

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 596 260**

21 Número de solicitud: 201530793

51 Int. Cl.:

H04B 10/2537 (2013.01)

G01B 11/00 (2006.01)

H04B 7/22 (2006.01)

G02B 6/00 (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

05.06.2015

43 Fecha de publicación de la solicitud:

05.01.2017

Fecha de concesión:

11.10.2017

45 Fecha de publicación de la concesión:

19.10.2017

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2016/070423

73 Titular/es:

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ (50.0%)

Plaza de San Diego, s/n

28801 Alcalá de Henares (Madrid) ES;

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES

CIENTÍFICAS (CSIC) (30.0%) y

FIBER OPTICS CONSULTING SERVICES AND

TECHNOLOGIES, S.L. (FOCUS, S.L.) (20.0%)

72 Inventor/es:

PASTOR GRAELLS, Juan;

MARTÍN LÓPEZ, Sonia;

GONZÁLEZ HERRÁEZ, Miguel;

VILLAFRANCA VELASCO, Aitor;

CORREDERA GUILLEN, Pedro y

MARTINS, Hugo Fidalgo

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

54 Título: **SISTEMA Y MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DISTRIBUIDA DE PERFIL DE DISPERSIÓN DE UNA FIBRA ÓPTICA**

57 Resumen:

Sistema y método de caracterización distribuida de perfil de dispersión de una fibra óptica.

Método y sistema que permiten caracterizar el perfil de dispersión (scattering) de una fibra óptica (2) mediante comparación de la amplitud y la fase de una luz pulsada (9) y una luz generada por dispersión Rayleigh (10). La luz generada por dispersión Rayleigh (10) se caracteriza mediante al menos un detector fotónico diferencial (7). Implementaciones particulares incluyen codificación de pulsos y desplazamientos frecuenciales para aumentar la resolución espacial. La invención proporciona una caracterización de alta resolución y sensibilidad sin recurrir a estados de referencia de la fibra bajo análisis.

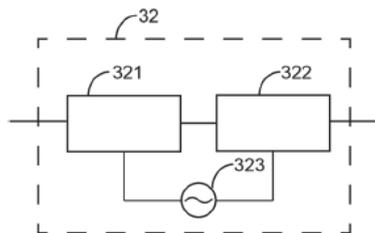


FIG.2

ES 2 596 260 B1

**SISTEMA Y MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DISTRIBUIDA DE PERFIL DE
DISPERSIÓN 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 del sensado y caracterización distribuida de fibras ópticas.

10

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

15

La medida del perfil de dispersión (del inglés 'scattering') de una fibra óptica proporciona información útil para la caracterización distribuida de 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 el que se describe en US 5,194,847 A, se basan en el análisis de la señal dispersada generada por dispersión Rayleigh al propagarse la luz pulsada por la fibra bajo test. Cuando se produce una perturbación en la fibra, el perfil de dispersión de la fibra cambia. Esto afecta a las fases relativas de los campos reflejados por cada centro de dispersión, y por lo tanto, la fase y la intensidad de la señal dispersada medida cambia. Esta información permite comparar dos estados de la fibra, y por lo tanto, detectar cambios de temperatura o vibraciones a lo largo de ella, tales como los generados por ondas acústicas o intrusos traspasando un perímetro.

20

25

Aunque los sistemas OTDR sensibles a la fase están basados exclusivamente en la intensidad de la señal dispersada, existen técnicas recientes que tienen en cuenta la fase de la señal. Es el caso del dispositivo de detección de ondas acústicas que se describe en US 2014/0255023 A1, el cual incorpora una unidad de detección coherente para caracterizar la fase y la amplitud de la señal dispersada. Sin embargo, 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, e introduciendo una diferencia de camino óptico (τ) entre las componentes divididas de la señal antes de ser recombinadas de nuevo. En este caso, la resolución temporal del perfil de variación de fase recuperado está determinado por la diferencia de camino óptico introducido entre las componentes divididas de

30

35

la señal. Por lo tanto, dicha técnica es adecuada para una predeterminada forma de pulso y resolución espacial. Además, las variaciones en la diferencia de camino óptico inducido se añadirán a la fase recuperada, introduciendo así un error. Por esta razón, la diferencia de camino óptico debe de ser controlada de forma precisa con una precisión por debajo de la longitud de onda de la frecuencia óptica usada (típicamente alrededor de 1 micrómetro). Estos métodos de recuperación de fase son sensibles a cambios ambientales. Además, los métodos interferométricos han sido extendidos para permitir la recuperación de perfiles de señal arbitrarios, pero estas técnicas requieren el uso de un oscilador local precisamente sincronizado. En el caso de la caracterización del perfil de dispersión de una fibra óptica, implica una mayor demanda de sincronización y control, debido al ruido añadido como resultado del ruido de fase del oscilador local.

Adicionalmente, para los sistemas de largo alcance basados en sensado OTDR, la resolución espacial está limitada por la anchura del pulso, o la anchura de un bit individual, en el caso de un pulso codificado. No obstante, los fotodetectores de intensidad convencionales están limitados a anchuras espectrales de ~50GHz y los moduladores ópticos industriales pueden proveer velocidades de modulación del mismo orden. Esto limita la resolución espacial de las técnicas basadas en OTDR a unos pocos milímetros, que puede resultar insuficiente en algunos escenarios exigentes.

Además, los esquemas de OTDR sensibles a la fase que se encuentran en el estado del arte son sólo capaces de comparar dos estados diferentes de una fibra óptica, pero no proporcionan una medida absoluta de un único estado de la fibra. Esta medida absoluta no sólo proporciona una poderosa herramienta para el sensado distribuido de alta resolución, sino también para la caracterización de la calidad de la fibra óptica. Además, cualquier resultado que pueda ser proporcionado de una medida relativa entre dos estados puede ser también obtenido comparando dos medidas absolutas.

Hasta ahora, el perfil de dispersión de una fibra ha sido caracterizado con alta resolución espacial mediante reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR, del inglés 'Optical Frequency Domain Reflectometry'). Tal es el caso, por ejemplo, del dispositivo de obtención de información espacial de una fibra descrito en US 6,160,826 A1. El 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 unas pocas 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 el perfil de dispersión absoluto en un rango de sensado largo con alta resolución espacial y temporal. Además, también existe la necesidad de sistemas de caracterización estables con 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 caracterización distribuida de fibras ópticas que proporciona una medida absoluta del perfil de dispersión (del inglés 'scattering') de la fibra, mediante comparación de la fase y amplitud de una luz pulsada y de la dispersión Rayleigh generada por dicha luz pulsada, siendo al menos la dispersión Rayleigh medida a través de diferenciación fotónica.

En un primer aspecto de la invención, se presenta un sistema de caracterización distribuida de fibra óptica que comprende:

-Medios de emisión que generan luz pulsada de alta coherencia y transmiten dicha luz pulsada a través de un primer extremo de la fibra óptica bajo test.

-Medios de recepción que reciben la luz Rayleigh retrodispersada generada por dispersión Rayleigh al propagarse la luz pulsada por la fibra bajo test. 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.

-Al menos un detector fotónico diferencial que mide la fase y la amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada, utilizando una técnica de diferenciación fotónica como por ejemplo una técnica de reconstrucción de fase utilizando diferenciación óptica ultrarrápida (PROUD, del inglés 'Phase Reconstruction Using Optical Ultrafast Differentiation'). En una primera opción preferente, un primer detector fotónico diferencial mide la fase y amplitud de la luz pulsada y un segundo detector fotónico diferencial mide la fase y amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada. En una segunda

opción preferente, un único detector fotónico diferencial mide tanto la luz Rayleigh retrodispersada como la luz pulsada. Medios de guiado de luz, tales como combinadores, conmutadores y/o retardos ópticos son incorporados al sistema para alimentar la luz pulsada y la luz Rayleigh retrodispersada en una entrada del detector fotónico diferencial sin superposición temporal entre ambas señales. En una tercera opción preferente, un único detector fotónico diferencial mide la fase y amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada, mientras que la fase y amplitud de la luz pulsada son parámetros fijos almacenados en una memoria del sistema, y por lo tanto no medidos directamente.

-Medios de computación para calcular el perfil de dispersión absoluto de la fibra óptica comparando la fase y la amplitud de la luz pulsada y la luz Rayleigh retrodispersada.

Con el fin de mejorar la resolución espacial del sistema, se presentan dos opciones preferentes:

-Codificación binaria. El pulso o pulsos generados por los medios de emisión son codificados con una pluralidad de bits, aumentando el ancho de banda del pulso de luz y permitiendo que los medios de computación aumenten la resolución espacial del sistema.

