



19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 310 368**

51 Int. Cl.:
G01K 11/32 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **05797035 .2**

96 Fecha de presentación : **07.09.2005**

97 Número de publicación de la solicitud: **1787098**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **23.05.2007**

54 Título: **Calibración de un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW.**

30 Prioridad: **10.09.2004 DK 2004 01381**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:
01.01.2009

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
01.01.2009

73 Titular/es: **LIOS Technology GmbH**
Schanzenstrasse 6-20
51063 Köln, DE

72 Inventor/es: **Fromme, Martin y**
Glombitza, Ulrich

74 Agente: **Lehmann Novo, María Isabel**

ES 2 310 368 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

Calibración de un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW.

5 **Campo técnico**

La invención se relaciona con el campo de los sistemas de medición, tales como los sistemas ópticos de medición, por ejemplo sistemas para la medición de propiedades físicas distribuidas espacialmente mediante un sensor, por ejemplo un sensor óptico.

10 La invención se relaciona específicamente con un método para calibrar un sistema de medición por retrodifusión de FMCW, tal como un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW, el sistema comprendiendo una parte de excitación y evaluación y un sensor que se extiende longitudinalmente, el sensor teniendo un primer y un segundo extremo, la parte de excitación y evaluación estando adaptada para excitar una señal de luz de frecuencia modulada con frecuencia de modulación f_m para evaluar una señal del sensor recibida desde el primer extremo del sensor, el sensor estando adaptado para capturar una señal de datos basada en la señal de luz de frecuencia modulada de la cual pueden ser extraídos parámetros físicos de los puntos de medición del sensor distribuidos espacialmente a lo largo de su longitud entre el primer y el segundo extremos.

20 La invención además se relaciona con un sistema de medición por retrodifusión, tal como un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW y con un medio legible por computadora.

La invención puede ser útil por ejemplo en aplicaciones tales como la medición de parámetros físicos distribuidos espacialmente, por ejemplo temperatura, humedad, fuerza, en grandes instalaciones, por ejemplo a lo largo de caminos, en túneles, en tubos o cables, en equipos industriales, etc.

25 **Arte anterior**

La siguiente presentación del arte anterior se relaciona con una de las áreas de aplicación de la presente invención, la medición de la temperatura distribuida basada en la retrodifusión óptica de Raman. La presente invención puede ser, sin embargo, aplicada a otros sistemas de medición que no estén basados en la retrodifusión *óptica*. Un ejemplo de un sistema de retrodifusión de FMCW del arte anterior para el cual la presente invención sería relevante es descrito en la EP-1 548 416.

35 Un sistema óptico de retrodifusión puede comprender por ejemplo una fuente de láser modulada, un sensor para capturar la medición distribuida espacialmente de una cantidad física (por ejemplo temperatura, fuerza, humedad, etc.) en la forma de una guía de onda óptica, por ejemplo una fibra óptica, elementos de mezcla, filtración y recepción (incluyendo convertidores opto-electrónicos), unidades de procesamiento y cálculo de señales para transformar y evaluar la(s) señal(es) retrodifundidas y para determinar el perfil distribuido espacialmente de la cantidad física en cuestión.

40 Un problema típico para un sistema óptico de retrodifusión es proporcionar una calibración precisa del sistema de medición (incluyendo el sensor). Un sistema de FMCW (Onda Continua de Frecuencia Modulada) del arte anterior para medir un perfil de temperatura distribuida, por ejemplo un sistema de reflectometría de dominio de frecuencia óptica, como por ejemplo el descrito en la EP-0 692 705, tiene que ser calibrado manualmente y el sensor (por ejemplo una fibra óptica) es expuesto a un número de puntos calientes bien definidos en localizaciones predeterminadas a lo largo de su longitud para lo cual las temperaturas reales en esas localizaciones son medidas con sensores de temperatura calibrados de modo tal que sea conocido un perfil real.

50 Debido a las propiedades de los datos de la frecuencia compleja (es decir, los datos comprenden partes reales e imaginarias); los valores de los datos de frecuencia corregidos son ambiguos.

Otros problemas con los sistemas del arte anterior incluyen contribuciones a errores de medición debido a uno o más de los siguientes:

55 a) *Errores de CC*

a1) El método de temperatura de FMCW está por ejemplo basado en la medición de la retrodifusión de Raman de la luz de una fibra óptica como una función de la modulación de la frecuencia del láser (f_m). Las curvas de retrodifusión de la luz de Raman como función de la longitud de la fibra están basadas en el cálculo de la Transformación Inversa de Fourier de una señal eléctrica del fotodetector. El algoritmo de esta Transformación Inversa de Fourier requiere la medición compleja de la señal de retrodifusión entre $f_m=0$ Hz y la máxima frecuencia de modulación del láser. La medición del primer punto de frecuencia (valor de CC) para la Transformación Inversa de Fourier es difícil, porque este valor es superpuesto con el componente constante clásico de la señal del fotodetector.

65 a2) El valor de CC no es una constante. El valor es dependiente de las propiedades del sensor (por ejemplo diferentes longitudes o diferentes especificaciones de las guías de onda ópticas usadas como sensores, ver las Figs. 6 y 7 y la descripción correspondiente).

ES 2 310 368 T3

b) Errores debidos a las tolerancias y al comportamiento no lineal de los componentes

Las técnicas de Raman de FMCW requieren la medición de fibra de una señal muy débil de luz de retrodifusión de Raman (por debajo del rango pico de vatios) como una función de la luz láser de frecuencia modulada sobre una amplia banda de frecuencia (la f_m puede estar, por ejemplo, en el rango de 0 Hz a 100 MHz). El promedio de la intensidad de la luz láser es constante. Debido a la señal débil del detector las tolerancias de los componentes ópticos (láser, fotodetector, filtro, etc.) y de los componentes electrónicos (amplificador, mezclador, filtro, etc.) tienen un impacto perceptible en la calidad de las curvas de retrodifusión y de temperatura resultante. Del mismo modo, el comportamiento no lineal de los componentes ópticos y electrónicos produce contorción en los datos de frecuencia. El resultado es una contorción no lineal a lo largo del perfil de temperatura lo que reduce la precisión del sistema de medición de la temperatura.

c) Errores debidos a la interferencia entre los diversos canales de medición

La interferencia entre los diferentes canales de medición puede provocar un error adicional en forma de ruido aleatorio e interferencias no lineales en el perfil de temperatura (ver por ejemplo la Fig. 10 y su descripción correspondiente).

d) Errores debidos a los efectos de envejecimiento

Los efectos de envejecimiento sobre los componentes ópticos y electrónicos también tienen un impacto en la calidad y estabilidad de los dispositivos de medición debido a la débil señal del detector de Raman y a la dependencia antes mencionada de la medición de FMCW entre la señal de frecuencia y el perfil de temperatura.

e) Errores causados por un cambio de la línea del sensor

En caso de que haya un cambio en la línea del sensor óptico, una calibración precedente puede ya no ser válida. Esto es causado principalmente por un impacto en el valor de CC de los datos de frecuencia.

Todos los efectos indeseables antes mencionados tienen un impacto en la calidad y la estabilidad de un sistema de medición de la temperatura de Raman. La eliminación y separación de estos efectos no es posible con los procedimientos de calibración actuales. Por consiguiente, los procedimientos de calibración deben ser repetidos cuando son notadas alteraciones de las calidades del sistema. Esta repetición consume mucho tiempo y es costosa. Una debilidad adicional de los actuales procedimientos de calibración es el fuerte impacto de errores incurridos en la calidad de la medición resultante (por ejemplo la exactitud (precisión) del sistema). Esto significa que las nuevas aplicaciones que tienen requerimientos más elevados de precisión de la medición son excluidas con los sistemas actuales.

Divulgación de la invención

Un objeto de la presente invención es proporcionar un método para calibrar un sistema de medición por retrodifusión de FMCW, tal como un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW que mejore la precisión de la medición. Otro objeto es proporcionar un método de calibración que sea conveniente para la automatización. Otro objeto es proporcionar un método de calibración que sea conveniente para la producción de sistemas de medición en mayores cantidades. Otro objeto es proporcionar un método de calibración que sea conveniente para ser usado en mediciones en el terreno.

Los objetos de la invención son logrados por la invención descrita en las reivindicaciones que se adjuntan y de la forma descrita a continuación.

Un objeto de la invención es logrado mediante un método para calibrar un sistema de medición por retrodifusión de FMCW, tal como un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW, el sistema comprendiendo una parte de excitación y evaluación y un sensor que se extiende longitudinalmente, el sensor teniendo un primer y un segundo extremo, la parte de excitación y evaluación estando adaptada para excitar una señal de luz de frecuencia modulada con frecuencia de modulación f_m para evaluar una señal del sensor recibida desde el primer extremo del sensor, el sensor estando adaptado para capturar una señal de datos basada en la señal de luz de frecuencia modulada de la cual pueden ser extraídos los parámetros físicos de los puntos de medición del sensor distribuidos espacialmente a lo largo de su longitud entre el primero y el segundo extremos, el método comprendiendo los pasos de

- A. Convertir dicha señal del sensor recibida en una señal eléctrica recibida compleja como una función de dicha frecuencia de modulación f_m , dicha señal eléctrica recibida compleja siendo representada por una parte de magnitud y una parte de desfase como función de dicha frecuencia de modulación f_m ;
- B. Realizar una transformación de dicha señal eléctrica recibida para proporcionar una señal de retrodifusión como función de ubicación entre dichos primer y segundo extremos de dicho sensor y más allá de dicho segundo extremo;
- C. A partir de dicha señal de retrodifusión como función de ubicación determinar las características de una curva representante de dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo;

ES 2 310 368 T3

D. Corregir dicha parte de magnitud de dicha señal eléctrica recibida y dicha parte de desfase de dicha señal eléctrica recibida en una dependencia predeterminada de dicha curva;

E. Repetir el paso B) sobre la base de la señal eléctrica recibida corregida.

5

En el paso F, los pasos C, D, E pueden ser repetidos opcionalmente hasta que sea satisfecho un criterio predeterminado.

10 Entre la señal de medición compleja (datos de frecuencia), en el paso A denominado “señal eléctrica recibida como función de la frecuencia de modulación f_m ”, y la curva de retrodifusión, en el paso B denominado “señal de retrodifusión como función de ubicación entre dichos primer y segundo extremos del sensor y más allá del segundo extremo”, existe un procedimiento de transformación matemática único: La Transformación Inversa de Fourier. Una herramienta práctica para el cálculo rápido de la transformación matemática es la Transformación Rápida de Fourier (FFT), respectivamente, la Transformación Rápida *Inversa* de Fourier (IFFT). La siguiente descripción usará estas abreviaturas. El análisis de la curva de retrodifusión permite una conclusión sobre las propiedades de los datos de la frecuencia compleja.

15

La señal eléctrica recibida compleja es representada ventajosamente como puntos discretos de mediciones en forma digital, por ejemplo como resultado de una conversión A/D (conversión de analógica a digital), y por ejemplo es almacenada en un medio apropiado de almacenamiento de datos (por ejemplo en la memoria de un DSP (procesador de señal digital)).

20

En una realización, más de un conjunto de datos para una señal eléctrica recibida en particular (por ejemplo una señal Stokes o una señal Anti-Stokes) correspondiente a un ciclo de medición son almacenados en la memoria. En una realización, los datos de un número de ciclos de medición de una señal en particular son promediados antes de que sea realizada una calibración correctiva.

25

En general, un ciclo de medición consiste en todos los pasos para determinar el perfil de temperatura (o al menos la curva de retrodifusión) (medir los datos de frecuencia, corregir los datos de frecuencia, calcular la curva de retrodifusión, calcular la proporción/relación de la curva de retrodifusión, calcular el perfil de temperatura). En una realización, el término “un ciclo de medición” es interpretado como un barrido de la frecuencia de modulación de la fuente de luz (láser).

