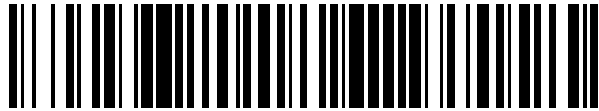


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 528 327**

21 Número de solicitud: 201331017

51 Int. Cl.:

**G01D 5/353** (2006.01)

**G02F 1/39** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION

B1

22 Fecha de presentación:

**05.07.2013**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**06.02.2015**

Fecha de la concesión:

**11.12.2015**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**18.12.2015**

56 Se remite a la solicitud internacional:

**PCT/ES2014/070540**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ (100.0%)  
Plaza de San Diego, s/n  
28801 Alcalá de Henares (Madrid) ES**

72 Inventor/es:

**DOMÍNGUEZ LÓPEZ, Alejandro;  
LÓPEZ GIL, Alexia;  
MARTÍN LÓPEZ, Sonia;  
GONZÁLEZ HERRÁEZ, Miguel y  
VILLAFRANCA VELASCO, Aitor**

74 Agente/Representante:

**GUTIÉRREZ DE MESA, José Antonio**

54 Título: **SISTEMA DE DETECCIÓN DIFERENCIAL PARA SENSORES DISTRIBUIDOS SOBRE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN SCATTERING BRILLOUIN ESTIMULADO**

57 Resumen:

Basado en detección diferencial en sensores distribuidos basados en scattering estimulado Brillouin sobre fibra óptica, consistente en separar las dos señales de las que está compuesta la señal de sonda y obtener la diferencia entre la banda de amplificación y la banda de atenuación estimuladas, o viceversa. Se obtiene de este modo una señal con mayor amplitud que en el caso de realizarse una detección con una sola banda. Así se mejora la relación señal-ruido en la señal del sensor, rango dinámico y se aumenta la longitud de alcance así como se disminuye la incertidumbre de la medida. Además se elimina el ruido común que haya presente en las dos bandas de la señal de sonda y, en el caso de emplear un detector balanceado en detección, se mejora las características de saturación del detector, pudiéndose conseguir amplitudes de señal mucho más grandes que en el caso convencional de detección.

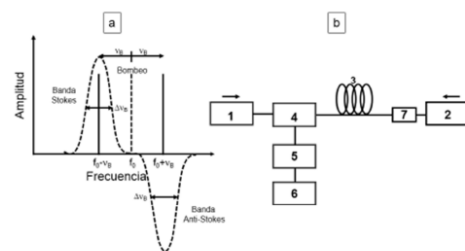


FIGURA 1

ES 2 528 327 B1

**DESCRIPCIÓN**

**SISTEMA DE DETECCIÓN DIFERENCIAL PARA SENSORES DISTRIBUIDOS SOBRE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN SCATTERING BRILLOUIN ESTIMULADO**

**SECTOR DE LA TÉCNICA**

- 5 La presente invención pertenece al sector de las tecnologías físicas aplicándose a sistemas de medición basados en sensores distribuidos sobre fibra óptica.
- El objeto principal de la presente invención es un sistema de detección para la mejora del rango dinámico (aumento del alcance de medida) en sensores distribuidos sobre fibra óptica. La mejora indicada por la invención es aplicable al desarrollo de equipos electroópticos de
- 10 sensado distribuido, basados en el fenómeno de *scattering* no lineal Brillouin estimulado, con aplicación en multitud de sectores como por ejemplo el de la ingeniería civil, la industria, la energía, el medio ambiente y otros en los que se requiera la monitorización de temperatura o deformaciones (o cualquier magnitud derivada) sobre largas distancias.