-Desplazamiento de frecuencia. Se incorporan medios sintonizables de emisión para proporcionar a cada pulso de la luz pulsada una frecuencia central distintiva. Nótese que esta opción es compatible tanto con sistemas con codificación binaria como con sistemas sin dicha codificación. Preferentemente, el desplazamiento de frecuencia se implementa con una fuente de luz sintonizable, si bien es posible utilizar cualquier otra configuración conocida en el estado del arte que genere luz coherente sintonizable en frecuencia. Adicionalmente, un desplazador de frecuencia puede ser implementado para un control más fino de la frecuencia de los pulsos, utilizando para ello un modulador externo y un filtro óptico. El modulador externo genera bandas laterales de la señal emitida por una fuente de luz, desplazando así el espectro de dicha señal. Las bandas laterales son filtradas por el filtro óptico.

Preferentemente, el sistema comprende además medios de amplificación distribuida, tales como amplificación Raman, que amplifica la luz 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.

Con el fin de implementar los esquemas de detección mediante diferenciación fotónica de la invención y proporcionar medidas de amplitud y fase de alta sensibilidad en tiempo real, el detector (o detectores) comprende un divisor, un filtro espectral lineal invariante en el tiempo, medios de detección y medios de digitalización, tales como un osciloscopio. Se presentan a continuación algunas opciones preferentes para dichos esquemas. Estas configuraciones son válidas tanto para sistemas con un único detector fotónico diferencial como para sistemas con dos detectores independientes.

-La señal a medir (es decir, bien la señal pulsada emitida por los medios de emisión, bien la luz Rayleigh retrodispersada generada mediante dispersión Rayleigh) se divide mediante el divisor en dos brazos. El primer brazo es medido directamente por un primer fotodetector, cuya salida sirve de entrada de un primer puerto de los medios de digitalización. El segundo brazo comprende un filtro espectral lineal, tal como un multiplexor por división en longitud de onda (WDM, del inglés 'Wavelength Division Multiplexer'), una red de Bragg en fibra o un interferómetro Mach-Zehnder desbalanceado. La salida del filtro espectral lineal se mide en un segundo fotodetector y se transmite a los medios de digitalización a través de un segundo puerto.

-Un retardo óptico incluido en el primer brazo, siendo las señales generadas por el retardo óptico y el filtro espectral lineal combinadas por un combinador y medidas por un único fotodetector y alimentadas a los medios de digitalización.

-Un conmutador óptico anterior a un fotodetector único, seleccionando alternativamente el primer y el segundo brazo.

-Un detector balanceado en el segundo brazo, siendo dos salidas del filtro espectral lineal utilizadas como entradas del detector balanceado. La salida diferencial proporcionada por el detector balanceado sirve de entrada de uno de los puertos de los medios de digitalización, mientras que la medida directa del primer brazo a través de un fotodetector sirve de entrada del otro puerto de los medios de digitalización.

-Un retardo óptico se incluye en el primer brazo, siendo las señales generadas por el retardo óptico y una primera salida del filtro espectral lineal combinadas por un combinador e introducidas en un primer puerto de entrada de un detector balanceado. Una segunda salida del filtro espectral lineal sirve de entrada de un segundo puerto del detector balanceado.

-Un conmutador óptico selecciona alternativamente uno de los dos brazos a los que transmitir la señal a medir. El segundo brazo comprende un filtro espectral lineal. Las

señales generadas por el primer brazo y una primera salida del filtro espectral lineal combinadas por un combinador e introducidas en un primer puerto de entrada de un detector balanceado. Una segunda salida del filtro espectral lineal sirve de entrada de un segundo puerto del detector balanceado.

5

En un segundo aspecto de la invención, se presenta un método de caracterización distribuida del perfil de dispersión de una fibra óptica. El método comprende:

10 -Transmitir luz pulsada a través de una fibra bajo test. Preferentemente, el método comprende además codificar cada pulso de la luz pulsada en una pluralidad de bits, y/o desplazar la frecuencia de cada pulso de la luz pulsada.

-Recibir la luz Rayleigh retrodispersada generada mediante dispersión Rayleigh en la fibra óptica. La transmisión y la recepción se realizan en un mismo extremo de la fibra.

15 -Medir la fase y la amplitud de luz Rayleigh retrodispersada utilizando un esquema de diferenciación fotónica como PROUD.

-Dependiendo de la opción preferente escogida, el método puede comprender bien medir la fase y amplitud de la luz pulsada mediante diferenciación fotónica, bien utilizar luz pulsada con fase y amplitud conocidas.

20 -Calcular el perfil de dispersión de la fibra óptica comparando la fase y la amplitud de la luz pulsada y de la luz Rayleigh retrodispersada. A pesar de que el método puede implementarse con un único pulso, el método comprende preferentemente promediar múltiples pulsos para mejorar la relación señal a ruido.

25 Si el método no comprende desplazamiento frecuencial de la luz pulsada, el paso de calcular el perfil de dispersión de la fibra preferentemente comprende:

-Calcular una primera transformada de Fourier de la luz pulsada; utilizando la fase y amplitud medidas o recuperadas de memoria de dicha luz pulsada.

-Calcular una segunda transformada de Fourier de la luz Rayleigh dispersada; utilizando la fase y amplitud medidas de dicha luz Rayleigh dispersada.

30 -Calcular una transformada de Fourier inversa del resultado de dividir la primera y la segunda transformada de Fourier.

35 Si el método comprende desplazamiento frecuencial, el paso de calcular el perfil de dispersión es repetido para cada frecuencia disponible. Es decir, se calculan una pluralidad de perfiles de dispersión auxiliares, estando cada perfil auxiliar asociado a una frecuencia,

utilizando tanto la fase como la amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada. Los pasos utilizados para cada frecuencia son los mismos descritos para el caso de una única frecuencia. La pluralidad de perfiles auxiliares resultantes, se utilizan para calcular una pluralidad de coeficientes de Fourier del perfil de dispersión final. Esta técnica permite
5 reconstruir el perfil de dispersión con una mayor resolución que utilizando una única frecuencia.

Finalmente, en un tercer aspecto de la invención, se presenta un programa de ordenador que comprende medios de código de programa de ordenador adaptados para
10 implementar el método descrito, 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 aplicado al método y al programa de ordenador de la invención, y viceversa.

Con el sistema, método y programa de ordenador de la invención, se proporciona un perfil de dispersión absoluto de alta resolución y alta sensibilidad. El rango de medida está limitado únicamente por la intensidad de la luz pulsada, permitiendo incorporar sistemas de
15 amplificación distribuida. Adicionalmente, la fibra óptica bajo test se caracteriza de manera absoluta y continua, sin comparar múltiples estados, y los resultados se pueden proporcionar en tiempo real. Estas y otras ventajas resultarán aparentes a la luz de la descripción detallada de la invención.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

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, y para complementar esta descripción, se acompañan como parte integrante de la misma las
20 siguientes figuras, cuyo carácter es ilustrativo y no limitativo:

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

La figura 2 muestra con mayor detalle una implementación particular del modulador externo de la invención que incorpora codificación binaria para aumentar la resolución
35 espacial.

La figura 3 presenta un esquema de una señal pulsada de ejemplo empleada por una implementación particular de la invención.

La figura 4 muestra otra realización preferente de la invención en la que se incorpora desplazamiento frecuencial para aumentar la resolución espacial.

5 La figura 5 ejemplifica una realización preferente de los medios de desplazamiento frecuencial de la invención.

La figura 6 presenta otra realización preferente de la invención que incorpora amplificación distribuida para aumentar la distancia de caracterización.

10 La figura 7 muestra una primera implementación preferente de los detectores fotónicos diferenciales de la invención basada en dos fotodetectores independientes.

La figura 8 muestra una segunda implementación preferente de los detectores fotónicos diferenciales de la invención basada en un único fotodetector y un retardo óptico.

La figura 9 muestra una tercera implementación preferente de los detectores fotónicos diferenciales de la invención basada en un único fotodetector y un conmutador óptico.

15 La figura 10 muestra una cuarta implementación preferente de los detectores fotónicos diferenciales de la invención basada en un fotodetector y un detector balanceado.

La figura 11 muestra una quinta implementación preferente de los detectores fotónicos diferenciales de la invención basada en un detector balanceado y un retardo óptico.

20 La figura 12 muestra una sexta implementación preferente de los detectores fotónicos diferenciales de la invención basada en un detector balanceado y un conmutador óptico.

La figura 13 presenta una realización particular del sistema de la invención con un único detector fotónico diferencial para medir tanto la señal pulsada como la luz Rayleigh retrodispersada.

25 La figura 14 presenta una realización particular del sistema de la invención con un único detector fotónico diferencial y una señal pulsada de características conocidas.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION

30 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.

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.

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 una luz pulsada 9, la cual comprende uno o más pulsos ópticos. En la primera implementación, los medios de emisión 3 comprenden una fuente continua láser coherente 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. 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 de la fuente láser coherente 31, 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.

