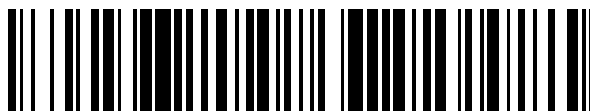


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 625 655**

51 Int. Cl.:

G01D 5/353 (2006.01)

G01L 1/24 (2006.01)

G01N 21/47 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **22.12.2010** **PCT/EP2010/070585**

87 Fecha y número de publicación internacional: **28.06.2012** **WO12084040**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **22.12.2010** **E 10795727 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.03.2017** **EP 2656014**

54 Título: **Método y aparato de medición optoelectrónica de Brillouin**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la
traducción de la patente:
20.07.2017

73 Titular/es:

OMNISENS S.A. (100.0%)
Riond-Bosson 3
1110 Morges, CH

72 Inventor/es:

LE FLOCH, SÉBASTIEN

74 Agente/Representante:

CURELL AGUILÁ, Mireia

ES 2 625 655 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y aparato de medición optoelectrónica de Brillouin.

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un método y un dispositivo de medición optoelectrónica. En particular, aunque no de forma exclusiva, la presente invención se refiere a un método y un dispositivo de medición optoelectrónica que se pueden usar para monitorizar características físicas de una estructura de ingeniería.

10 Descripción de la técnica relacionada

En muchos campos de aplicación, como tuberías, cables de alimentación o aplicaciones submarinas, el uso de aparatos de medición para monitorizar continuamente parámetros estructurales y/o funcionales es bien conocido. Los aparatos de medición se pueden aplicar también al sector de la ingeniería civil, y, en particular, en el campo de la construcción de estructuras de grandes dimensiones.

Los aparatos de medición se usan comúnmente para controlar con el paso del tiempo la tendencia de la temperatura o de la deformación, es decir, de la medición geométrica del cambio de forma o alargamiento resultante de esfuerzos y que definen la cantidad de estiramiento o compresión a lo largo de la fibra, de la estructura respectiva. De forma más detallada, estos aparatos de medición son aptos para aportar información de carácter local, y, por lo tanto, se pueden usar para monitorizar, en función del tiempo, la temperatura o la deformación asociada a una pluralidad de partes y/o de componentes de la estructura de ingeniería a monitorizar, proporcionando información útil sobre fugas, movimiento de tierras, deformación, etcétera, de la estructura.

Entre los aparatos de medición usados para monitorizar el estado de estructuras de ingeniería o arquitectónicas, tienen una gran importancia los dispositivos optoelectrónicos que se basan en fibras ópticas. En particular, estos aparatos comprenden normalmente un dispositivo de medición electrónica, provisto de una sonda de fibra óptica que, habitualmente, es del orden de unas cuantas decenas de kilómetros. Durante su uso, esta fibra óptica se acopla de manera estable, y se mantiene sustancialmente en contacto, con partes o componentes de la estructura de ingeniería, cuyos parámetros físicos respectivos serán monitorizados. Por ejemplo, esta fibra óptica puede discurrir a lo largo de las tuberías de un oleoducto, o se puede insertar en un pilar de hormigón de un edificio, de manera que puede utilizarse para presentar la tendencia local de la temperatura o de la deformación de estas estructuras. En otras palabras, estos dispositivos optoelectrónicos comprenden sensores de fibra óptica, es decir, sensores que usan la fibra óptica como elemento de captación. Los sensores de fibra óptica pueden ser:

- sensores puntuales, en donde se hace que sea sensible a la temperatura y/o la deformación solamente una posición a lo largo de la fibra óptica;
- sensores cuasi-distribuidos o sensores multiplexados, en donde muchos sensores puntuales se conectan entre sí por medio de una fibra óptica y se multiplexan a lo largo de la fibra usando una longitud de onda diferente de luz para cada sensor; o
- sensores distribuidos o completamente distribuidos, en donde la fibra óptica es un sensor lineal largo ininterrumpido.

Estos instrumentos de medición basados en fibras ópticas se pueden subdividir en varios tipos, en función tanto de la(s) magnitud(es) física(s) para cuya medición son aptos como del principio físico usado para detectar esta(s) magnitud(es).

Cuando un pulso de luz potente de longitud de onda λ_0 (o frecuencia $\nu_0 = c/\lambda_0$, en donde c es la velocidad de la luz), conocido como bombeo, se propaga a través de una fibra óptica, una pequeña cantidad de la potencia incidente se dispersa en todas las direcciones debido a no homogeneidades locales dentro de la fibra óptica. Si la fibra óptica es una fibra monomodo (SMF), es decir, una fibra diseñada para transportar solamente un único rayo de luz (modo), entonces solo es relevante la dispersión hacia delante y hacia atrás puesto que la luz dispersada en otras direcciones no es guiada. Tiene un interés particular la retrodispersión puesto que se propaga de vuelta hacia el extremo de la fibra en donde se lanzó originalmente la luz de láser hacia la fibra óptica.

Los procesos de dispersión se originan por impurezas de los materiales (dispersión de Rayleigh), ondas acústicas excitadas térmicamente (dispersión de Brillouin) o vibraciones atómicas o moleculares (dispersión de Raman).

Las técnicas de captación con distribución se basan en el análisis de la señal retrodispersada creada en una

posición diferente a lo largo de la fibra.

- Dispersión de Rayleigh es la interacción de un pulso de luz con impurezas de material. Es la mayor de las tres señales retrodispersadas en fibras de sílice y tiene la misma longitud de onda que la luz incidente. La dispersión de Rayleigh es el principio físico que subyace tras el reflectómetro óptico en el dominio del tiempo (OTDR).
- Dispersión de Brillouin es la interacción de un pulso de luz con ondas acústicas térmicamente excitadas (denominadas también fonones acústicos). Las ondas acústicas, a través del efecto elasto-óptico, modifican de manera ligera, local y periódica el índice de refracción. La retícula correspondiente en movimiento refleja de vuelta una pequeña cantidad de la luz incidente y desplaza su frecuencia (o longitud de onda) debido al Efecto Doppler. El desplazamiento depende de la velocidad acústica en la fibra, mientras que su signo depende de la dirección de propagación de las ondas acústicas progresivas. Así, se crea una retrodispersión de Brillouin en dos frecuencias diferentes en torno a la luz incidente, denominadas las componentes Stokes y Anti-Stokes. En fibras de sílice, el desplazamiento de frecuencia de Brillouin es del orden de los 10 GHz (0,1 nm en longitudes de onda del orden de 1.550 nm) y depende de la temperatura y la deformación.
- Dispersión de Raman es la interacción de un pulso de luz con vibraciones atómicas o moleculares excitadas térmicamente (fonones ópticos), y es la más pequeña de las tres señales retrodispersadas en cuanto a intensidad. La dispersión de Raman presenta un elevado desplazamiento de frecuencia de típicamente 13 THz en fibras de sílice, que se corresponde con 100 nm a una longitud de onda de 1.550 nm. La intensidad de la componente Anti-Stokes Raman depende de la temperatura, mientras que la componente Stokes es prácticamente insensible a la temperatura.

La figura 1 muestra esquemáticamente un espectro de la luz retrodispersada generada en cada punto a lo largo de la fibra óptica cuando se lanza una luz de láser en la fibra óptica. El pico más alto, en la longitud de onda λ_0 , correspondiente a la longitud de onda de un láser monomodo, es el pico de Rayleigh, que se origina por impurezas del material. Las denominadas componentes Stokes y las denominadas componentes Anti-Stokes son los picos en el lado derecho, respectivamente el lado izquierdo, del pico de Rayleigh. El pico de Raman anti-Stokes, que se origina por vibraciones atómicas o moleculares, tiene una amplitud que depende de la temperatura T. Los picos de Brillouin Stokes y anti-Stokes, generados por ondas acústicas excitadas térmicamente, tienen una frecuencia que depende de la temperatura T y de la deformación ϵ .

El desplazamiento de Brillouin (posición de la longitud de onda con respecto a la luz de láser original) es una propiedad física intrínseca del material de la fibra, y aporta una información importante sobre la distribución de la deformación y la temperatura, experimentada por una fibra óptica.

