectral de un pulso de la señal óptica pulsada (9).

5 La señal óptica retrodispersada (10) recibida en $z=0$ en un instante de tiempo t , puede ser descrita por un campo eléctrico complejo, $E(t)$, que está dado por la convolución entre un pulso (91) y el perfil de dispersión de la fibra, descrito por una función compleja, $r(z)$, en una sección dada de fibra óptica (2)

$$z \in \left[\frac{(t - \tau_p) \cdot c}{2n}; \frac{t \cdot c}{2n} \right]$$

$$E(t) = \int_{z=tc/2n-\tau_p c/2n}^{tc/2n} r(z) \cdot E_0 \cdot e^{i2\pi v_0(t-2\int_0^z n(z)dz/c)} \cdot e^{i2\pi(\Delta v/2-\Delta v^*[(t-2\int_0^z n(z)dz/c)/\tau_p])(t-2\int_0^z n(z)dz/c)} dz$$

10

Ecuación 3

15 Nótese que $E(t)$ resulta de contribuciones generadas por el paso de todo un pulso de la señal óptica pulsada (9), a pesar de apenas contar con una integración a lo largo de una sección de fibra de longitud $\tau_p \cdot c / (2n)$. Nótese además que las consideraciones del perfil de amplitud de $E(t)$ recibido se establecen para $z=0$, correspondiente a la unión del circulador (51) y la fibra (2), mientras que dicha señal se mide en el fotodetector de intensidad. No obstante, dado que los medios de recepción (5)
 20 permanecen constantes entre medidas, el desarrollo sigue siendo válido para las señales medidas a la entrada del fotodetector de intensidad (7).

Las figuras 3a y 3b ilustran en detalle que las contribuciones a $E(t)$ reflejadas en distintos puntos de la fibra óptica (2), son generadas por distintas partes de un pulso (91), las cuales tienen por lo tanto distinta frecuencia instantánea v . En la figura 3a, $E(t)$ está compuesto por la suma de las convoluciones de $r(z)$ de dos secciones de fibra distintas $z \in [z_1; z_2], [z_2; z_3]$ con partes de un pulso de la señal óptica pulsada (9) con frecuencias instantáneas $v \in [v_4; v_3], [v_3; v_1]$, respectivamente. En un momento posterior, reflejado en la figura (3)b, $E(t+\Delta t)$ está compuesto por la suma de la

convoluciones de $r(z)$ de dos secciones de fibra distintas $z \in [z_2; z_3], [z_3; z_4]$ con partes del pulso de la señal óptica pulsada (9) con frecuencias instantáneas $\nu \in [\nu_4; \nu_2], [\nu_2; \nu_1]$, respectivamente.

5 Si Δt es suficientemente pequeño para que $[z_1; z_2], [z_3; z_4] \ll [z_2; z_3]$ (es decir, si el desplazamiento del pulso es pequeño en relación a su longitud), las contribuciones a $E(t)$ y $E(t+\Delta t)$ generadas en $[z_1; z_2], [z_3; z_4]$ son despreciables, resultando $E(t)$ y $E(t+\Delta t)$ de reflexiones de una misma sección de la fibra $[z_2; z_3]$ generadas por dos pulsos con un frecuencias $\nu \in [\nu_3; \nu_1]$ y $\nu \in [\nu_4; \nu_2] = [\nu_3; \nu_1] + \delta\nu$ respectivamente, es
 10 decir, dos pulsos iguales con un desplazamiento en frecuencia $\delta\nu$ entre ellos. Dicho desplazamiento en frecuencia es proporcional a Δt y a la pendiente ($dv/dt = \Delta v / \tau_p$) del perfil de frecuencia instantánea (92) de los pulsos (91).

Nótese, por último, como se puede deducir de la ecuación (2), que una pequeña
 15 variación local de índice de refracción de la fibra óptica (2), $\delta n(z)$, siendo $\delta n(z) \ll n(z)$, puede ser aproximadamente compensada con una variación correspondiente de ν_0 , $\delta\nu = -\nu_0 \delta n(z) / n(z)$. Es decir, se obtiene aproximadamente el mismo $E(t)$ con un índice de refracción local $n(z)$ y pulso de frecuencia central ν_0 , que con un índice de refracción local $n(z) + \delta n(z)$ y pulso de frecuencia central $\nu_0 + \delta\nu$.

20

La figura (4), ilustra en detalle el principio de medida de las variaciones locales del índice de refracción de la fibra que se deriva de la descripción anterior. Una variación del índice de refracción local de la fibra óptica (2), $n(z) \rightarrow n(z) + \delta n(z)$, resulta en un desplazamiento temporal del perfil de señal óptica retrodispersada (10), $E(t) \rightarrow E(t+\Delta t)$,
 25 la cual es equivalente a una variación de la frecuencia central del pulso de la señal óptica pulsada (9), $\nu_0 \rightarrow \nu_0 + \delta\nu$. En particular, se muestran un primer perfil de amplitud 10a de una primera señal óptica retrodispersada (10) que sirve como referencia, un segundo perfil de amplitud (10b) correspondiente a un primer incremento $\delta n_1(z)$ que genera un desplazamiento temporal Δt_1 , y un tercer perfil de amplitud (10c) correspondiente a un segundo incremento $\delta n_2(z)$ que genera un nuevo
 30

desplazamiento temporal Δt_2 respecto al segundo perfil de amplitud.

Para el cálculo de la variación local del índice de refracción entre dos estados de la fibra óptica (2), las medidas de dos perfiles de amplitud de la señal óptica retrodispersada (10) correspondientes a los dos estados de la fibra, $E_1(t)$, $E_2(t)$, proporcionadas por el fotodetector de intensidad (7), y la frecuencia central ν_0 y pendiente de frecuencia instantánea $dv/dt = \Delta\nu/\tau_p$ de los pulsos la señal óptica pulsada (9) son transmitidos a los medios de computación (8), que calculan primeramente el perfil de desplazamiento local, $\Lambda(t)$, entre $E_1(t)$ y $E_2(t)$ a través del máximo de su correlación local:

$$\Lambda(t) = \max(\text{correlación}[E_1(t-T_{\text{corr}}, t+T_{\text{corr}}), E_2(t-T_{\text{corr}}, t+T_{\text{corr}})]) \quad \text{ecuación 4}$$

Nótese que el error de la medida puede ser reducido utilizando una función de ajuste, como por ejemplo una gaussiana, para encontrar el máximo ponderado de la correlación local. El valor de T_{corr} es del orden de τ_p , pudiendo ser optimizado para reducir el error de la medición y variar la resolución espacial.

A continuación, la variación local del índice de refracción entre los dos estados de la fibra óptica (2), $\delta n(t) = \delta n(2nz/c)$, es calculada aplicando la siguiente relación:

$$\delta n(t) = \delta n(2nz/c) = -(n/\nu_0) * (dv/dt) * \Lambda(t) \quad \text{ecuación 5}$$

Preferiblemente, el perfil de frecuencia instantánea (92) del pulso se elige de forma que las variaciones locales del índice de refracción esperadas generan variaciones de frecuencia $\delta\nu$ pequeñas en relación al contenido espectral $\Delta\nu$ de los pulsos (91) (típicamente $\delta\nu/\Delta\nu < 0.1$). Además, el sistema minimiza preferentemente las derivas de frecuencia ν_r ocurridas entre pulsos (91) de forma que sean pequeñas en relación al contenido espectral $\Delta\nu$, puesto que dicha deriva ν_r es añadida al $\delta\nu$ calculado. Se consigue con dicha minimización de la deriva una optimización de errores en el cálculo de $\delta n(z)$. En cualquier caso, nótese que para un tiempo rápido de adquisición de perfiles de amplitud de las señales ópticas retrodispersadas (10), típicamente del orden de $\tau_T \sim 0.5\text{ms}$, las variaciones locales del índice de refracción y las derivas de

frecuencia ν_r entre pulsos (91) son típicamente reducidas.