30

El término “un conjunto de datos”, por ejemplo en “un conjunto de datos de frecuencia”, en el presente contexto es interpretado como los datos que representan una señal dada en un ciclo de medición. Un “conjunto de datos de frecuencia” puede ser definido por ejemplo por un número de puntos de datos de la frecuencia compleja en el rango de CC hasta una frecuencia de modulación máxima (por ejemplo 100 MHz) con un espaciamiento de frecuencia definido (por ejemplo 8 kHz).

35

Por iteración, puede ser lograda una corrección refinada gradualmente de la(s) curva(s) de retrodifusión. En una realización, el procedimiento de iteración puede comprender los pasos siguientes 1. Determinar un cambio incremental de la magnitud de la señal eléctrica recibida compleja en $f_m=0$ (valor de CC) y determinar un cambio incremental de la compensación de fase de toda la característica de fase (desfase φ vs. frecuencia de modulación f_m) de la señal eléctrica recibida compleja; 2. Recalcular la curva de retrodifusión; 3. Sobre la base de criterios predefinidos, decidir si continuar desde el paso 1. O detenerse. En una realización, la corrección es realizada mediante un procedimiento de linealización automatizado, controlado por computadoras llamado “calibración automatizada del sistema” (ver sección 5 más adelante).

40

45

Los anteriores pasos de calibración aseguran una precisión mejorada de los parámetros físicos siendo determinados por el sistema de medición.

50

Los resultados de una calibración correctiva dada son almacenados ventajosamente en una memoria del sistema para su (posterior) uso como base para otra calibración correctiva del mismo tipo (pero con otros factores de corrección) o de otro tipo (por ejemplo una “corrección de error de CC” vs. “calibración de la frecuencia”).

55

En una realización, el orden de los diferentes tipos de calibración correctiva es optimizado para proporcionar los mejores resultados (como por ejemplo evaluado en vista de la correspondencia entre los resultados medidos y los esperados teóricamente o verificados en la práctica).

60

El término un “sistema de medición por retrodifusión de FMCW” es interpretado en el presente contexto como un sistema de medición de Onda Continua de Frecuencia Modulada (FMCW) basado en la modulación de la frecuencia de una señal electromagnética (por ejemplo a frecuencias de microonda, de radar o de luz, etc.) que es retrodifundida desde uno o más medios de difusión continua y/o desde uno o más reflectores.

65

Un sistema de FMCW de radar puede ser usado por ejemplo para determinar la distancia hasta y la velocidad de un objeto. Un sistema de FMCW eléctrico puede ser usado por ejemplo para monitorear la distribución espacial de la temperatura a lo largo de un cable eléctrico, ver por ejemplo la EP-1 548 416.

ES 2 310 368 T3

En un sistema de medición de FMCW, la determinación de la distribución espacial de valores físicos a lo largo de un medio sensor está basada por ejemplo en la IFFT de la respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia. Para realizar una IFFT, el rango de frecuencia requerido es desde la CC (0 Hz) hasta un límite de frecuencia superior. La calidad de la medición es significativamente dependiente de la precisión de la frecuencia más baja (CC), lo cual especifica el nivel base de la señal resultante después de la IFFT. Los dispositivos de medición de FMCW, como el descrito por ejemplo en EP-0 692 705 y EP-1 548 416, tienen una frecuencia límite inferior por encima de la CC (0 Hz).

Por tanto el procedimiento de calibración de la presente invención tiene como objetivo la determinación de un valor de medición correcto a CC (0 Hz) y es aplicable a los sistemas de medición de FMCW en general.

En una realización particular, el sistema de medición por retrodifusión de FMCW es un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW.

El término un “sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW” es interpretado en el presente contexto como un sistema óptico de medición de Onda Continua de Frecuencia Modulada (FMCW) basado en la modulación de la frecuencia de un rayo de luz (luz de bomba) que es retrodifundido desde uno o más medios ópticos de difusión continua (típicamente una fibra óptica) o/y desde uno o más reflectores ópticos (reflexión de Fresnel en los extremos de la fibra, conectores, lentes, espejos, etc.). La luz retrodifundida comprende la misma longitud de onda que la luz de bomba o/y adicionalmente luz a diferentes longitudes de onda debido a efectos ópticos no lineales. La característica de la luz retrodifundida es dependiente de los parámetros físicos (fuerza, tensión, presión, temperatura, etc.) o/y químicos (humedad, corrosión, sulfurosos, etc.) o/y electromagnéticos (fluorescencia, radiación, etc.) de los medios de difusión continua o/y reflectores.

El término un “sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW” es interpretado como que incluye sistemas basados en tecnología de medición heterodina (óptica o eléctrica).

Al usar tecnología *óptica* de medición heterodina en el sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW, la mezcla de la señal de bomba y la señal retrodifundida ocurre en las trayectorias ópticas de salida de un Interferómetro de Michelson, por ejemplo. Estos tipos de técnicas ópticas de FMCW también son llamadas “técnicas de OFDR” o “técnicas coherentes de FMCW” (ver por ejemplo U. Glombitza, E. Brinkmeyer, “Coherent Frequency Domain Reflectometry for Characterization of Single-Mode Integrated-Optical Waveguides”, Journal of Lightwave Technology, vol. 11, No. 8, agosto de 1993).

Al usar tecnología de medición heterodina *eléctrica* en el sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW, la mezcla de la señal de bomba y la señal retrodifundida ocurre en el módulo receptor eléctrico. Estos tipos de técnicas eléctricas de FMCW son también llamadas “técnicas incoherentes de OFDR” (ver por ejemplo: Emir Karamehmedovic, U. Glombitza, “Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing Using Incoherent Optical Frequency Domain Reflectometry”, The International Society for Optical Engineering, Photonics West, 2003).

Los términos “OFDR” (reflectometría de dominio de frecuencia óptica) y “retrodifusión óptica de FMCW” son usados indistintamente en la presente aplicación.

El término “corregir dicha señal eléctrica recibida en una dependencia predeterminada de dicha curva” es interpretado en el presente contexto como que en dependencia de

1. el valor medio y/o
2. la pendiente (gradiente) de la curva de retrodifusión más allá del segundo extremo, remoto, del sensor,
3. la magnitud del nivel del valor de CC ($f_m=0$), y
4. la compensación de fase de la característica de fase en el dominio de la frecuencia puede ser modificada.

En una realización, la modulación de frecuencia comprende la mezcla de dos señales ópticas (llamadas OFDR coherente).

En una realización, la modulación de la frecuencia del láser comprende una modulación de la intensidad de la luz láser en diferentes frecuencias. Por *ciclo de medición* la frecuencia del láser es cotejada entre 0 Hz y una frecuencia máxima, típicamente 100 MHz. El rango de frecuencia es adaptado para corresponder a la resolución espacial del dispositivo óptico de FMCW. El promedio de la intensidad de la luz de salida del láser en los diferentes pasos de la frecuencia es típicamente constante. El número de puntos de medición de la frecuencia es dependiente de la longitud de la fibra y el espaciado de la frecuencia es dependiente de la resolución espacial del dispositivo de FMCW.

El término “calibrar un sistema de medición de FMCW” (por ejemplo un “sistema óptico de medición de FMCW”) es interpretado en el presente contexto como el proceso de asegurar que un sistema de medición esté adaptado a cierto nivel de precisión determinando fuentes de errores y posibles desviaciones de un estándar y comprobar la corrección apropiada de tales errores y/o desviaciones.

ES 2 310 368 T3

En una realización, la calibración es realizada mediante la corrección de datos recibidos (originales) en el dominio de la frecuencia (señal eléctrica recibida compleja retrodifundida convertida de manera descendente contra la frecuencia de modulación del láser f_m).

5 En una realización, la señal recibida del sensor comprende primera y segunda partes distinguibles. El término “la señal recibida que comprende primera y segunda partes ópticas distinguibles” es interpretado en el presente contexto como que *sobre la base* de la señal recibida es posible identificar contribuciones de una parte específica del sensor (por ejemplo un sensor óptico), por ejemplo después de una conversión, tal como una conversión de óptica a eléctrica, y/o por ejemplo después de un procesamiento de señal ulterior de la señal óptica o eléctrica (por ejemplo involucrando una transformación de Fourier). Si por ejemplo una longitud de una guía de onda óptica es usada como sensor, el término
10 debe ser entendido de modo tal que sea posible derivar la contribución a la señal de esa longitud de guía de onda, de manera tal que pueda ser extraída la información sobre las propiedades físicas (por ejemplo temperatura) para esa longitud basada en la señal y de manera tal que las propiedades de la señal para regiones que se encuentran más allá de la longitud de la guía de onda puedan ser usadas para fines correctivos.

15 En una realización, la transformación de la señal eléctrica recibida para proporcionar una señal de retrodifusión como una función de ubicación entre dichos primer y segundo extremos de dicho sensor y más allá de dicho segundo extremo es una transformación de Fourier inversa.

20 En una realización, el sensor es una guía de onda óptica. En una realización, el sensor es una fibra óptica, por ejemplo una fibra óptica de vidrio de sílice. Alternativamente, el sensor puede ser un cable eléctrico (por ejemplo un cable coaxial) o cualquier otro medio sensor espacialmente distribuido.

25 Cuando se está en el paso F, dichos criterios predeterminados son que dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo de dicho sensor puede ser aproximada por una línea recta con una pendiente de aproximadamente 0, está garantizado que una señal de retrodifusión adicionalmente mejorada es proporcionada mejorando así la precisión del parámetro físico que es extraído. Además es ventajoso que el valor medio sea aproximadamente 0. La representación de datos aparece preferiblemente en “número de muestras” (en una representación lineal de datos).

30 El término “aproximadamente 0” en el presente contexto es interpretado como que las tolerancias/desviaciones de 0 del valor medio y el gradiente/pendiente de ruido más allá del extremo de fibra en la representación lineal de los datos de retrodifusión es tan leve que las curvas de retrodifusión en la representación logarítmica en el área de la fibra del sensor con una temperatura definida son lineales, y la atenuación a lo largo de la fibra del sensor es constante y concuerda con el valor teórico de atenuación de la fibra. Los valores de desviación/tolerancias aceptables a partir
35 de 0 determinados de esta manera son los criterios de convergencia del método de iteración. Estos son aplicables a cualquier otra fibra de sensor.

40 En una realización, dicha pendiente es más pequeña que un valor de convergencia específico. En una realización, dicha pendiente es aproximadamente 0, tal como menos de 0.5 muestras, tal como menos de 0.05 muestras, tal como menos de 0.005 muestras.

45 En una realización, dicho criterio predeterminado comprende el criterio que el valor medio de las muestras para una parte de o toda dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo es menor que un valor de convergencia específico tal como aproximadamente 0, tal como menos de 0.5 muestras, tal como menos de 0.05 muestras.

50 En una realización, el término “el valor medio es aproximadamente 0” es interpretado como que para un cambio incremental dado de la magnitud de la señal eléctrica recibida en $f_m=0$ en el paso D, el valor medio de la señal de retrodifusión más allá del segundo extremo del sensor que representa el nivel de ruidos cambia de signo cuando es recalculado en el paso E.

55 En una realización, en el paso D, dicha corrección de dicha parte de la magnitud de dicha señal eléctrica recibida comprende el sub-paso D1 de corregir los datos de la magnitud por una cantidad de corrección inicial de $\Delta H_0(0)$ en la frecuencia de modulación f_m igual a 0.

60 En una realización, en el paso D1 dicha cantidad inicial de corrección $\Delta H_0(0)$ es ajustada a un valor predeterminado, por ejemplo a un estimado.

65 En una realización, en el paso D1 dicha cantidad inicial de corrección $\Delta H_0(0)$ es determinada por la cantidad de desviación del valor medio de ruido en la curva de retrodifusión a partir de 0.

En una realización, en el paso D, dicha corrección de dicha parte del desfasaje de dicha señal eléctrica recibida comprende el sub-paso D2 de determinar un valor de compensación inicial de $\Delta\varphi_0(0)$ del desfasaje de la señal eléctrica recibida como función de dicha frecuencia de modulación f_m alrededor de $f_m=0$; y posteriormente corregir los datos que representan dicho desfasaje de la señal eléctrica recibida como función de la frecuencia de modulación f_m con dicho valor de compensación.