15 **ESTADO DE LA TÉCNICA**

- Los sensores distribuidos constituyen una técnica atractiva y prometedora para la monitorización de parámetros como la deformación y la temperatura sobre largas distancias. Los sensores de fibra óptica distribuidos están basados en una modulación de la intensidad o de la frecuencia de la luz introducida en la fibra, y una detección síncrona
- 20 con la que podemos determinar la posición en la que se produce la perturbación. De forma general cualquier fractura o daño en la estructura da lugar a una variación en la intensidad de luz que se transmite a lo largo de la fibra. Dentro de este tipo de sensores podemos destacar los sensores basados en técnicas de backscatter (retrodifusión) lineal y los basados en efectos no lineales como son el scattering Brillouin y el scattering Raman. En
- 25 los últimos años, los basados en scattering Raman y Brillouin han experimentado una creciente aplicación en la instrumentación de todo tipo de infraestructuras civiles (puentes, túneles, edificios, presas,...), de transporte (aviones, líneas ferroviarias,...), industriales y energéticas (conducciones de gas, de agua, plataformas petrolíferas,...).
- 30 El efecto Brillouin es una interacción acusto-óptica estimulada que se produce de forma muy eficaz en fibras ópticas. En términos simples, el efecto Brillouin se obtiene cuando se introduce luz láser (espectralmente estrecha y suficientemente potente) en una fibra óptica. A efectos de notación, podemos suponer que está centrada a una frecuencia óptica  $f_0$ . La presencia de esta luz induce una ganancia sobre un haz de luz que se propaga en sentido

contrario, a la frecuencia  $f_0 - v_B$ . De la misma forma, se induce una atenuación sobre un haz de luz que se propaga en sentido contrario, a la frecuencia  $f_0 + v_B$ . El parámetro  $v_B$  se denomina desplazamiento Brillouin y es sensible a cambios de temperatura o deformación de la fibra. Este hecho se emplea para la detección distribuida de cambios de temperatura y deformaciones.

Basados en este fenómeno físico, se han desarrollado a lo largo de los años distintas variedades de sensores, entre los que citamos: BOTDA (Brillouin Optical Time Domain Analyzer), BOFDA (Brillouin Optical Frequency Domain Analyzer) y BOCDA (Brillouin Optical Correlation Domain Analysis), BOTDA o BOFDA con asistencia Raman de cualquier orden y en cualquier configuración, V-BOTDA (Vectorial Brillouin Optical Time Domain Analyzer, en el que se modula la sonda y/o el bombeo de alguna manera), Coded-BOTDA (BOTDA con codificación de pulsos), DPP\_BOTDA (BOTDA con medida diferencial basada en pulsos de distinta anchura), etc., así como cualquiera de las combinaciones de éstos posible.

En los sensores BOTDA, y su variantes, para obtener la frecuencia Brillouin se manda uno o varios pulsos (en el caso de coded-BOTDA, por ejemplo) por la fibra y una señal continua (modulada o no) contrapropagante a éste. Para obtener el parámetro  $v_B$ , se analiza la diferencia de frecuencia entre el pulso enviado y la onda continua cuando se maximiza la amplificación de la onda continua contrapropagante. Para ello es preciso realizar un barrido de frecuencia. Al estar pulsada la luz, la amplificación registrada en el dominio del tiempo dependerá además de la posición en la que se encuentre el pulso en cada instante. Con ello puede trazarse un mapa de desplazamiento Brillouin en función de la distancia. Las variaciones de desplazamiento Brillouin se pueden relacionar con variaciones de temperatura o deformación.

El caso de los sensores BOFDA y sus variantes se diferencia de los anteriores en que en vez de un pulso se manda por la fibra una señal modulada en amplitud, con una frecuencia variable. Para realizar cada medida es necesario hacer un barrido en frecuencia de la señal de sonda, además de un barrido en la modulación de la señal de bombeo.

En los sensores basados en tecnología BOCDA y sus posibles variantes se aprovecha el hecho de que el scattering Brillouin estimulado depende de la correlación entre las dos

ondas que lo generan y la eficiencia del proceso baja de forma abrupta debido a cambios de frecuencia, fase o polarización. En esencia, el funcionamiento del BOCDA se apoya en la reducción artificialmente de la correlación, mediante una modulación inteligente, entre las ondas que generan scattering Brillouin estimulado en cualquier punto de la fibra, excepto en el punto de estudio.