La resolución de cálculo del perfil de desplazamiento local, $\Lambda(t)$ está relacionada con la anchura de banda del fotodetector de intensidad (7) y los medios de digitalización asociados a dicho fotodetector. Típicamente, el muestreo del perfil de amplitud $E(t)$ debe de ser por lo menos 50-100 veces superior a $1/\tau_p$. Suponiendo un pulso de la señal óptica pulsada (9) con buena linealidad del perfil de frecuencia instantánea y bajo ruido, la resolución de cálculo de variaciones locales del índice de refracción está limitada únicamente por la resolución de cálculo de $\Lambda(t)$ y la pendiente dv/dt , proporcionando por lo tanto una gran flexibilidad.

Como ejemplo típico de operación de la presente invención, un pulso (91) de 100ns, con un contenido espectral $\Delta\nu=1\text{GHz}$ centrado a 193THz, con un fotodetector de intensidad (7) y respectivos medios de digitalización con una anchura de banda de $\sim 10\text{GHz}$, permite medir variaciones de índice de refracción de la fibra $\delta n \sim 10^{-8}$ - 10^{-6} . Esto equivaldría, por ejemplo, a cambios de temperatura en la fibra de ~ 1 -100mK y desplazamientos de frecuencia $\delta\nu \sim 1$ -100MHz. Respecto a la velocidad de medida de variaciones locales del índice de refracción de la fibra δn , la presente invención necesita de un único pulso de señal óptica pulsada para caracterizar un estado de la fibra, permitiendo una medida cuasi continua: por ejemplo, para una fibra de 50km, el tiempo entre los pulsos τ_T (y por lo tanto entre medidas de variaciones locales del índice de refracción de la fibra δn), dado por la ecuación. 1, puede tener un valor típico de $\sim 0.5\text{ms}$.

El cálculo de las variaciones locales del índice de refracción $\delta n(z)$ puede además comprender el almacenamiento de los perfiles de amplitud medidos. Para unos determinados parámetros de medida (es decir, contenido espectral $\Delta\nu$, pendiente dv/dt y anchura de banda de detección fijos) corresponde un intervalo de variaciones locales del índice de refracción de la fibra entre perfiles de amplitud correspondientes a variaciones de frecuencia suficientemente mayores que la resolución mínima de la medida y suficientemente menores que el contenido espectral $\Delta\nu$, tal que la medida es óptima. Si tras la comparación entre dos perfiles de amplitud resulta que las variaciones del índice de refracción no son óptimas, se puede utilizar la estimación

(no óptima) de las variaciones del índice de refracción obtenidas para elegir otro par de perfiles de amplitud a comparar que sea más favorable. Así, se puede optimizar de modo manual o automático la selección de los pares de perfiles comparados en función de la velocidad de las variaciones locales del índice de refracción y la velocidad de adquisición, y se pueden reducir los errores y el coste computacional necesario. Asimismo, se pueden realizar medidas cumulativas de variaciones locales del índice de refracción de la fibra correspondientes a variaciones de frecuencia de valor arbitrario ($\delta v_{total}(t) \gg \Delta v$), mientras la variación entre dos perfiles consecutivos i, j , sea pequeña ($\delta v_{i,j}(t) \ll \Delta v$).

10

Nótese que el cálculo de las variaciones locales del índice de refracción se puede realizar con otros perfiles de amplitud y frecuencia instantánea distintos a los descritos en la presente implementación particular, siempre y cuando distintos instantes de un mismo pulso comprendan distintos componentes frecuenciales y dicha distribución sea constante entre pulsos. En particular, el experto en la materia comprenderá que los pulsos pueden presentar desviaciones en su perfil de amplitud y frecuencia instantánea respecto a las formas ideales de diseño por limitaciones de los medios de emisión (3). Por ejemplo, la rampa de frecuencias puede presentar incrementos no lineales, o la forma del pulso puede no ser perfectamente rectangular.

20

Nótese asimismo que, en implementación particular descrita, los perfiles de amplitud y frecuencia instantánea la de la señal óptica pulsada (9) no se miden directamente. Dichos perfiles son previamente almacenados en los medios de computación (8) o en una memoria del sistema. Obsérvese que múltiples datos de perfiles de amplitud y frecuencia instantánea de múltiples configuraciones de los medios de emisión (3) pueden ser guardados y seleccionados. Además, las variaciones en dichos datos almacenados con otros factores, tales como los factores ambientales, pueden ser almacenadas en memoria y aplicadas en consecuencia. Los cálculos realizados por los medios de computación (8) son los mismos indistintamente de si los perfiles de amplitud y frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada (9) son medidos o simplemente recuperados de la memoria.

30

La Figura 5 muestra una implementación de los medios de emisión (3) de la invención, en la cual la fuente continua láser coherente sintonizable (31) comprende medios de estabilización en frecuencia, reduciendo así las derivas de frecuencia y el error de la medida de las variaciones locales de índice de refracción. Los medios de estabilización en frecuencia fijan la frecuencia central ν_0 de un láser semiconductor (311) a una línea de absorción de una célula de gas (313), utilizando un divisor (312) que divide la señal emitida por (311) e introduce una parte en la célula de gas (313). Un amplificador *lock-in* (del inglés '*lock-in amplifier*') (314) actúa como sistema de retroalimentación e introduce inyecciones de corriente en el controlador del láser (311), que compensan las derivas de frecuencia del láser.

La Figura 6 muestra una realización alternativa del sistema de la invención, en el cual el rango de sensado es incrementado mediante amplificación distribuida, tal como la amplificación Raman. El rango de sensado está limitado únicamente por la intensidad de la señal óptica retrodispersada (10) y puede ser por lo tanto extendido empleando esta propuesta. En este caso particular, el sistema comprende un amplificador distribuido (11) bidireccional. La primera salida del amplificador distribuido (11) se introduce en el primer extremo de la fibra óptica (2) con la señal óptica pulsada (9) mediante un combinador (12), y la segunda salida del amplificador distribuido (11) se introduce por el segundo extremo de la fibra óptica (2). Nótese que cualquier otra técnica de amplificación distribuida conocida en el estado del arte puede ser usada, como por ejemplo la combinación de amplificación Raman y Brillouin. Se pueden alcanzar distancias típicamente superiores a 100 km con esta configuración.

La Figura 7 muestra una realización más alternativa del sistema de la invención, que utiliza una primera sección (21) de la fibra óptica (2) cuyas variaciones locales de índice de refracción son conocidas. Nótese que dichas variaciones locales pueden ser nulas en implementaciones particulares. Las variaciones locales de índice de refracción de la sección de fibra óptica (21) son introducidas o almacenadas en los medios de computación (8), utilizándose como referencia de calibración. Los medios de computación (8) utilizan las medidas de la primera sección (21) para corregir las medidas de una segunda sección (22) cuyas variaciones de índice de refracción son desconocidas. Se distingue así entre variaciones locales de índice de refracción de la

fibra óptica (2) y variaciones y/o ruidos en los perfiles de amplitud y frecuencia instantánea de los pulsos de la señal óptica pulsada (9), reduciéndose los errores de la medición. Nótese que, incluso en implementaciones alternativas sin una primera sección (21) de referencia, los medios de computación (8) pueden igualmente utilizar una estimación de la variación media del índice de refracción de la fibra óptica (2) para compensar errores introducidos por el ruido de los perfiles de amplitud y frecuencia instantánea de los pulsos (91), que típicamente ocurren en escalas de tiempo bastante más pequeñas.