En una realización, en el paso D2, dicho valor inicial de compensación de $\Delta\varphi_0(0)$ es ajustado a un valor predeterminado.

ES 2 310 368 T3

En una realización, en el paso D2, dicho valor inicial de compensación de $\Delta\varphi_0(0)$ es determinado mediante la extrapolación lineal de los datos del desfase para $f_m \rightarrow 0$ Hz.

Los resultados del procedimiento iterativo de linealización (en lo adelante denominado “calibración automatizada del sistema” y descrito más detalladamente en la sección 5 más adelante) son los factores de corrección para

- a) el procedimiento de corrección del valor de CC del paso D1 y
- b) el procedimiento de corrección de la compensación de fase del paso D2.

De esta manera la precisión físicamente limitada de ambos procedimientos (D1 y D2) es mejorada de manera significativa. Los remanentes de errores (errores residuales), que son específicos de un sistema dedicado que incluye la fibra, son eliminados mediante el uso de los resultados de la “calibración automatizada del sistema” en los procedimientos de corrección del valor de CC y de corrección de la compensación de fase. En contraste con los procedimientos de corrección del valor de CC y de corrección de la compensación de fase, que tienen que ser ejecutados durante cada ciclo de medición, la “calibración automatizada del sistema” tiene que ser realizada solo una vez para un sistema de medición dedicado que incluye la fibra.

En una realización, los pasos A, B, C, D, y opcionalmente E de dicho procedimiento de calibración son realizados en cada ciclo de medición.

En una realización, la “calibración automatizada del sistema” es realizada en algunos, en una mayoría o en todos los ciclos de medición.

En una realización, el paso D incluye además los sub-pasos D3 de determinar un factor residual de corrección $\Delta H_{res}(0)$ y D4 de determinar un valor de compensación residual de $\Delta\varphi_{res}(0)$, ambos sub-pasos estando basados en datos de retrodifusión calculados a partir de datos que representan dicha parte de magnitud y dicha parte del desfase, respectivamente, como una función de dicha frecuencia de modulación f_m después de la corrección mediante dicha cantidad inicial de corrección de $\Delta H_0(0)$ del sub-paso D1 y dicho valor inicial de compensación de $\Delta\varphi_0(0)$ del sub-paso D2, respectivamente donde en el sub-paso D3 el valor de dicho factor residual de corrección $\Delta H_{res}(0)$ está basado en el valor medio del nivel promedio de dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo de dicho sensor, y en el sub-paso D4 el valor de dicho valor residual de compensación $\Delta\varphi_{res}(0)$ está basado en el valor de la pendiente de dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo de dicho sensor.

En una realización, dichos pasos de corrección D3 y D4 están basados en curvas de retrodifusión promediadas, tal como más de 5 mediciones, tal como más de 10 mediciones, tal como más de 20 mediciones.

El término “curvas de retrodifusión promediadas” es interpretado en el presente contexto por ejemplo como el promedio (lineal) de un número de curvas de retrodifusión en cada punto del régimen espacial.

En una realización, el método comprende además los pasos de A1. Determinar un valor de compensación del desfase de la señal eléctrica recibida como función de dicha frecuencia de modulación f_m alrededor de $f_m=0$; y A2. Realizar una compensación de dichos datos del desfase basados en dicho valor de compensación. De tal modo es asegurado que la precisión del perfil del parámetro físico medido pueda ser mejorada aún más.

Cuando se está en el paso A1, dicho valor de compensación es determinado mediante la extrapolación lineal de los datos de desfase para $f_m \rightarrow 0$ Hz, es garantizado que sea proporcionado un procedimiento que es fácil de implementar y automatizar. Mediante la sustracción de la cantidad extrapolada linealmente de $\Delta\varphi(f_m=0)$ de todos los datos del desfase contra los de frecuencia (con lo cual el valor del desfase en $f_m=0$ es ajustado a 0°) y el recálculo de los datos de retrodifusión y del perfil del parámetro físico, es proporcionada una precisión mejorada de los datos del parámetro físico.

En una realización, la corrección de la fase es realizada antes de la corrección de CC en el procedimiento de calibración, es decir de manera tal que los pasos A1 y A2 sean realizados antes que el paso B. Esto tiene la ventaja de mejorar la calidad de la corrección combinada.

En una realización, una compensación de la interferencia entre los canales de medición (ver la sección 8 más adelante) es realizada antes de los procedimientos de corrección de CC y de compensación de fase. Después de la ejecución de la “calibración automatizada del sistema”, el orden de los procedimientos es arbitrario.

En una realización, el sensor y la parte de excitación y evaluación del sistema de medición son calibrados juntos. Esto tiene la ventaja de proporcionar una calibración que tome en cuenta las contribuciones a la corrección de los datos de frecuencia recibidos que se originan en las características particulares del sensor (así como los que se originan en la parte de excitación y evaluación y del método de medición en general (por ejemplo las transformaciones matemáticas).

En una realización particular, la calibración es realizada usando un sensor estandarizado, tal como un sensor óptico estandarizado, con características bien conocidas.

ES 2 310 368 T3

Cuando dicha calibración es realizada si características del sensor, tales como las características ópticas del sensor, cambian, es garantizado que las características del sensor tales como su longitud, atenuación, composición química (y por tanto las características de difusión), etc. sean incluidas en la calibración.

5 En una realización, dicha calibración es realizada si otras características del sistema han cambiado o se sospecha que han cambiado.

En una realización, dicho método de calibración es realizado para señales representativas de Anti-Stokes así como para señales Stokes.

10

En una realización, el sistema de medición es un sistema de medición por retrodifusión de Raman adaptado para medir un perfil de temperatura distribuida espacialmente.

15

En una realización, los parámetros físicos extraídos de los puntos de medición distribuidos espacialmente del sensor a lo largo de su longitud son usados para calcular un perfil de temperatura del sensor a lo largo de su longitud. Alternativamente otros parámetros, tales como humedad, corrosión, sulfuroso, presión, fuerza, radiación, etc. pudieran ser calculados.

20

En una realización, la medición está basada en la retrodifusión de Raman. Alternativamente, pudiera estar basada en la retrodifusión de Rayleigh.

25

En una realización, la señal recibida del sensor comprende una señal retrodifundida de Raman Stokes. En una realización, la señal recibida del sensor comprende una señal retrodifundida de Raman Anti-Stokes. En una realización, el cálculo del perfil de temperatura está basado en las señales retrodifundidas de Raman Stokes y Anti-Stokes.

El perfil logrado por el sistema de medición puede por tanto ser calibrado absolutamente (para el sistema de medición particular que incluye el sensor) y los posibles defectos de medición del sistema (incluyendo un error de CC) pueden ser corregidos en los datos de frecuencia por ejemplo mediante procedimientos de software.

30

En una realización, el método comprende adicionalmente un procedimiento de corrección de la interferencia (ver sección 8 más adelante) que comprende los pasos de

35

G1. Determinar y almacenar la interferencia entre los canales de medición del sistema de medición mediante un procedimiento específico de medición durante la fabricación del sistema, y

G2. Dentro de cada ciclo de medición de operación normal sustraer los datos de interferencia memorizados de los datos de frecuencia compleja medidos.

40

En una realización, los pasos G1 y G2 son realizados antes que otros pasos de calibración correctiva.

En una realización, el sensor comprende una parte de referencia conectable en serie a una parte de medición. En una realización, la parte de referencia es una fibra óptica bien caracterizada de longitud bien definida, almacenada opcionalmente a una temperatura bien definida.

45

En una realización, el método comprende adicionalmente pasos que tienen en cuenta la circunvolución teórica entre la frecuencia y el dominio espacial, donde en

50

el Paso H1, la curva de frecuencia compleja esperada es determinada a partir de un modelo matemático, y una función de error de frecuencia compleja constituida por la relación compleja de los datos *medidos* del sistema de retrodifusión de FMCW S_{RM} con respecto a la función de la frecuencia compleja *calculada* S_R es determinada, y almacenada en una memoria, y en

55

el Paso H2 al comienzo de un siguiente ciclo de medición, los datos de frecuencia medidos S_{RM} son corregidos con la función de error de frecuencia compleja.

En una realización, los pasos G1 y G2 son llevados a cabo después de otros pasos de calibración correctiva, preferiblemente como los últimos pasos de calibración correctiva.

60

La presente invención tiene que ver además con un sistema de medición por retrodifusión de FMCW, tal como un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW, que comprende un medio legible por computadora que tiene almacenado en él un código de programa legible por computadora para ejecutar un método de calibración como el descrito más adelante, en la sección "Modo(s) de poner en práctica la invención" y en las reivindicaciones.

65

El término "un medio legible por computadora" es interpretado en el presente contexto como cualquier medio apropiado para almacenar un código de programa incluyendo un disquete, un CD-ROM, una memoria flash, una unidad de disco duro, RAM, etc. En una realización, el medio legible por computadora es parte de o está integrado a una PC, a un microprocesador (por ejemplo un DSP).

La presente invención tiene que ver además con un medio legible por computadora que tiene almacenado en él un programa legible por computadora que cuando es ejecutado en una computadora puede ejecutar un método de calibración como el descrito más adelante, en la sección “Modo(s) de poner en práctica la invención” y en las reivindicaciones.

5

El término “una computadora” es interpretado en el presente contexto como cualquier unidad de procesamiento apropiada para ejecutar un código de programa, incluyendo una PC, un microprocesador, un DSP, etc.

10

Otros objetos de la invención son logrados por las realizaciones definidas en las reivindicaciones dependientes y en la descripción detallada de la invención.

15

Debe ser enfatizado que el término “comprende/que comprende” cuando es usado en esta descripción es interpretado como que especifica la presencia de características, unidades, pasos o componentes indicados pero no excluye la presencia o adición de una o más características, unidades, pasos, componentes indicados adicionales o grupos de los mismos.

Breve descripción de los dibujos

20

La invención será explicada más completamente a continuación en relación con una realización preferida y haciendo referencia a los dibujos en los cuales:

La Fig. 1 muestra ilustraciones esquemáticas de un sistema óptico de medición de FMCW que comprende una unidad de excitación y evaluación y un sensor óptico;

25

La Fig. 2 muestra datos de medición de un sistema de medición de retrodifusión de Raman para medir un perfil de temperatura distribuida, la Fig. 2a (izquierda) ilustrando la magnitud y la Fig. 2a (derecha) la fase de las señales complejas recibidas (convertidas eléctricas) de la luz Anti-Stokes y Stokes en el dominio de frecuencia; la Fig. 2b mostrando las señales transformadas de Fourier en el régimen espacial (las correspondientes curvas de retrodifusión) y la Fig. 2c la curva de temperatura distribuida derivada;

30

La Fig. 3 muestra el impacto del error de CC en las señales Stokes y Anti-Stokes de un sistema de medición de temperatura por retrodifusión de Raman, las Figs. 3a y 3b mostrando los canales Stokes y Anti-Stokes, respectivamente, con (Figs. a la izquierda) y sin (Figs. a la derecha) error de CC;

35

La Fig. 4 muestra los datos de medición de un sistema de medición de temperatura por retrodifusión de Raman con (Fig. 4a) y sin (Fig. 4b) un error de fase debido a tolerancias y degradación de los componentes;

40

La Fig. 5 muestra la función de fase de la señal recibida (convertida eléctrica) de un sistema de medición de temperatura por retrodifusión de Raman, la Fig. 5a mostrando un rango de frecuencia de 0 a 260 kHz y las Figs. 5b y 5c mostrando detalles de la curva en un rango de frecuencia de 0 a 30 kHz con y sin error de compensación, respectivamente;

45

La Fig. 6 muestra mediciones de la luz Anti-Stokes de Raman de un sensor de guía de onda con una longitud de 100 m, la Fig. 6a mostrando la curva de retrodifusión (escala logarítmica) y la Fig. 6b mostrando la correspondiente señal de frecuencia transformada de Fourier (función de magnitud de la señal de medición compleja);

