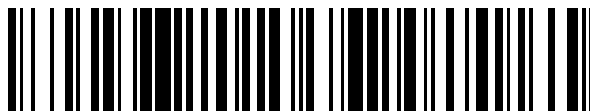


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 552 703**

21 Número de solicitud: 201430832

51 Int. Cl.:

G01D 5/353

(2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

30.05.2014

43 Fecha de publicación de la solicitud:

01.12.2015

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA (100.0%)
Campus de Arrosadía s/n - OTRI, Edificio de
Rectorado
31006 Pamplona (Navarra) ES**

72 Inventor/es:

**LOAYSSA LARA, Alayn;
SAGUES GARCÍA, Miguel y
URRICELQUI POLVORINOS, Javier**

74 Agente/Representante:

ILLESCAS TABOADA, Manuel

54 Título: **Sensor de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica y procedimiento de medida asociado**

57 Resumen:

Sensor de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica y procedimiento de medida asociado.

Sensor de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica (7) que comprende un generador de señales ópticas (1), un dispositivo de pulsación (70) y un generador de onda de prueba (5), que dan lugar a, al menos, una señal óptica de bombeo pulsada (H) y, al menos, una señal óptica de prueba (I); un segmento de fibra óptica (7) donde las señales ópticas de bombeo pulsada (H) y prueba (I) interaccionan entre sí; comprendiendo además el sensor un conjunto de reducción de efectos no locales y de aumento del umbral de Brillouin provisto de un generador de señal de modulación (2) que permite modular en longitud de onda al menos una de las señales ópticas de prueba I y/o al menos una señal óptica de amplificación (J).

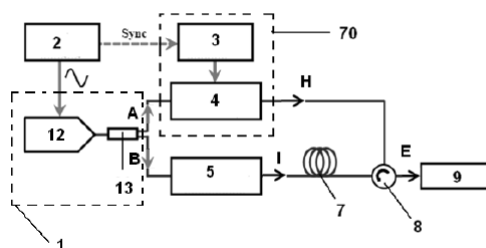


Fig. 3

DESCRIPCIÓN

Sensor de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica y procedimiento de medida asociado**CAMPO DE LA INVENCION**

5

La presente invención está relacionada con los sensores de fibra óptica distribuidos basados en el efecto no lineal de dispersión de Brillouin estimulada y, más específicamente, con los sensores basados en la técnica de análisis óptico Brillouin en el dominio del tiempo (*Brillouin optical time-domain analysis*, BOTDA).

10

El objeto de la invención es, por tanto, un sensor o dispositivo de medida destinado a medir la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica, que está basado en una mejora de la técnica BOTDA, así como un procedimiento de medida asociado. El dispositivo de medida según la invención tiene unas mejores prestaciones en comparación con los dispositivos de la técnica anterior, porque incorpora elementos capaces de generar espectros Brillouin cuyas características pueden variar a lo largo de dicha fibra óptica.

15

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

20

Los sensores Brillouin distribuidos del tipo BOTDA se basan en la utilización del efecto no lineal de dispersión de Brillouin estimulada (*stimulated Brillouin scattering*, SBS) en fibra óptica por el que dos ondas o señales ópticas, llamadas respectivamente onda de bombeo y onda de Stokes, que se propagan en sentido opuesto en un tramo de fibra óptica, dan lugar a la aparición de una onda acústica que genera transferencia de energía de la onda de bombeo a la onda de Stokes. El resultado de este proceso es que la onda de Stokes resulta

25 amplificada y la onda de bombeo atenuada. Esto ocurre siempre que la separación en frecuencia óptica de las ondas de bombeo y Stokes sea cercano al llamado desplazamiento en frecuencia Brillouin (*Brillouin frequency shift*, BFS) propio de la fibra óptica utilizada. De esta manera, el efecto da lugar a la aparición de un espectro de ganancia para ondas que se propaguen en sentido opuesto a la onda de bombeo y que tiene un máximo a la frecuencia

30 óptica dada por la resta entre la frecuencia óptica del bombeo y el BFS. Este espectro, también llamado espectro de ganancia Brillouin, tiene una forma de función de Lorentz y una anchura de línea del orden de algunas decenas de megahercios que viene dada por el

parámetro denominado anchura de línea Brillouin y que es propio de cada fibra. Simultáneamente, aparece un espectro de atenuación Brillouin con características análogas para ondas que se propagan en sentido opuesto a la onda de Stokes con forma y anchura de línea similar.

5

El concepto general de la técnica BOTDA se describe en la solicitud de patente US4997277. En su aplicación al desarrollo de sensores, se aprovecha que el BFS depende de las magnitudes físicas a las que está sometida la fibra, en particular la temperatura (T) y la elongación de la fibra (ε). Concretamente, se encuentra que el BFS tiene una dependencia
 10 aproximadamente lineal con estos parámetros que se puede expresar como $BFS = BFS_0 + C_T T + C_\varepsilon \varepsilon$, donde BFS_0 es el BFS a una temperatura dada de referencia y sin deformación de la fibra, y C_T y C_ε son los coeficientes de dependencia con la temperatura y la elongación, respectivamente. Por tanto, puede encontrarse la temperatura o la elongación a la que está sometida una fibra, simplemente midiendo el espectro de
 15 ganancia Brillouin y determinando su máximo. Para ello se introduce desde un extremo de la fibra la onda de bombeo y desde el otro extremo una onda auxiliar de prueba que actúa como onda de Stokes en la interacción Brillouin. El procedimiento consistiría en medir la ganancia que experimenta la onda de prueba al atravesar la fibra óptica para diferentes separaciones en frecuencia óptica entre las dos. Igualmente se podría utilizar el espectro de
 20 atenuación Brillouin y que la onda de prueba actúe como onda de bombeo en la interacción Brillouin. Con esto se podría determinar la temperatura o la elongación promedio a la que está sometido el tramo de fibra óptica utilizado.

La técnica BOTDA permite, además, realizar una medida de la distribución de las
 25 magnitudes físicas a lo largo de la fibra óptica. Para ello se realiza un pulsado de la onda de bombeo antes de introducirla por un extremo de la fibra. Este pulso se contra-propaga entonces a lo largo de la fibra con una onda de prueba continua en el tiempo que se introduce por el otro extremo.

30 Finalmente, se mide la ganancia que experimenta esta onda tras atravesar la fibra óptica en función del tiempo. La ganancia medida en un instante dado corresponde a la interacción entre el pulso de bombeo y la onda de prueba en una posición dada de la fibra. De esta manera, utilizando una técnica reflectométrica clásica se puede traducir ganancia en función

del tiempo a ganancia en función de la posición. Esto, combinado con un barrido de la separación en frecuencia óptica entre onda de bombeo y prueba, permite medir el espectro de ganancia Brillouin en cada posición de la fibra y, a partir de él, encontrar el BFS en esa posición y con ello T y ϵ . La resolución espacial de la medida viene determinada por la duración temporal del pulso de bombeo puesto que éste determina la extensión en la que se produce ganancia por interacción Brillouin entre bombeo y onda de prueba. La técnica BOTDA también se puede implementar mediante la medida del espectro de atenuación Brillouin en lugar del de ganancia.

- 10 Sin embargo, los sistemas BOTDA existentes tienen importantes limitaciones que impiden aprovechar todas las potenciales ventajas de esta tecnología. Los principales son: la escasa relación señal a ruido (*signal-to-noise ratio*, SNR) de las medidas, los elevados tiempos de medida necesarios, los efectos no locales que limitan la precisión de la medida y la máxima resolución espacial que se puede conseguir. La presente invención contribuye a compensar
- 15 directa o indirectamente estas limitaciones lo que permite una mejora muy significativa en las prestaciones de los sensores distribuidos tipo BOTDA.

Una de las principales limitaciones surge de los efectos no locales, que restringen la potencia máxima utilizable de la onda de prueba y, por tanto, también la relación señal a ruido (SNR) de la medición. Este efecto es debido a la transferencia de potencia entre las ondas de bombeo y prueba: conforme se propaga el bombeo a lo largo de la fibra cede energía a la onda de prueba y, por tanto, sufre una atenuación o vaciamiento. Esta atenuación tiene una dependencia con la longitud de onda que introduce una función de transferencia adicional a los espectros Brillouin medidos, esto introduce un error sistemático

20 en las medidas realizadas que supone una disminución de la precisión del sensor. La denominación de efectos no locales proviene de que, debido a este efecto, las medidas realizadas en un punto de la fibra óptica se hacen dependientes de las condiciones en otros puntos de la fibra donde se ha producido el vaciamiento del bombeo. Se han propuesto varios métodos para contrarrestar esta limitación mediante el uso de configuraciones

25 especiales de sensores BOTDA, como el uso de una doble onda de bombeo.

Otro factor que limita la potencia de la onda de prueba que se puede inyectar en la fibra de medida, es el vaciamiento y el ruido que se añade a esta onda debido a la dispersión de

Brillouin espontánea (*spontaneous Brillouin scattering*, SpBS). De hecho, conforme la señal óptica de prueba aumenta su potencia, comienza a actuar como señal óptica de bombeo de la amplificación SBS de ondas de Stokes que se generan por SpBS procedente de la excitación térmica de ondas acústicas en la fibra. Esto generara un vaciamiento de potencia de la onda de prueba y también un ruido debido al origen térmico, y por tanto aleatorio, de las señales de Stokes amplificadas. Este ruido contribuye a incrementar el ruido de intensidad relativo (*Relative Intensity Noise*, RIN) de la señal detectada, degradando la SNR de la medida. Esta es una manifestación del llamado umbral Brillouin de un tramo de fibra que determina la máxima potencia que es posible inyectar en una fibra sin que se produzca un vaciamiento significativo de la potencia de salida y la adición de ruido a ésta.

La SNR de la medida también se ve afectada por atenuación de los pulsos de bombeo al propagarse por tramos largos de fibra óptica. De esta manera, en el extremo más distante de la fibra los pulsos llegan con una baja potencia óptica lo que implica que dan lugar a una interacción Brillouin muy pequeña en la onda de prueba. De esta manera, la onda de prueba recibida correspondiente a esta zona distante de la fibra tiene poca potencia con lo que la SNR es también reducida. Para compensar este efecto se ha propuesto el uso de amplificación distribuida Raman que va compensando la atenuación sufrida por la onda de bombeo en su viaje a lo largo de la fibra. Sin embargo, la amplificación Raman no solamente afecta a la onda de bombeo sino también a la onda de prueba. Esta amplificación aumenta el ruido en la onda de prueba recibida debido a la transferencia del ruido de intensidad relativo del láser de bombeo Raman a la onda de prueba.

Un ejemplo de sensor tipo BOTDA se describe en la solicitud de patente WO 2012/10101592. En los dispositivos divulgados por dicho documento se emplea modulación de la longitud de onda de la señal de bombeo para realizar medidas de variaciones rápidas de BFS. Su funcionamiento está basado en utilizar, en cada posición de la fibra, una separación entre la señal óptica de bombeo y prueba tal que coloque la longitud de onda de la señal óptica de prueba en la pendiente del espectro de ganancia Brillouin. De esta manera, se utiliza el espectro Brillouin como discriminador para convertir cambios rápidos en BFS, debidos por ejemplo a vibraciones que generen variación rápida de la deformación, en cambios de amplitud de la señal detectada. Sin embargo, el BFS estacionario alrededor del cual se produce las variaciones rápidas de BFS cambia, en general, a lo largo de la fibra debido a las características estacionarias de la deformación y temperatura a la que esté

sometida en cada punto. En la patente WO 2012/10101592 se utiliza una señal óptica de prueba cuya longitud de onda se modula, con el objetivo de adaptarse a la variación del BFS estacionario a lo largo de la fibra. De esta manera, se consigue que en cada segmento de la fibra la separación en frecuencia entre bombeo y prueba sea la adecuada para conseguir que la señal óptica de prueba esté localizada en la pendiente del espectro de ganancia.

En la solicitud de patente EP 1959247 A2 se describe un sensor basado en Brillouin en que se emplea modulación directa de la longitud de onda de una fuente óptica, con el objetivo de generar en una misma fuente dos señales ópticas de longitudes de onda separadas por el BFS que se puedan utilizar como ondas de bombeo y prueba. Para ello, se utiliza una modulación con una onda cuadrada de manera que el efecto de chirp del láser (es decir, la modulación en la frecuencia óptica de emisión de un láser que aparece cuando se modula su corriente) dé lugar a la generación de señales ópticas de bombeo y prueba de forma alterna por división en el tiempo.

La solicitud de patente EP 2708856 A1a nombre del presente solicitante, divulga sensores de medida tipo BOTDA en los que es posible incrementar la SNR recibida sin necesidad de aumentar los tiempos de medida ni disminuir la precisión de dichos dispositivos. Sin embargo, dicho sensor continúa siendo vulnerable a la limitación en la potencia de la señal óptica de prueba inyectada impuesta por los efectos no locales y al ruido que se añade a esta señal óptica de prueba debido a la dispersión de Brillouin espontánea. La aplicación de la presente invención al sensor descrito en la solicitud EP 2708856 A1 de la presente invención permitiría reducir estas limitaciones. Además, se podría conseguir amplificar la potencia de los pulsos de bombeo conforme se propagan por la fibra.