La Figura 8 una realización aún más alternativa del sistema de la invención, que comprende en los medios de emisión (3), medios de control de polarización (34). Dependiendo de la implementación particular, los medios de control de polarización pueden comprender un polarizador para generar luz linealmente polarizada, o bien comprender un conmutador de polarización para generar luz en estados distintos de polarización. Al generar pulsos (91) en estados ortogonales de polarización, se permite medir el índice de refracción local en ejes ortogonales de la fibra y la diferencia entre ellos (es decir, la birrefringencia local, si los ejes de la polarización de la señal óptica pulsada están alineados con los ejes de índice de refracción de la fibra). Si la diferencia de índice de refracción local entre dos ejes ortogonales de la fibra δn_{\perp} es equivalente a una variación de frecuencia, $\delta v_{\perp} = -v_0 \cdot \delta n_{\perp} / n$ más larga que el contenido espectral Δv del pulso (91), se pueden utilizar medios de emisión (3) que permite realizar además un barrido de frecuencia con un paso constante $< \Delta v$, hasta encontrar un pico en la función de correlación entre dos perfiles de amplitud adquiridos en ejes ortogonales de polarización, con una frecuencia central v_0' de los pulsos (91). Después de calcular el perfil de desplazamiento local, $\Lambda_{\perp}(t)$, como se ha descrito previamente, el perfil de diferencia de índice de refracción entre los ejes ortogonales de la fibra $\delta n_{\perp}(z)$ se calcula como:

$$\delta n_{\perp}(t) = \delta n_{\perp}(2nz/c) = -(n/v_0) \cdot [(dv/dt) \cdot \Lambda_{\perp}(t) + (v_0' - v_0)] \quad \text{Ecuación 6}$$

En otra implementación, los medios de control de polarización (34) generan simultáneamente dos pulsos con polarizaciones ortogonales e incoherentes entre sí, generando así una señal óptica pulsada (9) despolarizada. El cálculo de los máximos de la autocorrelación local del perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada

(10) presentará tres picos, uno colocado en cero, y dos simétricamente colocados alrededor de cero, que permiten calcular el valor de la diferencia de índice de refracción local $\delta n_{\perp}(z)$ entre dos ejes ortogonales de la fibra (es decir, birrefringencia local) con un solo pulso de señal óptica pulsada (9). De ser necesario, el sistema puede incluir componentes ópticos específicos para mantener el estado de polarización de la luz, tales como un circulador óptico mantenedor de polarización (512).

La Figura 9 muestra una realización todavía más alternativa del sistema de la invención sistema de la invención, en la que los medios de computación (8) comprenden un primer módulo (81) de computación para calcular la variación local del índice de refracción de la fibra óptica (2) y un segundo módulo (82) de computación que realiza medidas adicionales de caracterización distribuida basadas en señal óptica retrodispersada generada por dispersión Rayleigh de luz pulsada de alta coherencia. Dichas medidas adicionales pueden comprender, por ejemplo, la monitorización distribuida de vibraciones P2 a lo largo de la fibra óptica (2). Dicha monitorización distribuida de vibraciones utiliza los perfiles amplitud de la señal óptica retrodispersada (10) que ya se adquieren para medir variaciones locales de índice de refracción, por lo que no implica la medición de ninguna señal o parámetro adicional. El primer módulo (81) y el segundo módulo (82) pueden actuar en paralelo sin interferir en las medidas de variaciones locales de índice de refracción. Nótese además que si la medida adicional necesita la recuperación del perfil de fase de la señal óptica retrodispersada, el sistema puede comprender un detector coherente (6) en lugar del fotodetector de intensidad (7).

La Figura 10 muestra una posible aplicación de la implementación descrita en la figura 9, que combina medición de variaciones locales de índice de refracción y monitorización de vibraciones P2. Esto permite, por ejemplo, minimizar el ruido debido a derivas térmicas de la fibra o en la frecuencia central de la fuente de luz. Es decir, el sistema de la invención permite realizar las siguientes medidas:

- medir únicamente la temperatura.
- medir únicamente la vibración.
- medir conjuntamente la temperatura y la vibración, siendo cada medida

directa e independiente.

- medir conjuntamente la temperatura y la vibración, de modo que una de las medidas se utiliza para corregir los resultados de la otra.

5 Supongamos un estado inicial con su consiguiente primer perfil de amplitud 10a de la señal óptica retrodispersada (10). Cuando la fibra sufre una perturbación P2, como por ejemplo una vibración, se genera un cuarto perfil de amplitud 10d, con variación local de amplitud ΔA . Posteriormente, se regresa a un estado igual al inicial, con un
10 quinto perfil de amplitud 10e igual al primer perfil de amplitud 10a. Si no hay variaciones del índice de refracción local de la fibra ni derivas de la frecuencia central de la fuente de luz, la perturbación local P2 se puede medir al comparar los perfiles de amplitud correspondientes a los distintos estados de la fibra en un mismo punto.

Por el contrario, si al estado inicial de la fibra se le aplica simultáneamente una
15 primera perturbación P1 asociada a una variación de índice de refracción y una segunda perturbación P2, como por ejemplo una vibración, el perfil de amplitud correspondiente (es decir, el sexto perfil de amplitud 10f) registrará un cambio local de amplitud ΔA y además un desplazamiento temporal Δt_4 . Nótese que la primera perturbación P1 y la segunda perturbación P2 tienen características distintas. La
20 primera perturbación P1 se traduce en un cambio del perfil de índice de refracción medio de la fibra óptica (2) a lo largo de una sección de fibra longitud del orden de la de los pulsos de la señal óptica pulsada (9), $n(z)$, sin cambiar el perfil de dispersión de la fibra, descrito por una función compleja, $r(z)$, en la ecuación (2). La segunda perturbación P2 se traduce en un cambio aleatorio del perfil de dispersión de la fibra,
25 $r(z)$, y con variaciones que pueden ocurrir en longitudes mucho menores que la longitud del pulso de la señal óptica pulsada (9), sin cambiar el perfil de índice de refracción de la fibra óptica (2), $n(z)$. Al terminar la perturbación P2, el séptimo perfil de amplitud 10g reflejará una forma igual a la del primer perfil de amplitud 10a, pero un desplazamiento temporal Δt_5 asociado a la variación de índice de refracción entre
30 ambas medidas. Mientras que en un sistema convencional de medida de vibraciones, esto supondría un error en la caracterización de la vibración, la presente invención permite determinar mediante correlación de los perfiles de amplitud en el primer módulo (81) de computación los desplazamientos temporales Δt_4 y Δt_5 , y utilizar dicha

información para comparar puntos equivalentes durante la caracterización de las vibraciones.

Es decir, en primer lugar, el primer módulo (81) de los medios de computación (8) determina la variación de índice de refracción local de la primera perturbación P1 mediante correlación de los perfiles de amplitud. A continuación, se compensa en dichos perfiles de amplitud el desplazamiento temporal asociado a dicha variación de índice de refracción. Finalmente, el segundo módulo utiliza los perfiles de amplitud compensados para caracterizar la segunda perturbación P2.

10

Alternativamente, se puede utilizar un Δv elevado en comparación con las derivas esperadas en el láser y las variaciones esperadas de Δn . De esta manera, los desplazamientos temporales de la traza resultante serán muy reducidos, mientras que mantendrá su sensibilidad a vibraciones. Esta configuración puede ser utilizada para realizar medidas de vibraciones reduciendo el ruido asociado a derivas de láser y a variaciones de índice de refracción. A mayor contenido espectral de los pulsos transmitidos, mayor será la reducción de ruido asociado a dichos factores. Nótese que en este caso no resulta necesario el uso del primer módulo (81) de computación .

15

20

La Figura 11 ejemplifica otra posible implementación particular del sistema en la cual los medios de emisión (3) generan pulsos (91) de intensidad óptica I_k conocida y variable. En particular, se presenta un primer pulso 91a que permite medir un primer perfil de amplitud 10a, y un segundo pulso 91b de diferente intensidad óptica, cuya propagación resulta en la medición de un octavo perfil de amplitud 10h. El octavo perfil de amplitud 10h presenta un retardo Δt_6 provocado por el cambio de intensidad del segundo pulso 91b y por el índice de refracción no lineal local de la fibra óptica (2). Dicho índice de refracción no lineal local, $n_2(z)$, es medido por el sistema a través de las variaciones de índice de refractivo local $\delta n_k(t)$ obtenidas para distintas intensidades ópticas I_k de los pulsos para un mismo estado de la fibra, utilizando:

25

30

$$\delta n_k(t) = n + I_k * n_2(z)$$

Ecuación 7

Para distancias largas de fibra, es necesario tener en cuenta las deformaciones de

los pulsos al propagarse en la fibra debido a los efectos no lineales. Nótese que si la fibra es homogénea, es posible caracterizar el índice de refracción no lineal local para distancias cortas de fibra y asumir que se mantiene constante a lo largo del resto de la fibra.