La información de frecuencia de la luz retrodispersada por Brillouin se puede aprovechar para medir la información local de temperatura o deformación a lo largo de una fibra óptica. Como elementos de captación pueden utilizarse fibras y cables de telecomunicaciones, monomodo, normalizados o especiales. A la técnica de medir la temperatura o deformación local se le hace referencia como técnica basada en la frecuencia, puesto que la información de temperatura o deformación está contenida en el desplazamiento de frecuencia de Brillouin. Es inherentemente más fiable y más estable que cualquier técnica basada en la intensidad, basada en el efecto Raman, que son sensibles a derivas, pérdidas y variaciones de atenuaciones. Como consecuencia, la técnica basada en Brillouin ofrece una estabilidad a largo plazo y una gran inmunidad a la atenuación. Además, la dispersión de Brillouin debe cumplir una condición de fase muy estricta, haciendo que la interacción se manifieste como una resonancia espectralmente estrecha, lo cual da como resultado una medición precisa. A este proceso de propagación de un pulso de luz en la fibra óptica y de medición de la señal de retrodispersión se le denomina Dispersión de Brillouin Espontánea (SPBS): es un proceso débil que conduce a una luz dispersada de baja intensidad.

El proceso de dispersión de Brillouin tiene la particularidad de que puede ser estimulado por una segunda señal óptica - denominada sonda - además de la primera señal óptica - denominada bombeo - que generó la dispersión, siempre que la sonda cumpla condiciones específicas. Esta propiedad es especialmente interesante para aplicaciones de captación y se puede materializar mediante el uso de una sonda que se propaga a la contra con respecto al bombeo. La estimulación llega al máximo cuando las frecuencias (o longitudes de onda) de bombeo y de la sonda están separadas exactamente por el desplazamiento de Brillouin. En este caso, la energía transferida desde el bombeo a la sonda (o viceversa, en función de la señal de retrodispersión Stokes/antistokes seleccionada) da como resultado una gran potenciación de la intensidad retrodispersada y, por lo tanto, una mayor Relación Señal/Ruido (SNR). Esto puede considerarse como un fenómeno de resonancia, en donde se produce una amplificación de la potencia de la sonda a costa del bombeo cuando se cumple la condición de resonancia, es decir, cuando la diferencia de frecuencia entre el bombeo y la sonda coincide con la frecuencia de Brillouin local.

En las soluciones conocidas, el bombeo está compuesto por pulsos ópticos de longitud de uno o más

nanosegundos, y la sonda por una luz de Onda Continua - CW, tal como se describirá.

A los dispositivos de medición optoelectrónica basados en la Retrodispersión de Brillouin Estimulada (SBS) se les conoce como Analizadores Ópticos de Brillouin en el Dominio del Tiempo o BOTDA; por oposición a los Reflectómetros Ópticos de Brillouin en el dominio del tiempo (BOTDR) los cuales se basan en la retrodispersión de Brillouin espontánea (SPBS).

Un dispositivo de medición optoelectrónica basado en BOTDA lleva a cabo normalmente un análisis en el dominio de la frecuencia y un análisis en el dominio del tiempo.

- Análisis en el dominio de la frecuencia: la información de temperatura/deformación está codificada en el desplazamiento de frecuencia de Brillouin. Un barrido de la frecuencia de la sonda con respecto al bombeo mientras se monitoriza la intensidad de la señal retrodispersada, permite hallar el pico de ganancia de Brillouin, y, por lo tanto, el desplazamiento de Brillouin correspondiente, a partir de lo cual puede calcularse la temperatura o la deformación.

Esto se logra usando dos fuentes ópticas, por ejemplo, láseres, o una sola fuente óptica a partir de la cual se crean tanto la señal de bombeo como la señal de sonda. En este caso, se utiliza un modulador óptico (típicamente un componente de telecomunicaciones) para realizar barridos de la frecuencia de sonda de una manera controlada.

- Análisis en el dominio del tiempo: debido al carácter por pulsos del bombeo, la interacción del bombeo/sonda tiene lugar en una posición diferente a lo largo de la fibra en momentos diferentes. Para cualquier posición dada, la parte de la señal de sonda que interacciona con el bombeo llega a un detector después de un retardo de tiempo igual a dos veces el tiempo de desplazamiento desde la entrada de la fibra a la posición especificada. Así, la monitorización de la intensidad retrodispersada con respecto al tiempo, mientras se conoce la velocidad de la luz en la fibra, proporciona información sobre la posición en la que tiene lugar la dispersión.

Los dispositivos comerciales típicos de medición optoelectrónica basados en BOTDA, pueden medir la temperatura/deformación sobre 30 km de fibra con una resolución espacial de 1 m (equivalente a 30.000 sensores independientes distintos). La resolución en la temperatura es típicamente <1 K. Los límites vienen dados por la pérdida lineal de la fibra y por la presencia de otros efectos no lineales que tamizan la interacción y que evitan que cualquier aumento de potencia compense la pérdida.

No obstante, es importante ofrecer un dispositivo de medición optoelectrónica con un alcance de 100 km y una resolución espacial métrica. La mayoría de las soluciones propuestas no es satisfactoria puesto que requiere un hardware complejo alimentado de forma remota que no constituye una solución atractiva.

Una codificación inteligente que haga uso de una secuencia de pulsos puede mejorar la relación de señal/ruido, manteniéndose la totalidad del resto de características de medición (tiempo de medición, resolución espacial y precisión de temperatura). Con pérdidas de fibra convencionales, esto se corresponde ya con la medición de temperatura/deformación sobre 50 km de fibra. Esta demostración se basó en una codificación denominada SIMPLEX, usada de forma común en otros campos de la ingeniería. La implementación de una codificación de este tipo no requiere ninguna modificación del hardware del dispositivo, simplemente un cambio en el software que controla el dispositivo y un consumo sustancial en cuanto a cálculos, de manera que puede considerarse como una modernización con un coste añadido muy bajo. No obstante, el código SIMPLEX es eficiente cuando está compuesto por señales de "retorno a cero" (RZ), las cuales son más difíciles de gestionar que las señales "sin retorno a cero" (NRZ), lo cual limita su practicidad.

Para mejorar la relación señal/ruido de las señales adquiridas, se conoce la codificación por intensidad de la primera y la segunda señales de radiación electromagnética utilizadas en las técnicas basadas en la SBS. No obstante, dicha codificación no proporciona una solución satisfactoria en la medida en la que la relación señal/ruido de las señales adquiridas sigue sin aumentar de manera significativa. Por consiguiente, todavía existe un desequilibrio significativo entre la resolución espacial y la precisión de las mediciones realizadas de temperatura y deformación.

El documento WO 10058438 A describe un aparato optoelectrónico de medición para monitorizar características físicas de una estructura, basado en la dispersión de Brillouin estimulada. En este caso, dicho aparato comprende una(s) fuente(s) óptica(s) para emitir una primera y una segunda radiaciones que se propagan en direcciones opuestas a lo largo de la fibra. El aparato se basa en señales codificadas en el tiempo (Simplex).

El documento GB 2243210 se refiere a un sensor distribuido de fibra óptica que utiliza la retrodispersión de Brillouin estimulada (SBS) para detectar la temperatura, la deformación y cualquier parámetro externo que

afecte a la frecuencia o la fase o la amplitud de la retrodispersión óptica.

El documento FR 2 710 150 se refiere a un dispositivo para medir la dispersión de Brillouin, diseñado con el fin de generar una señal de bombeo y una señal de prueba que se inyectan en un extremo de la fibra. El valor de la dispersión de Brillouin en la fibra permite la determinación de parámetros físicos externos a la fibra. El documento describe solamente la codificación de señales en el tiempo.