La luz pulsada 9 generada 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 primer detector fotónico diferencial 6. La luz Rayleigh retrodispersada 10 generada dentro de la fibra óptica 2 por la luz pulsada 9 mediante efecto Rayleigh es recibida por unos medios de recepción 5 en el mismo puerto de la fibra usado para la transmisión, y se introduce en un segundo detector fotónico diferencial 7. Para este propósito, los medios de recepción 5 comprenden un circulador óptico 51 de tres puertos de tal manera que la luz pulsada 9 es recibida de los medios de emisión 3 en el primer puerto y transmitida a la fibra óptica 2 a través del segundo puerto. La luz Rayleigh retrodispersada 10 es recibida en el segundo puerto y transmitida al segundo detector fotónico diferencial 7 a través del tercer puerto del circulador óptico 51. 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 pueden comprender cualquier etapa de acondicionamiento de señal y/o de amplificación 52.

5 El primer detector fotónico diferencial 6 y el segundo detector fotónico diferencial 7 son detectores fotónicos diferenciales que miden tanto la fase como la amplitud de sus respectivas entradas (luz pulsada 9 y luz Rayleigh retrodispersada 10) mediante técnicas de reconstrucción de fase utilizando diferenciación óptica ultrarrápida (PROUD, del inglés 'Phase Reconstruction Using Optical Ultrafast Differentiation'). Determinando el campo complejo (intensidad y fase del campo) del pulso óptico de entrada y de la luz Rayleigh retrodispersada, es posible determinar el perfil de dispersión complejo (intensidad y fase) de la fibra óptica que genera la luz Rayleigh retrodispersada, con una resolución espacial del orden del pulso de entrada. El rango de sensado está limitado únicamente por la intensidad de la luz Rayleigh retrodispersada. El ruido de la medida puede ser reducido promediando la luz Rayleigh retrodispersada de múltiples medidas obtenidas bajo las mismas condiciones (esto es, mismo pulso óptico de entrada y sin alterar la fibra óptica). Nótese que, si los pulsos generados por los medios de emisión 3 no cambian en el tiempo, es suficiente con medir la fase y la amplitud de un único pulso y usar los mismos datos para cualquier comparación posterior con la señal Rayleigh dispersada.

20 Los medios de modulación externos 32 pueden no sólo dar forma a los pulsos sino también codificar una pluralidad de bits para mejorar la resolución espacial, como se detalla en la Figura 2. Para este propósito, los medios de modulación externa 32 comprenden un generador de pulsos 321 y un codificador de bits 322 sincronizados mediante un generador de señales 323. El generador de pulsos 321 y el codificador de bits 322 pueden ser implementados con dos moduladores externos con diferentes frecuencias. Denotar que el orden del generador de pulsos 321 y el codificador de bits 322 es intercambiable. Como se observa en la Figura 3, la luz pulsada 9 resultante comprende uno o más pulsos 91 de longitud T_{pulse} , separados por una duración de pulso τ_T . Cada pulso 91 comprende una pluralidad de bits 92, donde cada bit 92 presenta una longitud de τ_{bit} . Debe garantizarse que la longitud de coherencia de la fuente de luz coherente 31 sea mayor que la longitud del pulso. Además, el tiempo entre los pulsos τ_T debe verificar:

$$2n_g L / c \leq \tau_T$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío, n_g es el índice medio de refracción de grupo de la fibra 2 a la longitud de onda de la fuente de luz 31, y L es la longitud de la fibra 2. Esto

asegura que únicamente la señal generada a partir de un pulso o una secuencia de pulsos codificados se recupera de la fibra en un mismo instante, evitando así la superposición de señales de diferentes regiones de la fibra. Para un disparo de un único pulso, dividiendo el pulso óptico de entrada en una serie de pulsos más pequeños (bits), puede alcanzarse una mayor resolución (resolución espacial del orden del tamaño del bit en lugar del tamaño del pulso entero) mientras que se proporciona suficiente energía al pulso para conseguir realizar la caracterización de fibra a un rango mayor. Obsérvese que pueden ser aplicados otros medios de emisión alternativos conocidos en el estado del arte para la generación del pulso de la presente invención dentro del alcance reivindicado.

La medida de la fase y la amplitud proporcionada por el primer detector fotónico diferencial 6 y el segundo detector 7 son transmitidas a los medios de computación 8, que calculan el perfil de dispersión absoluto de la fibra óptica 2 aplicando la siguiente relación:

$$r(t) = r(2n_g z/c) = FT^{-1} \left[\frac{FT(e(t))}{FT(p(t))} \right]$$

donde $r(t)$ es el perfil de dispersión en función del tiempo, $e(t)$ es la señal compleja de la luz Rayleigh retrodispersada 10 medida en el segundo detector fotónico diferencial 7, $p(t)$ es la medida compleja de la luz pulsada 9 de entrada en el primer detector fotónico diferencial 6, FT es la transformada de Fourier (FT , del inglés 'Fourier Transform') y FT^{-1} es la transformada de Fourier inversa, z es la posición a lo largo de la fibra 2, n_g es el índice medio de refracción de grupo de la fibra 2 y c es la velocidad de la luz en el vacío. Debido a que las señales $e(t)$ y $p(t)$ recuperadas tienen sus espectros centrados alrededor de 0 (y no alrededor de la frecuencia central de la luz pulsada 9 de entrada), el espectro de $r(t)$ está desplazado espectralmente por una frecuencia igual a la frecuencia central de la luz pulsada 9.

El método es válido para regiones del espectro donde $P(\omega) \neq 0$, siendo $P(\omega)$ el espectro de la luz pulsada 9 como función de la frecuencia angular. Por lo tanto, la resolución con la que $r(t)$ puede ser recuperada, depende del ancho de banda de $P(\omega)$. Cuando se emplean pulsos codificados, el ancho de banda de $p(t)$ se incrementa permitiendo, por lo tanto, una resolución mayor en la $r(t)$ recuperada. Más allá de incrementar la precisión, el proceso de computación sigue siendo el mismo para pulsos codificados y no codificados.

Además, el ancho de banda $P(\omega)$ se vuelve dependiente del ancho y la forma del pulso, así como de la forma y secuencia de bits en el caso de la codificación binaria. Por ejemplo, el

uso de pulsos y/o bits con un perfil temporal rectangular da como resultado un espectro en forma de seno cardinal (sinc), el cual tiene ceros en regiones donde la energía espectral es aun relevante. Una solución preferente consiste en usar pulsos Gaussianos y/o bits (en el dominio temporal), dando como resultado un espectro Gaussiano sin ceros que permite una mejor
5 reconstrucción de la función $r(t)$. Además, se pueden usar diversos algoritmos para maximizar la anchura espectral de la señal recibida, tales como una secuencia binaria pseudoaleatoria. Usando este método, la resolución espacial de $r(z)$ puede ser determinada con una precisión del orden del pulso en el caso de pulsos no codificados, y del orden del bit en el caso de pulsos codificados.

10

La Figura 4 presenta los componentes principales de una segunda implementación particular del sistema 1 de la invención, que incorpora la posibilidad de desplazar la frecuencia central de la luz pulsada de entrada para mejorar la resolución espacial. Cambiando de forma precisa la frecuencia de la luz pulsada de entrada, el perfil de dispersión puede ser recuperado
15 con una resolución espacial inversamente proporcional al rango de barrido de frecuencias, y por lo tanto, por debajo del tamaño del pulso óptico de entrada (o del bit, en el caso del uso de codificación binaria). Para un barrido de frecuencia con un paso constante del orden del ancho de banda del pulso óptico de entrada (o del bit, en el caso de uso de codificación binaria), el incremento de la resolución espacial será por lo tanto del orden del número de frecuencias
20 distintas usadas para la frecuencia central de la luz pulsada de entrada.

20

En el caso particular de la Figura 4, una fuente de luz sintonizable 31 es empleada para desplazar la frecuencia central de la señal pulsada de entrada. Adicionalmente, se usa un desplazador de frecuencia 34 para un ajuste fino de la frecuencia, que a su vez puede comprender un modulador externo 341 adicional y un filtro óptico 342 como se observa en la
25 Figura 5. El modulador externo 341 adicional genera unas bandas de frecuencia laterales desplazadas alrededor de la emisión de la fuente de luz 31, siendo dichas bandas laterales seleccionadas por el filtro óptico 342. Nótese que el desplazador de frecuencia 34 es opcional. Nótese además que el desplazador de frecuencia 34 puede ser implementado con cualquier
30 otra configuración conocida en el estado del arte para una emisión selectiva de frecuencia. Por ejemplo, una fuente de luz fija 31 conectada a un desplazador de frecuencia 34 puede ser usado en el caso de que se requiera un menor rango de barrido de frecuencias.

30

En el caso de pulsos con diferentes frecuencias, para cada frecuencia angular central ω_n de la luz pulsada de entrada, la medida de la fase y la amplitud proporcionada por el primer
35

detector fotónico diferencial 6 y el segundo detector fotónico diferencial 7 son transmitidas a los medios de computación 8, que calculan el perfil de dispersión absoluto de la fibra óptica 2 aplicando la siguiente relación:

$$r_n(t) = r_n(2n_g z/c) = FT^{-1} \left[\frac{FT(e_n(t))}{FT(p_n(t))} \right]$$

5 donde $r_n(t)$ es el perfil de dispersión en función del tiempo (desplazado frecuencialmente por ω_n), $e_n(t)$ es la señal compleja de la luz Rayleigh retrodispersada 10 medida en el segundo detector fotónico diferencial 7 y $p_n(t)$ es la medida compleja de la luz pulsada 9 de entrada en el primer detector fotónico diferencial 6.