Además de los sensores BOTDA, existen otros tipos de sensores Brillouin distribuidos, como son los basados en la técnica de análisis óptico Brillouin en el dominio de la coherencia (Brillouin optical coherence domain analysis, BOCDA) que utilizan el efecto SBS, pero empleando un método distinto al de los BOTDA para proveer medidas distribuidas de BFS. En los sensores BOCDA, como el descrito en la solicitud de patente EP 2068126 A1, se modulan en longitud de onda unas señales de bombeo y prueba que son continuas en el tiempo. Con la modulación se consigue modificar su coherencia relativa de manera que al contrapropagarse en la fibra óptica sensora se localice la interacción SBS en una posición

específica en la que la correlación de ambas señales ópticas es alta.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

5 Con objeto de abordar los problemas y desventajas de la técnica anterior arriba indicados, un primer aspecto de la invención contempla un sensor de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica que comprende, al menos:

- 10 - un generador de señales ópticas configurado para generar, una(s) primera(s) señal(es) óptica(s) y una(s) segunda(s) señal(es) óptica(s) que dan lugar, respectivamente, a al menos una señal óptica de bombeo y, al menos, una señal óptica de prueba;
- Un segmento de fibra óptica donde la(s) señal(es) óptica(s) de prueba interacciona(n) con la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo;
- 15 - Un dispositivo de pulsación configurado para pulsar las primera(s) señal(es) óptica(s) para formar la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo pulsadas;
- Un generador de onda de prueba configurado para generar señal(es) óptica(s) de prueba (I) a partir de la(s) segunda(s) señal(es) óptica(s);
- Un fotorreceptor configurado para detectar la señal óptica de salida, resultante de la interacción entre la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo y la(s) señal(es) óptica(s) de prueba;
- 20 - Un conjunto de procesamiento de la señal óptica de salida configurado para obtener las características de la interacción de la(s) señal(es) óptica(s) de prueba con la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo pulsadas a lo largo de la fibra óptica;

Caracterizado porque además comprende:

- 25 - Un conjunto de reducción de efectos no locales y de aumento del umbral de Brillouin que comprende, a su vez, un generador de señal de modulación que permite modular en longitud de onda al menos una de la(s) señal(es) óptica(s) de prueba y/o al menos una señal óptica de amplificación, destinada a compensar la atenuación de la señal óptica de bombeo a lo largo de la fibra óptica.

30

El sensor de medida de la presente invención permite compensar la reducción en la

potencia de la señal óptica de prueba impuesta por los efectos no locales y el ruido que se añade a dicha señal óptica de prueba por la dispersión de Brillouin espontánea (inconvenientes de la técnica anterior ya mencionados anteriormente), mediante un primer enfoque novedoso: la modulación de la longitud de onda de la señal óptica (o señales ópticas) de prueba, opcionalmente sincronizada con la pulsación de la señal óptica (o señales ópticas) de bombeo, una técnica no empleada para este fin hasta la fecha.

Alternativamente, mediante un segundo enfoque novedoso, una segunda realización de sensor de medida según la invención permite compensar la atenuación de la señal óptica de bombeo a lo largo de la fibra óptica. Para ello comprende una fuente óptica configurada para generar una señal óptica de bombeo de la amplificación de Brillouin, también llamada “señal óptica de amplificación”. Además dicha señal óptica de amplificación está opcionalmente modulada en longitud de onda por un generador de señal de modulación. Asimismo, en una realización preferida de la invención la señal óptica de amplificación ésta opcionalmente sincronizada con la pulsación de la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo, de tal forma que se consigue aún una mayor estabilidad en la potencia de la señal óptica de bombeo. Por último, en otra realización alternativa de la invención, ni la señal óptica de amplificación, ni la señal (o señales) ópticas de prueba están moduladas en longitud de onda.

Por otro lado, es importante señalar que, a lo largo de la fibra, la separación en longitud de onda de la señal óptica (o señales ópticas) de prueba y la señal óptica de bombeo tiene un componente constante, que no incluye la modulación de la longitud de onda de la señal óptica (o señales ópticas) de prueba, y un componente variable, que es resultado de dicha modulación.

En una realización preferida de la invención, el generador de señal de modulación está sincronizado con el generador de pulsos, de tal forma que la modulación en longitud de onda de al menos una señal óptica de prueba está sincronizada con la pulsación de la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo.

En otra realización preferida de la invención, el generador de señal de modulación es un generador de señales eléctricas que inyecta una señal eléctrica al generador de señales ópticas y está sincronizado, a su vez, con el generador de pulsos de manera que las señales

ópticas de bombeo pulsadas coincidan en el tiempo con la misma forma de onda de la modulación.

5 En otra realización preferida, el generador de señales ópticas comprende además un modulador óptico de fase.

Los espectros de interacción Brillouin generados pueden ser los empleados para la propia medida BOTDA, en cuyo caso la variación de sus características se realiza modulando la longitud de onda de la señal de prueba. También pueden ser espectros de interacción
10 Brillouin adicionales a los empleados en la medida BOTDA, por ejemplo, espectros de ganancia Brillouin que se empleen para amplificar los pulsos de bombeo utilizados en el BOTDA conforme se propagan por la fibra, compensando la atenuación introducida por ésta. En ambos casos se consigue mejorar las prestaciones del sensor en términos de relación señal a ruido y el resto de prestaciones relacionadas (tiempo de medida, resolución,
15 alcance, etc).

La longitud de onda de dicha señal óptica de amplificación puede estar opcionalmente modulada, preferentemente, mediante la modulación de la corriente eléctrica inyectada en la fuente óptica que la genera, y aún más preferentemente, de manera que la longitud de onda
20 de dicha señal óptica de amplificación esté sincronizada con la señal pulsada de bombeo. Además, la fuente óptica puede opcionalmente comprender una pluralidad de fuentes láser. La presente invención también contempla que, opcionalmente, la señal óptica de amplificación no esté modulada en longitud de onda.

25 Un segundo aspecto de la invención se refiere a un procedimiento de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica que utiliza un sensor según el primer aspecto de la invención y comprende las siguientes etapas:

- i. modular la longitud de onda de la señal óptica de prueba (a fin de crear un perfil de variación a lo largo de la fibra óptica destinado a reducir los efectos
30 no locales y aumentar el umbral Brillouin de dicha fibra óptica);
- ii. Sincronizar la pulsación de la señal óptica de bombeo con la modulación de la longitud de onda de la señal óptica de prueba;

- iii. Ajustar la componente constante de la separación en longitud de onda de las señales ópticas de prueba y bombeo;
- iv. Introducir por un extremo de un segmento de fibra óptica la señal óptica de bombeo pulsada;
- 5 v. Introducir por el otro extremo de la fibra óptica la señal óptica de prueba;
- vi. Permitir la interacción en la fibra óptica, por medio del efecto de dispersión de Brillouin estimulada, de la señal óptica de bombeo con la señal óptica de prueba, que da lugar a una señal óptica de salida;
- vii. Detectar en el fotorreceptor la señal óptica de salida; y
- 10 viii. Analizar y procesar la señal óptica de salida detectada en el fotorreceptor mediante el conjunto de procesamiento para obtener la distribución, a lo largo de la fibra óptica, del módulo y/o la fase del espectro de la interacción Brillouin.

En una realización preferida de la invención, el procedimiento de medida comprende, además, repetir las etapas (i) a (viii) anteriormente descritas para distintos ajustes de la componente constante de la separación en longitud de onda de las señales ópticas de prueba y bombeo, con el fin de obtener la distribución a lo largo de la fibra óptica del módulo y/o la fase de la interacción Brillouin a distintas frecuencias ópticas.

20 En otra realización preferida de la invención, el procedimiento comprende:

- las etapas (i) a (v) anteriormente descritas,
- introducir, por el mismo extremo de la fibra óptica que se ha introducido la señal óptica de prueba, una señal óptica de amplificación a fin de que actúe como bombeo de ganancia Brillouin para la señal óptica pulsada de bombeo;
- 25 - la etapa (vi) anteriormente descrita;
- permitir la interacción en la fibra óptica de la señal óptica de bombeo con la señal óptica de amplificación; y
- las etapas (vii) y (viii) anteriormente descritas.

30 En otra realización aún más preferida de la invención, se modula en longitud de onda la

señal óptica de amplificación antes de introducirla en la fibra óptica.

En una última realización de la invención, el procedimiento comprende:

- 5 - las etapas (iii) a (v) anteriormente descritas,
- introducir, por el mismo extremo de la fibra óptica que se ha introducido la señal óptica de prueba (I), una señal óptica de amplificación (J) a fin de que actúe como bombeo de ganancia Brillouin para la señal óptica pulsada de bombeo (H);
- la etapa (vi) anteriormente descrita;
- 10 - permitir la interacción en la fibra óptica (7) de la señal óptica de bombeo pulsada (H) con la señal óptica de amplificación (I); y
- Las etapas (vii) y (viii) anteriormente descritas.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

- 15 A continuación se explicarán características adicionales de la invención con relación a las figuras adjuntas, dadas solamente a modo de ejemplo explicativo y no limitativo, en las que:

La Figura 1 ilustra un sensor BOTDA convencional según la técnica anterior;

- 20 Las Figuras 2a y 2b ilustran la distribución de espectros Brillouin medidos por el sensor de la figura 1 a lo largo de una fibra óptica que está sometida a una deformación y temperatura constante en toda su longitud;

La Figura 3 muestra esquemáticamente una realización de un sensor según un aspecto de la invención;

- 25 Las Figuras 4a y 4b describen la distribución de espectros Brillouin medidos a lo largo de una fibra óptica que está sometida a una deformación y temperatura constante en toda su longitud cuando se ha sintetizado un BFS sinusoidal, en un sensor según un aspecto de la invención;

- 30 Las Figura 5a y 5b describen la reducción que se consigue en los efectos no locales mediante la síntesis de distintos perfiles de BFS, en un sensor según un aspecto de la invención;

La Figura 6 muestra esquemáticamente otra realización de un sensor según un aspecto de la invención en el que se utiliza una fuente óptica adicional para bombear ganancia Brillouin que amplifica los pulsos de bombeo;

5 Las Figura 7a a 7c describen el espectro de las señales ópticas empleadas en un sensor según un aspecto de la invención y la distribución de la ganancia Brillouin generada en la fibra para los pulsos de bombeo;

La Figura 8 describe esquemáticamente un sensor según un aspecto de la invención en el que se utiliza una fuente óptica adicional para bombear ganancia Brillouin que amplifica los pulsos de bombeo;

10 La Figura 9 describe esquemáticamente un sensor que implementa un aspecto de la invención en el que se utilizan múltiples fuentes óptica adicionales para bombear ganancia Brillouin que amplifica los pulsos de bombeo;

La Figura 10 representa esquemáticamente una realización preferente de un sensor según la presente invención;

15 La Figura 11 representa un esquema del conjunto de generación de señales ópticas utilizado en una realización de la presente invención;

La Figura 12 representa una realización del generador de señales ópticas de la presente invención;

20 La Figura 13 representa otra realización del generador de señales ópticas del dispositivo de la invención;

La Figura 14 representa una realización del generador de onda de prueba de la invención;

La Figura 15 representa una realización del conformador de pulsos de bombeo de la invención; y

25 La Figura 16 representa otra realización del generador de pulsos de bombeo de la invención.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

30 Se describen ahora varios ejemplos concretos de la invención haciendo referencia a las figuras adjuntas. En dichas figuras, los componentes con funciones iguales o similares se han designado usando el mismo número de referencia.

La Fig. 1 describe un sensor BOTDA según la técnica anterior, que comprende un único generador de señales ópticas 1 el cual, en esta realización, comprende un láser 12 y un acoplador 13. Las señales ópticas generadas por dicho generador de señales ópticas se dividen en una primera señal óptica A y una segunda señal óptica B, gracias al acoplador 13. La primera señal óptica A ingresa en un dispositivo de pulsación 70 que comprende un generador de pulsos 3 y un conformador de pulsos 4 (explicados en detalle más adelante), para dar lugar a una señal óptica de bombeo pulsada H, mientras que la segunda señal óptica B da lugar a una señal óptica de prueba I, que en este caso es una señal continua, mediante un generador de onda de prueba 5 (descrito más adelante en detalle). Las señales ópticas de bombeo pulsada H y de prueba I, interaccionan entre sí en una fibra óptica 7, dando lugar a una señal óptica de salida E, que es detectada por un fotorreceptor 9. El sensor también está provisto de un circulador 8 (explicado en detalle más adelante).

Las señales ópticas de bombeo pulsada H y de prueba I tienen, además, diferentes longitudes de onda, siendo la diferencia de dichas longitudes de onda próxima al BFS de la fibra óptica 7 utilizada.

Las Fig. 2a y 2b muestran un ejemplo típico de la distribución de espectros Brillouin que se mediría utilizando un sensor BOTDA convencional, como el mostrado en la Fig.1, a lo largo de una fibra óptica que tuviera un BFS prácticamente constante en toda su longitud, es decir, que toda la fibra estuviera a una misma temperatura y sufriera una deformación análoga. Estos espectros se obtienen variando la separación en longitud de onda entre la onda de bombeo y la de prueba. En esta figura se puede apreciar que los espectros Brillouin están centrados en torno a la misma frecuencia para todas las posiciones.

La Fig. 3 muestra una realización de un sensor de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica según la presente invención que comprende, además de los elementos anteriormente descritos con relación a la fig. 1, un generador de señal de modulación 2 en la forma de generador de señales eléctricas, que inyecta señales eléctricas al generador de señales ópticas 1 destinadas a provocar una modulación en longitud de onda. Dicho generador de señales eléctricas 2 está sincronizado además con el dispositivo de pulsación 70 (formado por el generador de pulsos 3 y el conformador de pulsos 4).