5

La Figura 12 presenta otra implementación del sistema y método de la invención en la cual los pulsos de la señal óptica pulsada (9) no son conocidos a priori, sino que se utiliza un detector coherente (6) para medir el perfil de amplitud y el perfil de frecuencia instantánea (92) de la señal óptica pulsada (9) y el perfil de amplitud de la señal óptica retrodispersada (10). La señal óptica pulsada (9) emitida por los medios de emisión (3) se divide mediante un primer divisor (4) en dos brazos. El primer brazo se introduce en la fibra óptica (2), mientras que el segundo brazo se introduce en un combinador óptico (14), que recibe además la señal óptica retrodispersada (10) y envía ambas señales al detector coherente (6). Para evitar cualquier solapamiento entre la señal óptica pulsada (9) y la señal óptica retrodispersada (10), un retardo óptico 1(3) se añade entre el divisor (4) y el circulador óptico (51), que puede ser implementado, por ejemplo, con una fibra monomodo. Además, la limitación en el periodo de repetición de los pulsos τ_T para asegurar que no se produce la superposición de distintas señales en el detector coherente (6), estará dada ahora por:

20

$$2nL + D/c \leq \tau_T$$

Ecuación 8

donde D es el retardo inducido por el retardo óptico (13). Hay que destacar que los medios de computación (8) manejan cualquier sincronización y ajustes necesarios para la medida de ambas señales, alternativamente, con el mismo detector coherente (6).

25

Cualquier implementación alternativa que permita enviar ambas señales al mismo detector coherente (6) sin superposición puede ser empleada alternativamente. Por ejemplo, el combinador óptico (14) puede ser reemplazado por un conmutador óptico, permitiendo ambas configuraciones con o sin el retardo óptico (13). Además, el

30

retardo óptico (13) puede ser implementado en otras posiciones del sistema alcanzando un efecto similar, tal y como el camino seguido por la señal óptica retrodispersada (10) dentro del sistema 1. Por ejemplo, el retardo óptico (13) puede estar situado entre el circulador óptico (51) y el combinador óptico (14). Hay que tener en cuenta que los pulsos (91) generados por los medios de emisión (3) no deben cambiar durante la caracterización de los dos o más estados utilizados para calcular la variación de índice de refracción. Como dichos pulsos (91) no varían durante ese intervalo de tiempo, el conmutador óptico puede ser programado para transmitir la señal óptica pulsada (9) al detector coherente (6) una única vez durante todo el tiempo que los pulsos (91) permanecen inalterados.

Finalmente, la Figura 13 presenta una última implementación del sistema de la invención en la cual los pulsos (91) de la señal óptica pulsada (9) no son conocidos y un detector coherente (6) y un fotodetector de intensidad (7) se usan para caracterizar la señal óptica pulsada (9) y la señal óptica retrodispersada (10), respectivamente. La señal óptica pulsada emitida por los medios (3) se divide mediante un primer divisor (4) en dos brazos. El primer brazo se introduce en la fibra óptica (2), mientras que el segundo brazo se introduce a un detector coherente (6) que se usa para medir el perfil de la amplitud y frecuencia instantánea de la señal óptica pulsada (9). La señal óptica retrodispersada (10) se introduce a un fotodetector de intensidad (7) que se usa para medir el perfil de la amplitud la señal óptica retrodispersada (10).

Cabe destacar que cualquier característica o implementación presentada para los medios de emisión (3) y los medios de computación (8) (por ejemplo control de polarización, uso de distintas intensidades de pulso, cálculos adicionales, etc.) es compatible con cualquier implementación particular de los medios de detección (un único detector coherente para la señal óptica pulsada y la señal óptica retrodispersada, múltiples detectores, un único detector combinado con información previamente almacenada, etc.).

Nótese también que las medidas de variaciones locales de índice de refracción de la fibra recuperado por la invención pueden ser usadas, por ejemplo, para implementar

sensores distribuidos de deformación, vibración, birrefringencia o temperatura. Cualquier otro uso o aplicaciones de la medida de variaciones locales de índice de refracción de la fibra conocidas en el estado del arte pueden también ser implementadas con el sistema y método descritos.

5

El trabajo que ha dado lugar a esta invención ha recibido financiación del programa 'People Programme (Marie Curie Actions), European Union's Seventh Framework Programme (FP7/2007-2013)' bajo el acuerdo de beca REA n° [608099]; y de EURAMET a través del proyecto 14IND13 JRP-i22.

10

REIVINDICACIONES

1. Sistema (1) de caracterización distribuida de variaciones locales de índice de refracción de una fibra óptica (2) que comprende:

- 5 • medios de emisión (3) adaptados para generar al menos dos señales ópticas pulsadas (9) y transmitir dichas señales ópticas pulsadas (9) a través de un primer extremo de la fibra óptica (2);
- medios de recepción (5) adaptados para recibir en el primer extremo de la fibra óptica (2) al menos una primera señal óptica retrodispersada (10) generada
10 mediante dispersión Rayleigh por una primera señal óptica pulsada de las señales ópticas pulsadas (9) al propagarse por la fibra óptica (2), y una segunda señal óptica retrodispersada (10) generada mediante dispersión Rayleigh por una segunda señal óptica pulsada de las señales ópticas pulsadas (9) al propagarse por la fibra óptica (2); y
- 15 • medios de detección adaptados para medir al menos un primer perfil de amplitud de la al menos una primera señal óptica retrodispersada (10) y un segundo perfil de amplitud de la al menos una segunda señal óptica retrodispersada (10);

estando el sistema (1) caracterizado por que:

- 20 • los medios de emisión (3) están adaptados para generar las señales ópticas pulsadas (9) con un mismo perfil de frecuencia instantánea (92), siendo dicho perfil de frecuencia instantánea (92) variable en el tiempo; y
- comprende medios de computación (8) configurados para calcular las variaciones locales del índice de refracción de la fibra óptica (2) en función de, al menos, el perfil de frecuencia instantánea (92), el primer perfil de amplitud y el segundo perfil
25 de amplitud.

2. Sistema de acuerdo con la reivindicación 1 caracterizado por que el perfil de frecuencia instantánea (92) comprende al menos una rampa lineal.

30 3. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la primera las señales ópticas pulsadas (9) comprenden al menos un pulso (91) rectangular.

4. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende una memoria accesible por los medios de computación (8), estando almacenado en dicha memoria el perfil de frecuencia instantánea (92).

5 5. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 caracterizado por que los medios de detección comprenden al menos un detector coherente (6) adaptado para medir el perfil de frecuencia instantánea (92).

10 6. Sistema de acuerdo con la reivindicación 5 caracterizado por que los medios de detección comprenden un único detector coherente (6) conectado a los medios de emisión (3) y los medios de recepción (5), estando el detector coherente (6) adaptado para medir, además del perfil de frecuencia instantánea (92), el primer perfil de amplitud y el segundo perfil de amplitud;

15 7. Sistema de acuerdo con la reivindicación 5 caracterizado por que los medios de detección comprenden:

- un detector coherente (6) conectado a los medios de emisión (3), estando el detector coherente (6) adaptado para medir el perfil de frecuencia instantánea (92); y
- 20 • un fotodetector de intensidad (7) conectado a los medios de recepción (5), estando el fotodetector de intensidad (7) adaptado para medir el primer perfil de amplitud y el segundo perfil de amplitud.

25 8. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que los medios de emisión (3) adicionalmente comprenden medios de estabilización de frecuencia.

30 9. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que el sistema adicionalmente comprende amplificador distribuido (11) bidireccional adaptado para amplificar las señales ópticas pulsadas (9), el primer perfil de amplitud y el segundo perfil de amplitud en la fibra óptica (2).

10. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores

caracterizado por que el sistema adicionalmente comprende medios de sintonización adaptados para modificar dinámicamente una longitud de pulso y una pendiente del perfil de frecuencia instantánea (92) de las señales ópticas pulsadas (9).