En el caso de los sensores basados en BOTDA y BOFDA existe una limitación insalvable e inherente a la fibra óptica que es la atenuación que sufre la luz al propagarse por ella. El rango en longitud de medida que presentan todos estos sistemas está cercano a la decena de metros y en torno al medio centenar de kilómetros.

En el caso de los BOCDA las señales obtenidas son débiles, generalmente, y conviene tener estrategias para mejorar la relación señal ruido de las mismas (SNR).

Los principales sistemas de sensado distribuido en fibras existentes en el mercado, bajo nuestro conocimiento, son:

FOS-TA: Fibre Optic Sensing Technology and Applications. Distributed Temperature and Strain Sensing (DTS & DTSS) System. Singapur. Maximo Rango de medida 30 km.

Omnisens: DiTeSt: Distributed Temperature & Strain monitoring instruments. Suiza. Hasta 30 km. SMARTECH (Suiza) comercializa un instrumento similar.

Neubrex Ltd. Japan. NEUBRESCOPE : Pre-Pump BOTDA Technique, Hasta 25 km.

YOKOGAWA AQ8603 Optical Fiber Strain Analyzer, basado en Brillouin espontáneo.

OZ-OPTICS DTS0115 "Distributed Brillouin sensor system based on DFB lasers using offset locking".

SENSORNET DTSS "Distributed Temperature & Strain Sensor" (10 Hz).

## DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La invención describe un sistema de detección para los sistemas anteriormente citados basados en *scattering* estimulado Brillouin (sistemas tipo BOTDA, BOFDA y BOCDA

incluyendo sus variantes como por ejemplo la asistencia Raman de cualquier orden o la variante vectorial de los mismos, etc.) que permite mejorar el rango dinámico (aumento del alcance de medida o la relación señal ruido en cada punto).

- 5 En todos los sistemas citados anteriormente la detección se realiza en el extremo desde el que se lanza el bombeo. Para ello, se detecta (con un fotodetector) la señal de sonda en función del tiempo de vuelo de la señal de bombeo en la fibra. Normalmente la señal de sonda se compone de dos frecuencias (una a  $f_0+v_B$  y otra a  $f_0-v_B$ ), siendo  $v_B$  la diferencia de frecuencia entre bombeo y sonda. Los sistemas convencionales aíslan en detección  
10 una de las dos frecuencias que componen la sonda y la detectan con un único fotodetector, obteniendo señales de ganancia o atenuación en función de la banda elegida.

El presente sistema consiste en primer lugar en un conjunto de dispositivos con los que se consigue, en primer lugar, separar de manera adecuada las dos señales correspondientes  
15 a la banda amplificada y a la banda atenuada a lo largo de la fibra óptica objeto de monitorización. Para ello se podrá usar cualquier tipo de dispositivo óptico que no distorsione estas señales de forma irreparable. A continuación se procede a obtener la diferencia entre la banda de amplificación y la banda de atenuación estimuladas, o viceversa. Se obtiene de este modo una señal con mayor amplitud que en el caso de  
20 realizarse una detección con una sola banda. Con este aumento de amplitud mejoramos la relación señal-ruido en la señal del sensor, mejorando el rango dinámico y aumentando por tanto la longitud de alcance así como disminuyendo la incertidumbre de la medida. Esta configuración tiene más ventajas añadidas: primero, se elimina el ruido común que haya presente en las dos bandas de la señal de sonda. Segundo, en el caso de emplear un  
25 detector balanceado en detección, se mejora las características de saturación del detector, pudiéndose conseguir amplitudes de señal mucho más grandes que en el caso convencional de detección.