Así, en esta realización del sensor BOTDA según la invención, la longitud de onda de emisión del láser 12 se modula por medio de una señal eléctrica, típicamente de baja frecuencia, que está sincronizada con el dispositivo de pulsación 70 de manera que las sucesivas señales ópticas de bombeo pulsadas H coincidan en el tiempo con la misma forma de onda de la modulación. Esta modulación se puede realizar, por ejemplo, mediante una pequeña modulación de una corriente inyectada a un laser de semiconductor, dado que el llamado efecto de *chirp* del láser transforma modulación de corriente en modulación de longitud de onda. En las figuras 4a y 4b se muestra, como ejemplo, una modulación mediante una onda sinusoidal, pero cualquier otra forma de onda es posible. Tal como se explica a continuación la forma de onda de la modulación de longitud de onda conseguida se traslada directamente a la forma de la variación del BFS virtual que se genera en la fibra óptica sensora.

En la rama superior del esquema de la figura 3, la señal óptica de bombeo pulsada H, que en esta ocasión está además modulada en longitud de onda, es pulsada. Como el dispositivo de pulsación 70 y la modulación están sincronizados, la señal óptica de bombeo pulsada H adquiere una longitud de onda que depende del retardo de propagación fijo entre el láser 12 y el dispositivo de pulsación 70. Esta señal óptica de bombeo pulsada H se propaga en sentido opuesto a la señal óptica de prueba I en la fibra óptica. Sin embargo, en contraste con el BOTDA convencional, la longitud de onda de la señal óptica de prueba I con la que interacciona no es constante a lo largo de la fibra óptica, porque el láser 12 está modulado en longitud de onda. Por tanto, en cada posición (z) de la fibra óptica, la señal óptica de bombeo pulsada H interacciona con una señal óptica de prueba I con una longitud de onda distinta. La interacción Brillouin entre estas dos señales ópticas viene determinada por la separación de su diferencia en frecuencia óptica (longitud de onda) respecto del centro del espectro Brillouin, $\Delta\nu$, que viene dada en cada posición z a lo largo de la fibra óptica por:

$$\Delta\nu(z)=\nu_S(z)-\nu_P-\text{BFS}(z) \quad (1)$$

donde ν_P es la frecuencia óptica de la señal óptica de bombeo pulsada H, que se mantiene constante para todas las posiciones de la fibra óptica, y ν_S es la frecuencia óptica local de la onda de prueba, que varía en función de la posición. Esta expresión matemática implica que, desde el punto de vista de la interacción Brillouin, es equivalente tener una variación en

BFS(z) a lo largo de la fibra que tener una variación idéntica en $v_s(z)$. Por tanto, se puede decir que mediante la modulación de la longitud de onda de la señal óptica de prueba I prevista en los dispositivos de la invención se está sintetizando un perfil de BFS virtual a lo largo de la fibra óptica 7. Se denomina BFS virtual porque mediante la modulación de la

5 onda de prueba se está consiguiendo un efecto en la medida de los espectros Brillouin análogo al que se tendría si el BFS realmente variara a lo largo de la fibra.

Las figuras 4a y 4b muestran la distribución de espectros que se medirían con el sensor BOTDA según la invención para el caso de que se aplique una modulación sinusoidal al

10 laser 12 y considerando la misma fibra óptica 7 que en las figura 2a y 2b. Estos espectros se miden al modificar la componente constante de la separación en longitud de onda entre las señales ópticas de bombeo H y prueba I. Se puede apreciar claramente el efecto de síntesis de BFS con forma sinusoidal en este caso.

La síntesis de BFS virtual característica de los sensores según la invención se puede utilizar, por ejemplo, para compensar los efectos no locales. El caso peor con estos efectos para un BOTDA convencional es cuando tenemos una fibra con un BFS uniforme. En este caso, hay transferencia de energía entre la señal óptica de bombeo y la de prueba a lo largo de toda la fibra, la transferencia de energía es máxima y el error en la medida al final de la fibra es

20 grande. Utilizando un sensor según la invención, se puede compensar este efecto porque, incluso aunque el BFS a lo largo de la fibra óptica 7 sea constante, la modulación de la longitud de onda de la señal óptica de prueba I genera de forma efectiva un BFS virtual variable. Como consecuencia de la dependencia con la posición del BFS virtual, la transferencia de energía entre la señal óptica de bombeo H y prueba I se reduce, y con ello

25 los efectos no locales. Las figuras 5a y 5b muestran ejemplos de compensación de los efectos no locales utilizando la síntesis de BFS virtual característica de los sensores de la presente invención. Los efectos no locales se pueden caracterizar por el llamado factor de vaciamiento que cuantifica el vaciamiento de la señal óptica de bombeo pulsada H debido a su interacción con la señal óptica de prueba I, que se define como:

$$d = |P_P - P_{P0}| / P_{P0} \quad (2)$$

Donde P_P y P_{P0} son las potencias de la señal óptica de bombeo pulsada H al final de la fibra óptica 7 con y sin interacción Brillouin, respectivamente.

La Figura 5a muestra el factor de vaciamiento calculado para los distintos perfiles de BFS sintetizados y para BFS uniforme que se representan en la Figura 5b. En línea discontinua de trazo y punto se muestra el caso de que se tenga una fibra óptica 7 con una distribución de BFS uniforme (10.8 GHz en este ejemplo). Para esta fibra óptica 7, la potencia de bombeo adquiere una dependencia en longitud de onda lorentziana cuyo máximo coincide con el BFS. Es bien conocido que para tener una precisión en la medida de BFS de al menos 1 MHz es necesario que el máximo de factor de vaciamiento sea del 17% (ver, por ejemplo, L. Thévenaz et. Al., Optics Express, Vol. 21, pp. 14017-14035, 2013). Este valor sería claramente superado en este caso con lo que aumentaría el error de la medida.

El vaciamiento de la señal óptica de bombeo pulsada H puede ser reducido sintetizando un perfil de BFS virtual. Por ejemplo, utilizando una onda cuadrada se puede simular una fibra sensora compuesta de dos segmentos con diferente BFS, tal como se muestra en la figura 5b en línea de trazos. Con este perfil de BFS se obtendría el factor de vaciamiento compuesto por dos picos que se muestra en la figura 5a. Se puede apreciar que se consigue disminuir el máximo vaciamiento del pulso. Otra posibilidad es sintetizar un perfil de BFS que varíe continuamente a lo largo de la fibra óptica 7. Por ejemplo, una modulación sinusoidal, que distribuya la energía en un rango mayor de frecuencias que la modulación cuadrada. En la figura 5b, en línea continua, se muestra un ejemplo de modulación con una onda sinusoidal que genera una variación sinusoidal del BFS. Esta modulación da lugar al factor de vaciamiento casi plano que se muestra en la figura 5a. Se puede apreciar que se consigue en este caso un factor de vaciamiento menor del 10% que asegura buenas prestaciones en el sensor BOTDA.

Esto son ejemplos de algunos perfiles de variación de BFS utilizables. Sin embargo, se pueden buscar perfiles de variación del BFS virtual optimizados para conseguir el objetivo de reducir al máximo los efectos no locales. De esta manera se puede aumentar la potencia de la señal óptica de prueba I y con ello mejorar la SNR de la señal detectada y el resto de prestaciones relacionadas del sensor (tiempo de medida, resolución, alcance, etc).

Otra ventaja que se puede conseguir mediante la síntesis de BFS virtual característica de los sensores de la invención es reducir la limitación en la potencia máxima de la señal óptica de prueba I causada por los efectos nocivos del SBS bombeado por la propia señal óptica

de prueba. Es decir, se puede conseguir aumentar el umbral Brillouin mediante la síntesis de un BFS virtual mediante la modulación de la señal óptica de prueba. El caso peor de umbral Brillouin es cuando tenemos una fibra con un BFS contante, por tanto, la síntesis de un BFS virtual contribuye a reducirlo y a relajar la limitación de potencia máxima de la señal óptica de prueba utilizable en un BOTDA. Se sigue aquí el mismo principio de las técnicas que consiguen aumentar el umbral Brillouin mediante la concatenación de segmentos de fibra que tengan distinto BFS (Ver, por ejemplo, K. Shiraki, et al., "SBS threshold of a fiber with a Brillouin frequency shift distribution," J. Lightw. Technol. 14(1), 50-57 (1996)). Por ejemplo, se encuentra que en una fibra monomodo de 20 Km, el umbral Brillouin se incrementa de ~7 mW a ~44 mW cuando se sintetiza un perfil sinusoidal de BFS con una desviación de frecuencia de 150 MHz y un total de 12 periodos contenidos a lo largo de la fibra.

La Fig. 6 muestra otra realización de un sensor de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica, según la presente invención, que comprende además de los elementos anteriormente descritos con relación a la fig. 3, una fuente óptica 24 configurada para generar una señal óptica de amplificación J, destinada a compensar la atenuación de la señal óptica de bombeo pulsada H a lo largo de la fibra óptica 7. Para ello, dicha señal óptica de bombeo pulsada H y dicha señal óptica de prueba I, pasan a través de un segundo acoplador 23.

La figura 6 describe, por tanto, otro aspecto de la presente invención, en este caso, el empleo de la generación de espectros de interacción Brillouin a lo largo de la fibra óptica 7 para compensar la atenuación que experimentan las señales ópticas de bombeo H al propagarse por la fibra óptica 7 sensora. Con respecto al sensor de la figura 3, además del generador de señales ópticas 1, en esta realización se añade una fuente óptica 24 que genera una señal óptica J que se emplea para bombear la amplificación Brillouin de las señales ópticas de bombeo pulsadas H. Por tanto, en esta realización del sensor según la invención hay dos interacciones Brillouin distintas: la empleada para la propia medida BOTDA y la que se emplea para amplificar los pulsos de bombeo utilizados en el BOTDA. Los espectros de las distintas señales ópticas involucradas se muestran esquemáticamente en las figuras 7a y 7b.

En el aspecto de la invención que se describe en la figura 6 la longitud de onda de emisión

de la fuente óptica 24 empleada se modula por medio de una señal que está sincronizada con el dispositivo de pulsación 70, de manera que sucesivas señales ópticas de bombeo pulsadas H coincidan en el tiempo con la misma forma de onda de la modulación. Nuevamente, esta modulación se puede realizar, por ejemplo, mediante la modulación de la corriente inyectada a un laser de semiconductor. En la figura se muestra, como ejemplo, una modulación con una onda sinusoidal, pero cualquier otra forma de onda es utilizable. En este caso se genera una interacción Brillouin con un perfil de BFS virtual que amplifica los pulsos de bombeo. La interacción Brillouin entre la señal óptica generada por el laser y los pulsos viene determinada por la separación de su diferencia en frecuencia óptica (longitud de onda) respecto del centro del espectro Brillouin, Δv_2 , que viene dada por:

$$\Delta v_2(z) = v_P - v_L(z) - \text{BFS}(z) \quad (2)$$

donde v_L es la longitud de onda del láser auxiliar en cada posición de la fibra. En este caso la señal óptica de bombeo pulsada H actúa como onda de Stokes en la amplificación Brillouin y la señal de la fuente óptica 24 como onda de bombeo. En las figuras 7a y 7b se muestra también un ejemplo del espectro de ganancia que experimenta la señal óptica de bombeo pulsada H en función de la posición, que como se ve tiene una forma análoga al de la figura 4. También se muestra, en la figura 7c, el espectro de ganancia total experimentado por la señal óptica de bombeo pulsada H desde su entrada en la fibra hasta cada una de las posiciones z. Se puede apreciar que se trata de un espectro de ganancia casi plano y que va aumentando al propagarse por la fibra.

La figura 8 describe otro aspecto de la invención análogo al descrito en la figura 6, pero en el cual la señal generada por el generador de señal eléctrica 60 no tiene por qué ser periódica ni estar sincronizada con las señales ópticas de bombeo pulsadas H. Además, en este caso, se podría utilizar una combinación de modulación en amplitud y longitud de onda. En este caso, en cada punto de la fibra se crearían unos espectros de interacción Brillouin cuyas características varían dinámicamente en el tiempo.

En la figura 9 se describe otro aspecto de la invención análogo al descrito en las figuras 6 y 7, pero en el cual se considera que pueden utilizarse múltiples fuentes ópticas 24 de bombeo que pueden estar o no moduladas y sincronizadas opcionalmente con las señales ópticas de bombeo pulsadas H.

En resumen, la presente invención introduce novedades en el procedimiento de generación de las señales ópticas utilizadas en sensores Brillouin distribuidos con el objetivo de generar perfiles de interacción Brillouin que puedan variar a lo largo de la fibra. Esta variación de los perfiles de interacción se puede conseguir con la modulación de la onda de prueba, con el
 5 objetivo de conseguir una distribución de la interacción Brillouin a lo largo de la fibra que minimice los efectos no locales y el ruido generado por dispersión de Brillouin espontánea. Otra posibilidad es generar unos perfiles de ganancia Brillouin que puedan variar a lo largo de la fibra con el objetivo de amplificar los pulsos de Bombeo. Para ello se utiliza, al menos, una fuente óptica adicional que actúa como bombeo de esta ganancia y que puede tener
 10 modulada su longitud de onda de emisión.

La Figura 10 muestra una realización del dispositivo de la invención que comprende un conjunto de generación de señales ópticas 0 que engloba la porción del sensor de medida según la invención encargada de la generación de las señales ópticas de bombeo pulsadas
 15 H y prueba I, así como de la modulación y pulsado de dichas señales ópticas H e I, un tramo de fibra óptica 7 sensora, un circulador 8, un filtro óptico 25, un fotorreceptor 9, un sistema de procesamiento de señal y captura de datos 10, un sistema de control 11, un acoplador o multiplexor 23 y una fuente óptica adicional 24.