5 11. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que los medios de computación (8) están adaptados para calcular las variaciones locales del índice de refracción de la fibra óptica (2) en función de, además, unas variaciones locales de índice de refracción conocidas de una fibra de calibración (21).

10

12. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que los medios de emisión (3) comprenden medios de control de polarización (34) adaptados para controlar un estado de polarización de al menos una de las señales ópticas pulsadas (9).

15

13. Sistema de acuerdo con la reivindicación 12 caracterizado por que los medios de emisión (3) están adaptados para generar al menos dos señales ópticas pulsadas (9) con polarizaciones ortogonales y porque los medios de computación (8) están adaptados para medir la variación de índice de refracción local para cada una de las polarizaciones ortogonales.

20

14. Sistema de acuerdo con la reivindicación 12 caracterizado por que los medios de emisión (3) están adaptados para generar simultáneamente dos pulsos (91) incoherentes entre sí, presentando dichos dos pulsos (91) polarizaciones ortogonales; y porque los medios de computación (8) están adaptados para medir la variación de índice de refracción local para cada una de las polarizaciones ortogonales.

25

15. Sistema de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado porque los medios de computación (8) están adaptados además para realizar medidas adicionales de caracterización distribuida de la fibra óptica (2) a partir de, al menos, las señales ópticas retrodispersadas (10), y realizándose dichas medidas adicionales en paralelo al cálculo de variaciones locales de índice de refracción.

30

16. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 14, caracterizado por que:

- los medios de emisión (3) están adaptados además para generar las señales ópticas pulsadas (9) con un contenido espectral mayor que unas derivas esperadas de un láser de emisión y que un rango espectral necesario para medir las variaciones locales de índice de refracción, y
- los medios de computación (8) están configurados para realizar una medida distribuida de vibraciones insensible a dichas derivas y dichas variaciones locales de índice de refracción.

17. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que los medios de emisión (3) están adaptados para generar pulsos (91) de distintas intensidades ópticas y porque los medios de computación (8) están adaptados para calcular un índice de refracción no lineal local de la fibra óptica (2) a partir de variaciones locales de índice de refracción de una fibra óptica (2) para pulsos (91) de distintas intensidades ópticas.

18. Método de caracterización distribuida de variaciones locales del índice de refracción de una fibra óptica (2) que comprende:

- generar al menos una primera señal óptica pulsada (9) de las señales ópticas pulsadas (9) y una segunda señal óptica pulsada de las señales ópticas pulsadas (9);
- transmitir dichas señales ópticas pulsadas (9) a través de un primer extremo de la fibra óptica (2);
- recibir en el primer extremo de la fibra óptica (2) al menos una primera señal óptica retrodispersada (10) generada mediante dispersión Rayleigh por la primera señal óptica pulsada (9) de las señales ópticas pulsadas (9) al propagarse por la fibra óptica (2), y una segunda señal óptica retrodispersada (10) generada mediante dispersión Rayleigh por segunda señal óptica pulsada de las señales ópticas pulsadas (9) al propagarse por la fibra óptica (2); y
- medir al menos un primer perfil de amplitud de la al menos una primera señal óptica retrodispersada (10) y un segundo perfil de amplitud de la al menos una segunda señal óptica retrodispersada (10);

estando el método caracterizado por que comprende:

- generar las señales ópticas pulsadas (9) con un mismo perfil de frecuencia instantánea (92), siendo dicho perfil de frecuencia instantánea (92) variable en el tiempo; y
- 5 • calcular las variaciones locales del índice de refracción de la fibra óptica (2) en función de, al menos, el perfil de frecuencia instantánea (92), el primer perfil de amplitud y el segundo perfil de amplitud.

10 19. Método de acuerdo con la reivindicación 18 caracterizado por que el paso de calcular las variaciones locales del índice de refracción comprende a su vez:

- calcular un perfil de desplazamiento local basado en una correlación local entre el primer perfil de amplitud y el segundo perfil de amplitud; y
- multiplicar el perfil de desplazamiento local por un factor derivado del perfil de frecuencia instantánea (92).

15

20 20. Método de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones 18 y 19 caracterizado por que comprende además almacenar múltiples perfiles de amplitud de las señales ópticas retrodispersadas (10) y optimizar una selección de perfiles a comparar en función de una velocidad de las variaciones locales del índice de refracción y una velocidad de adquisición de los perfiles de amplitud.

25 21. Programa de ordenador que comprende código de programa de ordenador necesario para realizar las etapas del método de una cualquiera de las reivindicaciones 18 a 20, cuando el mencionado programa se ejecuta en un procesador digital de la señal, un circuito integrado específico de la aplicación, un microprocesador, un microcontrolador o una forma de hardware programable.