10 Cabe señalar que la frecuencia central del filtro espectral lineal 62 invariante en el tiempo en el primer detector fotónico diferencial 6 y en el segundo detector 7 debe de ser actualizada en cada medida para que coincida con ω_n . Así, ya sea los medios de computación 8 o los medios adicionales de sincronización deberán comunicarse con los medios de emisión 3, el primer detector fotónico diferencial 6 y el segundo detector 7 para sincronizar
15 sus frecuencias de operación.

En el caso de emplear un conjunto de frecuencias centradas en ω_0 separadas entre sí por un paso constante $\Delta\omega$, $\omega_n = [\omega_0 - m \cdot \Delta\omega, \omega_0 - (m-1) \cdot \Delta\omega, \dots, \omega_0, \dots, \dots, \omega_0 + (m-1) \cdot \Delta\omega, \omega_0 + m \cdot \Delta\omega]$, el perfil de dispersión $r(t)$ de la fibra (espectralmente desplazado por ω_0), puede ser
20 reconstruido, empleando el $r_n(t)$, mediante teoría básica de Fourier:

$$r(t) = r(2n_g z/c) = \sum_{n=-m}^m \left(\int_{t'-t-\frac{\pi}{\Delta\omega}}^{t'+\frac{\pi}{\Delta\omega}} \frac{\Delta\omega}{2\pi} r_n(t') dt' \right) e^{i\omega_n t}$$

La resolución de $r(t)$ es inversamente proporcional al rango de barrido de frecuencias total $\propto \frac{2\pi}{(2m+1)\Delta\omega}$. En este caso, se maximiza la eficiencia del método (medidas mínimas

25 $2m+1$, con un error en $r(t)$ bajo) cuando la inversa del paso en frecuencia ($2\pi/\Delta\omega$) es del orden de la resolución de $r_n(t)$, por ejemplo, del orden del tamaño del pulso de entrada (o del bit, en el caso del uso de codificación binaria). Por lo tanto, si se usa codificación binaria, puede emplearse un paso de frecuencia $\Delta\omega$ mayor, y se requerirán menos medidas para una reconstrucción de $r(t)$ equivalente. Esto constituye una ventaja sobre un OFDR, que requiere buena linealidad sobre las variaciones de frecuencia inversamente proporcionales a la longitud
30 de fibra monitorizada. Estas variaciones en la frecuencia del OFDR son por lo tanto mucho

menores que las variaciones de frecuencia requeridas en el método de la presente invención.

La Figura 6 muestra otra implementación del método de 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 luz Rayleigh retrodispersada y puede ser por lo tanto extendido empleando esta propuesta. En el caso particular de la Figura 6, 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 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.

Existen múltiples configuraciones que permiten implementar técnicas de diferenciación fotónica en el primer detector fotónico diferencial 6 y en el segundo detector fotónico diferencial 7 para la medida de fase y amplitud de la luz pulsada 9 y de la luz Rayleigh retrodispersada 10 respectivamente. La Figura 7 presenta una primera implementación del primer detector fotónico diferencial 6 y el segundo detector fotónico diferencial 7 empleando detección PROUD directa en el dominio del tiempo. La señal de interés, es decir la luz pulsada 9 o la luz Rayleigh retrodispersada 10 dependiendo del detector, se separa en dos brazos mediante un divisor 61. El divisor 61 puede ser implementado, por ejemplo, mediante un acoplador 50/50.

La primera salida del divisor 61 se conecta a un primer fotodetector 63, que permite caracterizar la intensidad de la señal de interés, $|x(t)|^2$. La segunda salida del divisor 61 pasa a través de un filtro espectral lineal 62, el cual puede ser un multiplexor por división en longitud de onda (WDM, del inglés 'Wavelength Division Multiplexer'), una red de Bragg (FBG, del inglés 'Fibre Bragg Grating') o un interferómetro Mach-Zhender (MZI, del inglés 'Mach-Zhender Interferometer'), caracterizado por una función de transferencia espectral

$D(\omega)$:

$$D(\omega) = A(\omega + \Delta\omega)$$

donde A es la pendiente del filtro (positiva o negativa) y $\Delta\omega$ es el desplazamiento positivo en frecuencia de la señal de interés $x(t)$ y la frecuencia donde $D(\omega)$ llega a cero. La salida del

filtro espectral lineal 62 invariante en el tiempo es la señal diferenciada. En el dominio espectral, la señal diferenciada se denota como $Y(\omega)$, y es dada por:

$$Y(\omega) = X(\omega) \cdot D(\omega) = A\omega X(\omega) + A\Delta\omega X(\omega)$$

5 Usando teoría básica de Fourier, la señal diferenciada en el dominio temporal, notada como $y(t)$, es dada por:

$$y(t) = -jA \frac{\partial x(t)}{\partial t} + A\Delta\omega x(t) = A e^{-j\phi(t)} \left\{ \Delta\omega |x(t)| + |x(t)| \omega_{inst}(t) - j \frac{\partial |x(t)|}{\partial t} \right\}$$

donde $\omega_{inst}(t) = \frac{\partial \phi(t)}{\partial t}$ es la frecuencia angular instantánea de la señal de interés. La salida del filtro espectral lineal 62 invariante en el tiempo se conecta al segundo fotodetector 63, el cual permite caracterizar la intensidad de la señal diferenciada $|y(t)|^2$. $|y(t)|^2$ depende de

10 $|x(t)|^2$ de la siguiente forma:

$$|y(t)|^2 = A^2 \left\{ \left| \frac{\partial |x(t)|}{\partial t} \right|^2 + |x(t)|^2 [\omega_{inst}(t) + \Delta\omega]^2 \right\}$$

Las salidas del primer y del segundo fotodetector 63 se conectan a unos medios de digitalización 64, tales como un osciloscopio, proporcionando a los medios de computación 8 datos digitalizados que describen la fase y la amplitud de las señales implicadas.

15 Es importante asegurar que $\Delta\omega$ satisface que $\Delta\omega > |\omega_{inst}(t)|$ a lo largo de la toda la duración de la señal de interés $x(t)$, para ser capaz de recuperar $\omega_{inst}(t)$ (y por lo tanto $\Phi(t)$) sin ambigüedades. De esta dependencia, la frecuencia angular instantánea $\omega_{inst}(t)$ puede ser expresada en términos de las intensidades detectadas $|x(t)|^2$ e $|y(t)|^2$:

$$\omega_{inst}(t) = \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} = s(t) - \Delta\omega$$

20 donde

$$s(t) = \sqrt{\left(\frac{1}{|x(t)|^2} \right) \left(\left[\frac{|y(t)|^2}{A} \right] - \left[\frac{\partial |x(t)|}{\partial t} \right]^2 \right)}$$

Tras recuperar la frecuencia angular instantánea $\omega_{inst}(t)$, el perfil de fase temporal del pulso puede ser recuperado como:

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^t \omega_{inst}(\tau) d\tau + \phi_0$$

5 Para la recuperación numérica de $\Phi(t)$, es importante que las funciones $|x(t)|^2$ e $|y(t)|^2$ estén sincronizadas. Sin embargo, la sincronización no tiene por qué ser realizada físicamente, ajustando los caminos ópticos entre el primer y el segundo fotodetector 63. Alternativamente, la diferencia de camino óptico entre los fotodetectores 63 puede ser medida usando una señal óptica de calibración. El retardo correspondiente entre las funciones $|x(t)|^2$ e $|y(t)|^2$, recuperado en los fotodetectores 63, puede ser entonces
10 compensado numéricamente. Esto constituye una ventaja sobre los métodos convencionales (como I/Q), los cuales para recuperar las variaciones de fase requieren un retardo en línea físico, con unas diferencias de camino óptico controladas con precisiones por debajo de la longitud de onda de la señal de interés.

15 A fin de reducir la presencia de ruido en la medida de $|x(t)|^2$ e $|y(t)|^2$, se pueden promediar las señales dispersadas reflejadas de la fibra óptica. Esto incrementa la precisión de la reconstrucción del perfil de fase $\Phi(t)$, pero también reduce el ancho de banda para el que el sistema puede detectar cambios en el perfil de dispersión de la fibra 2.

20 La Figura 8 muestra una implementación alternativa que solamente requiere un único fotodetector 63. Las salidas del primer puerto del divisor 61 se pasan a través de un retardo óptico 65 antes de ser recombinadas con la salida del filtro espectral lineal 62 en el combinador 66. El retardo óptico 65 puede ser implementado, por ejemplo, con una fibra monomodo con más del doble del tamaño de la fibra óptica 2, para asegurar que $x(t)$ e $y(t)$
25 no se solapen en el tiempo. Además, la limitación en el periodo del pulso τ_T para asegurar evitar la superposición de $x(t)$ e $y(t)$ en medidas diferentes, estará dada ahora por:

$$2n_g L / c + D \leq \tau_T$$

donde D es el retardo inducido por el retardo óptico 65. Otra implementación alternativa a fin de utilizar un único fotodetector 63 sin un retardo óptico 65 se presenta en la Figura 9. Un

conmutador óptico 67 alterna la llegada al fotodetector 63 de las señales $x(t)$ e $y(t)$. En este caso, la señal recibida de la fibra necesita ser constante al menos durante dos medidas, una medida para medir $x(t)$ y otra medida para medir $y(t)$.