20 Respecto al conjunto de generación de señales ópticas 0 y las señales generadas por éste, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El conjunto de generación de señales ópticas 0 tiene por misión generar las señales ópticas H e I que interaccionan en la fibra óptica 7.
- La señal H es una señal óptica compuesta de pulsos de luz que actúa como bombeo
 25 de la interacción Brillouin en la fibra óptica 7.
- La señal I es una señal óptica que actúa como onda de prueba de la interacción Brillouin que tiene lugar en la fibra óptica 7.
- Al menos para la señal I se puede modular su longitud de onda en el tiempo por medio de una señal moduladora que está sincronizada con los pulsos de luz de la
 30 señal H.

Respecto a la fibra óptica 7, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La fibra óptica 7 es donde tiene lugar la interacción Brillouin entre la señal óptica de bombeo H y la señal óptica de prueba I.
- La fibra óptica 7 es, preferentemente, de tipo monomodo (esto es, en la que sólo se propaga un modo de luz), para garantizar la eficiencia de la interacción Brillouin en ella.
- La fibra óptica 7 posee, preferentemente, unas características propias del espectro Brillouin, en particular del BFS, en cada punto de ella, que depende de las magnitudes físicas a las que esté sometida.
- La fibra óptica 7 presenta, preferentemente, unas características propias de la interacción que incluyen los coeficientes de dependencia del BFS con temperatura y elongación.
- La fibra óptica 7 presenta, preferentemente, unos coeficientes propios de dependencia del BFS con temperatura y elongación que son, preferentemente, conocidos a priori, para poder utilizar la fibra como elemento sensor de estas magnitudes físicas.

Respecto al circulador 8, su misión es, por una parte, encaminar la señal óptica de bombeo H hacia la fibra óptica 7 bajo análisis y, por otra, encaminar la señal E procedente de la fibra óptica 7 hacia el fotorreceptor 9.

Respecto al filtro óptico 25, su misión es filtrar, en caso necesario, el ruido óptico u otras componentes no deseadas del espectro óptico, preferentemente antes del fotorreceptor 9.

Respecto al fotorreceptor 9, dicho elemento tiene por misión detectar la señal óptica de salida E, resultado de la propagación de la señal I a lo largo de la fibra óptica 7 donde experimenta interacción Brillouin con la señal de bombeo H.

Respecto al sistema de procesado de señal y captura de datos 10, dicho elemento tiene por misión procesar la señal detectada en el fotorreceptor 9, obtener los datos de medida y actuar de interfaz con el sistema de control 11.

Respecto al sistema de control 11, su misión es sincronizar la operación del sistema de medida actuando, al menos, sobre el generador de señales ópticas 0, mediante una combinación de hardware y/o software programables, así como procesar los datos de medida capturados en el sistema de captura de datos 10 para obtener la medida del BFS y, en su caso, de las magnitudes físicas en cada punto de la fibra óptica 7.

Respecto a la fuente óptica 24 y la señal generada por ésta J, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La misión de la fuente óptica 24 es generar una señal J que se utiliza como bombeo de la ganancia Brillouin en la fibra óptica 7 para amplificar los pulsos de bombeo H.

En una realización de la presente invención, la fuente óptica 24 tiene su longitud de onda de emisión modulada.

En otra realización de la presente invención, la fuente óptica 24 tiene su longitud de onda de emisión modulada por medio de una señal moduladora que está sincronizada con los pulsos de luz de la señal H.

En otra realización de la presente invención, la fuente óptica 24 está compuesta de múltiples fuentes ópticas que pueden tener o no modulada su longitud de onda de emisión de manera sincronizada o no con los pulsos de luz de la señal H.

Respecto al acoplador o multiplexor 23, su misión es combinar en la fibra óptica 7 las señales I y J emitidas por el conjunto de generación de señales ópticas 0 y la fuente óptica 24, respectivamente.

En otra realización preferente de la invención no son necesarios la fuente óptica 24 ni el acoplador o multiplexor 23 puesto que no se busca amplificar los pulsos de bombeo H.

En otra realización preferente de la invención no se modula la longitud de onda de la señal I

emitida por el conjunto de generación de señales ópticas 0.

La figura 11 muestra una realización preferente del conjunto de generación de señales ópticas 0, que comprende un generador de señales ópticas 1, un generador de señal de modulación 2, un generador de pulsos 3, un conformador de pulsos de bombeo 4, un amplificador óptico 21, un filtro óptico 22, un generador de onda de prueba 5 y un controlador de polarización 6.

Respecto al generador de señales ópticas 1 y las señales ópticas generadas por ésta, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El generador de señales ópticas 1 genera, al menos, dos señales ópticas separadas, una(s) primera(s) señal(es) óptica(s) A se emplea(n) para generar la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo y una(s) segunda(s) señal(es) óptica(s) B para generar la(s) señal(es) óptica(s) de prueba.
- Para, al menos, una de las señales ópticas generadas B se puede modular su longitud de onda por la señal moduladora generada por el generador de señal de modulación 2.

Respecto al generador de señal de modulación 2 y la señal eléctrica F generada por éste, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El generador de señal de modulación 2 tiene por misión generar una señal eléctrica F que puede modular la longitud de onda de al menos una de las señales generadas por la fuente óptica 1.
- La señal eléctrica F es, preferentemente, una señal periódica.
- La señal eléctrica F está sincronizada con la señal pulsada C generada por el generador de pulsos 3.

Respecto al generador de pulsos 3 y la señal eléctrica C generada por éste, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El generador de pulsos 3 tiene por misión generar una señal eléctrica C compuesta

por pulsos eléctricos que sirven para conformar los pulsos ópticos de bombeo.

- La señal eléctrica C está compuesta de pulsos que están, preferentemente, sincronizados con la señal periódica F generada por el generador de señal de modulación 2.

5

Respecto al conformador de pulsos de bombeo 4, dicho elemento tiene por misión generar pulsos ópticos de bombeo a partir de una de las señales ópticas A generadas en el generador de señales ópticas 1 utilizando los pulsos eléctricos C generados por el generador de pulsos 3.

10

Respecto al amplificador óptico 21, su misión es aumentar, en caso necesario, la potencia de la señal óptica D generada por el conformador de pulsos de bombeo 4, a fin de incrementar la magnitud de la interacción Brillouin en la fibra óptica 7.

- 15 Respecto al filtro óptico 22, su misión es filtrar, en caso necesario, el ruido óptico u otras componentes no deseadas del espectro óptico, preferentemente a la salida del amplificador óptico 21.

- 20 Respecto al generador de onda de prueba 5 y la señal óptica G generada por éste, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El generador de onda de prueba 5 tiene por misión generar la onda de prueba a partir de una de las segundas señales B del generador de señales ópticas 1.

- 25 Respecto al controlador de polarización 6, dicho elemento tiene por misión modificar la polarización de la onda G, para asegurar que en todos los puntos de la fibra se produzca interacción Brillouin eficiente durante la medida.

La Figura 12 muestra el generador de señales ópticas 1 utilizado en una realización preferente de la presente invención, que comprende, preferentemente, una fuente óptica de banda estrecha 12, preferentemente una fuente láser y un divisor óptico de señal 13.

- 30 Respecto a la fuente óptica de banda estrecha 12 y la señal óptica generada por ésta, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La señal óptica generada por la fuente óptica de banda estrecha 12 posee, preferentemente, una anchura espectral suficientemente estrecha para asegurar la eficiencia del efecto SBS en la fibra.
- La señal eléctrica F generada por el generador de señal de modulación 2 se utiliza para modular la longitud de onda de la señal emitida por la fuente óptica de banda estrecha 12, preferentemente, mediante la modulación de la corriente de inyección a la fuente láser.

Respecto al divisor 13, tiene por misión dividir la señal de la fuente óptica de banda estrecha 12 en, al menos, dos caminos.

La Figura 13 muestra el generador de señales ópticas 1 utilizado en otra realización preferente de la presente invención, que comprende, preferentemente, dos fuentes ópticas de banda estrecha 14 y 15.

Respecto de las fuentes ópticas de banda estrecha 14 y 15 y las señales ópticas generadas por éstas, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La señal óptica generada por las fuentes óptica de banda estrecha 14 15 poseen, preferentemente, una anchura espectral suficientemente estrecha para asegurar la eficiencia del efecto SBS en la fibra.
- La señal eléctrica F generada por el generador de señal de modulación 2 se utiliza para modular la longitud de onda de la señal emitida por, al menos, una de las fuentes ópticas de banda estrecha 15, preferentemente, mediante la modulación de la corriente de inyección a la fuente láser.
- Las fuentes ópticas de banda estrecha 14 y 15 tienen una separación en la longitud de onda de emisión estable y sintonizable.

La Figura 14 muestra el generador de onda de prueba 5 utilizado en una realización preferente de la presente invención, que comprende, preferentemente, un generador de señal de radiofrecuencia 16 y un modulador óptico 17.

Respecto del generador de señal de radiofrecuencia 16, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- 5 – El generador de señal de radiofrecuencia 16 tiene por misión generar una señal de radiofrecuencia, preferentemente sinusoidal, que se aplica al modulador óptico 17 para generar bandas laterales de modulación en el espectro de la señal óptica G.
- El generador de señal de radiofrecuencia 16 permite variar la frecuencia de la señal eléctrica generada, en el caso de que se opte por realizar la medida del espectro Brillouin mediante la sintonía de la frecuencia óptica de una de las componentes espectrales de la señal de prueba G.
- 10 – El generador de señal de radiofrecuencia 16 proporciona una señal eléctrica de frecuencia fija, en el caso de que se opte por realizar la medida del espectro Brillouin mediante la sintonía de la frecuencia óptica de la onda de bombeo, o si se va a medir una frecuencia concreta dentro del espectro Brillouin.

15 Respecto del modulador óptico 17 y la señal óptica G generada por éste, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El modulador óptico 17 tiene por misión modular la señal óptica B generada por el generador de señales ópticas¹ para generar bandas laterales de modulación en el espectro de la señal óptica G.
- 20 – La separación de las bandas laterales de modulación respecto de la portadora óptica viene dada por la frecuencia de la señal de radiofrecuencia generada por el generador de señales de radiofrecuencia 16.
- Al menos una de las bandas laterales de modulación se emplea como onda de prueba de la interacción Brillouin generada por la señal de bombeo H en la fibra
- 25 óptica 7.

En otra realización, de la presente invención, no es necesaria la utilización de un generador de onda de prueba 5, por lo que la señal óptica G sería la propia señal óptica B.

30 La Figura 15 muestra el conformador de pulsos de bombeo 4 utilizado en una realización preferente de la presente invención, que comprende, preferentemente, un modulador óptico 18.

Respecto del modulador óptico 18, dicho elemento tiene por misión generar un pulso óptico a partir de la señal C generada por el generador de pulsos 3.

La Figura 16 muestra el conformador de pulsos de bombeo 4 utilizado en otra realización preferente de la presente invención, que comprende, preferentemente, un modulador óptico 19 y un generador de pulsos de RF 20.

Respecto del generador de pulsos de RF 20 y la señal generada por éste, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- El generador de pulsos de RF 20 tiene por misión generar pulsos de una señal eléctrica, preferentemente sinusoidal, y de una frecuencia dada.

- El generador de pulsos de RF 20 permite variar, durante la medida, la frecuencia de la señal sinusoidal pulsada que genera, en el caso de que se opte por realizar la medida del espectro Brillouin mediante la variación de la frecuencia óptica de la señal óptica de bombeo H.

- El generador de pulsos de RF 20 mantiene fija la frecuencia de la señal sinusoidal pulsada que genera, en el caso de que se opte por realizar la medida del espectro Brillouin mediante la sintonía de la frecuencia óptica de una de las componentes espectrales de la onda de prueba I, o si sólo se va a medir una frecuencia concreta dentro del espectro Brillouin.

Respecto del modulador óptico 19, han de tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- La misión del modulador óptico es generar, al menos, una banda lateral de modulación de la señal óptica A generada por el generador de señales ópticas 1.

- La señal aplicada al modulador óptico 19 se genera, preferentemente, en el generador de pulsos de RF 20.

El procedimiento de medida de los espectros de la interacción Brillouin en la fibra óptica 7 utilizando la presente realización de la invención incluye las siguientes etapas:

- i. Se ajusta, en caso necesario, la modulación de la longitud de onda de la señal I a fin de crear un perfil de variación de longitud de onda de la onda de prueba a lo largo de la fibra óptica 7 que reduzca los efectos no locales y el ruido Brillouin. En el caso en que se utilice la realización del conjunto de generación de señales ópticas 0 basado en el empleo de un generador de señal de modulación 2, el ajuste de la modulación de la

longitud de onda de la señal I se realiza ajustando la forma de onda de la señal F generada por el generador de señal de modulación 2.

5 ii. Se ajustan, en caso necesario, los pulsos de la señal de bombeo H para que estén sincronizados con la modulación de la longitud de onda de la señal I. En el caso de que se utilice la realización del conjunto de generación de señales ópticas 0 basada en el empleo de un generador de señal de modulación 2 y un generador de pulsos 3, el ajuste de la sincronización de los pulsos de la señal de bombeo H se consigue ajustando el generador de pulsos 3 de forma sincronizada con la señal F.