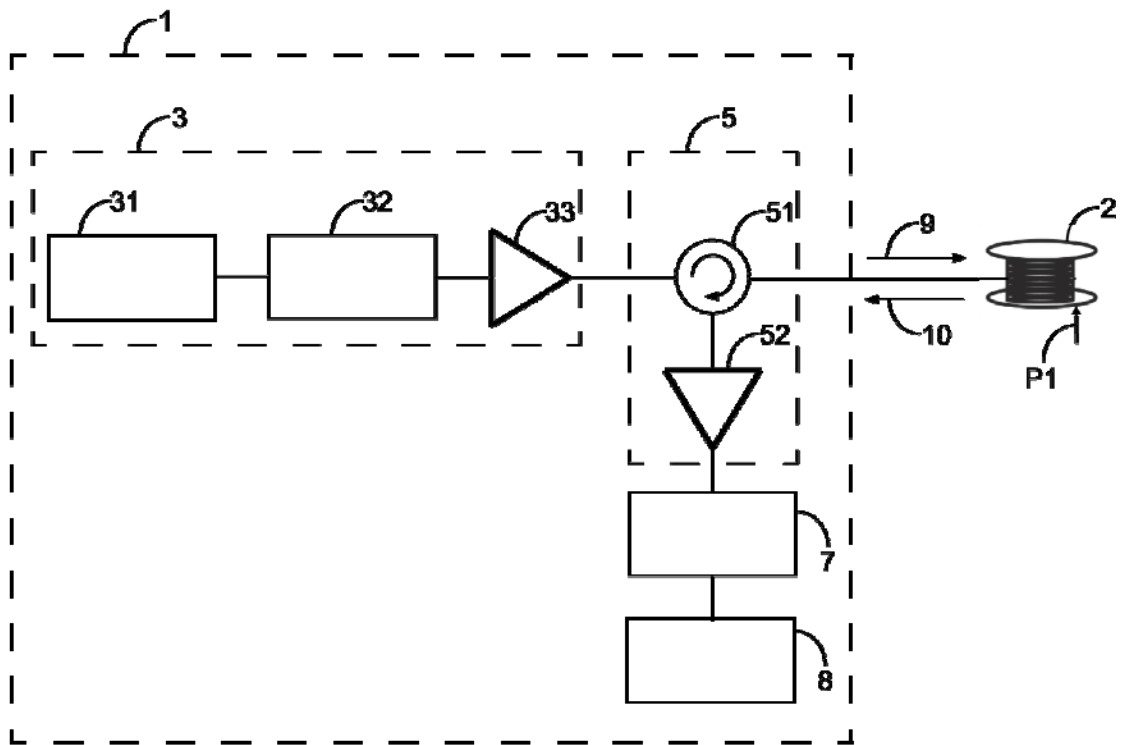


Fig. 1

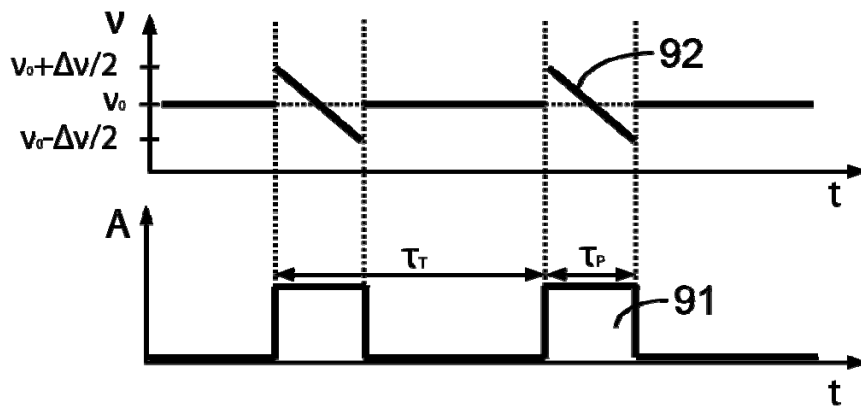


Fig. 2

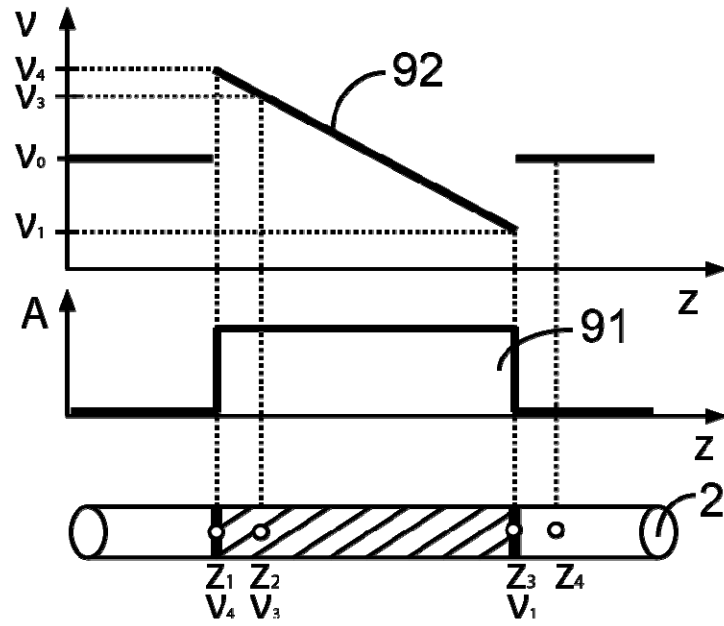


Fig. 3a

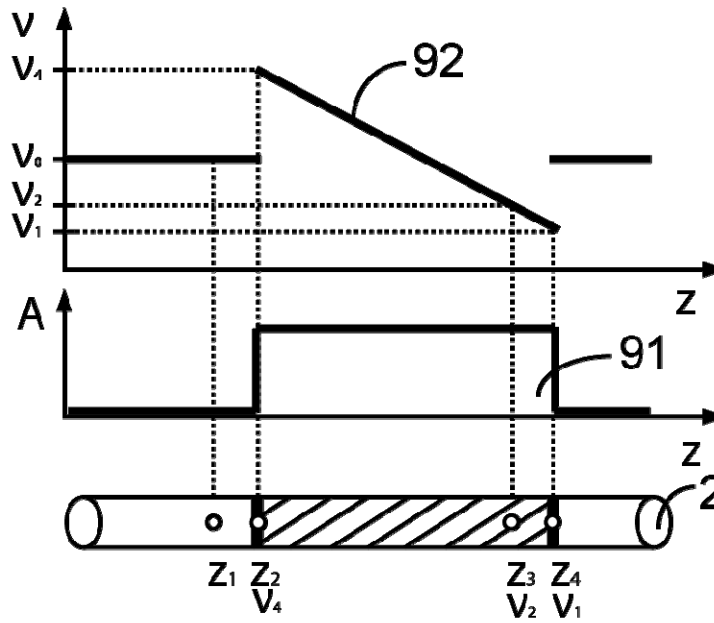


Fig. 3b

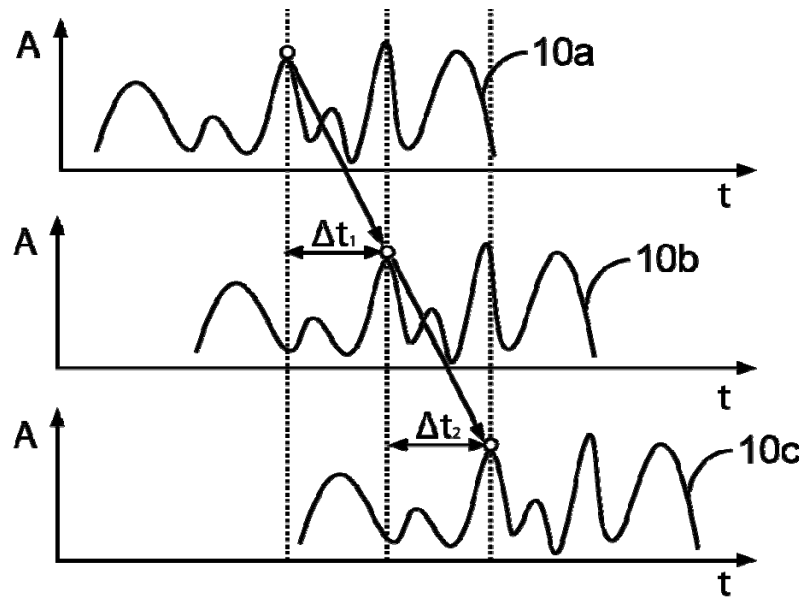