La Fig. 7 muestra mediciones de la luz Anti-Stokes de Raman de un sensor con una longitud de guía de onda de 5000 m, la Fig. 7a mostrando la curva de retrodifusión (en una escala logarítmica) como una función de ubicación en la fibra y la Fig. 7b mostrando la función de magnitud como una función de la frecuencia;

50

La Fig. 8 muestra la señal de referencia en la frecuencia de modulación $f_2 = 10$ kHz como ejemplo;

La Fig. 9 muestra un procedimiento ejemplar de calibración que comprende pasos del procedimiento de acuerdo con la presente invención;

55

La Fig. 10 ilustra la influencia de la interferencia entre canales de medición en las curvas de retrodifusión resultantes (todas las curvas en una escala logarítmica en el “eje Y” vertical), la Fig. 10a mostrando la señal de medición que incluye la interferencia de los diferentes canales (Anti-Stokes y Stokes), la Fig. 10b mostrando un ejemplo de solo la interferencia de diferentes canales de medición. La Fig. 10c mostrando la señal de medición como una función de la frecuencia *sin* interferencia eléctrica, la Fig. 10d mostrando la curva de retrodifusión de una fibra óptica *con* error de interferencia, y la Fig. 10e mostrando la curva de retrodifusión de una fibra óptica *sin* error de interferencia;

60

La Fig. 11 muestra las curvas de retrodifusión para un sensor óptico de guía de onda de una longitud fija con y sin errores CC, la Fig. 11a y 11b mostrando la curva de retrodifusión de una fibra óptica de una longitud de 5273 m *sin* error de CC, el “eje Y” vertical estando en una escala *logarítmica* y una escala *lineal*, respectivamente, y la Fig. 11c mostrando la curva de retrodifusión de una fibra óptica de una longitud de 5273 m *con* error de CC (escala logarítmica del eje Y), la Fig. 11d mostrando la curva de retrodifusión de una fibra óptica de una longitud de 4415 m *con* error de compensación de fase (el eje Y vertical estando en una escala *lineal*), y la Fig. 11e mostrando la curva de retrodifusión de la fibra óptica de la Fig. 11d *sin* error de compensación de fase (escala lineal del eje Y);

65

La Fig. 12a muestra el perfil de temperatura como función de la longitud de la fibra *sin* calibración de la frecuencia. La Fig. 12b muestra el perfil de temperatura en función de la longitud de la fibra *con* calibración de la frecuencia;

La Fig. 13a muestra la función de la magnitud compleja *calculada* de la señal Anti-Stokes como una función de la frecuencia, la Fig. 13b muestra la función de magnitud compleja *medida* de la señal Anti-Stokes como una función de la frecuencia. La Fig. 13c muestra la función de error de frecuencia compleja de las señales Anti-Stokes como función de la frecuencia; y

La Fig. 14a muestra la relación calculada de una curva de retrodifusión de Anti-Stokes a Stokes. La Fig. 14b muestra la relación calculada de una curva de retrodifusión de Anti-Stokes a Stokes, y la Fig. 14c muestra la *función de error de la relación* de la curva de retrodifusión de Anti-Stokes a Stokes.

Las Figs. son esquemáticas y simplificadas para mayor claridad, y solo muestran detalles que son esenciales para la comprensión de la invención, mientras otros detalles son excluidos.

15 **Modo(s) de poner en práctica la invención**

1. *Un sistema de medición por retrodifusión óptica*

20 La Fig. 1 muestra ilustraciones esquemáticas de un sistema óptico de medición de FMCW que comprende una unidad de excitación y evaluación y un sensor óptico.

En la Fig. 1a es mostrado un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW 10 que comprende una unidad de excitación y evaluación 11 para interactuar (como es ilustrado por la flecha 12) con el sensor óptico 13. En la Fig. 1b la unidad de excitación y evaluación 11 del sistema de medición 10 es mostrada comprendiendo la fuente de luz 111, por ejemplo un láser tal como un láser semiconductor (por ejemplo un láser semiconductor de 980 nm como el usado típicamente para los amplificadores de fibra óptica en los sistemas ópticos de telecomunicación para la transmisión de datos) que excita una señal de luz de frecuencia modulada 121 en un primer extremo 134 del sensor óptico 13 (por ejemplo una longitud L de fibra óptica, tal como una fibra de sílice), el sensor teniendo un segundo extremo 132, localizado remotamente con respecto a la fuente de luz 111. La señal de luz 121 de la fuente de luz 111 puede ser modificada opcionalmente (por ejemplo filtrada y/o enfocada) antes de entrar en el sensor óptico 13 (como es indicado por la flecha punteada dentro de la unidad de recepción 112). El(los) componente(s) óptico(s) (por ejemplo filtros, separadores, lentes, etc.) responsable(s) de la modificación pueden formar parte completa o parcialmente de la unidad de recepción 112 o estar localizados completa o parcialmente en otra parte (por ejemplo como una o más unidades separadas o formando parte del sensor 13). La señal de luz retrodifundida 122 del sensor óptico 13 es mostrada siendo recibida por la unidad de recepción 112 y las señales 113 son reenviadas desde la unidad de recepción 112 a la unidad de procesamiento y evaluación 114. La señal de luz recibida (retrodifundida) 122 comprende una señal de datos basada en la señal de luz de frecuencia modulada 121 de la cual pueden ser extraídos parámetros físicos de los puntos de medición espacialmente distribuidos 131 a lo largo del sensor 13. Los puntos de medición 131 están distribuidos sobre una longitud L del sensor óptico 13.

La Fig. 1c muestra un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW ejemplar 10 en forma de un sistema óptico de medición de la temperatura basado en la retrodifusión de Raman. Debe ser mencionado que el método de calibración también puede ser usado para la difusión de Rayleigh (por ejemplo para la medición de la humedad o la fuerza (como es descrito por ejemplo en la EP-692705)) u otras formas de difusión que proporcionan una señal de retrodifusión de tamaño apropiado.

El sistema de medición de la temperatura 10 de la Fig. 1c comprende una unidad de excitación y evaluación 11 que comprende el módulo de fuente de luz 111 (que comprende el generador de frecuencia 1113, el láser 1111, y el impulsor de láser 1112), un receptor óptico 112 (que comprende filtros y fotodetectores como es indicado por símbolos bien conocidos), una unidad de recepción y evaluación eléctrica 114 (que comprende convertidores de trans-impedancia, mezcladores 1141, amplificadores, filtros pasa banda, convertidores de analógico a digital (A/D) y unidades de procesamiento de señal 1142) y un sensor de temperatura 13 en la forma de un fibra óptica (incluyendo posiblemente componentes del acoplador de entrada-salida para acoplar la señal de luz 12 a la entrada/salida de la fibra óptica). Posibles fuentes de calor 135 son indicadas en el sensor. La unidad de medición 11 internamente tiene una longitud adicional de fibra óptica usada como referencia para el cálculo de la temperatura. Esta fibra óptica de referencia por razones prácticas está enrollada en una bobina de fibra que está situada entre el módulo óptico 112 y el sensor 13. Un interruptor óptico puede ser usado por ejemplo para medir la fibra óptica 13 desde ambos extremos (134 y 132) para obtener correcciones de atenuación de la fibra óptica. Una opción adicional es usar un interruptor óptico para medir varias fibras ópticas con la misma unidad de medición (parte de excitación y evaluación 11). La luz debe ser lanzada de manera secuencial hacia el primer extremo 134 de cada uno de la multitud de sensores. El interruptor óptico puede estar situado entre la bobina de referencia y el sensor 13. Estos componentes ópticos adicionales opcionales (bobina de referencia e interruptor óptico) no son mostrados en la Fig. 1. El sistema de la Fig. 1 comprende además la unidad de procesamiento 115 y la interfaz de usuario 116. La cooperación entre los varios bloques funcionales es indicada por flechas.

En la realización mostrada en la Fig. 1c el sistema comprende tres canales, es decir además de los dos canales de medición (Anti-Stokes y Stokes), un canal adicional de referencia. La salida del láser es modulada en amplitud por

ES 2 310 368 T3

una señal de seno cuya frecuencia (f_0 en la Fig. 1c, llamada en otra parte f_m) es barrida desde una frecuencia de partida (por ejemplo 0 Hz) hasta una frecuencia final (por ejemplo de 100 MHz) dentro de un intervalo de tiempo de medición por medio de un modulador de AF. La luz láser de frecuencia modulada 121 resultante es acoplada a través del módulo óptico 112 a un primer extremo 134 de la guía de onda óptica 13. La luz (incluyendo la luz de Raman) 122 que es retrodifundida continuamente desde cada parte (ver puntos 131 en la Fig. 1b) a lo largo de la longitud de la fibra 13 es filtrada espectralmente en el módulo óptico y convertida en señales eléctricas a través de los fotodetectores. Una parte de la luz del módulo de fuente de luz 111 es reflejada en el segundo extremo 132 (remoto) de la fibra óptica y una parte 133 es transmitida. Las señales (de medición) recibidas 113 son amplificadas y mezcladas en el rango espectral de baja frecuencia (rango de BF) proporcionando una señal eléctrica recibida (retrodifundida) como una función de la frecuencia de modulación f_m del láser. La transformación Inversa de Fourier de las señales de BF promediadas resulta en dos curvas de retrodifusión de Raman (Anti-Stokes y Stokes). Las amplitudes de estas curvas de retrodifusión son proporcionales a la intensidad de difusión de Raman a lo largo de la longitud de la fibra óptica. La temperatura de la fibra a lo largo del cable sensor es un resultado de la relación (proporción) de la amplitud de las señales de los dos canales de medición. Tal sistema y su uso para medir un perfil de temperatura distribuida o de humedad o de fuerza es descrito en la EP-0 692 705 y está comercialmente disponible en forma de un sistema de DTS (DTS = detección de temperatura distribuida) como por ejemplo un controlador OTS 40P de LIOS Technology GmbH, Colonia, Alemania.

2. "Datos de frecuencia" -> "Datos de retrodifusión" -> "Perfil de temperatura"

2.1 Datos de medición

El cálculo de las curvas de retrodifusión estandarizadas $s_R(z)$ está basado en una Transformación Inversa de Fourier de la curva de frecuencia compleja medida (que comprende partes verdaderas e imaginarias, por ejemplo que representan la magnitud y la fase, respectivamente, de los datos complejos), ver la ecuación (I) a continuación. Para realizar la transformación, los datos (complejos) deben ser medidos como una función de la frecuencia de modulación f_m del láser (respectivamente de la variable de frecuencia de ubicación estandarizada $v = \frac{2 \cdot f}{v_{gr}}$) desde una frecuencia de partida (por ejemplo 0 Hz) hasta una frecuencia final (por ejemplo de 100 MHz).

El valor medido a 0 Hz (denominado valor de CC) plantea problemas. Este valor es una superposición de dos contribuciones, una que se origina del valor promedio de la potencia de salida del láser (sin ninguna modulación) y otra del valor promedio de la señal de luz retrodifundida de Raman proveniente de la fibra óptica. Es decir una contribución es independiente del sensor y la otra depende del sensor.

La Fig. 2 muestra datos de medición de un sistema de retrodifusión de Raman para medir un perfil de temperatura distribuida, la Fig. 2a (izquierda) ilustrando la magnitud y la Fig. 2a (derecha) la fase de las señales complejas recibidas (eléctricas convertidas de manera descendente) de la luz Anti-Stokes y Stokes en el dominio de la frecuencia, la Fig. 2b mostrando las señales transformadas de Fourier en el régimen espacial (las correspondientes curvas de retrodifusión) y la Fig. 2c mostrando la curva de temperatura distribuida derivada.

La Fig. 2a (izquierda) muestra las magnitudes (en dB) de las señales de datos de frecuencia compleja recibidas 21 representando las señales retrodifundidas de Anti-Stokes 212 y Stokes 211 como una función de la frecuencia de modulación f_m de 0 a 8 MHz.