10 iii. Se ajusta la componente constante de la separación en longitud de onda de la onda de prueba I y de bombeo H al valor deseado. Para ello, en el caso de que se utilice la realización del conjunto de generación de señales ópticas 0 que utiliza un generador de señales ópticas 1 basado en el empleo de dos fuentes láser 14 y 15, el ajuste de la separación en longitud de onda de la señal óptica de prueba I y de bombeo pulsado H puede implicar el ajuste de la separación en longitud de onda de ambas fuentes 14 y 15. En el caso de que se utilice la realización del conjunto de generación de señales ópticas 0 que utiliza un conformador de pulsos de bombeo 4 basado en el empleo de un generador de pulsos de radiofrecuencia 20, el ajuste de la separación en longitud de onda de la señal óptica de prueba I y de bombeo pulsada H puede implicar el ajuste, en caso necesario, de la frecuencia de la señal sinusoidal pulsada que genera el generador 20. En el caso en que se utilice la realización del conjunto de generación de señales ópticas 0 que utiliza un generador de onda de prueba 5 basada en el uso de un modulador óptico 17 y un generador de radiofrecuencia 16, el ajuste de la separación en longitud de onda de la señal óptica de prueba I y de bombeo pulsada H puede implicar el ajuste, en caso necesario, de la frecuencia del generador de radiofrecuencia 16.

20 iv. Se ajusta la polarización de la luz de la señal óptica de prueba I para asegurar que en todos los puntos de la fibra se produzca interacción Brillouin eficiente durante la medida. En el caso de que se utilice la realización del conjunto de generación de señales ópticas 0 basado en el uso de un controlador de polarización 6, el ajuste de la polarización de la luz de la señal óptica de prueba I se realiza ajustando el controlador de polarización 6.

30 v. Se ajusta, en caso necesario, la modulación de la fuente óptica 24 a fin de generar señal J que dé lugar a una distribución de espectros de ganancia Brillouin en la fibra óptica que amplifique los pulsos de la señal de bombeo pulsada H.

- vi. Se introduce la señal óptica de prueba I en un extremo de la fibra óptica 7 a medir.
- vii. Se introduce la señal óptica de bombeo pulsada H por el extremo opuesto de la fibra óptica 7.
- viii. Se introduce, en caso necesario, la señal óptica de amplificación J.
- 5 ix. Se produce la interacción Brillouin de las componentes espectrales de la señal óptica de bombeo H y la señal óptica de prueba I en la fibra óptica 7 que da lugar a una onda óptica de salida E. Simultáneamente, se produce la interacción entre la señal de señal óptica de amplificación J y los pulsos de bombeo H en la fibra óptica 7.
- 10 x. Se separan la señal óptica de bombeo H y la señal óptica de salida E mediante un circulador 8 situado en el extremo de entrada de la señal óptica H en el tramo de fibra óptica 7.
- xi. Se detecta la señal óptica de salida E mediante un fotorreceptor 9.
- xii. Se producen los necesarios procesados en la señal detectada en el fotorreceptor 9.
- 15 xiii. Se registran los datos en el sistema de control 10 y se envían al sistema de control 11.
- xiv. Si se desea caracterizar más de una frecuencia del espectro Brillouin, se repiten los pasos (iii) a (xi) para un nuevo ajuste de la separación en longitud de onda de la señal óptica de prueba I y del bombeo H.
- 20 xv. Se procesan los datos de medida en el sistema de control 10 para obtener la medida distribuida de BFS a lo largo de la fibra y, en su caso, de los parámetros físicos de temperatura y/o deformación unitaria.

Por último, una vez descritos el dispositivo y el procedimiento de la presente invención, así como algunas de sus realizaciones, y describiendo sus principales ventajas sobre el estado de la técnica, cabe resaltar que su aplicación no ha de ser entendida como limitativa frente a

25 otras realizaciones, mediante las adecuadas variaciones o combinaciones de sus elementos, siempre que dichas variaciones o combinaciones no alteren la esencia de la invención, así como el objeto de la misma, el cual está definido exclusivamente por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Sensor de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica (7) que comprende, al menos:

- 5 - Un generador de señales ópticas (1) configurado para generar una(s) primera(s) señal(es) óptica(s) (A) y una(s) segunda(s) señal(es) óptica(s) (B) que dan lugar, respectivamente, a al menos, una señal óptica de bombeo pulsada (H) y, al menos, una señal óptica de prueba (I);
- 10 - Un segmento de fibra óptica (7) donde la(s) señal(es) óptica(s) de prueba (I) interacciona(n) con la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo pulsada(s) (H);
- Un dispositivo de pulsación (70) configurado para pulsar la(s) primera(s) señal(es) óptica(s) (A) para formar la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo (H);
- Un generador de onda de prueba (5) configurado para generar la(s) señal(es) óptica(s) de prueba (I) a partir de las segunda(s) señal(es) ópticas (B);
- 15 - Un fotorreceptor (9) configurado para detectar la señal óptica de salida (E), resultante de la interacción entre la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo (H) y la(s) señal(es) óptica(s) de prueba (I);
- Un conjunto de procesamiento de la señal óptica de salida (E) configurado para obtener las características de la interacción de la(s) señal(es) óptica(s) de prueba (I) que interacciona(n) con la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo pulsadas (H) a lo largo de la fibra óptica (7);
- 20

Caracterizado porque además comprende:

- 25 - Un conjunto de reducción de efectos no locales y de aumento del umbral de Brillouin que comprende, a su vez, un generador de señal de modulación (2) que permite modular en longitud de onda al menos una de la(s) señal(es) óptica(s) de prueba (I) y/o al menos una señal óptica de amplificación (J), destinada a compensar la atenuación de la señal óptica de bombeo a lo largo de la fibra óptica.

- 30 2. Sensor según la reivindicación 1, caracterizado porque el generador de señal de modulación (2) está sincronizado con el dispositivo de pulsación (70), de tal forma que la modulación en longitud de onda de al menos una señal óptica de prueba (I)

está sincronizada con la pulsación de la(s) señal(es) óptica(s) de bombeo (H).

3. Sensor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque el generador de señal de modulación (2) es un generador de señales eléctricas que inyecta una señal eléctrica al generador de señales ópticas (1) y está sincronizado, a su vez, con el dispositivo de pulsación (70).
4. Sensor según cualquiera de las reivindicaciones 1 y 2, caracterizado porque el generador de señales ópticas (1) comprende un modulador óptico de fase.
5. Sensor según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque comprende, además, al menos una fuente óptica (24) configurada para generar al menos una señal óptica de amplificación (J), destinada a compensar la atenuación de la señal óptica de bombeo pulsada (H) a lo largo de la fibra óptica (7).
6. Sensor según la reivindicación 5, caracterizado porque la señal óptica de amplificación (J), emitida por dicha fuente óptica (24), está modulada en longitud de onda mediante un generador de señal de modulación (2).
7. Sensor según la reivindicación 6, caracterizado porque la señal óptica de amplificación (J), emitida por dicha fuente óptica (24), está modulada en longitud de onda por medio de una corriente eléctrica inyectada en dicha fuente óptica (24).
8. Sensor según cualquiera de las reivindicaciones 6 y 7, caracterizado porque la modulación en longitud de onda de la señal óptica de amplificación (J), está sincronizada, a su vez, con el dispositivo de pulsación (70).
9. Sensor según cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, caracterizado porque la señal óptica de amplificación (J) no está modulada en longitud de onda.

10. Sensor según la reivindicación 9, caracterizado porque la(s) señal(es) óptica(s) de prueba (I) tampoco está(n) modulada(s) en longitud de onda.
- 5 11. Procedimiento de medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica que utiliza un sensor según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado porque comprende las siguientes etapas:
- i. Modular la longitud de onda de la señal óptica de prueba (I);
 - ii. Sincronizar la pulsación de la señal óptica de bombeo pulsada (H) con la modulación de la longitud de onda de la señal óptica de prueba (I);
 - 10 iii. Ajustar la componente constante de la separación en longitud de onda de las señales ópticas de prueba (I) y bombeo pulsada (H);
 - iv. Introducir por un extremo de un segmento de fibra óptica (7) la señal óptica de bombeo pulsada (H);
 - v. Introducir por el otro extremo de la fibra óptica (7) la señal óptica de prueba (I);
 - 15 vi. Permitir la interacción en la fibra óptica (7), de la señal óptica de bombeo pulsada (H) con la señal óptica de prueba (I), que da lugar a una señal óptica de salida (E);
 - vii. Detectar en el fotorreceptor (9) la señal óptica de salida (E); y
 - 20 viii. Analizar y procesar la señal óptica de salida detectada en el fotorreceptor (9) mediante el conjunto de procesado para obtener la distribución, a lo largo de la fibra óptica (7), del módulo y/o la fase del espectro de la interacción Brillouin.
12. Procedimiento de medida según la reivindicación 11, caracterizado porque comprende:
- 25 - Las etapas (i) a (v) anteriormente descritas,
 - Introducir, por el mismo extremo de la fibra óptica (7) que se ha introducido la señal óptica de prueba (I), una señal óptica de amplificación (J) a fin de que actúe como bombeo de ganancia Brillouin para la señal óptica pulsada de bombeo (H);
 - La etapa (vi) anteriormente descrita;
 - 30 - Permitir la interacción en la fibra óptica (7) de la señal óptica de bombeo pulsada

(H) con la señal óptica de amplificación (J); y

- Las etapas (vii) y (viii) anteriormente descritas.

13. Procedimiento de medida según la reivindicación 11, caracterizado porque
5 comprende:

- las etapas (i) a (v) anteriormente descritas,
- modular en longitud de onda la señal óptica de amplificación,
- introducir, por el mismo extremo de la fibra óptica que se ha introducido la señal
10 óptica de prueba (I), una señal óptica de amplificación (J) a fin de que actúe como
bombeo de ganancia Brillouin para la señal óptica pulsada de bombeo (H);
- la etapa (vi) anteriormente descrita;
- permitir la interacción en la fibra óptica (7) de la señal óptica de bombeo pulsada
(H) con la señal óptica de amplificación (I); y
- Las etapas (vii) y (viii) anteriormente descritas.

15

14. Procedimiento de medida según cualquiera de las reivindicaciones 12 y 13,
caracterizado porque comprende:

- las etapas (iii) a (v) anteriormente descritas,
- introducir, por el mismo extremo de la fibra óptica que se ha introducido la señal
20 óptica de prueba (I), una señal óptica de amplificación (J) a fin de que actúe como
bombeo de ganancia Brillouin para la señal óptica pulsada de bombeo (H);
- la etapa (vi) anteriormente descrita;
- permitir la interacción en la fibra óptica (7) de la señal óptica de bombeo pulsada
(H) con la señal óptica de amplificación (I); y
- Las etapas (vii) y (viii) anteriormente descritas.

25

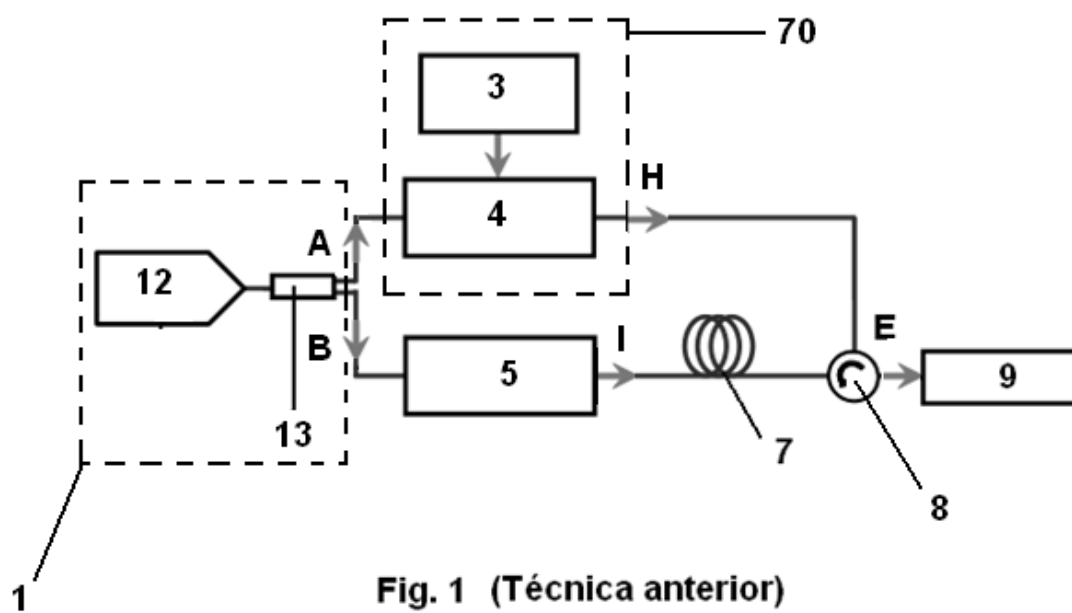


Fig. 1 (Técnica anterior)

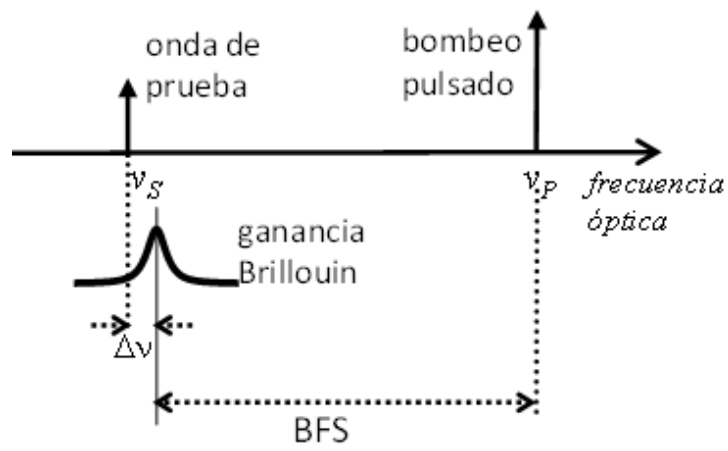


Fig. 2a (técnica anterior)