5 Una implementación alternativa para el primer detector fotónico diferencial 6 y el segundo detector fotónico diferencial 7 mediante detección PROUD balanceada en el dominio del tiempo se presenta en la Figura 10. La señal de interés se separa en dos señales mediante un divisor 61. La primera salida del divisor se conecta al fotodetector 63, el cual permite caracterizar la intensidad de $x(t)$. La segunda salida del divisor 61 pasa a
10 través de un filtro espectral lineal 62 con dos salidas diferenciales $y_+(t)$, $y_-(t)$. Cada una de las señales diferenciadas resultan de pasar por dos funciones de transferencia espectral de signos opuestos D_+ and D_- :

$$D_+(\omega) = +|A|(\omega + \Delta\omega) \quad , \quad D_-(\omega) = -|A|(\omega - \Delta\omega)$$

15 Esto puede ser implementado, por ejemplo, con un multiplexor por división en longitud de onda. De forma similar al caso de detección PROUD directa, la dependencia de $|y_+(t)|^2$, $|y_-(t)|^2$ con $|x(t)|^2$ está dada por:

$$|y_{\pm}(t)|^2 = A^2 \left\{ \left| \frac{\partial |x(t)|}{\partial t} \right|^2 + |x(t)|^2 [\omega_{inst}(t) \pm \Delta\omega]^2 \right\}$$

20 Las salidas de filtro espectral lineal 62 están conectadas a las entradas del detector balanceado 68, también conocido como detector diferencial. La salida del detector balanceado 68 es la señal diferenciada balanceada $|y(t)|^2$ dada por:

$$|y(t)|^2 = |y_+(t)|^2 - |y_-(t)|^2 = 4A^2\Delta\omega |x(t)|^2 \omega_{inst}(t)$$

25 A fin de cancelar eficientemente los términos comunes de ambas entradas del detector balanceado 68, la intensidad en la frecuencia central $\omega = 0$ ($\omega_{sign} = \omega_o$) y el camino óptico entre las dos entradas deben ser iguales. En la práctica, el desajuste tolerable del camino óptico o la intensidad entre las señales, estará determinado por la precisión prevista en las medidas de la fase $\Phi(t)$. Típicamente, el desajuste en el camino óptico requerido deberá estar por debajo del tamaño del pulso (o del bit, en el caso del uso de codificación binaria).

La frecuencia angular instantánea $\omega_{inst}(t)$ se puede expresar en términos de las intensidades $|x(t)|^2$ e $|y(t)|^2$ como:

$$\omega_{inst}(t) = \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} = \frac{|y(t)|^2}{4A^2(\Delta\omega)|x(t)|^2}$$

5 Se puede obtener una determinación de $\omega_{inst}(t)$ más robusta en comparación con detección PROUD directa, debido a la dependencia lineal con $|y(t)|^2$. Además, debido a que no aparecen términos de derivación temporal de $|x(t)|$ y otros términos $1/|x(t)|^2$, el sistema es más estable frente a ruido o puntos de desvanecimiento (donde $|x(t)|^2$ es próximo a cero).

10

La Figura 11 presenta otra alternativa implementación de los detectores fotónicos diferenciales 6,7 de la invención que permite implementar los medios de detección con un solo detector balanceado 68. De forma similar a ejemplos previos, un divisor 61 separa la señal bajo análisis en dos brazos. El primero de ellos incorpora un filtro espectral lineal 62 con dos salidas, mientras que el segundo brazo incorpora un retardo óptico 65. La primera salida del filtro espectral lineal 62 se dirige a la primera entrada del detector balanceado 68. La segunda salida del filtro espectral lineal 62 se combina con la salida del retardo óptico 65 con un combinador 66 y se introduce en la segunda entrada del detector balanceado 68. Esta configuración permite medir la señal filtrada con un detector balanceado 68, como en la configuración de la Figura 10, usando el mismo detector para medir la señal no filtrada, evitando superposiciones gracias al retardo introducido.

15

20

25

Finalmente, la Figura 12 muestra una implementación alternativa de los detectores fotónicos diferenciales 6,7, implementado también con un único detector balanceado 68. El divisor 61 se reemplaza por un conmutador óptico 67 que dirige la señal de forma alternante entre la primera entrada y la segunda entrada del detector. El resto de la configuración es similar a la presentada en la Figura 11, excepto por la ausencia de un retardo óptico en el segundo brazo, al ser innecesario por el uso de un conmutador óptico 67.

30

La Figura 13 presenta otra implementación del sistema y método de la invención en

la cual un único detector fotónico diferencial 6 se usa para medir la fase y la amplitud de la luz pulsada 9 y la luz Rayleigh retrodispersada 10. Ambas señales se combinan con un combinador óptico 14 antes de enviarse al detector. Para evitar cualquier solapamiento entre la luz pulsada 9 y la luz Rayleigh retrodispersada 10, un retardo óptico 13 se añade entre el divisor 4 y el circulador óptico 51. Destacar que los medios de computación 8 manejan cualquier sincronización y ajustes necesarios para la medida de ambas señales, alternativamente, con el mismo detector fotónico diferencial 6.

Cualquier implementación alternativa que permita enviar ambas señales al mismo detector fotónico diferencial 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 retardo óptico 13 puede ser implementado en otra posiciones del sistema alcanzando un efecto similar, tal y como el camino seguido por la luz Rayleigh retrodispersada 10 dentro del sistema 1. Por ejemplo, el retardo óptico 13 podría estar situado entre el circulador óptico 51 y el combinador 14. Hay que tener en cuenta que, si los pulsos enviados por los medios de emisión 3 no varían a lo largo del tiempo, el conmutador óptico puede ser programado para mandar la luz pulsada 9 al detector 6 una única vez durante la medida.

Además, destacar que cualquier característica o implementación presentada para los medios de emisión, como la codificación binaria, desplazamiento de frecuencia, implementación de detección PROUD, amplificación distribuida, etc. puede ser aplicada a cualquiera de los esquemas con un solo detector de diferenciación óptica.

Finalmente, la Figura 14 presenta una última implementación del sistema y método de la invención en la cual la luz pulsada 9 es una señal con fase y amplitud conocida. Por lo tanto, el sistema comprende un único detector fotónico diferencial 7 el cual mide la fase y la amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada 10. La fase y la amplitud de la luz pulsada 9 no se mide directamente. Dicha fase y amplitud son previamente almacenadas en los medios de computación 8 o en una memoria del sistema. Obsérvese que múltiples datos de fases y amplitudes 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 la fase y la amplitud de la luz pulsada 9 son medidas o simplemente

recuperadas de la memoria.

5 Nótese que las técnicas PROUD autoreferenciadas descritas no requieren un oscilador local. Esto es una ventaja sobre las técnicas que emplean un oscilador local, en cuyo caso el ruido de fase del oscilador local sería añadido al ruido de la medida.

10 El perfil de dispersión absoluto recuperado por la invención puede ser usado, por ejemplo, para evaluar la calidad de una fibra, o para implementar sensores distribuidos de vibraciones o temperatura, como los sistemas OTDR sensibles a la fase. Cualquier otro uso o aplicaciones de la medida del perfil de dispersión conocidas en el estado del arte pueden también ser implementadas con el sistema y método de la invención. Finalmente, nótese que los esquemas de diferenciación fotónica alternativos conocidos en el estado del arte pueden ser empleados en la presente invención dentro del alcance reivindicado.

15

REIVINDICACIONES

1. Sistema (1) de caracterización distribuida de un perfil de dispersión de una fibra óptica (2) que comprende:
- 5 -medios de emisión (3) adaptados para transmitir luz pulsada (9) a través de un primer extremo de la fibra óptica (2);
-y medios de recepción (5) adaptados para recibir en el primer extremo de la fibra óptica (2) una luz Rayleigh retrodispersada (10), generada mediante dispersión Rayleigh por la luz pulsada (9) al propagarse por la fibra óptica (2);
- 10 caracterizado por que el sistema comprende además:
-al menos un detector fotónico diferencial (6, 7) adaptado para medir una fase y una amplitud de al menos la luz Rayleigh retrodispersada (10) ; y
-medios de computación (8) configurados para calcular el perfil de dispersión absoluto de un estado de la fibra óptica (2) por comparación de la fase y la amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada (10) y una fase y amplitud de la luz pulsada (9).
- 15
2. Sistema de acuerdo con la reivindicación 1 caracterizado por que comprende un primer detector fotónico diferencial (6) adaptado para medir la fase y amplitud de la luz pulsada (9) y un segundo detector fotónico diferencial (7) adaptado para medir la fase y la amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada (10)..
- 20
3. Sistema de acuerdo con la reivindicación 1 caracterizado por que comprende:
-un único detector fotónico diferencial (7) adaptado para medir la fase y la amplitud de la luz pulsada (9) y de la luz Rayleigh retrodispersada (10);
- 25 -medios de guiado de luz adaptados para alimentar la luz pulsada (9) y la luz Rayleigh retrodispersada (9) sin solapamiento temporal en una entrada del detector fotónico diferencial (7).
4. Sistema de acuerdo con la reivindicación 1 caracterizado por que comprende un único detector fotónico diferencial (7) adaptado para medir la fase y la amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada (10), y por que la luz pulsada presenta una fase y una amplitud conocidas almacenada en una memoria accesible por los medios de computación (8).
- 30
5. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por

que los medios de emisión (3) comprenden un codificador de bits (322) configurado para codificar al menos un pulso (91) de la luz pulsada con una pluralidad de bits (92).