Fig. 4

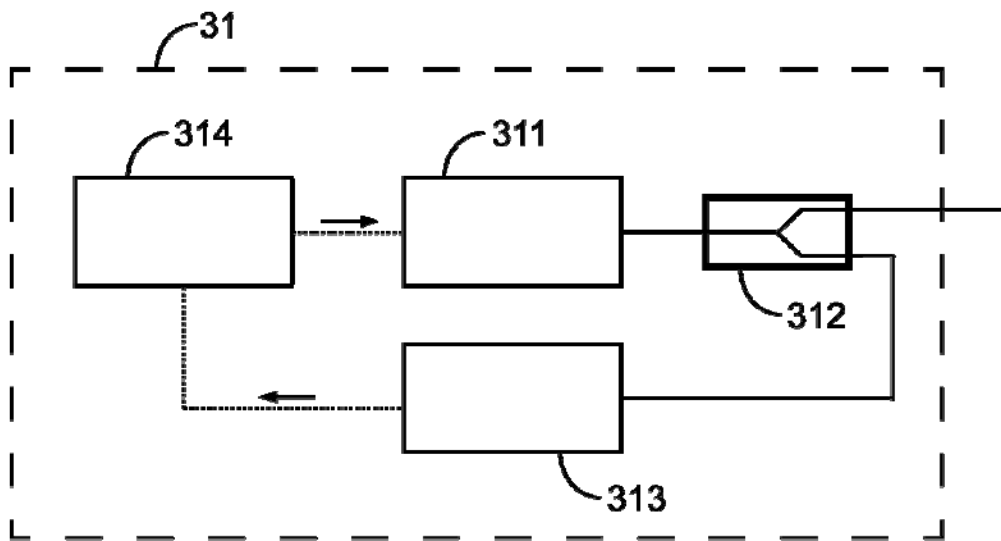


Fig. 5

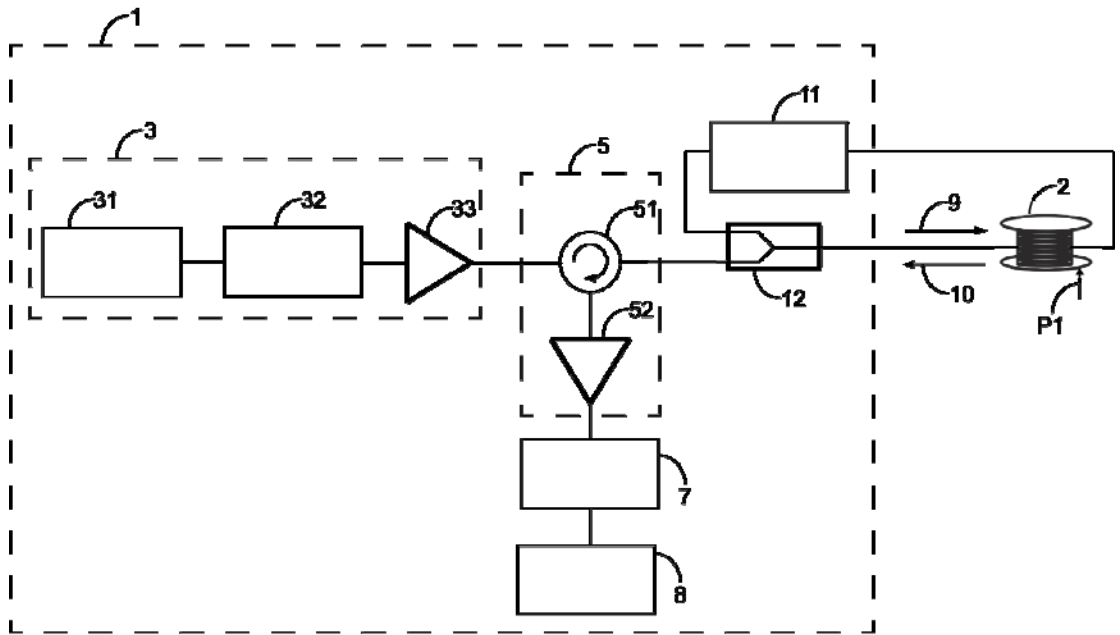


Fig. 6

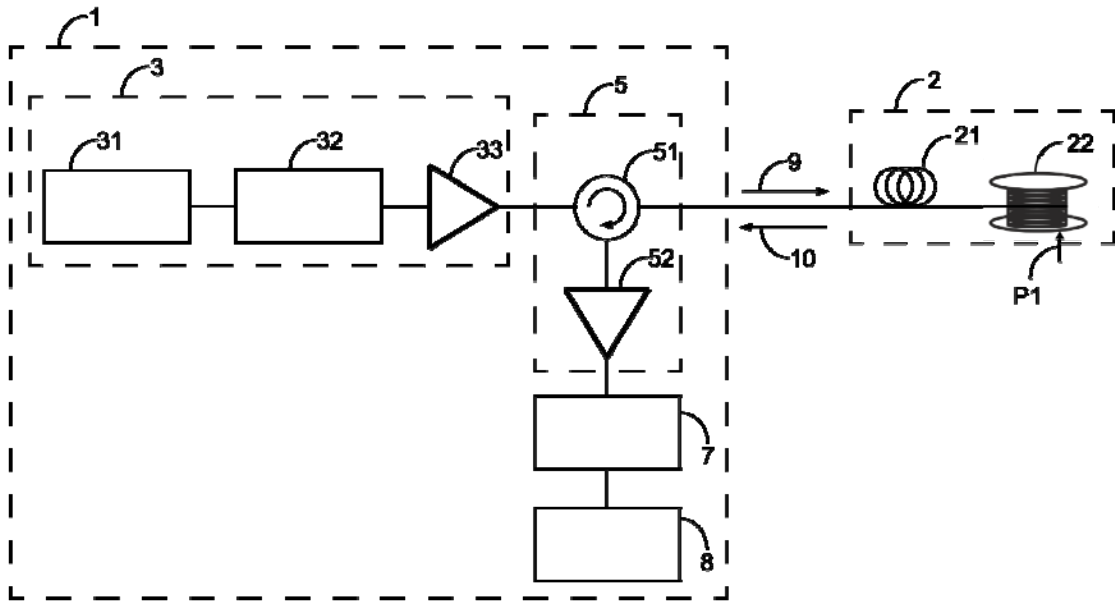


Fig. 7

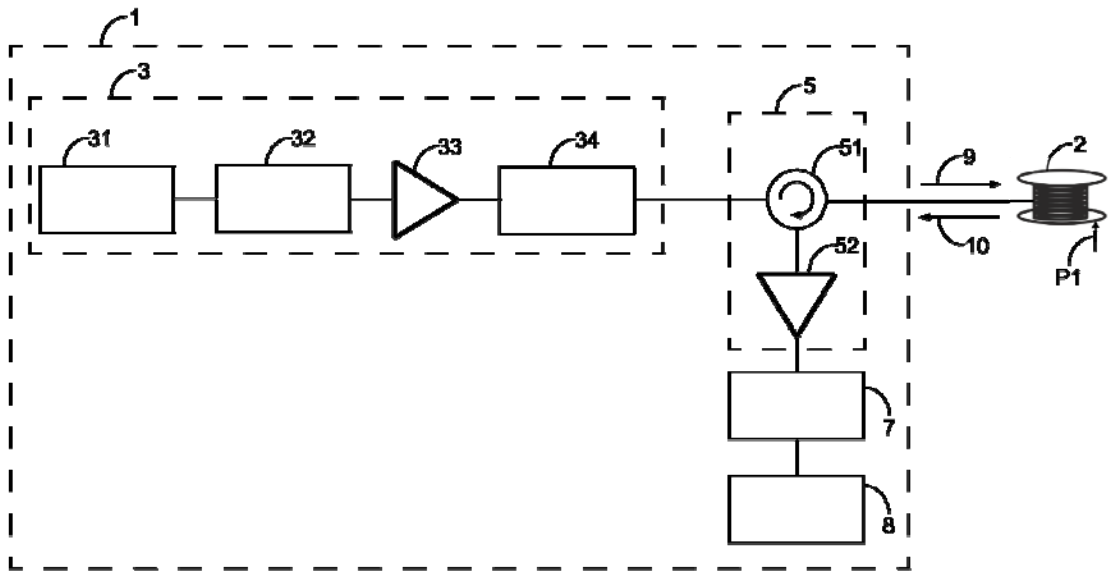


Fig. 8