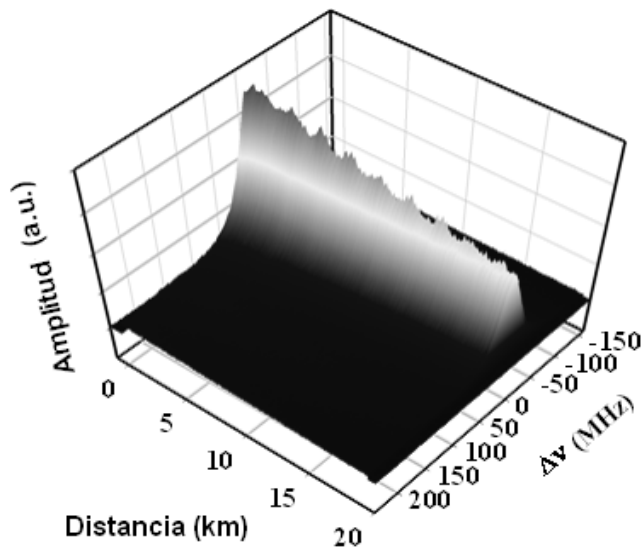


Fig. 2b (técnica anterior)

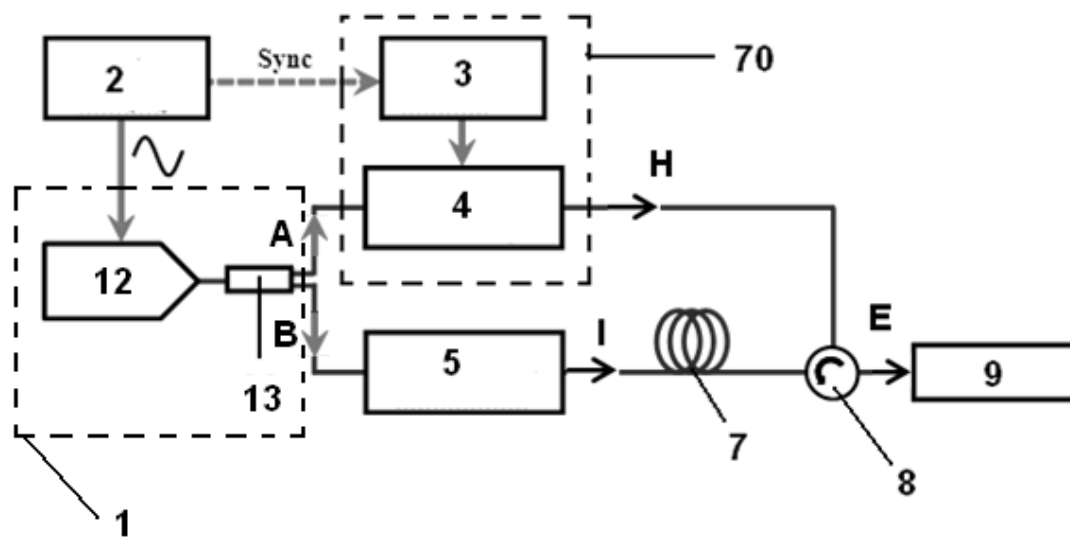


Fig. 3

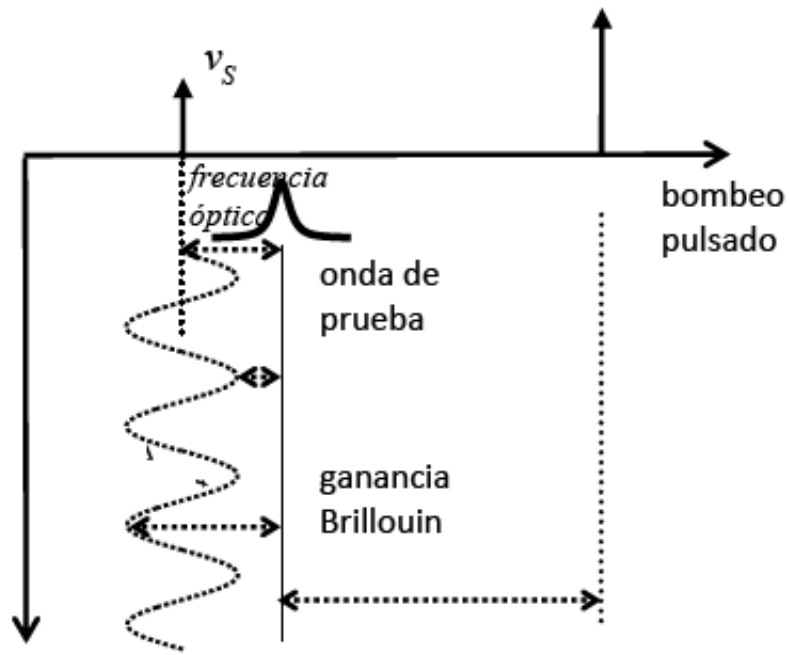


Fig. 4a

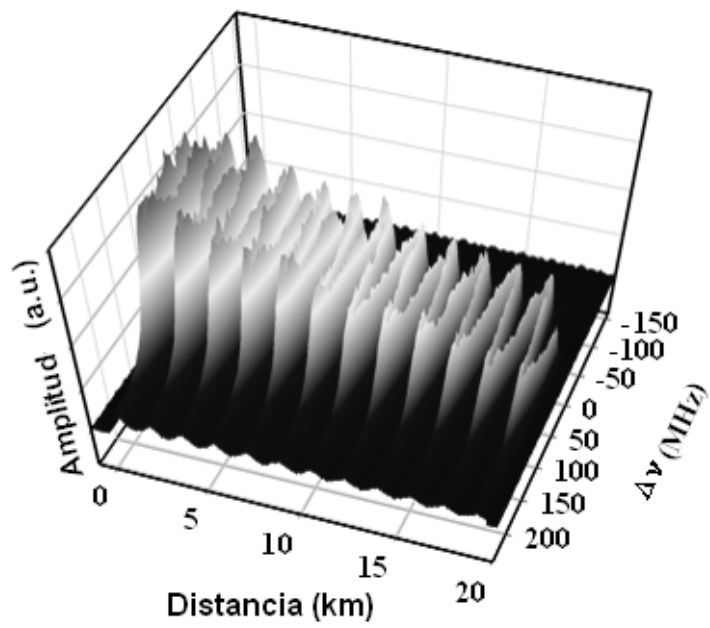


Fig. 4b

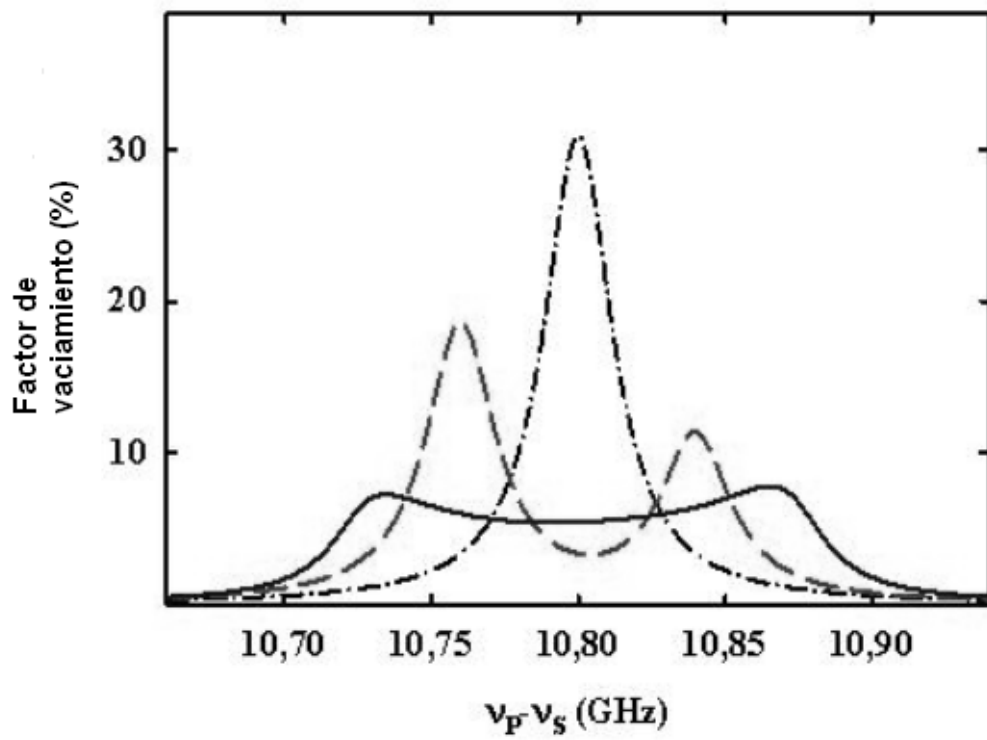


Fig. 5a

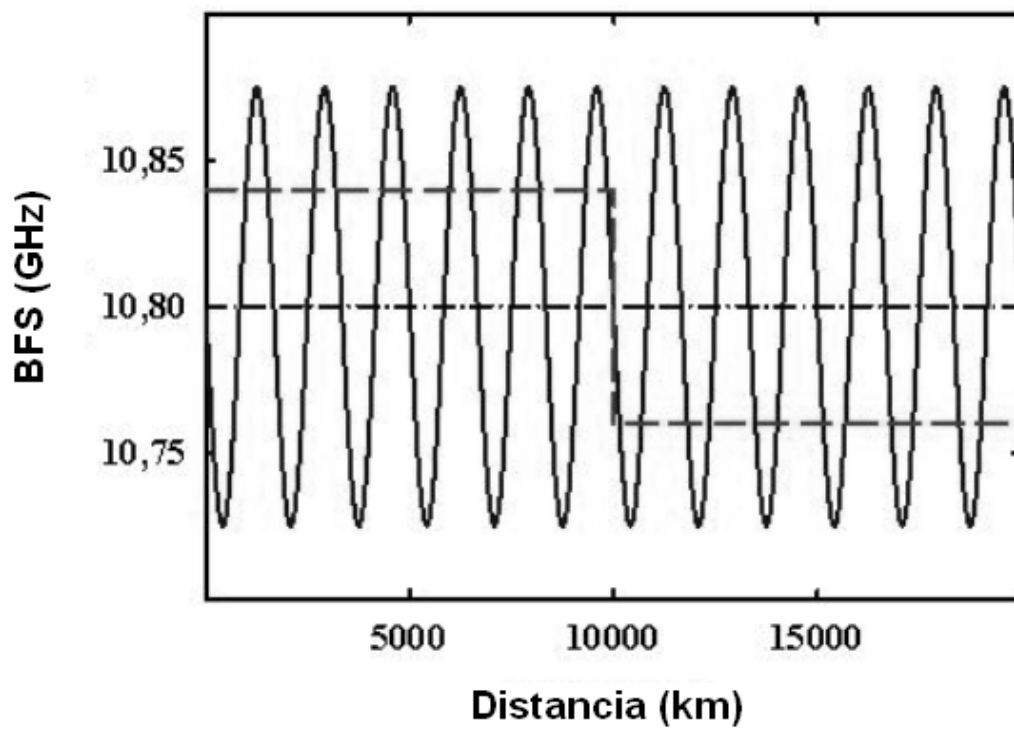


Fig. 5b

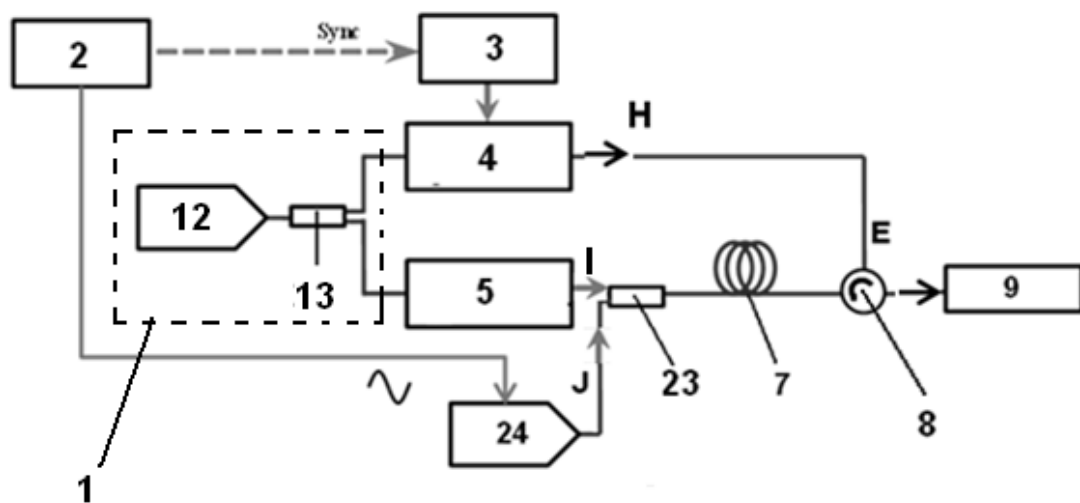


Fig. 6

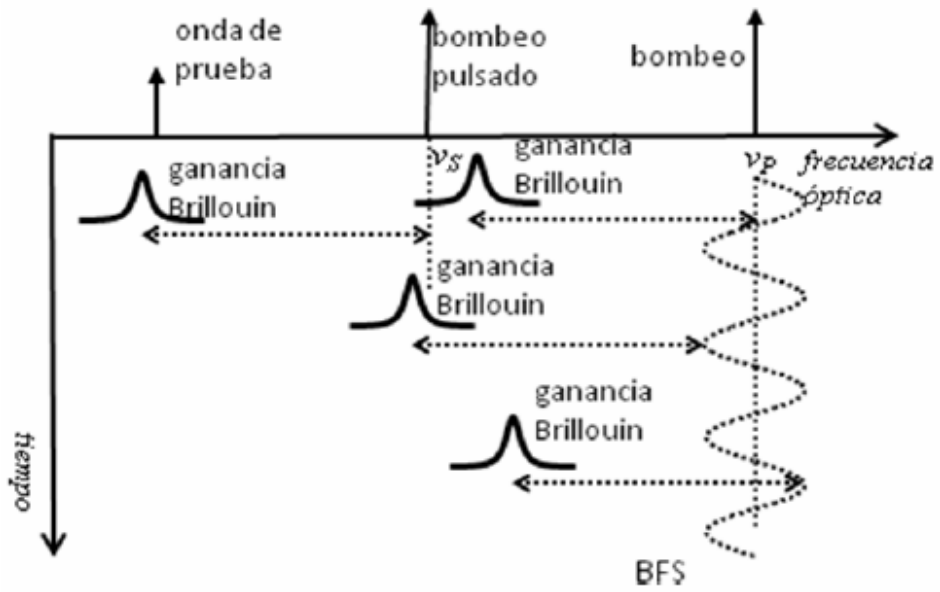


Fig. 7a

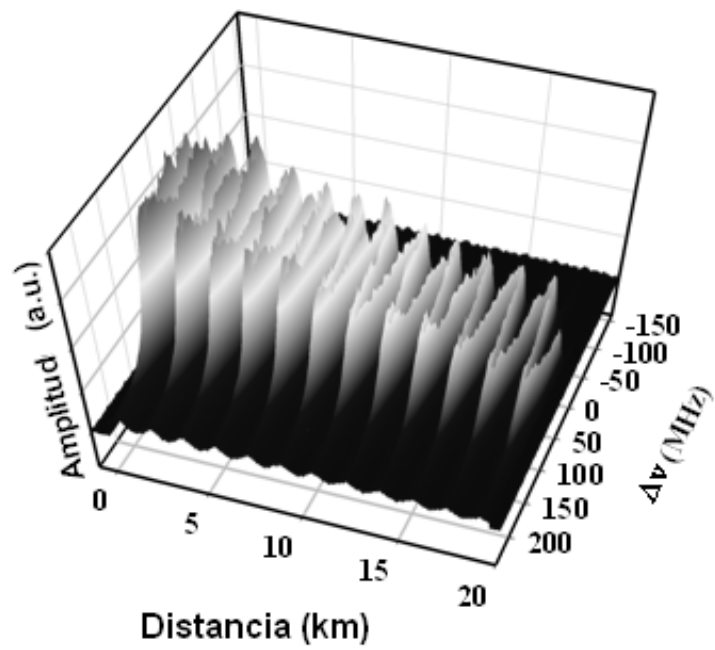


Fig. 7b

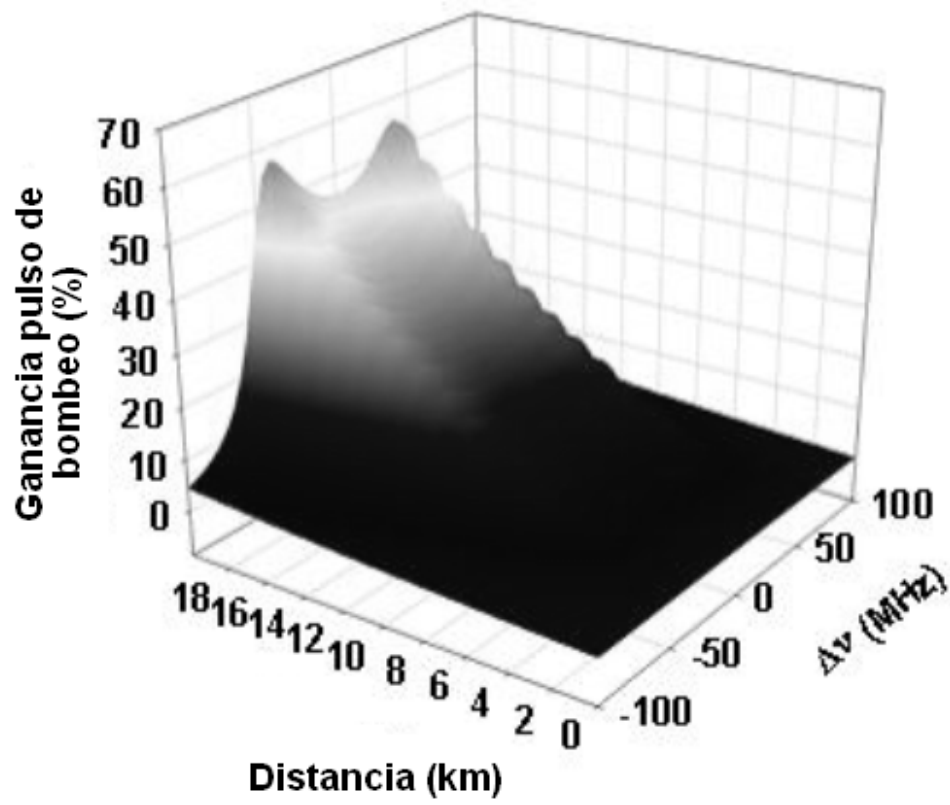


Fig. 7c

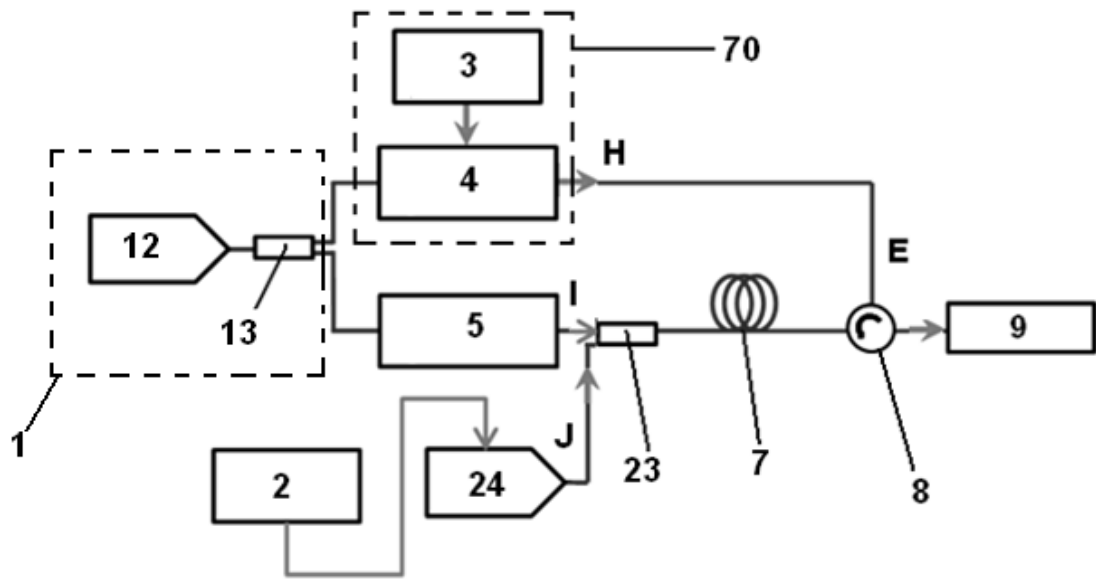


Fig. 8

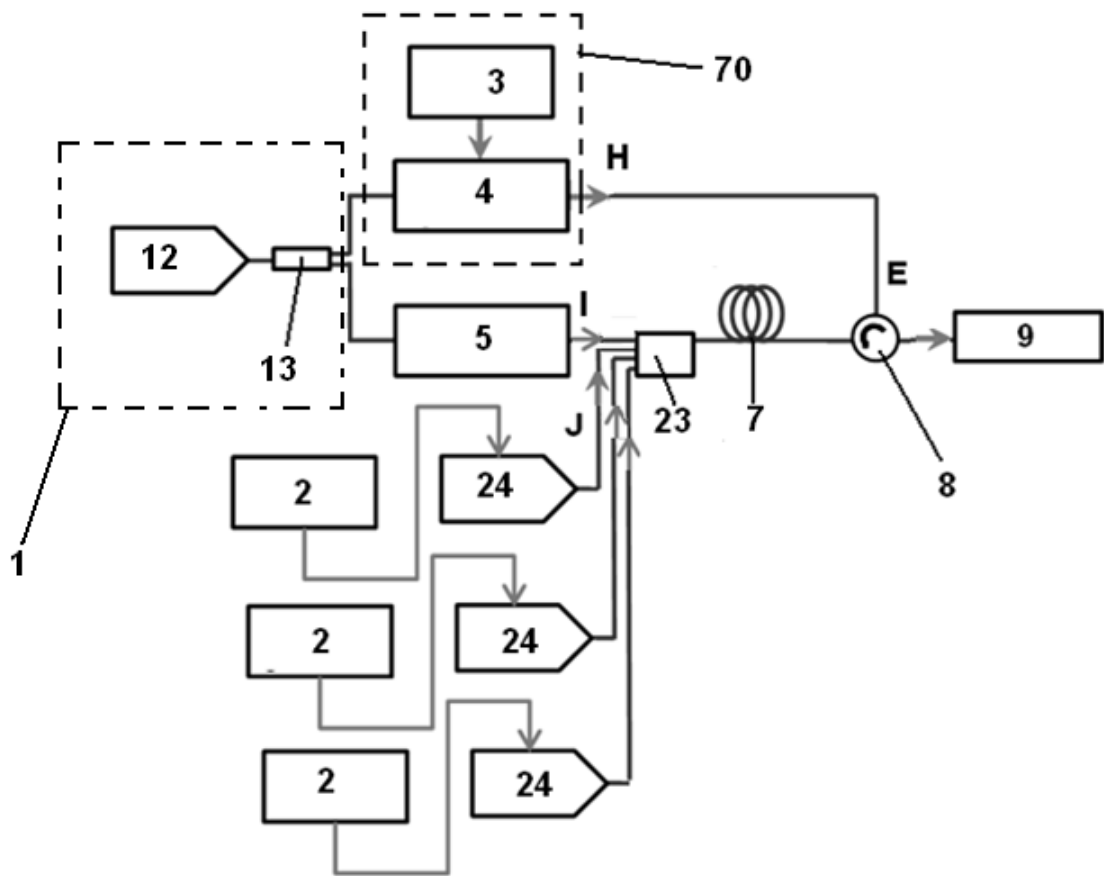


Fig. 9

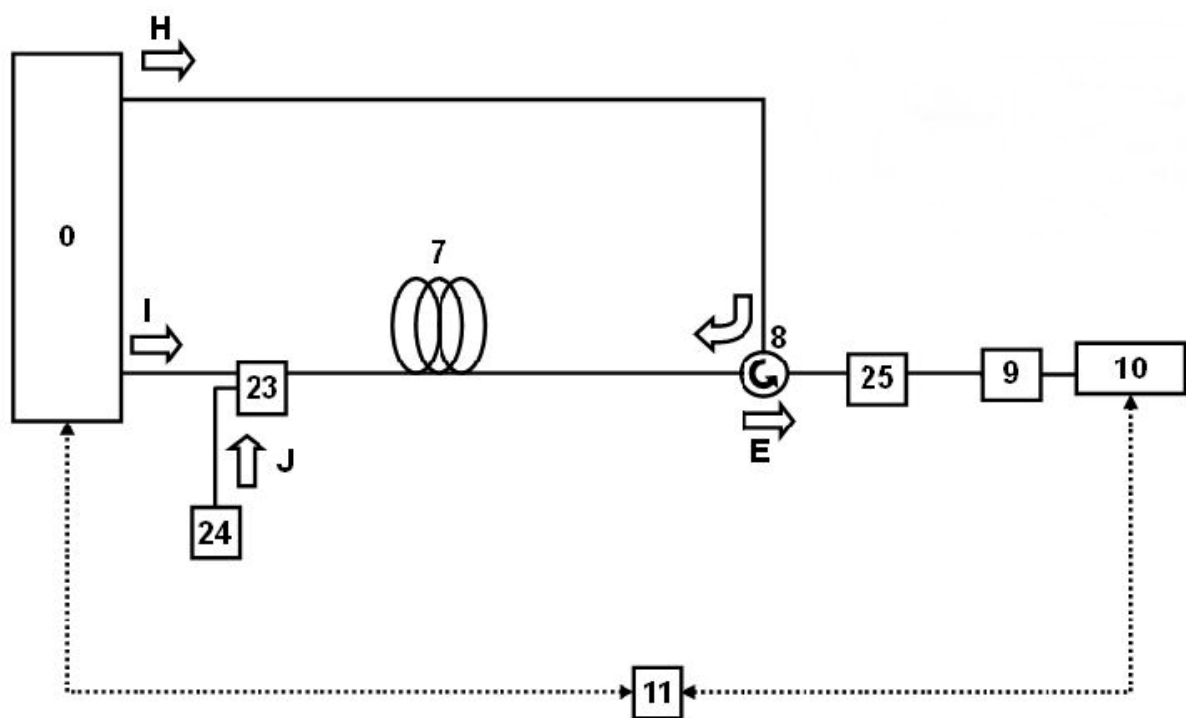


Fig. 10

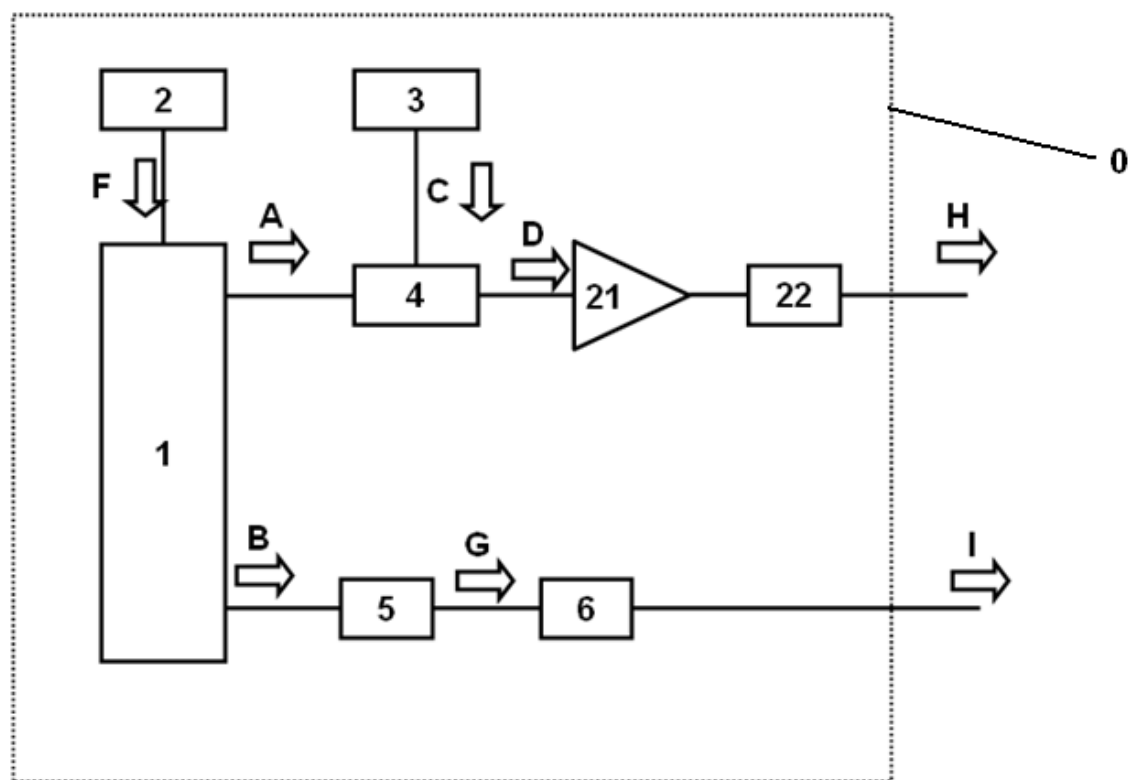


Fig. 11

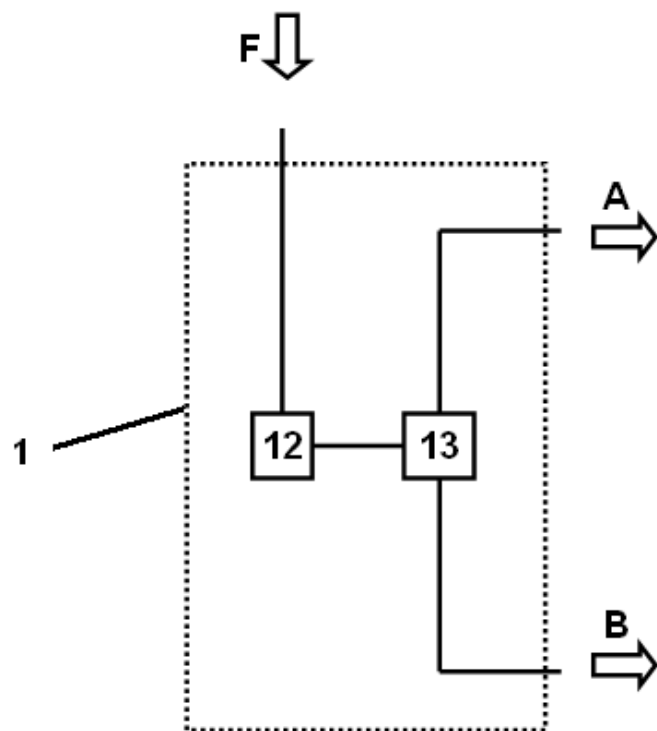


Fig. 12

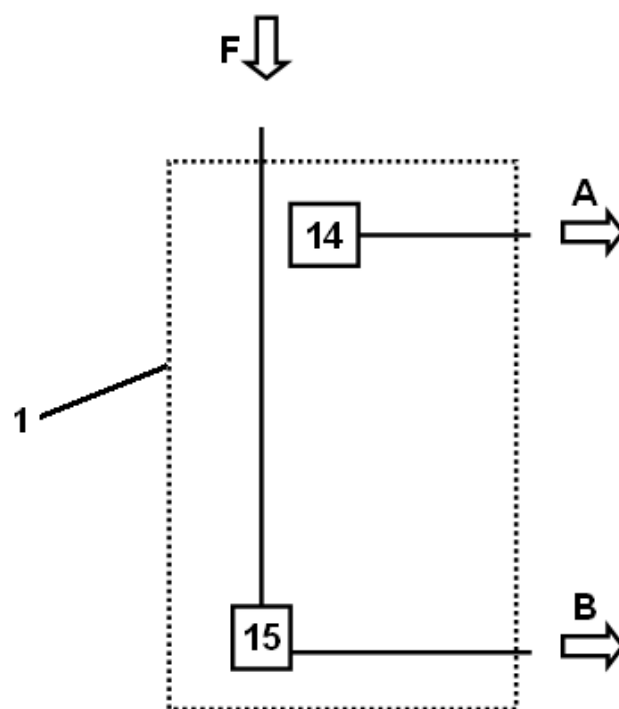


Fig. 13

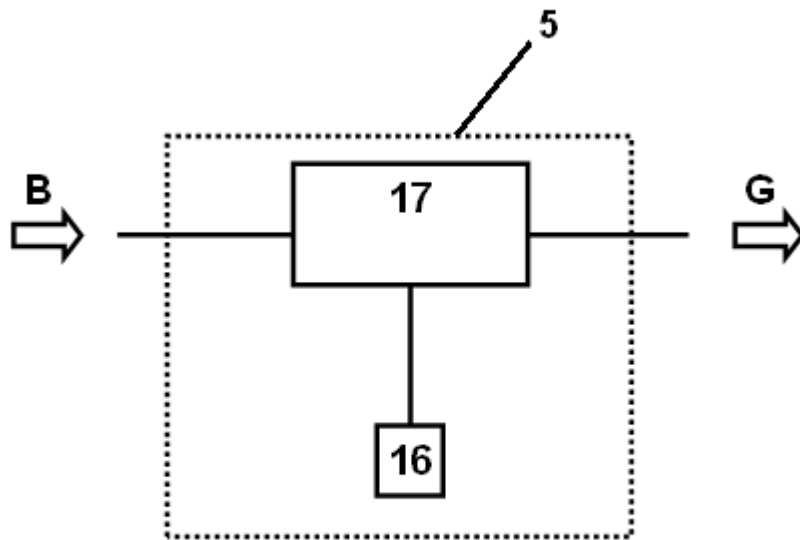


Fig. 14

c ↓

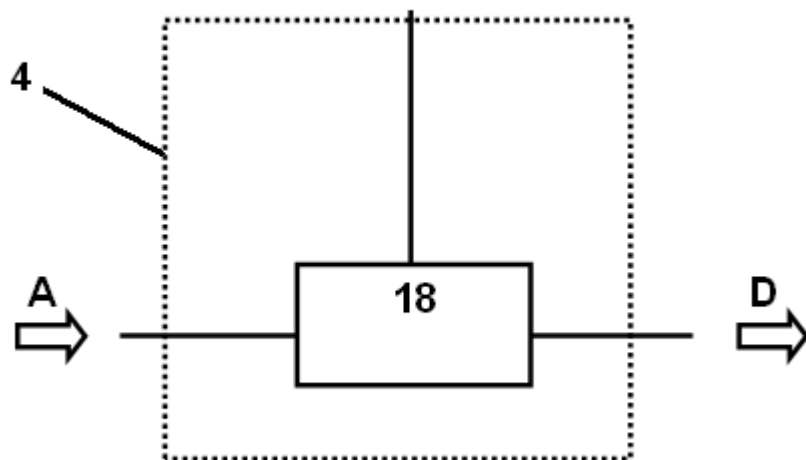


Fig. 15

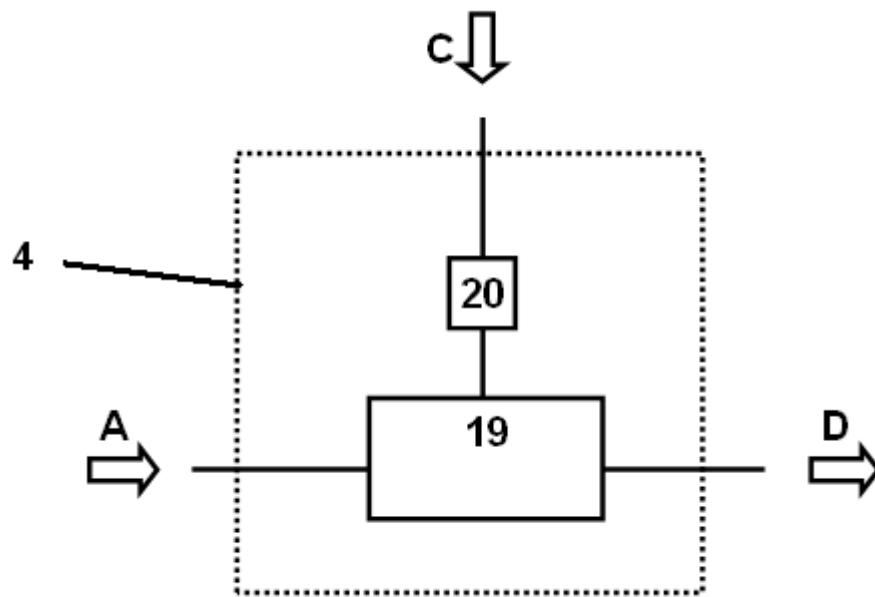


Fig. 16



- ②① N.º solicitud: 201430832
②② Fecha de presentación de la solicitud: 30.05.2014
③② Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

⑤① Int. Cl.: **G01D5/353** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑤⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	EP 2708856 A1 (UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA) 19.03.2014, todo el documento.	1-14
A	URRICELQUI, J., ZORNOZA, A., SAGUES, M. & LOAYSSA, A.: "Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation". OPTICS EXPRESS 26942, Vol. 20, Nº 24, 19 de noviembre de 2012.	1-14