El documento EP 0 887 624 se refiere a un sistema de medición de la distorsión de fibras ópticas (es decir, un dispositivo y un método) que se proporciona para llevar a cabo una medición sobre una fibra óptica medida, que se construye conectando alternativamente dos tipos de fibra óptica cuyos desplazamientos de frecuencia de Brillouin son diferentes entre sí. En este caso, el sistema suministra secuencialmente pulsos ópticos a la fibra óptica medida, al mismo tiempo que cambia las frecuencias de su iluminación, de manera que, desde la fibra óptica medida, se da salida a haces de retrodispersión de Brillouin. Primero, el sistema suministra un pulso óptico que tiene una frecuencia de iluminación preestablecida, a la fibra óptica medida, de un estado sin distorsión, de manera que el dispositivo produce datos iniciales que representan variaciones, referidas al tiempo, de la intensidad de iluminación correspondiente a la luz de retrodispersión de Brillouin a la que se da salida desde la fibra óptica medida. A continuación, el sistema mide una forma de onda de variaciones referidas al tiempo, que representa la intensidad de iluminación de la luz de retrodispersión de Brillouin, a la cual se da salida desde la fibra óptica medida a la que se suministra el pulso óptico de la frecuencia de iluminación preestablecida. Comparando la forma de onda medida de variaciones referidas al tiempo con los datos iniciales, el sistema determina la aparición de distorsiones en la fibra óptica medida. Después de esto, el sistema discrimina un tipo de distorsión, el cual se corresponde con una dilatación o una contracción, basándose en una relación entre desplazamientos de frecuencia de Brillouin, que se calculan respectivamente con relación a un punto de detección y su punto adyacente sobre la forma de onda medida de variaciones referidas al tiempo.

La técnica de reflectometría óptica en el dominio del tiempo con barrido de frecuencia, del documento US nº 2010/014071, incluye el lanzamiento de una pluralidad de pulsos de interrogación hacia una fibra óptica con una pluralidad de frecuencias portadoras ópticas. Se detecta una señal de retrodispersión de Rayleigh para cada pulso de interrogación en función del tiempo, entre el lanzamiento del pulso y la detección de la señal de retrodispersión. La señal de retrodispersión de Rayleigh, resuelta en el tiempo, en cada frecuencia óptica, puede examinarse a continuación para determinar una distribución de un parámetro físico a lo largo de la fibra óptica.

Por lo tanto, teniendo en cuenta la descripción anterior, el problema de tener disponible un método y un aparato de medición optoelectrónica, que se utilice para medir simultáneamente el cambio, a lo largo del tiempo, tanto de la temperatura local como de la deformación local de una estructura de ingeniería o arquitectónica, está resuelto en la actualidad de una manera insatisfactoria, y representa un desafío interesante para el solicitante, el cual tiene el objetivo de proporcionar un aparato de medición que, al mismo tiempo, sea eficiente, económico y fiable.

Existe una necesidad de mejorar la eficiencia de las mediciones optoelectrónicas, que se corresponde con un aumento del alcance con la resolución espacial conocida, o, en otras palabras, manteniendo el alcance y aumentando la resolución espacial.

Es una finalidad de la presente invención sortear o mitigar una o más de las desventajas antes mencionadas.

Breve resumen de la invención

Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método de medición optoelectrónica de Brillouin que comprende la etapa de, proporcionar una señal en una fibra óptica, en donde dicha señal se codifica en tiempo-frecuencia, en donde dicha señal codificada en tiempo-frecuencia (s1) es una señal de bombeo óptica que comprende una secuencia de palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos pulsos, mostrando cada pulso de una palabra de código particular una frecuencia diferente.

En una forma de realización, la señal que se codifica en tiempo-frecuencia puede estar constituida por dos o más longitudes de onda, codificándose cada una de ellas en frecuencia-tiempo.

El método de la invención se aplica a un sistema de BOTDA, así como a un sistema de BOTDR. En ambos casos, la señal codificada en tiempo-frecuencia es la señal de bombeo. En un sistema de BOTDA, la señal de sonda no se codifica en tiempo-frecuencia.

En este contexto, una señal "codificada en tiempo-frecuencia" significa una señal que comprende una secuencia de palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos pulsos o letras de código, mostrando cada pulso o letra de código de una palabra de código una frecuencia diferente.

Cada letra de código es de hecho una señal de pulso, que tiene una amplitud, una frecuencia y una duración temporal. La amplitud puede ser cero o un valor fijo, en lo sucesivo normalizado a 1; la frecuencia es diferente para cada pulso, tal como se describirá, y la duración temporal, en una forma de realización preferida, es del orden de nanosegundos. Una palabra de código, que comprende por lo menos dos letras de código, no es necesariamente una señal de "retorno a cero" (RZ).

Según una forma de realización, el método de la invención comprende además las siguientes etapas

- definir por lo menos dos palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos letras de código, estando asociada cada letra de código de una palabra de código a una frecuencia diferente
- construir una matriz de codificación S usando dichas por lo menos dos palabras de código definidas
- codificar en tiempo-frecuencia una señal usando dicha matriz de codificación S
- proporcionar dicha señal en una fibra óptica de un sistema óptico basado en un efecto de Brillouin (tanto BOTDA como BOTDR)
- medir la respuesta de la fibra óptica a la señal y construir la matriz medida correspondiente S'.
- construir una matriz inversa S^{-1} de la matriz de codificación S
- sobre la base de dicha medición y de dicha matriz inversa, decodificar dicha respuesta de la fibra óptica.

En la medida en la que la señal de bombeo usada en el método de medición optoelectrónica se codifica en tiempo-frecuencia, resulta más sencilla de diferenciar con respecto al ruido en comparación con señales no codificadas o codificadas en intensidad; consecuentemente, se logra una mayor relación de señal/ruido. Como consecuencia de la mayor relación de señal/ruido, se obtiene una mejora de la resolución espacial, y se incrementa la distancia sobre la cual pueden medirse y monitorizarse condiciones de temperatura o deformación.

Ventajosamente, la mejora de la relación de señal/ruido se logra sin ninguna penalización sobre el tiempo de adquisición y con un coste de hardware mínimo.

Ventajosamente, el método según la invención minimiza posibles derivas en mediciones de temperatura/deformación. Por otra parte, debido al amplio intervalo de las frecuencias codificadas, permite un agotamiento menor de la señal, en comparación con códigos monofrecuenciales, por ejemplo, el código Simplex.

Por otra parte, cuanto mayor sea la longitud L de una palabra de código, mayor será la ganancia de codificación en comparación con las soluciones conocidas. Puesto que, tal como se describirá, la matriz S presenta una simetría que es una rotación de ciertas sub-matrices M, esta simetría permite reducir al mínimo el ruido después de la decodificación.

Según una forma de realización, el método de la invención aplicado a un sistema óptico que está configurado para medir un Efecto de Brillouin estimulado (BOTDA), comprende además las siguientes etapas:

- transmitir una primera señal en una primera dirección a lo largo de una fibra óptica, en donde la primera señal es una señal codificada en tiempo-frecuencia;
- transmitir una segunda señal en una segunda dirección a lo largo de la fibra óptica, de tal manera que la primera y la segunda señales interactúen dentro de la fibra óptica y formen una señal combinada;
- sondear la fibra óptica en uno o más puntos de sondeo para medir la señal combinada.

Según otra forma de realización, el método de la invención aplicado a un sistema óptico que está configurado para medir un efecto de Brillouin espontáneo (BOTDR), comprende además las siguientes etapas

- transmitir una primera señal en una primera dirección a lo largo de una fibra óptica, en donde la primera señal es una señal codificada en tiempo-frecuencia
- sondear la fibra óptica en uno o más puntos de sondeo para medir una señal retrodispersada.

Según el método de la invención, es posible identificar irregularidades en la fibra óptica sobre la base de una

o más características de la señal combinada medida. Sondeando la fibra óptica, es posible medir una componente de señal codificada en el tiempo y una componente de señal codificada en frecuencia, de una señal combinada. A continuación, se determina la condición de resonancia basándose en la componente de señal codificada en frecuencia, medida.

La invención se refiere también a un dispositivo de medición optoelectrónica, apto para su uso en un método de medición optoelectrónica de Brillouin, comprendiendo el dispositivo, medios para proporcionar una señal codificada en tiempo-frecuencia en una fibra óptica, en donde dicha señal codificada en tiempo-frecuencia (s1) es una señal de bombeo óptica que comprende una secuencia de palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos pulsos, mostrando cada pulso de una palabra de código particular una frecuencia diferente.