Las magnitudes de los datos de la frecuencia compleja son calculados como sigue. La magnitud de un número complejo $Z = a + jb$ es la raíz de la suma del cuadrado de la parte real (a) y el cuadrado de la parte imaginaria (b) de la función compleja Z:

$$Z = a + jb = |r| \cdot \exp(-j \frac{b}{a})$$

$$|r| = \sqrt{a^2 + b^2}$$

La fase es la relación angular entre la parte imaginaria (b) y la parte real (a) del número complejo Z.

La Fig. 2a (derecha) muestra las correspondientes fases 22 de las señales de datos de la frecuencia compleja recibidas 221 representando las señales retrodifundidas de Anti-Stokes y Stokes (las dos señales no son distinguibles en el diagrama mostrado) como una función de la frecuencia de modulación f_m de 0 a 8 MHz.

La Fig. 2b muestra las curvas de retrodifusión 23 (Stokes 232 y Anti-Stokes 231) derivadas de las señales complejas recibidas de las Fig. 2a y 2b, y la Fig. 2c muestra el perfil de temperatura resultante T(z) 24 (temperatura T en °C vs. coordenada de la longitud de la fibra z de 0 a 4500 m).

2.2 Marco matemático

La intensidad $dP_R(t)$ dependiente del tiempo (t) de la señal retrodifundida de Raman puede ser expresada como sigue:

$$dP_R(t) = \zeta_R \cdot \rho_R \cdot e^{-2(\alpha_p(z) + \alpha_R(z))} \cdot P_p \left(t - \frac{2z}{v_{gr}} \right) dz$$

donde R puede representar parámetros específicos de Stokes o Anti-Stokes, respectivamente, ζ_R toma en cuenta varias pérdidas (filtro, acoplador, etc.), ρ_R es el factor de retrodifusión de Raman, α_p es el coeficiente de atenuación en la guía de onda óptica en la longitud de onda λ_p (λ_p siendo la luz láser de bomba), α_R es el coeficiente de atenuación en las diferentes longitudes de onda de luz de Raman (Stokes y Anti-Stokes), P_p es la potencia óptica de la fuente de láser, z es la coordenada espacial a lo largo de la longitud L de la guía de onda óptica considerada, v_{gr} es la velocidad de grupo de la luz.

La potencia total de difusión de cada canal de Raman respectivo es obtenida mediante la integración a lo largo de la longitud de la fibra L.

Incluyendo la modulación de intensidad sinusoidal del láser, la señal recibida por la unidad de excitación y evaluación puede ser expresada como:

$$P_R(t) = \zeta_R \cdot \hat{P} \int_0^L \rho_R \cdot e^{-2(\alpha_p(z) + \alpha_R(z))} \left(1 + m \cdot \cos \left(2\pi \cdot f \left(t - \frac{2z}{v_{gr}} \right) \right) \right) dz$$

donde \hat{P} es la amplitud de CC de la luz láser y m es la profundidad de la modulación del láser (ver por ejemplo la Fig. 8) y f es la frecuencia de la señal de modulación (denominada f_m en otra parte de esta solicitud). La salida óptica del láser (luz de bomba) P_p es representada por:

$$P_p(t) = \hat{P} (1 + m \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t))$$

Desarrollo de la potencia de difusión de cada canal de Raman respectivo para la Integral de Fourier Inversa:

$$P_R(t) = P_{RO} + \Re \{ p_R(f) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t} \}$$

con

$$P_{RO} = \zeta_R \cdot \hat{P} \cdot \int_0^L \rho_R \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{RR}(z)} dz = \zeta_R \cdot \hat{P} \cdot \int_0^L \rho_R \cdot e^{-2(\alpha_p(z) + \alpha_R(z))} dz$$

$$p_R(f) = \zeta_R \cdot \hat{P} \cdot m \cdot \int_0^L \rho_R(z) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{RR}(z)} \cdot e^{-j2\pi \left(\frac{2 \cdot f}{v_{gr}} \right) z} dz$$

donde P_{RO} es el valor de CC correspondiente al punto de operación del láser ($m=0$) y $p_R(f)$ es la señal de medición compleja de la luz de Raman como función de la modulación del láser y \Re denota la parte real de una figura o función

compleja. El signo “!” arriba del signo de igualdad es una notación especial de la fórmula como Integral de Fourier. Note que una parte adicional de CC proviene de la parte real de la figura compleja en $f=0$ ($Re[p_R(0)] \neq 0$).

Si

$$v = \frac{2 \cdot f}{v_g}$$

es introducido como variable estandarizada de la frecuencia de ubicación, la siguiente señal estandarizada del detector S_R resulta en:

$$S_R(v) = \int_0^L \rho_R(z) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{PR}(z)} \cdot e^{-j2\pi \cdot v \cdot z} dz$$

con

$$S_R(v) = \frac{p_R(v)}{\zeta_R \cdot \hat{P} \cdot m}$$

que mediante transformación Inversa de Fourier conduce a:

$$s_R(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_R(v) \cdot e^{j2\pi \cdot v \cdot z} dv = \rho_R(z) \cdot e^{-2 \cdot \alpha_{PR} \cdot z}$$

Ec. (I)

que representa un cálculo teórico de la curva de retrodifusión de Raman como función de la ubicación (ver por ejemplo la Fig. 2b). Las curvas de retrodifusión de Raman describen la propagación de la intensidad de la luz de retrodifusión a lo largo de la fibra óptica.

3. Corrección del error de CC

Para la transformación inversa de Fourier solo necesitamos el valor de CC de

$$\Re\{p_R(f) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t}\}$$

Esto puede ser *determinado* usando un procedimiento de medición especial, ver más adelante. El valor de CC está compuesto por una parte relacionada con el valor promedio de la señal de OC del láser (que puede ser medida directamente) y una parte que se origina de la luz retrodifundida en los canales de medición (que no puede ser medida directamente). En una realización, el método puede ser arreglado para compensar sustancialmente los efectos que se originan del envejecimiento de los componentes (por ejemplo el diodo láser) o de las tolerancias de los componentes electrónicos. Esto puede ser logrado usando diferentes mediciones independientes para encontrar parámetros para calcular el valor de CC de la manera correcta.

Debido a la precisión numérica finita del método de cálculo, está presente un error residual específico del dispositivo. Este error puede tener un impacto significativo en el perfil de temperatura distribuida y también en la calibración de la temperatura.

La Fig. 3 muestra el impacto del error de CC en las señales Stokes y Anti-Stokes de un sistema de medición de temperatura por retrodifusión de Raman, las Figs. 3a y 3b mostrando los canales Stokes 31, 32 y Anti-Stokes 33, 34, respectivamente, con (las Figs. de la izquierda, 31, 33) y sin (las Figs. de la derecha, 32, 34) error de CC.

ES 2 310 368 T3

Es observado que las curvas de retrodifusión corregidas para el error de CC (derecha) muestran una linealidad mejorada en comparación con las curvas no corregidas (izquierda).

El valor de CC correcto de la señal del detector de medición de Raman puede ser obtenido usando diferentes mediciones independientes para encontrar los parámetros para el cálculo de este valor de CC.

El formalismo de la FMCW en el dominio de la frecuencia permite medir el término de retraso de la fase de la luz de retrodifusión de Raman a lo largo de la fibra. En el dominio espacial (después de la IFFT) la señal correspondiente es el término de la velocidad de grupo de la luz de Raman. Debido a las propiedades de la modulación de las fuentes de láser (modulación de intensidad por diversas frecuencias en un punto fijo de la operación), la señal compleja del detector en $f_m=0$ Hz (valor de CC) contiene un término adicional que es independiente del término de retraso de la fase de la luz de retrodifusión de Raman. Este término es indeseable por la IFFT y produce el error de CC antes mencionado. Este error de CC tiene un fuerte impacto y produce perturbaciones en las curvas de retrodifusión y también por el cálculo de las curvas de temperatura.

La tarea es determinar parámetros desconocidos de la ecuación antes mencionada en diferentes frecuencias. Los parámetros desconocidos son, la contribución al valor de CC causada por el punto de operación del láser (U_{DC1}), y la contribución al valor de CC causada por la modulación para frecuencias que descienden hasta cero Hz (U_{DC2}). Hay diferentes maneras posibles. El siguiente es un ejemplo:

$$P_R(t) = P_{RO} + \Re\{p_R(f) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t}\}$$

$$U_{Raman} \sim P_{RO} + \Re\{p_R(f) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t}\}$$

$$U_{Raman} \sim U_{DC1} + U_{DC2}$$

U es el voltaje de la señal de medición después del convertidor analógico-digital. El voltaje U es directamente proporcional a la corriente del fotodetector (es decir, a la intensidad de la luz óptica retrodifundida de Raman).

Con una primera medición en cualquier frecuencia de modulación ($f=f_2$, por ejemplo 3 kHz) de la fuente de láser en el canal de referencia, podemos determinar la profundidad de la modulación m del láser (ver la Fig. 8).

La Fig. 8 muestra la señal de referencia en la frecuencia $f_2 = 10$ kHz. La señal digital nos permite calcular el valor de CC (mediante la adición de los valores de muestreo divididos por el número de muestras de datos) y los valores de CA. A partir de estos valores puede ser derivada la profundidad de la modulación m.

En un segundo paso en $f=0$, es realizada una medición de la CC cuyo resultado es la suma de $U_{Raman}(f=0)$.

Con una tercera medición en $f=f_1$ (por ejemplo 8 kHz?) medimos el valor de CC que es denominado U_{DC1} . Solo es medido el valor de CC causado por el punto de operación del láser (por ejemplo acoplado a CC electrónicamente).

Un paso final es el cálculo del valor de CC (U_{DC2}) mediante la ecuación siguiente:

$$U_{DC2} = (U_{Raman}(f=0) - U_{DC1})$$

El método para corregir el valor de CC dado a conocer anteriormente tiene la ventaja de ser relativamente rápido y por tanto posible de realizar en un ciclo de medición con una duración razonablemente corta.

La descripción de la influencia del error de CC (Fig. 3) muestra que los errores influyen en los datos de la frecuencia compleja y en los datos de retrodifusión y es observable en la no linealidad de las curvas de retrodifusión (incluyendo en la parte más allá del segundo extremo, remoto, de la guía de onda óptica del sensor (por ejemplo 134 en Fig. 1), ver las Fig. 11a, 11b, 11c).

ES 2 310 368 T3

Para disminuir o eliminar los dos errores residuales mencionados, el curso del ruido en los datos de retrodifusión correspondientes a la parte más allá del extremo remoto de la guía de onda óptica es analizado para los datos tanto Stokes como Anti-Stokes.

5 En el caso ideal, el uso de datos de frecuencia libre de errores daría lugar a curvas de retrodifusión que comprenden un nivel de ruido constante en la parte de la curva que representa la región más allá del extremo remoto de la guía de onda. El curso del ruido en esta región debe ser representado idealmente mediante una línea recta con una pendiente/gradiente de 0.

10

4. Corrección del error de fase

La sección siguiente describe un procedimiento para corregir el error de fase en los datos de la frecuencia compleja recibidos debido a las tolerancias de los componentes y al comportamiento no lineal de los componentes.

15

El sistema de medición que aparece en la Fig. 1c tiene tres canales de medición separados. Las diferentes tolerancias y los efectos de envejecimiento de los componentes electrónicos de los canales individuales dan lugar a diferencias de fase “inducidas” de las señales correspondientes lo que conduce a curvas de retrodifusión no lineales e influye de nuevo en el perfil resultante del parámetro físico que ha de ser determinado por el sistema (en este caso la temperatura).

20

La Fig. 4 muestra datos de la medición de un sistema de medición de la temperatura por retrodifusión de Raman *con* (Fig. 4a) y *sin* (Fig. 4b) un error de fase debido a las tolerancias y a la degradación de los componentes.