A	URRICELQUI, J., SAGUES, M. & LOAYSSA, A.: "BOTDA measurements tolerant to non-local effects by using a phase-modulated probe wave and RF demodulation". OPTICS EXPRESS 17186, Vol. 21, Nº 14, 15 de Julio de 2013.	1-14
A	WO 2012101592 A1 (RAMOT AT TEL AVIV UNIVERSITY LTD.) 02.08.2012, todo el documento.	1-14
A	US 20130011144 A1 (AMIRI FARAHANI, M. et al.) 10.01.2013, todo el documento.	1,11

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones

☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe
17.06.2015

Examinador
Ó. González Peñalba

Página
1/4

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01D, G01L, G01K, G01M

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, INSPEC

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 17.06.2015

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones 1-14	SI
	Reivindicaciones	NO
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones 1-14	SI
	Reivindicaciones	NO

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	EP 2708856 A1 (UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA)	19.03.2014

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Se ha considerado, dentro del límite de tiempo establecido al efecto, que la invención definida en las reivindicaciones 1-14 de la presente Solicitud tiene novedad y actividad inventiva por no estar incluida en el estado de la técnica ni poder deducirse de este de un modo evidente por un experto en la materia.

Se han encontrado en el estado de la técnica numerosos dispositivos y métodos para la medida de la distribución de magnitudes físicas en una fibra óptica mediante la metodología BOTDA. Así, por ejemplo, el documento D01, citado en el Informe sobre el Estado de la Técnica (IET) con