El dispositivo según la invención comprende un generador de frecuencia apto para codificar una señal en tiempo-frecuencia usando una matriz de codificación S construida partiendo de la definición de por lo menos dos palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos letras de código, estando asociada cada letra de código de una palabra de código a una frecuencia diferente.

En una forma de realización, el generador de frecuencia está dispuesto para cambiar la frecuencia a un ritmo igual a la duración de una letra de código, que puede ser del orden de nanosegundos.

Ventajosamente, el dispositivo según la invención permite típicamente una resolución espacial de 1 m con un alcance conocido (50 km) o hasta típicamente un alcance de 100 km con una resolución espacial conocida (5 m).

La resolución espacial del método depende de la longitud temporal de las letras de código que forma la señal codificada en tiempo-frecuencia.

Breve descripción de los dibujos

A continuación se describirá una forma de realización de la invención únicamente a título de ejemplo, en referencia a los dibujos adjuntos, en los cuales,

la figura 1 muestra una vista de los componentes de luz retrodispersada de una luz lanzada en una fibra óptica monomodo.

la figura 2 es un esquema que ilustra una fibra óptica en la cual se lleva a cabo el método de medición optoelectrónica, según la presente invención, usando un dispositivo de medición optoelectrónica de acuerdo con la presente invención, aplicado al BOTDA.

la figura 3 es un esquema que ilustra un ejemplo de un dispositivo de medición optoelectrónica según la presente invención, aplicado al BOTDA.

la figura 4 es un esquema que ilustra un ejemplo de un dispositivo de medición optoelectrónica según la presente invención, aplicado a un BOTDR.

la figura 5 es un ejemplo de posibles palabras de código correspondientes a un código que tiene una longitud $L = 5$.

la figura 6 es un ejemplo de la primera palabra de código de la figura 5.

la figura 7 es un ejemplo de matriz de codificación S construida partiendo de las palabras de código de la figura 5.

la figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra las etapas implicadas cuando se usa un dispositivo de medición electrónica de acuerdo con la presente invención, para detectar variaciones de temperatura y de deformación de una fibra óptica.

Descripción detallada de posibles formas de realización de la invención

La figura 2 es un esquema que ilustra una fibra óptica 100 en la cual se lleva a cabo el método de medición optoelectrónica, de acuerdo con la presente invención, usando un dispositivo de medición optoelectrónica 1 según la presente invención.

La figura 2 se refiere a un BOTDA. No obstante, el método y el dispositivo según la invención no se limitan a un BOTDA, sino que se pueden aplicar también a un BOTDR, y, en general, a cualquier sistema óptico basado en un efecto de Brillouin.

- El dispositivo 1 comprende una fuente óptica, por ejemplo, un láser, que funciona a una longitud de onda determinada, por ejemplo, a 1.550 nm. Le sigue un procesamiento de señales ópticas 10, dispuesto para generar la primera señal s1, o bombeo, que se codifica en tiempo-frecuencia, y la segunda señal s2, o sonda. En otra forma de realización, dos fuentes ópticas, por ejemplo, dos láseres, generan por separado s1 y s2.
- Un filtro de Multiplexado por División de Longitud de Onda (WDM) 20 separa s1 y s2. En una forma de realización preferida, dos conmutadores de 1 x N 30 pueden gestionar N canales, donde N es un número entero superior a 1, por ejemplo, 2.
- En una forma de realización, la fibra óptica 100 comprende dos fibras - una fibra de retorno y una fibra de captación - conectadas entre sí por un conector o un empalme, estando conectada cada fibra a un canal ch1 ó ch2 de cada conmutador 30.
- Un fotodetector (PD) 40 está dispuesto para detectar la señal de sonda retrodispersada s2' en función del tiempo, la cual es digitalizada y procesada por procesamiento digital A/D rápido 50.
- En una forma de realización preferida, la fuente óptica es un láser DFB (Realimentación Distribuida).
- Un procesamiento de señales ópticas 10 puede permitir la codificación de la primera señal s1 o bombeo en tiempo-frecuencia. El dispositivo de medición optoelectrónica puede comprender un generador de frecuencia apto para codificar en tiempo-frecuencia la señal, usando la matriz de codificación S.
- En una forma de realización, el generador de frecuencia podría comprender un láser de DFB 60 como fuente óptica, un modulador electro-óptico (EOM) 16 accionado por una fuente de RF, un mezclador y un Sintetizador Digital Directo 14 (DDS); el DDS se podría conectar a una FPGA para gestionar dichas palabras de código.
- El modulador 16 se podría polarizar para funcionar en un esquema de supresión de portadora, de manera que la banda lateral inferior o superior, dependiendo de la modulación de configuración de pérdida/ganancia de Brillouin, se puede usar como señal de bombeo s1 después de suprimir la banda lateral superior o inferior utilizando, por ejemplo, una Red de Bragg en Fibra (FBG). En una forma de realización, se podría usar un amplificador, por ejemplo, un Amplificador de Fibra Dopada con Erblio (EDFA), para amplificar s1.
- La luz proveniente de la misma fuente óptica 60 se usa para sintetizar la segunda señal s2 ó sonda. El dispositivo puede comprender un aislador 70 para permitir la transmisión de la segunda señal s2 en solamente una dirección. Un circulador óptico 80 permite gestionar las direcciones de s1 y s2.
- El dispositivo de medición optoelectrónica puede comprender unos medios de medición aptos para medir la respuesta de la fibra óptica a dicha señal. Los medios de medición podrían ser un fotodetector (PD) 40, dispuesto para detectar la señal de sonda retrodispersada s2' en función del tiempo.
- Una FPGA o un DDS son ejemplos de medios de cálculo aptos para definir por lo menos dos palabras de código o secuencias, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos letras de código, estando asociada cada letra de código de una palabra de código a una frecuencia diferente y para construir una matriz de codificación S usando las por lo menos dos palabras de código definidas.
- La figura 3 muestra un ejemplo simplificado de un sistema de BOTDA de acuerdo con la invención. La invención también se puede aplicar a un sistema de BOTDR, ilustrado en la figura 4. Según esta forma de realización de la invención, el dispositivo de medición incluye una fuente óptica 60, un modulador electro-óptico (EOM) 16 accionado por una fuente de RF, un mezclador y un Sintetizador Digital Directo 14 (DDS) dispuesto para lanzar una señal codificada en tiempo-frecuencia (s1) hacia la fibra 100, tal como se ha explicado anteriormente. El circulador óptico 80 y el fotodetector 40 están dispuestos para medir una señal retrodispersada, generada por retrodispersión de Brillouin espontánea en la fibra 100.
- La longitud "L" de la palabra de código en tiempo-frecuencia, es decir, el número de sus letras de código, es igual al número de frecuencias que se pueden usar para codificar la señal en tiempo-frecuencia. En una forma de realización preferida, L es un número primo. En otra forma de realización, una de estas frecuencias puede aparecer como mucho dos veces en una palabra de código.
- En una forma de realización preferida, cada palabra de código contiene por lo menos una letra de código asociada a una frecuencia igual a un cero de la matriz S, correspondiente a una frecuencia en donde la ganancia de Brillouin es cero: en otras palabras, el número de letras de código asociadas a frecuencias diferentes a un cero de la Matriz S usada en cada palabra de código es igual a L - 1. La presencia de este cero es muy útil para invertir la matriz S y, a continuación, calcular S^{-1} .

Cada letra de código es una señal de pulso, que tiene una amplitud, una frecuencia y una duración temporal. La amplitud puede ser cero o un valor fijo, en lo sucesivo normalizado a 1; la frecuencia es diferente para cada pulso y la duración temporal, en una forma de realización preferida, es del orden de nanosegundos. Una palabra de código, que comprende por lo menos dos letras de código, no es necesariamente una señal de “retorno a cero” (RZ). Una señal “sin retorno a cero” (NRZ) es menos difícil de gestionar que una señal de RZ.