A continuación se describen distintas posibles realizaciones de la invención descrita sin  
30 ánimo de excluir ninguna otra posible:

- a) Las señales de sonda amplificadas y atenuadas se dividen a la salida de la fibra óptica sensora de manera que se puedan analizar por separado. El dispositivo para realizar esta separación será cualquiera que permita diferenciar ambas señales, por

ejemplo un dispositivo que discrimine en frecuencia. Una vez separadas estas dos señales de manera que se puedan analizar de forma independiente, la técnica de detección se basa en un detector balanceado. Éste por medio de un amplificador de transimpedancia obtiene una tensión proporcional a la diferencia de fotocorrientes medidas por dos fotodiodos cuando a sus entradas se conectan dos señales ópticas correspondientes a la banda de amplificación estimulada y a la banda de atenuación estimulada.

b) Como en la realización anterior pero en vez de usar un dispositivo de discriminación espectral para separar las dos señales se usará uno de discriminación en polarización, siempre y cuando las dos bandas de señal tengan polarizaciones ortogonales.

c) Como en la realización a) pero en este caso el detector balanceado es sustituido por dos detectores simples (fotoreceptores). Cada detector tiene a su entrada la señal óptica de una de las bandas (amplificación y atenuación). Posteriormente algún elemento electrónico o lógico obtiene la diferencia de las salidas de los dos detectores o algún procesado equivalente que mejore la relación señal-ruido.

d) Como en la realización b) pero en este caso se utiliza un detector balanceado.

### **DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**

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 ha representado lo siguiente:

FIGURA 1.-

(a) Esquema espectral característico de los sistemas BOTDA, BOFDA y BOCDA y los derivados de ellos.

(b) Típica configuración experimental de los sistemas BOTDA, BOFDA y BOCDA y los derivados de ellos.

FIGURA 2.- Muestra un esquema de configuración experimental de acuerdo con las propuestas a) y b) de realización del sistema objeto de invención.

El bloque **A** representa la unión de los cuatro elementos 1, 2, 3 y 7 descritos en la FIGURA 1.

5 El elemento **B** en este caso representa un sistema de filtrado que permite separar la banda de la señal de sonda amplificada y la banda de la señal de sonda atenuada. El bloque **6** representa el detector balanceado.

FIGURA 3.- Muestra un esquema de acuerdo con la propuesta c) de realización del sistema  
10 objeto de invención.

Los bloques **A** y **B** representan los mismos elementos que en la FIGURA 2. Los bloques 6i y 6ii representan los dos fotodetectores que recogerán las dos señales correspondientes a la señal amplificada y a la señal atenuada. El bloque 6iii cualquier sistema capaz de calcular  
15 la diferencia de la salida de los detectores (software, electrónicamente, ópticamente...).

### **REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCION**

El sistema de detección propuesto para la mejora del rango dinámico y el aumento del alcance de medida se aplica a cualquier sensor distribuido Brillouin de fibra óptica cuya  
20 tecnología de medida esté basada en sistemas BOTDA, BOFDA o BOCDA así como a cualquiera de sus variantes (Vectorial-BOTDA/BOFDA, Raman Assisted-BOTDA/BOFDA u otros).

Todos los sistemas basados en estas técnicas presentan un esquema de señales en  
25 frecuencia como el que se representa en la **FIGURA 1a**, en donde a ambos lados de la señal de bombeo (generada en el elemento **1** de la **FIGURA 1b**) con la que se genera scattering Brillouin se introducen dos señales contrapropagantes a éste (generadas en el elemento **2** de la **FIGURA 1b**) representadas en línea continua en la **FIGURA 1a**. Estas dos señales deben estar equiespaciadas respecto a la señal de bombeo en el espectro óptico. Cuando estas  
30 señales se encuentren separadas del bombeo una frecuencia próxima a  $\nu_B$  y dentro de la banda de ganancia o atenuación Brillouin generada por el bombeo, experimentarán una ganancia o una atenuación en su amplitud al propagarse por la fibra óptica bajo test (representada por el elemento **3** de la **FIGURA 1b**) junto con la señal de bombeo. El resultado de estos procesos simultáneos de amplificación y atenuación se extrae de la línea de natural