5 6. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que los medios de emisión (3) son medios de emisión sintonizables configurados para desplazar la frecuencia central de cada pulso (91) de la luz pulsada (9).

10 7. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores caracterizado por que comprende además un amplificador distribuido (11) adaptado para amplificar la luz pulsada (9) en la fibra óptica (2).

8. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que al menos un detector fotónico diferencial (6, 7) comprende:

15 -un divisor (61) con una primera salida conectada a un primer brazo del al menos un detector fotónico diferencial (6, 7) y una segunda salida conectada a un segundo brazo del al menos uno de los detectores fotónicos diferenciales (6, 7);

-un filtro espectral lineal (62) temporalmente invariante en el primer brazo, estando el filtro espectral lineal (62) configurado para aplicar un variación de amplitud lineal frecuentemente dependiente;

20 -medios de detección configurados para medir la potencia óptica del primer brazo y del segundo brazo;

-medios de digitalización (64) conectados a los medios de detección.

25 9. Sistema de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por que el al menos un detector fotónico diferencial (6, 7) comprende además:

-un retardo óptico (65) en la segunda salida del divisor (61);

30 -un combinador (66), estando una primera entrada del combinador (66) conectada a una salida del filtro espectral lineal (62), una segunda entrada del combinador (66) conectada al retardo óptico (65) y una salida del combinador (66) conectada a una entrada de los medios de detección.

35 10. Sistema de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por que el al menos un detector fotónico diferencial (6, 7) comprende además un conmutador óptico (67), estando dos puertos del conmutador óptico (67) conectados al primer brazo y el segundo brazo del al menos un detector fotónico diferencial (6, 7).

5 11. Sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10 caracterizado por que los medios de detección comprenden un detector balanceado (68), estando al menos una entrada del detector balanceado (68) conectada a al menos una salida del filtro espectral lineal (62).

10 12. Sistema de acuerdo con la reivindicación 8, caracterizado por que los medios de detección comprenden un primer fotodetector (63) conectado a una segunda salida del divisor (61) y un segundo fotodetector (63) conectado a la salida del filtro espectral lineal (62).

13. Método de caracterización distribuida de un perfil de dispersión de una fibra óptica (2) que comprende:

-transmitir luz pulsada (9) a través de un primer extremo de la fibra óptica (2);

15 -recibir en el primer extremo de la fibra óptica (2) una luz Rayleigh retrodispersada (10), generada mediante dispersión Rayleigh por la luz pulsada (9) al propagarse por la fibra óptica (2);

-medir una fase y una amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada (10) mediante diferenciación fotónica;

20 -determinar una fase y una amplitud de la luz pulsada (9);

-calcular el perfil de dispersión absoluto de un estado de la fibra óptica (2) por comparación de la fase y la amplitud de la luz Rayleigh retrodispersada (10) y una fase y amplitud de la luz pulsada (9),

comprendiendo dicho paso de calcular el perfil de dispersión absoluto:

25 -calcular al menos una primera transformada de Fourier de la luz pulsada (9);

-calcular al menos una segunda transformada de Fourier de la luz Rayleigh retrodispersada (10);

-calcular al menos una transformada de Fourier inversa de la división entre la al menos una primera transformada de Fourier y la al menos una segunda transformada de Fourier.

30 14. Programa de ordenador que comprende medios de código de programa de ordenador adaptados para realizar las etapas del método de la reivindicación 13, 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 un hardware programable.