La figura 5 es un ejemplo de posibles palabras de código o secuencias de un código que tiene una longitud $L = 5$. Las expresiones “Pos[1], Pos[2],..., Pos[5]” indican la posición temporal de las letras de código o pulsos que forman una palabra de código, para aportar un orden temporal. En particular, Pos[5] sucede temporalmente a Pos[4], la cual sucede temporalmente a Pos[3], y así sucesivamente.

Si se toma la primera línea de la tabla de la figura 5, se obtiene una primera palabra de código, ilustrada en la figura 6, la cual está compuesta por cinco letras de código:

- en Pos[1] hay una primera letra de código correspondiente a una frecuencia f_1
- en Pos[2] hay una segunda letra de código correspondiente a una frecuencia f_2
- en Pos[3] hay una tercera letra de código correspondiente a una frecuencia f_4
- en Pos[4] hay una cuarta letra de código correspondiente a una frecuencia f_2
- en Pos[5] hay una quinta letra de código correspondiente a una frecuencia donde la ganancia de Brillouin es 0.

La longitud “L”, en este caso $L = 5$, de la palabra de código en tiempo-frecuencia, es decir, el número de sus letras de código, es igual al número de frecuencias (f_1 a f_5) que se pueden usar para codificar la señal en tiempo-frecuencia. En este caso, una de estas frecuencias puede aparecer como mucho dos veces en una palabra de código. Por ejemplo, en la palabra de código de la figura 6, la frecuencia f_2 aparece dos veces, en Pos[2] y Pos[4].

Cada palabra de código contiene por lo menos una letra de código asociada a una frecuencia correspondiente a una ganancia de Brillouin de cero. La presencia de este cero se usa para invertir la matriz S y, a continuación, calcular S^{-1} .

Las palabras de código en las líneas 2 a 5 de la figura 5 se obtienen girando verticalmente las frecuencias de cada posición temporal Pos[1] a Pos[4], de tal manera que cada palabra de código 2 a 5 comprende como mucho dos letras de código que tienen la misma frecuencia. En referencia, por ejemplo, a la Pos[1], columna C1, la primera palabra de código tiene, en esta posición, la frecuencia f_1 , la segunda palabra de código f_2 , la tercera palabra de código f_3 , la cuarta f_4 y la quinta f_5 .

Las siguientes palabras de código 6 a 10 se obtienen a partir de las palabras de código 1 a 5 girando la columna C1 y las siguientes columnas tal como se indica en la figura 5. Se aplica lo mismo a las palabras de código 11 a 15 y así sucesivamente.

La figura 7 es un ejemplo de matriz de codificación S construida partiendo de las palabras de código de la figura 5.

Ventajosamente, la matriz de codificación S contiene $L \times L$ submatrices diferentes M , es decir, L sub-matrices M , estando situada cada sub-matriz M , L veces en la matriz S de acuerdo con un criterio de rotación.

Cada sub-matriz M tiene unas dimensiones $L \times L$. La primera fila de la primera sub-matriz M es una representación de la primera letra de código de la primera palabra de código. En el ejemplo ilustrado en la figura 7, la primera línea de la primera sub-matriz M_1 es [1, 0, 0, 0, 0], lo cual indica que, en la posición Pos[1], la frecuencia de la letra de código es la primera frecuencia f_1 . La primera línea de la segunda sub-matriz M_2 , no ilustrada, es [0, 1, 0, 0, 0], lo cual indica que, en la posición Pos[2], la frecuencia de la letra de código es la segunda frecuencia f_2 . La primera línea de la tercera sub-matriz M_3 , no ilustrada, es [0, 0, 0, 1, 0], lo cual indica que, en la posición Pos[3], la frecuencia de la letra de código es la cuarta frecuencia f_4 , y así sucesivamente.

La primera línea de la matriz S es entonces una representación matricial de la palabra de código ilustrada en la figura 6.

La matriz S se obtiene a partir de diferentes rotaciones de las sub-matrices L tal como se ilustra en la figura 7.

Cuanto más larga sea la palabra de código L , más grande será la matriz S , por otra parte, cuanto mayor sea

L, más elevada será la ganancia de codificación en comparación con las soluciones conocidas, y, puesto que la matriz S presenta una simetría que es una rotación de sub-matrices M, esta simetría permite minimizar el ruido después de la decodificación.

- 5 El dispositivo de medición optoelectrónica puede comprender un decodificador, no ilustrado, apto para decodificar la respuesta de la fibra óptica basándose en la medición y en la matriz inversa S^{-1} .

10 La figura 8 es un diagrama de flujo que ilustra las etapas implicadas cuando se usa un dispositivo de medición optoelectrónica de acuerdo con la presente invención, para detectar temperatura y deformación de una fibra óptica.

Después del inicio, se fija la longitud de código L (etapa 1000). A continuación, se fijan las diferentes secuencias o palabras de código (etapa 2000). Se adquiere, a continuación, la respuesta de la fibra óptica, en el dominio del tiempo, para toda la longitud de la fibra óptica (etapa 3000). La adquisición se corresponde con el registro de la intensidad de la sonda en función del tiempo, la conversión de la información en información de distancia (Procesado y mapeo de distancia), y el cálculo de la Ganancia de Brillouin en cada posición a lo largo de la fibra. La respuesta de la fibra se construye llevando a cabo una adquisición repetida de la señal retrodispersada, con el fin de construir la matriz S' que expresa la respuesta medida de la fibra, (etapa 4000). Las etapas 2000 a 4000 se repiten hasta que se ha completado la matriz (etapa 5000). A continuación, la matriz se decodifica utilizando la matriz inversa S^{-1} (etapa 6000). Si un punto de la fibra se mide más de una vez, la decodificación comprende el promediado de estas mediciones. Se calcula a continuación el Perfil de Frecuencia de Brillouin, es decir, el cálculo del Desplazamiento de Frecuencia de Brillouin en cada posición a lo largo de la fibra (etapa 7000). En la etapa 8000, el Perfil de Frecuencia de Brillouin se convierte en un perfil de deformación o temperatura (etapa 9000), usando coeficientes de datos de temperatura o deformación para calibración de la fibra. Finalmente, los perfiles de temperatura o deformación se almacenan y se ponen a disposición para un posterior procesamiento de monitorización (etapa 10000).

La optimización del código hace referencia a la búsqueda de combinaciones de rotaciones de las sub-matrices M que reducen al mínimo la varianza (desviación típica). En una forma de realización preferida, el código tiene una ganancia igual a $(L/2)^{(1/2)}$.

Para aquellos versados en la materia se pondrán de manifiesto varias modificaciones y variaciones sobre las formas de realización descritas de la invención, sin desviarse con respecto al alcance de esta última según se define en las reivindicaciones adjuntas. Aunque la invención se ha descrito en relación con formas de realización preferidas específicas, debe entenderse que la invención tal como se reivindica no debe limitarse indebidamente a dicha forma de realización específica.