de propagación de la luz mediante el dispositivo representado por el elemento **4** de la **FIGURA 1b**. Este dispositivo puede estar diseñado y fabricado tanto en tecnología de fibra óptica como en cualquier otra tecnología. En los elementos **5** y **6** de la **FIGURA 1b** tienen lugar todos los procesos y acciones necesarios para obtener, de estas dos señales (atenuada y amplificada por scattering Brillouin estimulado), la señal resultado de la monitorización de la fibra bajo test **(3)**, según se recoge en la descripción de esta patente.

Dicho sistema de detección puede ser materializado de la siguiente manera:

- 10 a) Para un sistema BOTDA.
- i. Se utilizan dos o más señales luminosas, bombeo **(1)** (esta señal se emitirá en régimen pulsado) y sonda o sondas **(2)**, que se introducen en la fibra óptica sensora **(3)** en sentido contra-propagante. Ambas señales se introducen en la fibra a través de sistemas de inserción/extracción **(4)**, por ejemplo un circulador, e inserción **(7)**, por ejemplo un splitter.
- 15 La fibra óptica sensora **(3)** se tiende a lo largo del elemento objeto del sensado, por ejemplo una gran infraestructura civil.
- Se utiliza un filtro óptico **(5)** de discriminación espectral, mediante el cual conseguiremos separar las bandas de interés, que presentan frecuencias simétricas respecto a la frecuencia central del bombeo.
- 20 Posteriormente, en detección **(6)** se calcula la diferencia entre la amplitud de ambas bandas mediante un detector balanceado o detectores simples en combinación con elementos electrónicos, electro-ópticos, ópticos o por software, obteniendo así una señal con mayor potencia que con banda única.
- 25 ii. Como en la realización (i) pero separando las señales de sonda amplificada y atenuada mediante elementos sensibles a la polarización. Para ello será necesario que las dos bandas de la señal de sonda tengan polarizaciones ortogonales, lo cual obliga a un diseño específico del dispositivo con el que se genera la señal de sonda. Respecto a la realización (i), se sustituye el filtro de discriminación espectral por un filtro de discriminación en polarización.
- 30 iii. Como en la realización (i) y (ii) combinando los dos tipos de filtros.



- b) Para un sistema BOFDA igual que la realización (a), sólo que en este caso el bombeo está modulado en lugar de pulsado.
- c) Para un sistema BOCDA igual que la realización (a), sólo que en este caso hay una modulación de frecuencia tanto en el bombeo como en la sonda.

5

## REIVINDICACIONES

1. Sistema de detección diferencial para sensores distribuidos sobre fibra óptica basados en scattering Brillouin estimulado caracterizado porque comprende:
- 5
- una o más fuentes luminosas utilizadas como fuentes de bombeo y sonda para generar el efecto de scattering Brillouin estimulado (1,2),
  - fibra óptica (3) utilizada como elemento sensor, que se conecta a las fuentes luminosas mediante un puerto de entrada/salida (4) y de entrada (7),
  - 10 - un elemento o dispositivo que divida la señal a la salida de la fibra óptica sensora (3) de manera que se puedan analizar la banda amplificada y la banda atenuada en el proceso de scattering Brillouin, por separado. El dispositivo para realizar esta separación será cualquiera que permita diferenciar ambas señales, por ejemplo un dispositivo que discrimine en frecuencia.
  - 15 - un sistema detector (6) capaz de recoger y procesar las señales de la banda de sonda amplificada y la banda de sonda atenuada (diferencia entre la banda de amplificación y la banda de atenuación estimuladas, o viceversa) y que no distorsione estas señales de forma irreparable.
- 20
2. Sistema de detección diferencial para sensores distribuidos sobre fibra óptica basados en scattering Brillouin estimulado, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque el sistema detector (6) consiste en un detector balanceado.
3. Sistema de detección diferencial para sensores distribuidos sobre fibra óptica basados en scattering Brillouin estimulado, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque:
- 25
- el detector balanceado recogido en la reivindicación 2 es sustituido por dos detectores simples (fotoreceptores). Cada detector tiene a su entrada la señal óptica de una de las bandas (amplificación y atenuación),
  - 30 - algún elemento electrónico o lógico que obtenga la diferencia de las salidas de los dos detectores o algún procesado equivalente que mejore la relación señal-ruido.