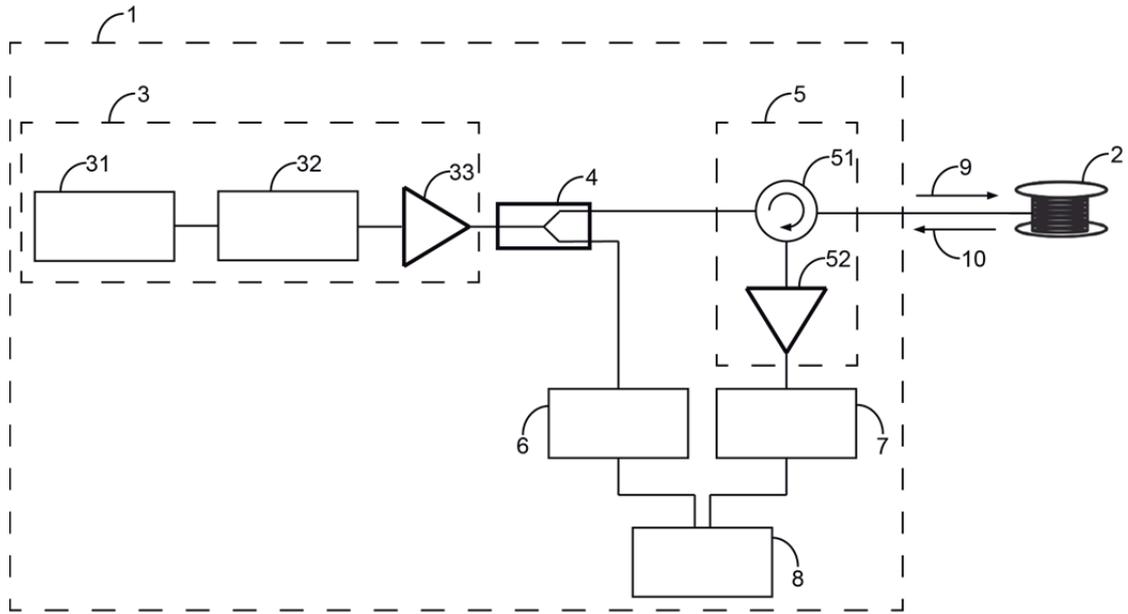


FIG. 1

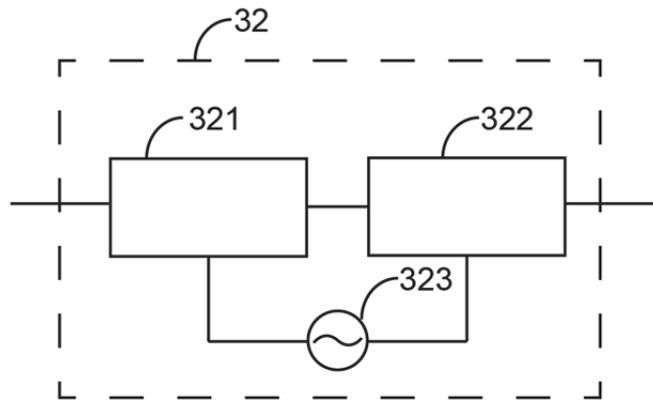


FIG. 2

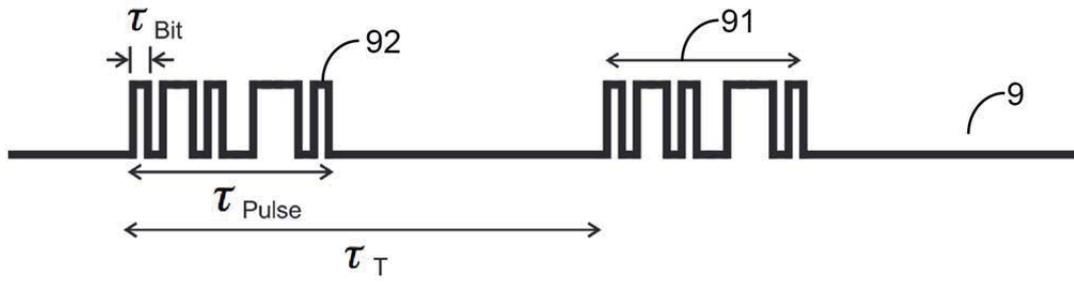


FIG.3

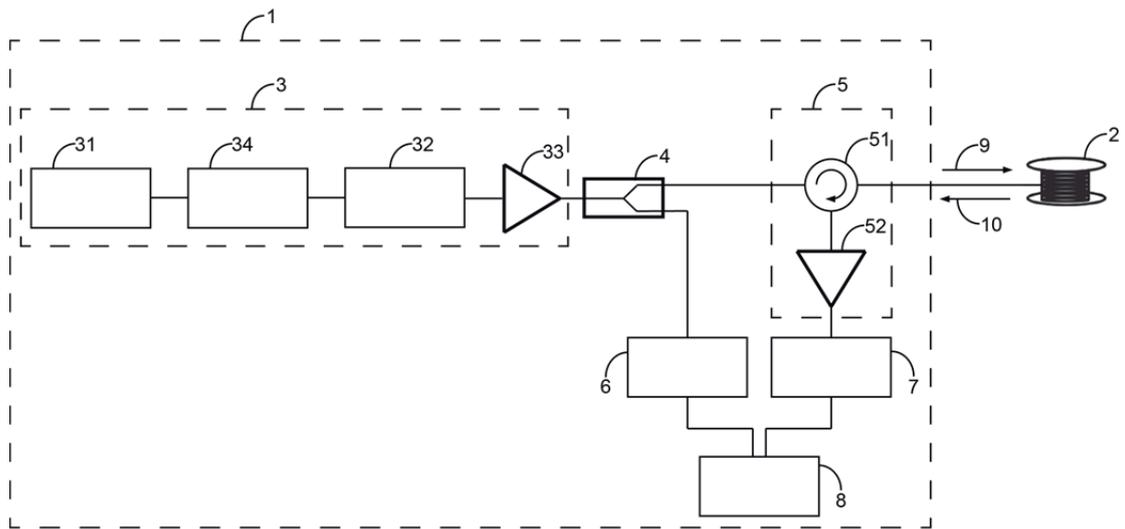


FIG.4

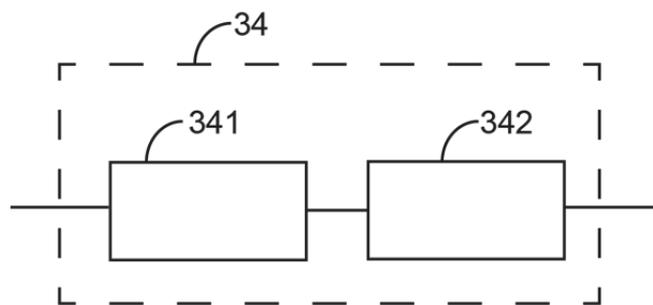


FIG.5

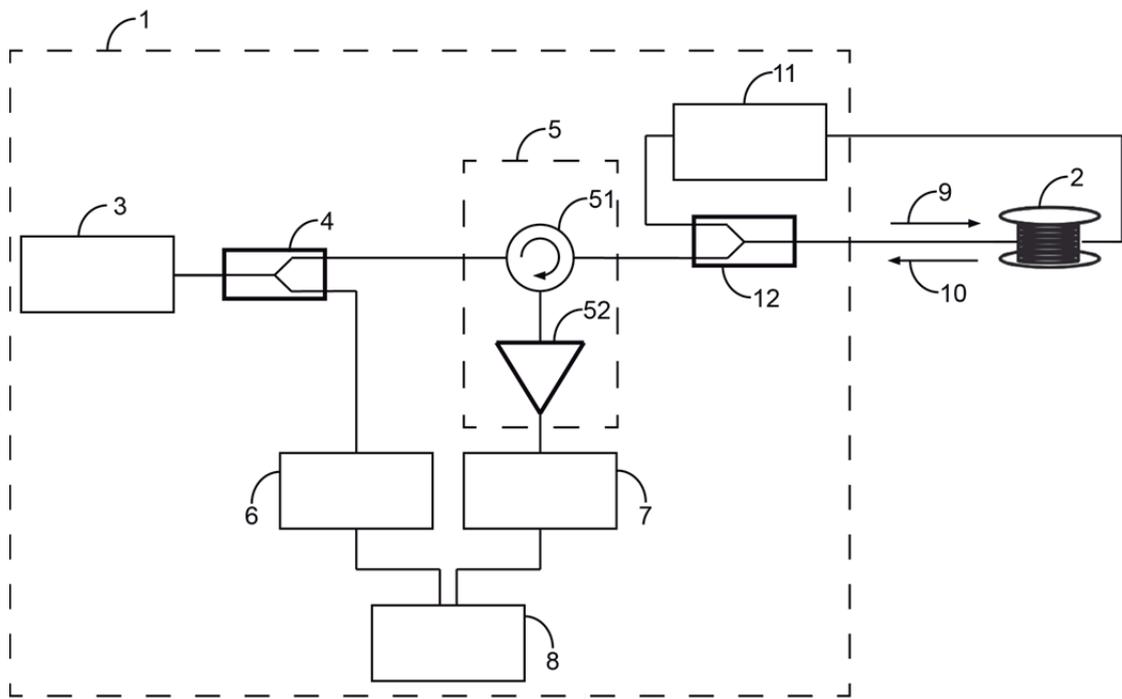


FIG. 6

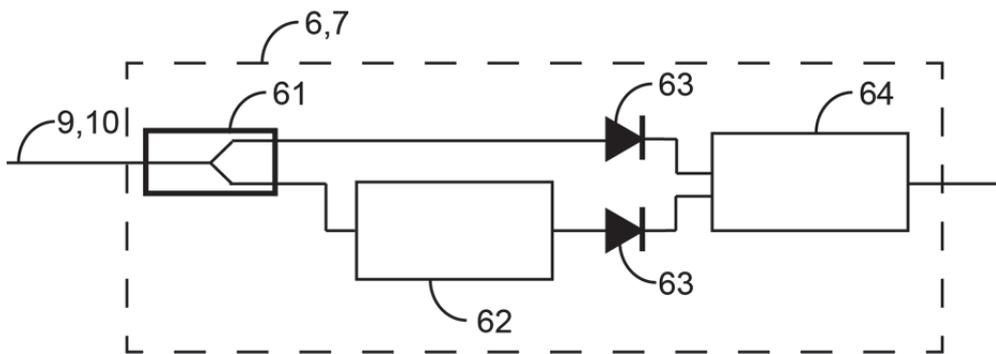


FIG. 7