REIVINDICACIONES

1. Método de medición optoelectrónica de Brillouin, que comprende la etapa de proporcionar una señal (s1) en una fibra óptica (100), siendo dicha señal (s1) codificada en tiempo-frecuencia, siendo dicha señal codificada en tiempo-frecuencia (s1) una señal de bombeo óptica que comprende una secuencia de palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos pulsos, mostrando cada pulso de una palabra de código particular una frecuencia diferente.
2. Método de medición optoelectrónica de Brillouin según la reivindicación 1, que comprende además las etapas siguientes,
 - definir por lo menos dos palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos letras de código, estando cada letra de código de una palabra de código asociada a una frecuencia diferente
 - construir una matriz de codificación (S) usando dichas por lo menos dos palabras de código definidas
 - codificar en tiempo-frecuencia dicha señal usando dicha matriz de codificación (S)
 - medir la respuesta de la fibra óptica a dicha señal
 - construir una matriz inversa (S^{-1}) de la matriz de codificación (S)
 - sobre la base de dicha medición y de dicha matriz inversa, descodificar dicha respuesta de la fibra óptica.
3. Método de medición optoelectrónica de Brillouin según una de las reivindicaciones 1 o 2, que además comprende codificar en tiempo-frecuencia cada una de dichas dos o más longitudes de onda si dicha señal (s1) comprende dos o más longitudes de onda.
4. Método de medición optoelectrónica de Brillouin según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que dicho sistema óptico está configurado para medir un efecto de Brillouin estimulado, comprendiendo además el método las etapas siguientes,
 - transmitir una primera señal (s1) en una primera dirección a lo largo de la fibra óptica, siendo la primera señal (s1) una señal codificada en tiempo-frecuencia;
 - transmitir una segunda señal (s2) en una segunda dirección a lo largo de la fibra óptica, de tal manera que la primera y segunda señales interactúen dentro de la fibra óptica y formen una señal combinada;
 - sondear la fibra óptica en uno o más puntos de sondeo para medir la señal combinada.
5. Método de medición optoelectrónica de Brillouin según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que dicho sistema óptico está configurado para medir un efecto de retrodispersión espontánea de Brillouin, comprendiendo además el método las etapas siguientes
 - transmitir una primera señal (s1) en una primera dirección a lo largo de la fibra óptica, siendo la primera señal (s1) una señal codificada en tiempo-frecuencia;
 - sondear la fibra óptica (100) en uno o más puntos de sondeo para medir una señal retrodispersada.
6. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que además comprende la etapa de identificar irregularidades en la fibra óptica basándose en una o más características de una señal combinada medida.
7. Dispositivo de medición optoelectrónica apto para su uso en un método de medición optoelectrónica de Brillouin, comprendiendo el dispositivo, unos medios para proporcionar una señal codificada en tiempo-frecuencia (s1) en una fibra óptica (100), siendo dicha señal codificada en tiempo-frecuencia (s1) una señal de bombeo óptica que comprende una secuencia de palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos pulsos, mostrando cada pulso de una palabra de código particular una frecuencia diferente.
8. Dispositivo de medición optoelectrónica según la reivindicación 7, que además comprende
 - unos medios de cálculo aptos para definir por lo menos dos palabras de código, comprendiendo cada palabra de código por lo menos dos letras de código, estando cada letra de código de una palabra de

código asociada a una frecuencia diferente, para construir una matriz de codificación (S) usando dichas por lo menos dos palabras de código definidas y para calcular la matriz inversa (S^{-1}) de la matriz de codificación (S)

- 5 - un generador de frecuencia apto para codificar en tiempo-frecuencia dicha señal usando dicha matriz de codificación (S)
- 10 - un transmisor apto para proporcionar dicha señal en una fibra óptica de un sistema óptico basado en un efecto de Brillouin
- 15 - unos medios de medición aptos para medir la respuesta de la fibra óptica a dicha señal
- 15 - un decodificador apto para decodificar dicha respuesta a la fibra óptica basándose en dicha medición y en dicha matriz inversa (S^{-1}).
- 20 9. Dispositivo de medición optoelectrónica según la reivindicación 8, en el que dicho generador de frecuencia está configurado para codificar en tiempo-frecuencia cada una de dichas dos o más longitudes de onda de una señal que comprende dos o más longitudes de onda.
- 25 10. Dispositivo de medición optoelectrónica según las reivindicaciones 7 a 9, en el que dicho sistema óptico es apto para su uso en un método de medición optoelectrónica estimulada de Brillouin, comprendiendo además el dispositivo un transmisor apto para transmitir una primera señal (s1) en una primera dirección a lo largo de la fibra óptica, siendo la primera señal una señal codificada en tiempo-frecuencia;
- 30 un transmisor apto para transmitir una segunda señal (s2) en una segunda dirección a lo largo de la fibra óptica, de tal manera que la primera y segunda señales interactúen dentro de la fibra óptica y formen una señal combinada;
- 35 unos medios aptos para sondear la fibra óptica en uno o más puntos de sondeo con el fin de medir la señal combinada.
- 40 11. Dispositivo de medición optoelectrónica según las reivindicaciones 7 a 9, en el que dicho sistema óptico es apto para su uso en un método de medición optoelectrónica espontánea de Brillouin, comprendiendo además el dispositivo
- 45 un transmisor (60, 14, 16) apto para transmitir una primera señal (s1) en una primera dirección a lo largo de la fibra óptica (100), siendo la primera señal una señal codificada en tiempo-frecuencia;
- 50 un detector (40) apto para sondear la fibra óptica (100) en uno o más puntos de sondeo con el fin de medir una señal retrodispersada.
- 55 12. Dispositivo de medición optoelectrónica según cualquiera de las reivindicaciones 8 a 11, en el que dicho generador de frecuencia está dispuesto para cambiar la frecuencia a un ritmo igual a la duración de una letra de código.
- 60 13. Dispositivo de medición optoelectrónica según la reivindicación 12, en el que dicha duración es del orden de nanosegundos.
- 65 14. Dispositivo de medición optoelectrónica según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 13, que comprende
- 70 - una fuente de luz (60)
- 75 - un modulador electro-óptico (16)
- 80 - un Sintetizador Digital Directo (14)
- 85 - una fibra óptica (100)
- 90 - un circulador (80)
- 95 - un fotodetector (40).
- 100 15. Dispositivo de medición optoelectrónica según la reivindicación 14, que además comprende
- 105 - un procesamiento de señales ópticas (10)
- 110 - un encaminamiento de filtrado óptico (20)
- 115 - un aislador (70).