25

La Fig. 4a muestra un ejemplo *con* un error de fase (grande) en los datos de la medición de la frecuencia compleja. La figura de arriba representada por el número de referencia 41 muestra la magnitud (en unidades de voltaje, que es proporcional a la intensidad de la señal del fotodetector) de ambas señales de medición complejas 411, 412 (que representan Anti-Stokes y Stokes, respectivamente como función del punto de medición) como una función de la frecuencia. La figura del centro 42 muestra las curvas de retrodifusión 421, 422 después de la transformación de Fourier (que representan Anti-Stokes y Stokes, respectivamente), es decir una medición de la potencia óptica [dB] *vs.* ubicación [m] (es decir la distancia desde la unidad de excitación y evaluación). La deformación 423 en la curva alrededor de los 1450 m indica el impacto debido a los errores de fase cerca del extremo de la fibra. El error de fase produce un comportamiento no lineal con perturbaciones también en la curva de temperatura [°C] *vs.* datos de la ubicación [m] como es mostrado en la figura de abajo 43. Una temperatura elevada es indicada por el pico 431 alrededor de los 2000 m.

35

Las correspondientes curvas del desfase [°] *vs.* la frecuencia [kHz] del canal Stokes son mostradas a modo de ejemplo en la Fig. 5a, número de referencia 51 con una vista ampliada (Fig. 5b), gráfico 511. El impacto del error es identificable al principio del gráfico. En lugar de un aumento lineal, la fase contiene una compensación de fase (identificable por la extrapolación lineal de la curva (por ejemplo de 1 a 6 kHz) hacia el eje de la frecuencia). Esta compensación de fase es la razón de las perturbaciones no lineales en las curvas de retrodifusión.

40

La Fig. 4b muestra un ejemplo de datos *sin* error de fase en los datos de medición de la frecuencia compleja que corresponden a los datos de la Fig. 4a *con* un error de fase. La figura de arriba representada por el número de referencia 44 muestra de manera similar la magnitud de ambas señales de medición complejas 441, 442 (que representan Anti-Stokes y Stokes, respectivamente como función del punto de medición) como una función de la frecuencia. La figura del centro 45 muestra de manera similar las curvas de retrodifusión 451, 452 después de la transformación de Fourier (que representan Anti-Stokes y Stokes, respectivamente). Es observado que el comportamiento de la curva alrededor de los 1450 m (número de referencia 453) cerca del extremo de la fibra es significativamente diferente de la curva correspondiente de la Fig. 4a. Los datos compensados del error de fase proporcionan un comportamiento lineal como también es mostrado en la curva de temperatura [°C] de abajo *vs.* la ubicación [m] 46. Una temperatura elevada es indicada por el pico 461 alrededor de los 2000 m. La Fig. 5c muestra una vista detallada de la correspondiente función de fase 512 de la señal de medición compleja como función de la frecuencia. Se observa que la curva del desfase incluye el punto (0,0).

50

55

La Fig. 5 muestra la función de fase de la señal recibida (eléctrica convertida) de un sistema de medición de la temperatura por retrodifusión de Raman, la Fig. 5a mostrando un rango de frecuencia de 0 a 260 kHz y las Figs. 5b y 5c detalles de la curva en un rango de frecuencia de 0 a 30 kHz *con* y *sin* error de compensación, respectivamente.

60

El valor de fase absoluto del error de compensación es muy bajo (típicamente de $< 1^\circ$). El valor de compensación es determinado mediante una aproximación lineal de la función de fase en la región de baja frecuencia (extrapolación lineal de la curva a su intersección con el eje de la frecuencia, frecuencia $\rightarrow 0$ Hz y más allá). El paso siguiente es una valoración aditiva de la función de fase completa con el valor de compensación (posiblemente) negativo. La determinación del error de compensación de fase y su corrección puede ser preferiblemente parte de un procedimiento de medición en línea de una herramienta de software de DSP (Procesamiento de la Señal Digital), como es mencionado más adelante en la descripción *del procedimiento automatizado de calibración del sistema*.

65

El resultado de la corrección de la compensación del desfase es mostrado en las Fig. 4b y 4c.

ES 2 310 368 T3

5. Procedimiento de calibración automatizada del sistema

Es ventajoso que el sensor sea incorporado en los procedimientos de calibración. Las propiedades de retrodifusión de la guía de onda óptica influyen en el curso de los datos de frecuencia compleja recibidos, de modo que los valores de errores del dispositivo (la parte de excitación y evaluación) no sean constantes. Además, su impacto en el perfil de temperatura es diferente. La calibración de la parte de excitación y evaluación debe ser repetida cuando las propiedades del sensor cambian (por ejemplo debido a una sustitución del sensor o al cambio de las propiedades físicas del sensor conectado a la parte de excitación y evaluación). En otras palabras, una recalibración del sistema de medición debe ser realizada (al menos) en caso de que el sensor sea sustituido por otro sensor que tenga diferentes propiedades físicas (incluyendo longitud, composición química, atenuación, etc.).

El presente procedimiento de calibración comprende un método automatizable, por ejemplo controlado por computadora, para eliminar el error residual en la fase de los datos de frecuencia compleja recibidos y el error de CC en los datos de retrodifusión basados en el concepto de la linealidad del ruido.

Basado en los valores de la señal de ruido esperados después del extremo de la fibra óptica (valor medio igual a 0 y gradiente/pendiente igual a 0) en la representación de datos lineales de las curvas de retrodifusión, los factores de corrección para el *procedimiento de corrección del valor de CC* (corrigiendo la magnitud del primer punto de la frecuencia) y para el *procedimiento de corrección de la compensación de fase* (eliminando la compensación de fase en toda la característica de fase de los datos de frecuencia) son determinados por ejemplo como es descrito de la manera siguiente.

En el 1^{er} paso un número mayor de mediciones (por ejemplo 20) son realizadas usando los procedimientos en línea “corrección del valor de CC” y “corrección de la compensación de fase” *sin* eliminar los errores residuales descubiertos. Los datos son memorizados en “una matriz de datos de frecuencia sin corregir”.

En el 2^{do} paso “factores de corrección de errores residuales” para los procedimientos en línea nombrados con anterioridad, que son inicializados a valores neutrales en el primer paso de iteración, son aplicados a la “matriz de datos de frecuencia sin corregir” resultando en la “matriz de datos de frecuencia corregidos”.

En el 3^{er} paso la IFFT es aplicado a cada conjunto de datos de frecuencia resultando en la “matriz de curvas de retrodifusión corregidas” que son promediadas para reducir la magnitud del ruido especialmente en el área más allá del extremo de la fibra. La magnitud de ruido debe ser menor que 20 muestras, por ejemplo.

En un 4^{to} paso es analizada la característica del ruido en el área más allá del extremo de la fibra. Existen dos criterios independientes para modificar los “factores de corrección de los errores residuales”.

1. Si el valor medio del ruido más allá del extremo de la fibra en la representación lineal de los datos de retrodifusión promediados es positivo, el factor de corrección de errores residuales para el *procedimiento de corrección del valor de CC* tiene que ser disminuido, si es negativo, aumentado.
2. Si el gradiente (pendiente) del ruido más allá del extremo de la fibra en la representación lineal de datos de los datos de retrodifusión promediados es positivo, el factor de corrección de errores residuales para el *procedimiento de corrección de la compensación de fase* tiene que ser disminuido, si resulta negativo, aumentado.

Los pasos del 2 al 4 son repetidos para la señal Stokes y Anti-Stokes hasta que sean satisfechos los valores de desviaciones aceptables de 0 para el valor medio y el gradiente del ruido más allá del extremo de la fibra (por ejemplo criterios de convergencia del método de iteración: valor medio < 0.05 muestras; gradiente < 0.005 muestras). En un paso final los factores de corrección de errores residuales son memorizados para el sistema dedicado (incluyendo la fibra). Los procedimientos en línea “corrección del valor de CC” y “corrección de la compensación de fase” tienen que usar estos factores específicos de sistema en una operación ulterior.

El método de iteración descrito “calibración automatizada del sistema” es conveniente para la automatización, la producción de sistemas de medición en mayores cantidades, y para ser usado en mediciones en el terreno para la puesta en marcha y mantenimiento eliminando también los efectos de envejecimiento. Elimina los impactos de los errores de CC (ver las Fig. 11a, 12b y 12c) y los errores de compensación de fase (ver las Fig. 12d y 12e) en las linealidades de las curvas de retrodifusión.

La Fig. 11a muestra la curva de retrodifusión de la luz de Raman de un sensor con una longitud de 5273 m sin errores de CC. La luz de Raman que reside al final de la fibra escapa y no puede ser detectada con el dispositivo de medición. La señal después del extremo de la fibra tiene un comportamiento de ruido aleatorio que se corresponde con las propiedades de ruido del fotodetector. El comportamiento de ruido aleatorio proporciona una señal que tiene una magnitud que fluctúa alrededor de cero con un valor medio de cero en todas las posiciones de la fibra más allá del extremo de la fibra, lo que incluye que el gradiente (pendiente) también es cero. La Fig. 11b muestra la misma curva de retrodifusión que antes solo que en una escala lineal. El gráfico confirma el comportamiento de ruido aleatorio más allá del extremo de la fibra. El ruido aleatorio es función lineal de la distancia.

Para el caso en que el cálculo del valor de CC o del valor de la compensación de fase tiene un error pequeño, el ruido aleatorio no tiene la misma característica que antes. El ruido contiene una compensación en general diferente lo que produce una función no lineal a lo largo de la distancia. Las Figs. 11b y 11c muestran estas propiedades del ruido en las curvas de retrodifusión con las mismas condiciones que antes incluyendo el error de CC.

La Fig. 11d muestra las propiedades del ruido de la curva de retrodifusión de una fibra óptica con una longitud de 4415 m con error de compensación de fase (el eje Y vertical estando en una escala *lineal*), y la Fig. 11e muestra la curva de retrodifusión corregida de la fibra óptica de la Fig. 11d sin error de compensación de fase (escala lineal del eje Y).

6. Calibración de la frecuencia

6.1 Introducción

El comportamiento no lineal de los componentes ópticos y electrónicos produce contorción en los datos de frecuencia. El resultado es también una contorción no lineal a lo largo del perfil de temperatura lo que reduce la precisión del sistema de medición de la temperatura. Estos tipos de errores tienen una compensación no lineal leve de como máximo ± 1 K a lo largo del perfil de temperatura. Especialmente para las aplicaciones de sensores que requieren precisión de alta temperatura es necesario un procedimiento adicional de calibración.

Los efectos no lineales antes mencionados resultan en una valoración no lineal de cada punto de medición de la función de frecuencia compleja. En contraste con los errores aditivos debido a la interferencia, los efectos no lineales resultan en un error multiplicativo en cada punto de frecuencia compleja. Este tipo de función de error multiplicativo puede ser corregido mediante una llamada *calibración de la frecuencia*. La calibración de la frecuencia es ventajosamente la secuencia final de la corrección de toda la calibración del sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW.

La Fig. 12a muestra un perfil de temperatura, es decir la temperatura [°C] como función de la coordenada de longitud de la fibra z [m], *sin* calibración de la frecuencia mostrando una perturbación distribuida a lo largo de la fibra. El sensor consiste en dos fibras ópticas diferentes (aquí) conectadas en serie. La primera fibra óptica con una longitud de alrededor de 100 m (denotada “fibra de referencia interna” en la Fig. 12a) está situada en el sistema de medición como una referencia de la temperatura para el cálculo de la temperatura. La segunda fibra con una longitud de alrededor de 3900 m es la verdadera fibra del sensor, que está conectada mediante un conector óptico al sistema de medición. La fibra del sensor está situada en una cámara climática a una temperatura de 20°C.

El perfil de temperatura a lo largo del cable sensor revela la contorción no lineal antes mencionada a lo largo del perfil de temperatura. En lugar de un perfil de temperatura constante con un valor de temperatura de 20°C, el comportamiento no lineal de los componentes ópticos y electrónicos produce una perturbación no lineal a lo largo del perfil de temperatura. El error máximo de -1 K corresponde a la posición de longitud de alrededor de $z=1000$ m y el error máximo de +1 K corresponde a la posición de longitud de alrededor de $z=3500$ m (ver la Fig. 13a).