la categoría A, como mero reflejo del estado del sector de análisis BOTDA en fibra óptica, y considerado el antecedente tecnológico más próximo al objeto definido en la reivindicación primera de esta Solicitud, describe un aparato, y su método de funcionamiento correspondiente, que, como la invención, permite la mejora de la relación entre señal y ruido sin aumentar el tiempo de medición ni reducir la precisión del sensor por la aparición de efectos no locales. El aparato utiliza una señal de bombeo pulsada y una señal de prueba modulada ópticamente cuya interacción por amplificación de Brillouin se recoge para obtener datos de las magnitudes medidas en la fibra, pero, a diferencia de dicha primera reivindicación, tal modulación no se realiza en longitud de onda, sino, según un aspecto preferido de este documento D01, mediante un modulador óptico de banda lateral única o un modulador de fase. Esta diferencia es esencial puesto que tiene un efecto técnico distinto que permite solventar problemas no resueltos, ni aun planteados, en D01, y, por tanto, confiere a dicha primera reivindicación novedad y actividad inventiva de acuerdo con los Artículos 6 y 8 de la vigente Ley de Patentes.

Un razonamiento análogo puede hacerse respecto de la reivindicación 11, que expresa, con el formalismo de un método, el modo de funcionamiento del sensor definido en las reivindicaciones de dispositivo. La reivindicación 11 tiene también, en consecuencia, novedad y actividad inventiva, así como las restantes reivindicaciones, dependientes directa o indirectamente de estas dos analizadas y que, por tanto, han de interpretarse como añadidas a ellas.