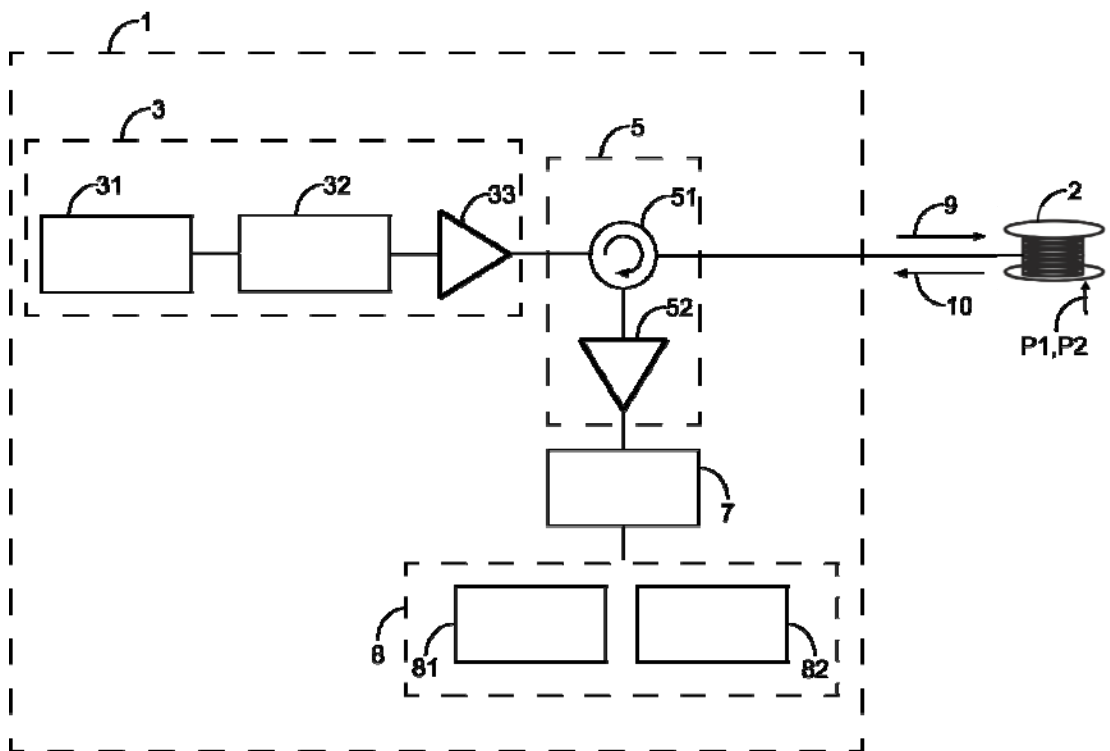


Fig. 9

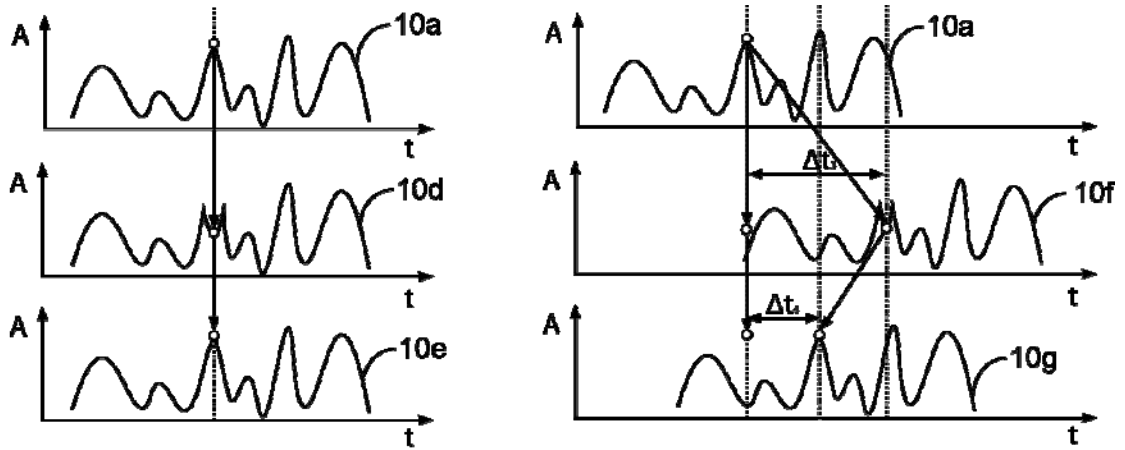


Fig. 10

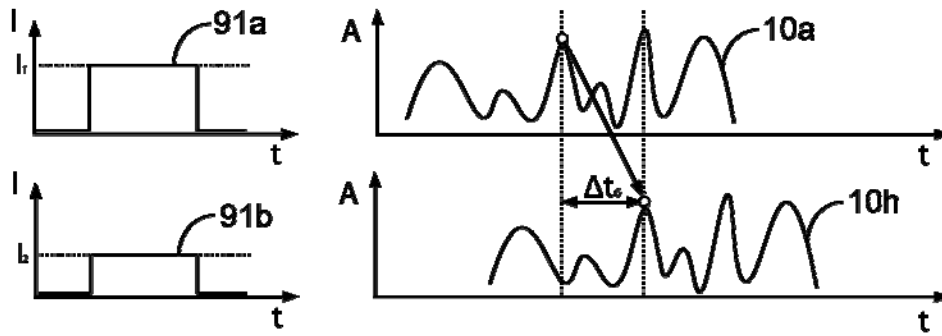


Fig. 11

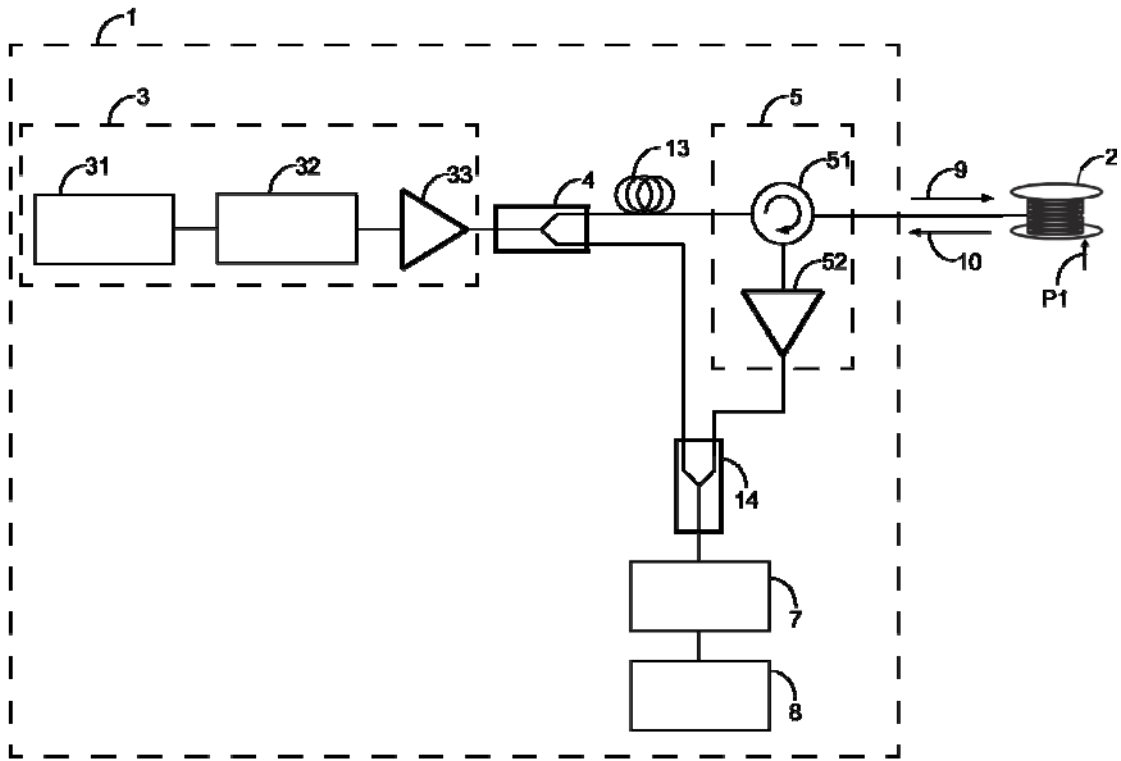


Fig. 12

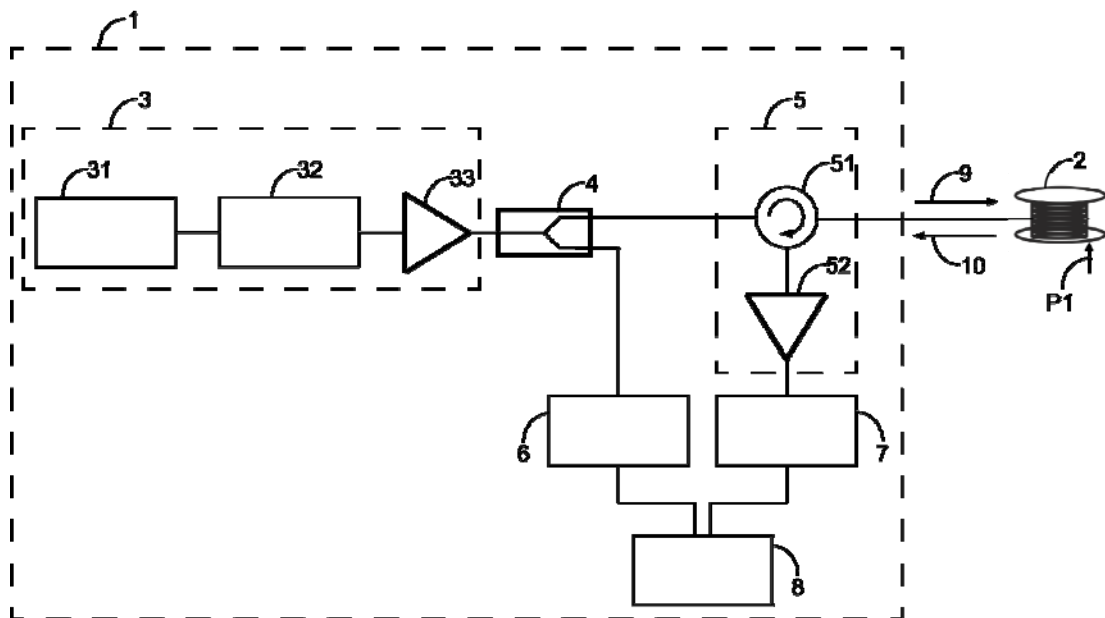


Fig. 13