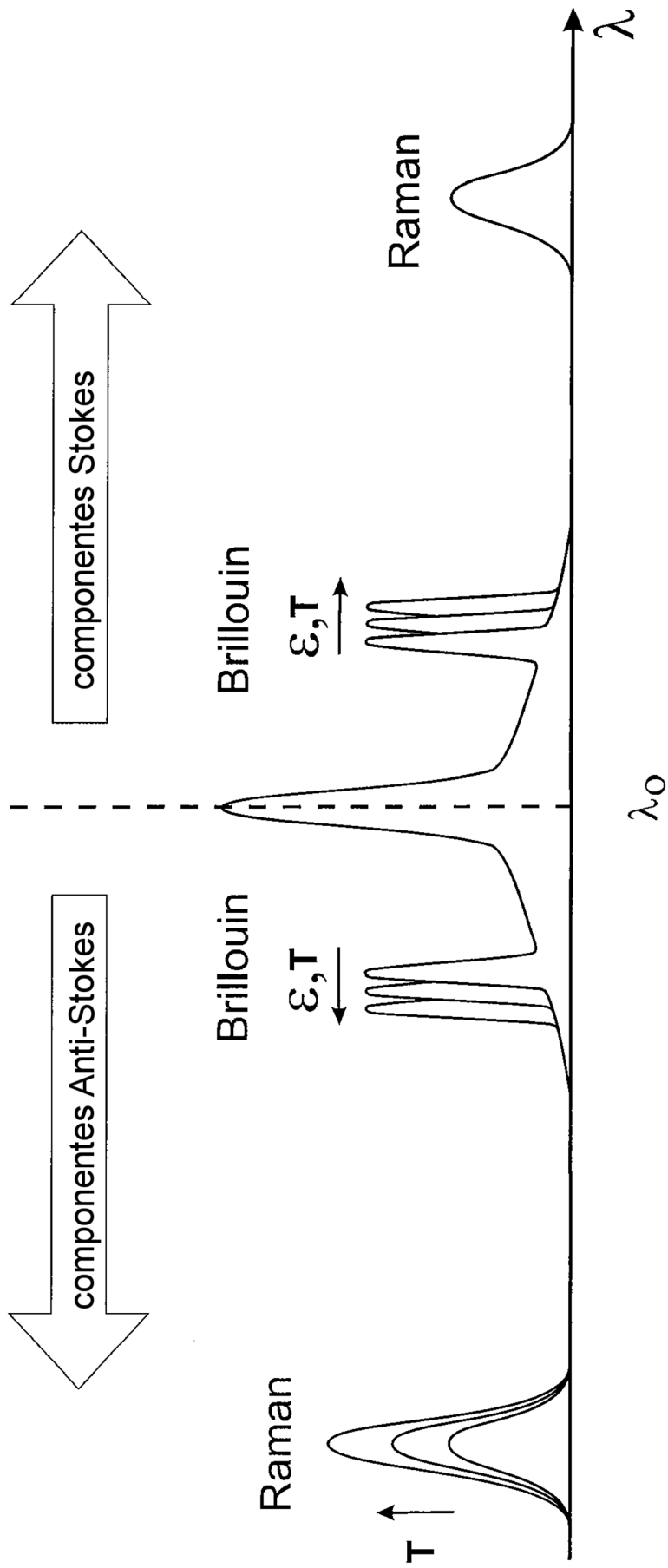


Fig. 1

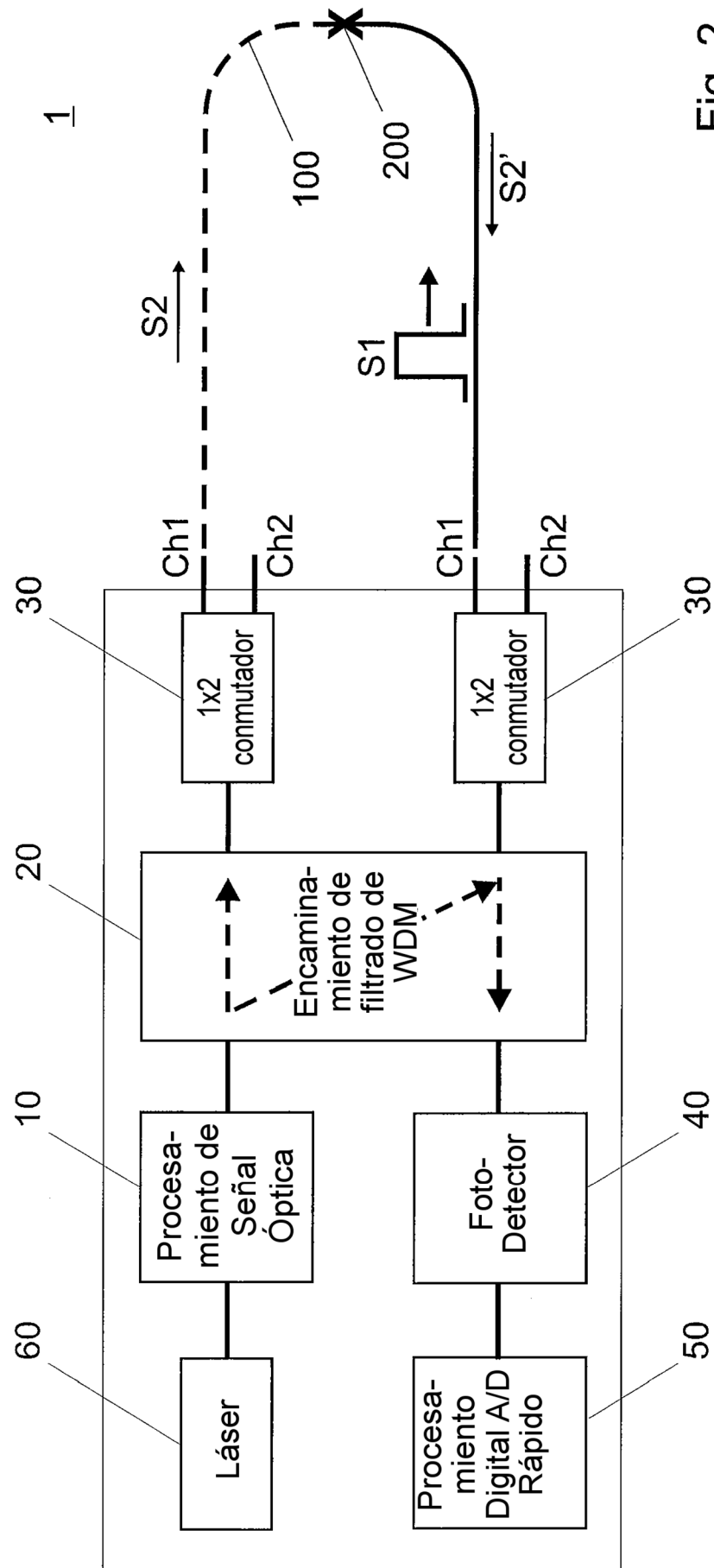


Fig. 2

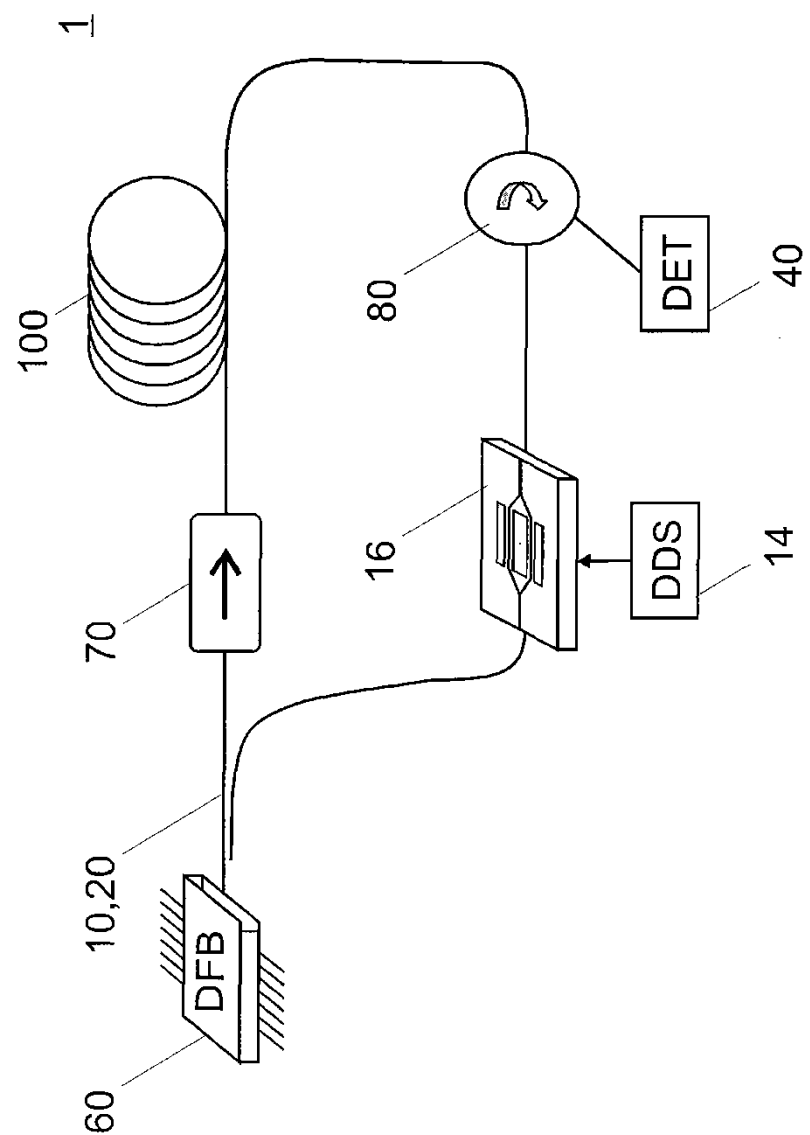


Fig. 3

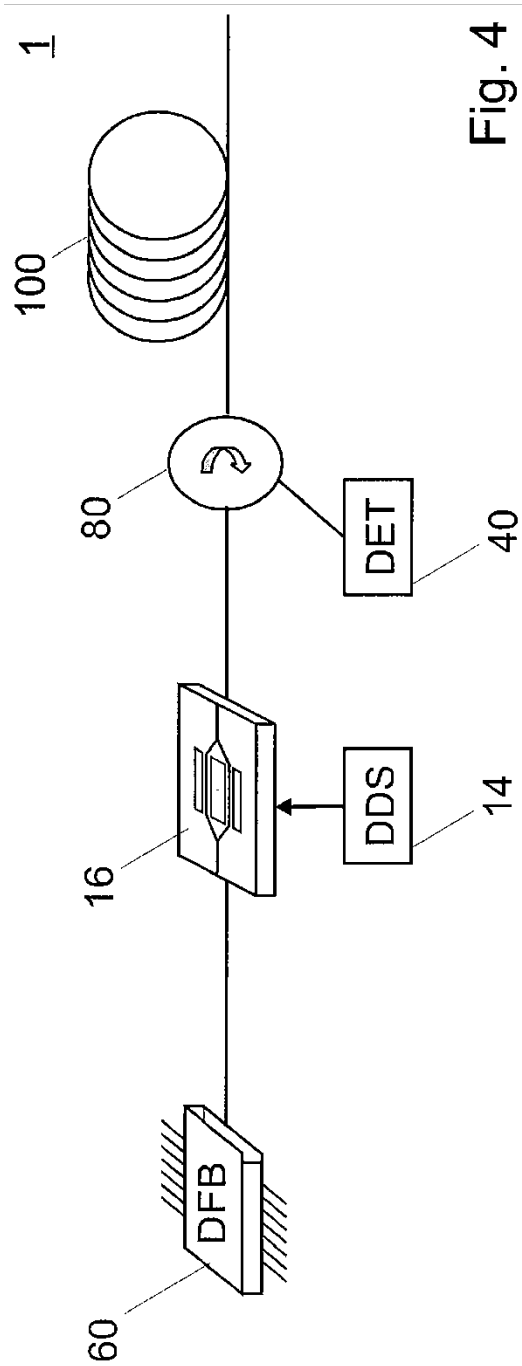


Fig. 4

Sec	Pos[1]	Pos[2]	Pos[3]	Pos[4]	Pos[5]
1	1.	2.	4.	2.	0.
2	2.	3.	5.	3.	0.
3	3.	4.	1.	4.	0.
4	4.	5.	2.	5.	0.
5	5.	1.	3.	1.	0.
6	0.	1.	2.	4.	2.
7	0.	2.	3.	5.	3.
8	0.	3.	4.	1.	4.
9	0.	4.	5.	2.	5.
10	0.	5.	1.	3.	1.
11	2.	0.	1.	2.	4.
12	3.	0.	2.	3.	5.
..	..	..	..	..	..

C1

Fig. 5

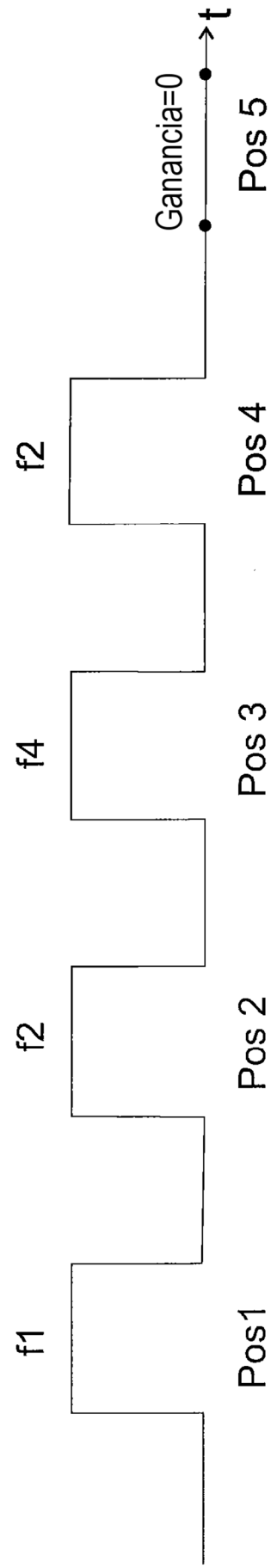


Fig. 6

The diagram shows a large matrix S enclosed in large parentheses. The matrix is sparse, with most entries being zero (represented by dots) and some non-zero entries (represented by '1's). Two submatrices are highlighted with boxes:

- M1** (top-left): A 6x6 matrix with the following structure:

1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1
- M2** (bottom-right): A 6x6 matrix with the following structure:

1	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	1

An arrow points from M1 to M2, indicating a relationship or transformation between them. The matrix S contains other non-zero entries, including a '1' at the top-left corner and a '1' at the bottom-right corner, and several other '1's scattered throughout the matrix.

Fig. 7

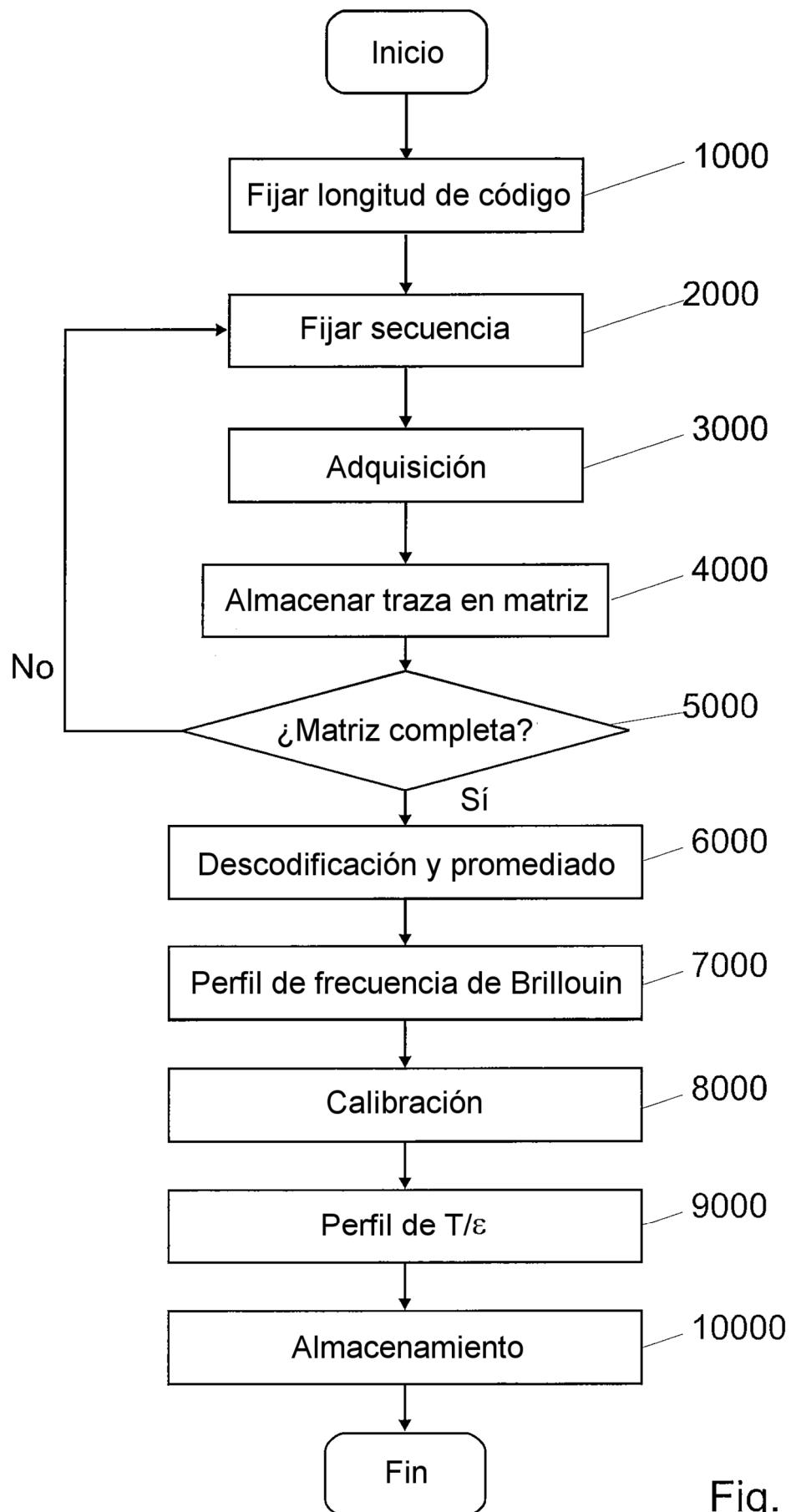


Fig. 8