La Fig. 12b muestra un perfil de temperatura como función de la longitud de la fibra de la misma fibra antes mencionada *después de la calibración de la frecuencia*. El gráfico muestra el perfil de temperatura del cable sensor con el valor esperado de temperatura de 20°C. El impacto de la contorción no lineal a lo largo de todo el perfil de temperatura (incluyendo la fibra de referencia interna) es corregido.

El método de calibración de la frecuencia toma en cuenta la circunvolución teórica entre la frecuencia y el dominio espacial, ver la descripción anterior basada en el análisis de Fourier.

A partir de este marco matemático, pueden ser calculados los datos de la frecuencia compleja. Es importante el conocimiento de las características del sensor en cuestión, por ejemplo de una fibra óptica estándar especial, que pueden por ejemplo ser extraídas de las mediciones de la fibra con un equipo de medición ya calibrado.

6.2 Marco matemático

La siguiente ecuación describe la curva de retrodifusión de Raman como función de la ubicación y es la base matemática para determinar la función de la frecuencia compleja usando la Transformación de Fourier.

$$s_R(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_R(\nu) \cdot e^{j2\pi \cdot \nu \cdot z} d\nu = \rho_R(z) \cdot e^{-2\alpha_{RR} \cdot z}$$

ES 2 310 368 T3

La ecuación anterior para la curva de retrodifusión de Raman describe el caso de una fibra óptica. Con la condición de que con el factor de retrodifusión de Raman constante ρ_R y el coeficiente de atenuación constante α_{PR} a lo largo de la fibra óptica la función de la frecuencia compleja de la luz de Raman es representada por:

$$S_{R1}(\nu) = \frac{\rho_{R1}}{2\alpha_{PR1} + j2\pi\nu} \left(1 - e^{-2\alpha_{PR1} \cdot L_1} \cdot e^{-j2\pi\nu \cdot L_1} \right)$$

L_1 es la longitud de la fibra óptica. Los efectos adicionales debido a la reflexión de Fresnel, descritos por el factor de reflexión R_{FR} , y las pérdidas adicionales debido a la inserción de pérdidas η no son incluidas en la ecuación antes mencionada.

En un intento de encontrar una descripción matemática conveniente de la configuración prácticamente relevante de las fibra óptica, debemos expandir el modelo óptico de las propiedades. Haciendo referencia al método de calibración, debemos contemplar una configuración de fibra con dos fibras ópticas diferentes con diferentes longitudes (L_1 , L_2), diferentes factores de retrodifusión de Raman (ρ_{R1} , ρ_{R2}) y diferentes coeficientes de atenuación (α_{PR1} , α_{PR2}). Las pérdidas de inserción del conector óptico para la conexión de fibra óptica son descritas por η_{1-2} . La correspondiente función de la frecuencia compleja de la luz de retrodifusión de Raman de dos fibras ópticas es

$$S_R(\nu) = S_{R1}(\nu) + S_{R2}(\nu)$$

con

$$S_{R1}(\nu) = \frac{\rho_{R1}}{2\alpha_{PR1} + j2\pi\nu} \left(1 - e^{-2\alpha_{PR1} \cdot L_1} \cdot e^{-j2\pi\nu \cdot L_1} \right)$$

$$S_{R2}(\nu) = \eta_{1-2} \cdot \left\{ \frac{\rho_{R2}}{2\alpha_{PR2} + j2\pi\nu} \left(1 - e^{-2\alpha_{PR2} \cdot L_2} \cdot e^{-j2\pi\nu \cdot L_2} \right) \right\} \cdot e^{-j2\pi\nu \cdot L_1}$$

El siguiente modelo matemático considera los factores de la reflexión de Fresnel en el primer extremo de la fibra óptica (R_{FR1}), en la conexión del conector óptico (R_{FR2}) y también en el segundo extremo de la configuración de la fibra óptica (R_{FR3}). Las propiedades de la reflexión pueden ser descritas mediante el siguiente término de la frecuencia compleja:

$$S_{FR}(\nu) = S_{F1}(\nu) + S_{F2}(\nu) + S_{F3}(\nu)$$

con

$$S_{F1}(\nu) = R_{FR1}$$

$$S_{F2}(\nu) = R_{FR2} \cdot e^{-2\alpha_{PR1} \cdot L_1} \cdot e^{-j2\pi\nu \cdot L_1}$$

$$S_{F3}(\nu) = R_{FR3} \cdot \eta_{1-2} \cdot e^{-2\alpha_{PR1} \cdot L_1} \cdot e^{-j2\pi\nu \cdot L_1} \cdot e^{-2\alpha_{PR2} \cdot (L_2 - L_1)} \cdot e^{-j2\pi\nu \cdot (L_2 - L_1)}$$

ES 2 310 368 T3

La expresión completa para la señal de frecuencia compleja basada en la configuración de fibra óptica antes mencionada es la suma de la luz de Raman de retrodifusión y reflejada:

5

$$S_R(\nu) = S_{R1}(\nu) + S_{R2}(\nu) + S_{F1}(\nu) + S_{F2}(\nu) + S_{F3}(\nu)$$

10 El desarrollo de estos términos está basado en el modelo de la velocidad de grupo de cables ópticos (ver por ejemplo G. Grau, W. Freude, "Optische Nachrichtentechnik", Springer Verlag, y H.-G. Unger, "Optische Nachrichtentechnik", Teil 1 y Teil 2, Hüthig-Verlag).

15 6.3 Procedimiento de calibración

Los parámetros ópticos (longitud de la fibra, factor de retrodifusión de Raman, coeficiente de atenuación, pérdidas de inserción y reflexiones de Fresnel) de la configuración de la fibra óptica (fibra de calibración) pueden ser medidos por dispositivos ópticos comerciales que usan Reflectometría Óptica en el Dominio Temporal (OTDR) (ver por ejemplo Erhard Grimm, Walter Nowak, "Lichtwellenleitertechnik", Hüthig-Verlag). El impacto de las reflexiones de Fresnel puede ser reducido usando un conector óptico con baja pérdida de retorno y cortando el extremo de la fibra óptica en ángulo.

20 Con este conocimiento sobre las propiedades ópticas de la configuración óptica, la curva de frecuencia compleja esperada puede ser determinada por medio del modelo matemático antes mencionado. La relación compleja de los datos *medidos* del sistema de retrodifusión de FMCW S_{RM} con respecto a la función de la frecuencia compleja *calculada* S_R proporciona la función del error de frecuencia compleja:

30

$$S_K(\nu) = \frac{S_{RM}(\nu)}{S_R(\nu)}$$

35

La Fig. 13a muestra la función de la magnitud compleja *calculada* de la señal receptora Anti-Stokes como función de la frecuencia (de 0 a 35 MHz). La correspondiente señal *medida* de la señal Anti-Stokes es presentada en la Fig. 13b. La relación compleja de la señal medida con respecto a la calculada es la función de error de la frecuencia compleja. La Fig. 13c muestra la correspondiente función de error compleja S_K de la señal Anti-Stokes. El eje vertical (eje Y) está en una escala logarítmica [dB].

40 Las desviaciones resultantes entre los datos de frecuencia medidos y los calculados pueden ser corregidas por una unidad de procesamiento de señal, como por ejemplo un DSP. La función de error de la frecuencia compleja debe ser almacenada en una memoria, como por ejemplo en la memoria de un DSP. En inicio de la (siguiente) medición, los datos de frecuencia S_{RM} detectados de las señales de Raman pueden ser corregidos con la función de error de la frecuencia compleja S_K por medio de la siguiente división compleja:

50

$$S_{ideal}(\nu) = \frac{S_{RM}(\nu)}{S_K(\nu)}$$

55

El resultado de la calibración de la frecuencia es un perfil de temperatura sin contorción no lineal y elevada precisión.

60 Una ventaja de la corrección de la frecuencia compleja es la prevención de perturbaciones no lineales en las curvas de retrodifusión. Para aplicaciones que requieren perfiles de retrodifusión de elevada precisión, la corrección mediante la función de error de la frecuencia compleja puede ser ventajosa. El almacenamiento de las dos funciones de error de la frecuencia compleja S_K (Stokes y Anti-Stokes) requiere una memoria suficiente, como por ejemplo en la tarjeta DSP.

65 Una *alternativa* para determinar la función de error de la frecuencia compleja en el dominio de la frecuencia es el cálculo de una *función de error de la relación* de las curvas de retrodifusión desde las señales Anti-Stokes hasta las Stokes en el dominio espacial.

La Fig. 14a muestra la relación (es decir la proporción o el cociente numérico en un punto por base de puntos), $S_{\text{Anti-Stokes}}(z)/S_{\text{Stokes}}(z)$ de la curva de retrodifusión Anti-Stokes con respecto a Stokes de las señales (teóricas) *calculadas* y la Fig. 14b muestra la correspondiente relación medida de la curva de retrodifusión Anti-Stokes con respecto a Stokes en una escala logarítmica vertical como una función de la coordenada de la longitud de fibra [m].

La diferencia entre las relaciones de las curvas de retrodifusión Anti-Stokes con respecto a Stokes de la función de la señal de frecuencia compleja medida y calculada es mostrada en la Fig. 14c. La escala vertical en la Fig. 14c es lineal y la escala axial es la coordenada de la longitud de fibra [m]. La curva de perturbaciones resultante representa la función de error de la temperatura a lo largo de la fibra óptica (ver la Fig. 12a). El uso de la *función de error de la relación* tiene la ventaja de que los requerimientos con respecto al almacenamiento de datos son mucho menos exigentes que los de las *funciones de error de la frecuencia compleja*. Una desventaja es la contorción no lineal en las curvas de retrodifusión de Raman.

7. El sensor óptico

Las propiedades del sensor óptico, por ejemplo una fibra óptica, incluyendo conectores ópticos, posibles empalmes, revestimiento, atenuación y longitud de la fibra, etc. ejercen una influencia en los resultados de las mediciones. Las propiedades ejercen una influencia directa sobre los datos de frecuencia compleja recibidos (por ejemplo originándose de la difusión de Raman). Idealmente, estos efectos son corregibles y no deben representar problemas al cambiar el sensor (suponiendo que las propiedades del nuevo sensor están bien caracterizadas y consideradas). En realidad, debido a la precisión finita de las correcciones, un error residual está presente en un procedimiento normal de calibración (donde el equipo es calibrado con un sensor “estándar” de propiedades conocidas) conduciendo a un error en las propiedades físicas derivadas (por ejemplo en el perfil de temperatura). Idealmente, una recalibración debe ser realizada cada vez que otro sensor es conectado a la unidad de excitación y evaluación. Esto hace que se pierda tiempo y resulta poco práctico (especialmente en equipos ya instalados).

Estos problemas pueden ser superados mediante una calibración automatizada basada en el concepto de las linealidades del ruido como es descrito aquí con anterioridad (ver sección 5).

La Fig. 6 muestra las mediciones de la luz Anti-Stokes de Raman de un sensor de guía de onda con una longitud de 100 m, la Fig. 6a mostrando la curva de retrodifusión (escala logarítmica) y la Fig. 6b mostrando la correspondiente señal de frecuencia transformada de Fourier (función de la magnitud de la señal de medición compleja).

La Fig. 6a muestra la curva de retrodifusión de la luz Anti-Stokes de Raman de un sensor de guía de onda con una longitud de 100 m (escala logarítmica). La primera parte del gráfico describe la atenuación lineal de la luz de Raman a lo largo de la longitud de la fibra. La luz que escapa del extremo remoto de la fibra no puede llegar al fotodetector del dispositivo de medición. La señal correspondiente del detector contiene ruido aleatorio que en la señal de retrodifusión produce una banda ruido en la región más allá del extremo remoto de la fibra. Las características de la correspondiente señal de frecuencia transformada de Fourier son mostradas en la Fig. 6b (función de la magnitud de la señal de medición compleja). Se observa que la señal de medición compleja y también el primer punto de medición (valor de CC) dependen de la longitud de la fibra. Ello implica que es ventajoso repetir la rutina de la calibración del hardware cuando las propiedades ópticas del sensor (fibra óptica) son cambiadas.