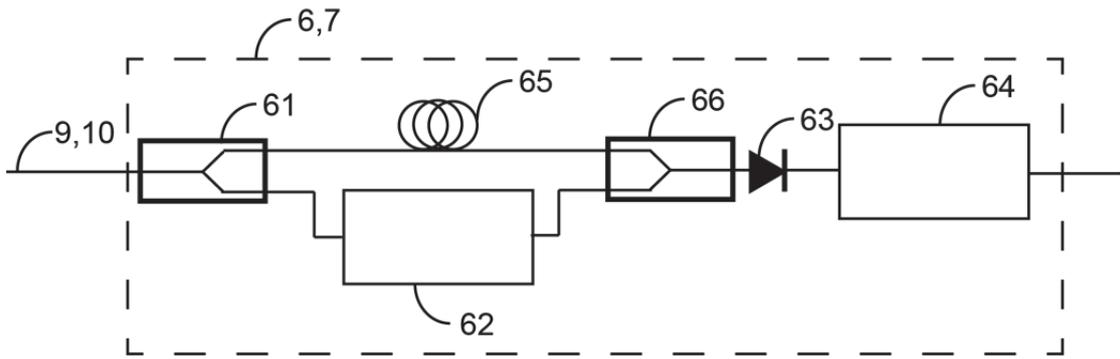


FIG. 8

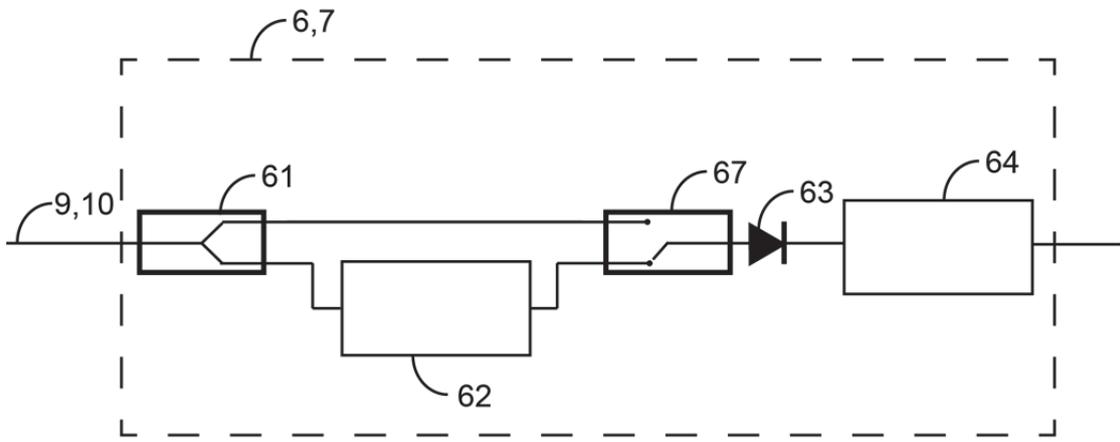


FIG. 9

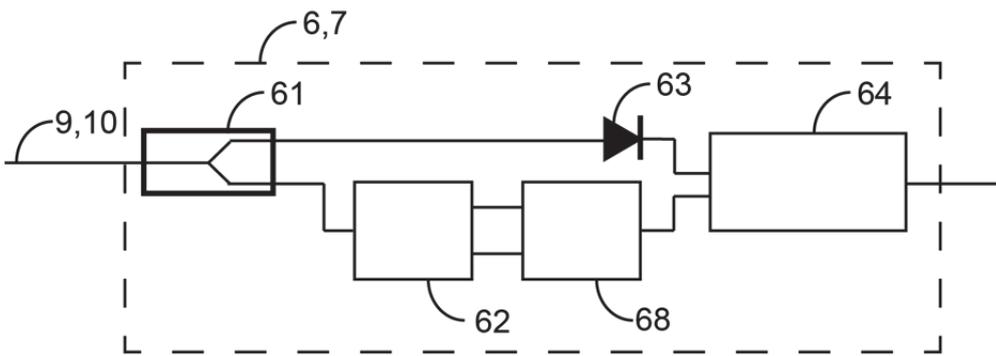


FIG. 10

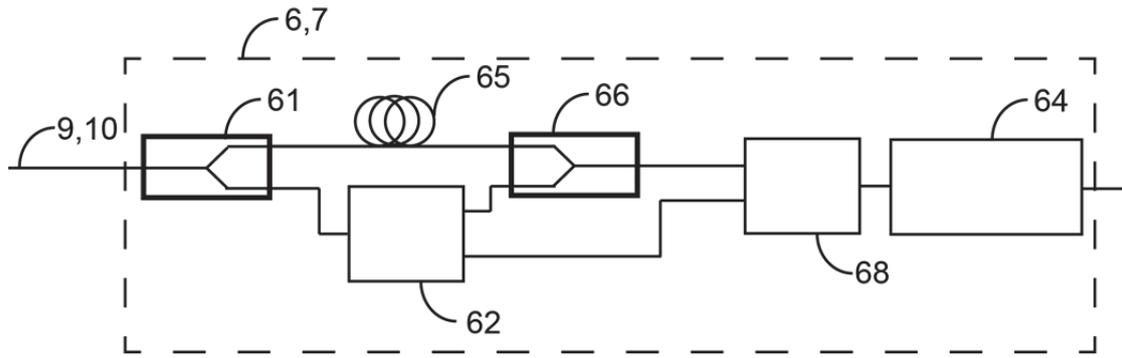


FIG. 11

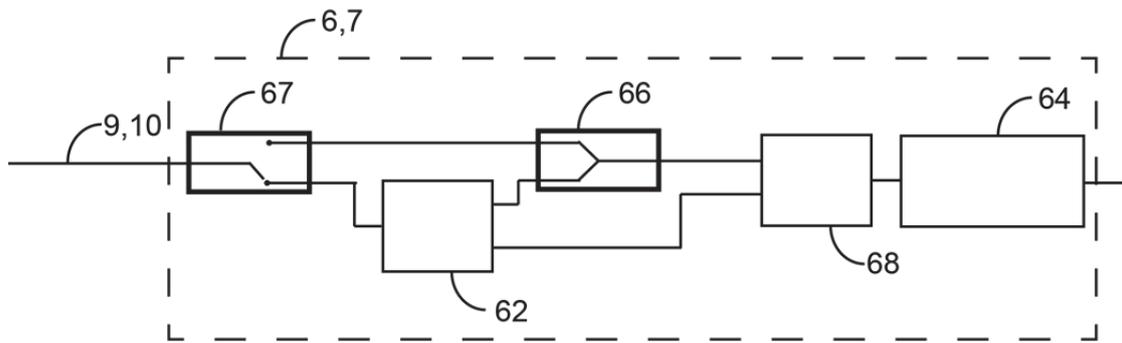


FIG. 12

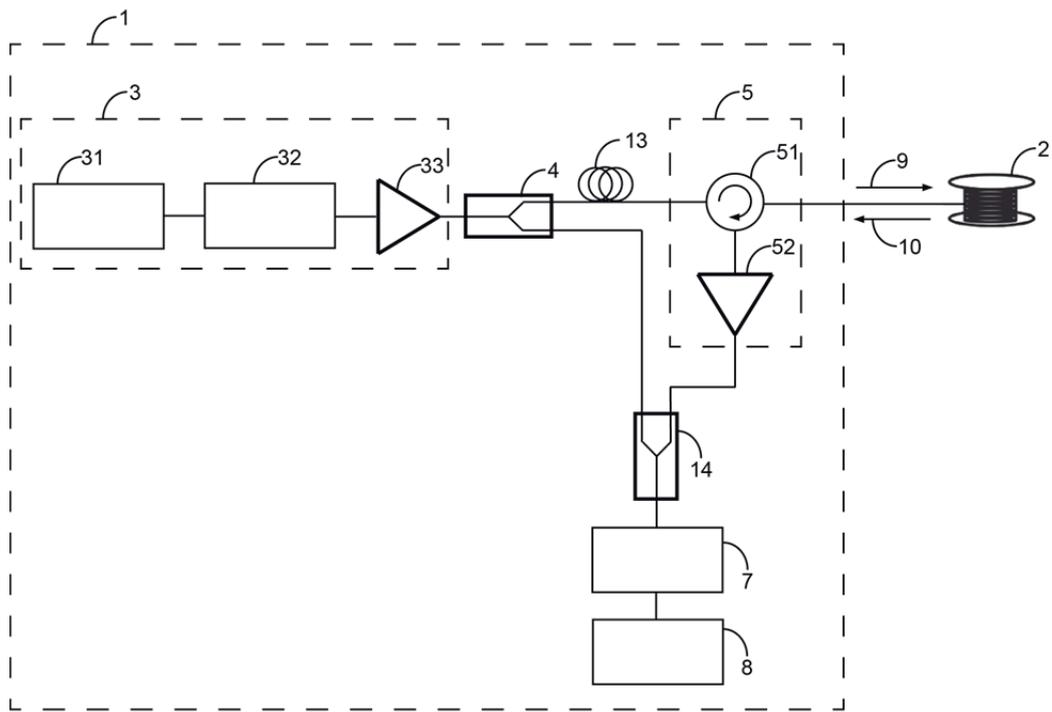


FIG.13

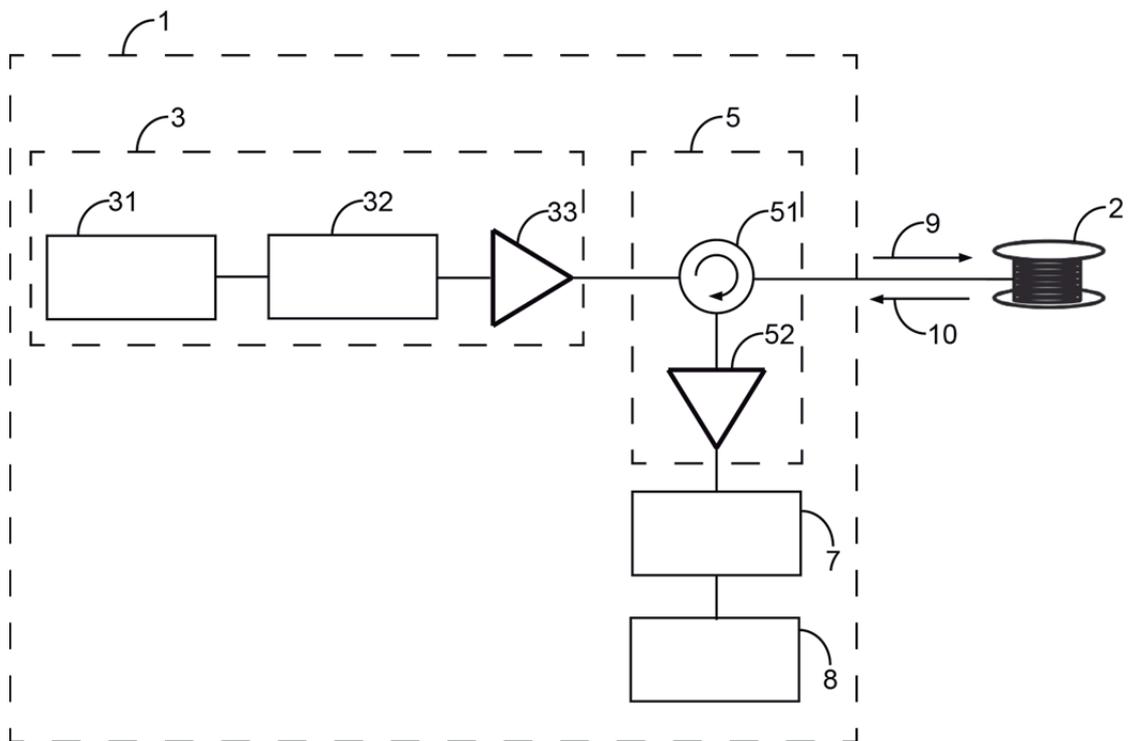


FIG.14