4. Sistema de detección diferencial para sensores distribuidos sobre fibra óptica basados en scattering Brillouin estimulado, de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque en vez de usar un dispositivo de discriminación espectral para separar las dos señales se usará uno de discriminación en polarización, siempre y cuando las dos bandas de señal tengan polarizaciones ortogonales.

5

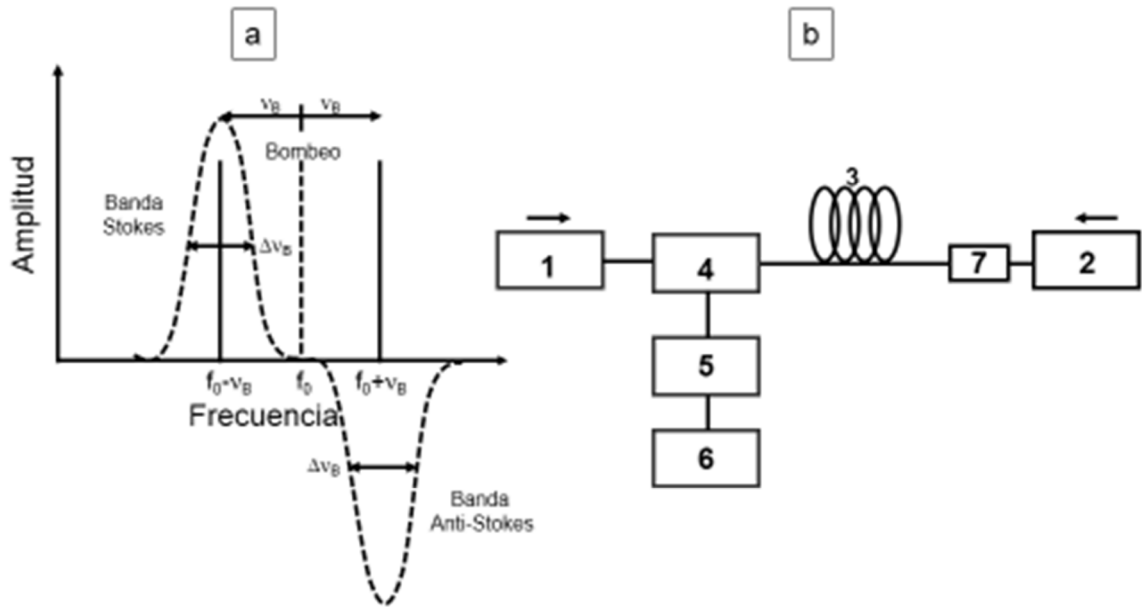


FIGURA 1



FIGURA 2

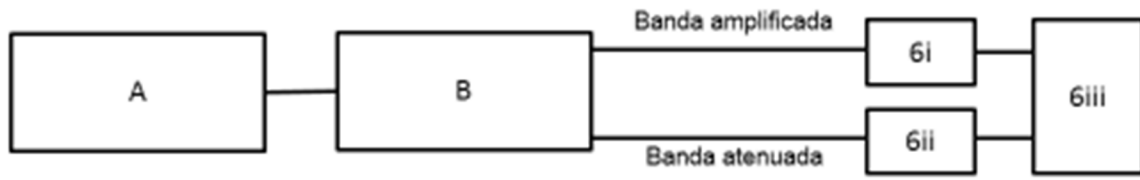


FIGURA 3