La Fig. 7 muestra las mediciones de la luz Anti-Stokes de Raman de un sensor con una longitud de la guía de onda de 5000 m, la Fig. 7a mostrando la curva de retrodifusión (en una escala logarítmica) en función de la ubicación en la fibra y la Fig. 7b mostrando la función de la magnitud en función de la frecuencia.

Una comparación de los gráficos correspondientes de la frecuencia de las Figs. 6b y 7b hacen claro el impacto de diferentes propiedades del sensor (aquí usando la longitud de la fibra como ejemplo). Esta clase de cambios de la señal de frecuencia tiene también un impacto en la medición del valor de CC. Esto significa que el valor de CC no es una función constante e ilustra la ventaja de incluir el sensor en la corrección del valor de CC de los datos de la frecuencia compleja.

8. Calibración de la interferencia

La Fig. 10 ilustra la influencia de la interferencia entre los canales de medición en las curvas de retrodifusión resultantes (todas las curvas en una escala logarítmica en el eje Y vertical), la Fig. 10a mostrando la interferencia en los diferentes canales (Anti-Stokes y Stokes), la Fig. 10b mostrando la interferencia “pura” desde el módulo láser hasta el tablero receptor óptico de diferentes canales de medición. En este caso ninguna señal óptica puede llegar al fotodetector de los tableros receptores. La Fig. 10c mostrando la señal de medición como función de la frecuencia *sin* interferencia eléctrica, las Figs. 10d y 10e mostrando la curva de retrodifusión de una fibra óptica *con* y *sin* error de interferencia, respectivamente.

La Fig. 10a muestra la señal de medición de la luz tanto Stokes como Anti-Stokes en función de la frecuencia (función de la magnitud). Las señales esperadas deben tener una caída exponencial a lo largo del eje de la frecuencia (una forma similar a la de la Fig. 7b). Los picos a 18 Mz y a 30 Mz provienen de la interferencia que produce

superposiciones aditivas en las señales de medición. Esta clase de interferencia provoca un error adicional en forma de ruido aleatorio e interferencias no lineales en el perfil de temperatura. Al principio de la curva de retrodifusión (Fig. 10d) podemos ver una oscilación. Esta oscilación es eliminada después de la compensación de la interferencia. En la Fig. 10e la curva de retrodifusión es plana al principio. Una comparación de estos gráficos (Fig. 10d y Fig. 10e) muestra un efecto adicional en la posición 140 m. La pequeña caída corresponde a la pérdida de inserción de la conexión de la fibra óptica. Este impacto en la retrodifusión es superpuesto debido al efecto de la interferencia. Esto significa que la interferencia produce errores y efectos no lineales en las curvas de retrodifusión con consecuencias también en el perfil de temperatura.

Esta clase de error es independiente de la señal de medición de Raman. Podemos medir estas perturbaciones eléctricas muy fácilmente abriendo la conexión del conector de la fibra óptica en el módulo láser. La luz láser por tanto ya no es recibida por el fotodetector. La medición de la frecuencia es mostrada en la Fig. 10b como interferencia compleja entre las señales Anti-Stokes y Stokes como función de la frecuencia en una escala logarítmica.

Esta señal de interferencia compleja puede ser almacenada en el sistema de DSP. La corrección del error es una sustracción compleja fácil en la que se sustrae la señal de medición (Fig. 10a) de la señal de interferencia pura (Fig. 10b). El resultado de esta operación es representado en la Fig. 10c que muestra la señal de medición como función de la frecuencia sin interferencia eléctrica (escala logarítmica).

Las Figs. 10d y 10e (todo en escala logarítmica) representan las correspondientes curvas de retrodifusión *con* (Fig. 10d) y *sin* (Fig. 10e) interferencia, respectivamente.

La Fig. 11 muestra las curvas de retrodifusión para un sensor óptico de guía de onda de una longitud fija con y sin errores de CC, habiendo sido eliminado ya el error de compensación de fase, las Figs. 11a y 11b mostrando la curva de retrodifusión de una fibra óptica con una longitud de 5273 m *sin* error de CC, el eje vertical Y estando en escala logarítmica y en escala lineal, respectivamente, y la Fig. 11c mostrando la curva de retrodifusión de una fibra óptica con una longitud de 5273 m *con* error de CC (escala logarítmica).

9. Secuencia de calibración

9.1 Calibración del hardware

La idea básica para el desarrollo de un procedimiento apropiado de calibración *de hardware* es separar los errores para poder realizar una corrección orientada al error.

Los diferentes errores en las curvas de frecuencia compleja pueden ser corregidos de manera ventajosa en la siguiente secuencia de corrección:

1. Errores de frecuencia aditivos debido a la interferencia eléctrica.
2. Error de compensación de fase debido a las tolerancias de los componentes.
3. Errores de CC debido al problema de medición del valor de CC para la fórmula de la Transformación Inversa de Fourier con una alta precisión.
4. Errores residuales de la corrección de los pasos 2 y 3 debido a una precisión físicamente limitada.
5. Errores de frecuencia multiplicativos debido al comportamiento no lineal de los componentes.

En principio existen otras secuencias de corrección posibles, pero la secuencia antes mencionada es preferida desde el punto de vista técnico.

9.2 Calibración de la temperatura

Después de la calibración del hardware el siguiente procedimiento es ventajosamente la *calibración de la temperatura* basada en las propiedades de la fibra óptica con la siguiente secuencia:

1. Determinación de la dependencia de la temperatura del revestimiento de la fibra.
2. Determinación del valor de la temperatura absoluta.
3. Determinación de la sensibilidad.

ES 2 310 368 T3

Ejemplo 1

La Fig. 9 muestra un ejemplo de una combinación preferida de los procedimientos de calibración.

5 En una realización, el método de calibración comprende los pasos siguientes que son parte de un procedimiento de calibración automatizada realizado en software en un DSP del sistema de medición:

Paso 1

10 *Compensación de la interferencia*

15 Para eliminar la interferencia, la interferencia es determinada mediante un procedimiento de medición específico (ver sección 8) durante la fabricación del sistema. Los resultados de la medición son memorizados en el sistema dedicado. Dentro de cada ciclo de medición en la operación normal la interferencia memorizada es sustraída de los datos de la frecuencia compleja medidos.

Paso 2

20 *Corrección de la Compensación de Fase*

25 La compensación de fase puede ser determinada mediante la aproximación lineal (ver sección 4) durante la fabricación del sistema o como medición en línea dentro de cada ciclo de medición durante la operación normal. El resultado ligeramente proclive a errores de la aproximación es mejorado mediante un segundo factor de corrección determinado con la calibración automatizada del sistema aplicando criterios sobre el ruido, si el paso 4 ya fue ejecutado.

Paso 3

30 *Corrección del valor de CC*

35 La corrección del valor de CC como método específico para determinar el valor real FFT-CC (ver sección 3) es ejecutada automáticamente (en línea) dentro de cada ciclo de medición durante la operación normal. El procedimiento de corrección del valor de CC toma en consideración los resultados de la calibración automatizada del sistema aplicando criterios sobre el ruido, si el paso 4 ya fue ejecutado.

Paso 4

40 *Calibración automatizada del sistema*

45 Los errores residuales de la corrección de la compensación de fase y la corrección del valor de CC son determinados mediante la calibración automatizada del sistema (ver sección 5). Con el método de iteración descrito que usa reglas definidas para modificar los factores de la corrección hasta que sean satisfechos los criterios de convergencia es lograda una linealización de las curvas de retrodifusión. La calibración automatizada del sistema es realizada durante la producción y tiene que ser repetida durante la puesta en marcha y el mantenimiento para tomar en consideración una fibra diferente o los efectos de envejecimiento. Los resultados de la calibración automatizada del sistema también son memorizados en el sistema y son aplicados en el paso 2 y 3 dentro de cada ciclo de medición durante la operación normal.

Paso 5

50 *Calibración de la Frecuencia*

55 La calibración de la frecuencia (ver sección 6) toma en consideración que debajo de la compensación de fase y del valor de CC hay una característica de fase y una característica de magnitud para frecuencias de medición por encima de cero Hz que se desvían de los resultados ideales. Los datos de la corrección son determinados dentro de una medición específica durante la producción de un sistema dedicado y son memorizados en el sistema. Dentro de cada ciclo de medición durante la operación normal estos datos son aplicados a los datos de frecuencia después de la corrección del valor de CC y de la corrección de la compensación de fase.

Paso 6

65 *Calibración de la Temperatura*

Los datos de la corrección (ver sección 9.2) son determinados dentro de una medición específica durante la fabricación de un sistema dedicado y son memorizados en el sistema.

ES 2 310 368 T3

Paso 7

Calibración de Campo

5 La calibración de campo es una repetición del paso 4 solo mediante un procedimiento de software, sin ningún otro recurso. La unidad de evaluación no necesita ser abierta con este fin. Los resultados de la recalibración eliminan un efecto de retroalimentación principalmente en el valor de CC cuando el sistema es modificado por un cambio de fibra y los efectos de envejecimiento de la unidad de evaluación.

10

Ejemplo 2

Haciendo referencia a los problemas del arte anterior mencionados en la sección “Arte anterior” que aparece anteriormente (puntos a)-e)), el ejemplo siguiente discute soluciones a esos problemas en el marco de la presente invención.

15

a) *Errores de CC*

20

a1) Dificultad de determinar el valor de la señal de retrodifusión en $f_m = 0$ (valor de CC).

a2) El valor de CC dependiente de las propiedades del sensor.

a1) y a2) son compensados mediante el *procedimiento automatizado de corrección de CC* (ver sección 3 anterior), que es un procedimiento de medición, usando además un factor de corrección determinado por un procedimiento de linealización denominado *calibración automática del sistema* (ver sección 5 anterior) aplicando los criterios relacionados con las características del ruido en las curvas de retrodifusión. Para determinar exactamente el valor de CC, el procedimiento de corrección de la CC usa los resultados del procedimiento de linealización para eliminar los errores residuales.

30

b) *Errores debido a las tolerancias y al comportamiento no lineal de los componentes ópticos y electrónicos*

b) es compensado mediante el *procedimiento de corrección de la compensación de fase* (tolerancias de los componentes), ver secciones 4 y 5 anteriores, y también mediante el *procedimiento de calibración de la frecuencia* (comportamiento no lineal de los componentes), ver sección 6 anterior.

35

El valor de la compensación de fase es determinado a través de la aproximación de la curva de fase alrededor de $f_m = 0$. La desviación de la fase es usada como entrada a un algoritmo de corrección que incluye la sustracción del valor de compensación de toda la curva de fase de la señal de los datos de frecuencia compleja.

40

b) es compensada en dos pasos:

1. Primero, es determinado un desplazamiento de fase relativo entre los canales de medición como error de fase constante de la característica de fase de los datos de frecuencia. Este desplazamiento de fase tiene el mayor impacto en la calidad de los resultados de la medición. El mismo es compensado mediante el “procedimiento de corrección de la compensación de fase” aplicado a toda la característica de fase. El procedimiento está basado en la aproximación del desfase medido para $f_m = 0$ Hz. La aproximación es ligeramente proclive a errores (ver sección 4 anterior). El error residual remanente es eliminado usando los resultados del procedimiento de linealización denominado “calibración automatizada del sistema” (ver sección 5 anterior).

45

50

2. En un 2^{do} paso, las no linealidades de la características de fase y magnitud para las frecuencias de medición de > 0 Hz son eliminadas mediante el uso del procedimiento de calibración de la frecuencia (ver sección 6 anterior).

55

c) *Errores debido a la interferencia entre diferentes canales de medición*

60

c) es compensado mediante el *procedimiento de compensación de la interferencia* (ver sección 8 anterior).

d) *Errores debido a los efectos de envejecimiento de los componentes electrónicos*

65

d) es compensado repitiendo la *calibración del hardware* (ver sección 9.1 anterior) una que otra vez cuando se sospeche un cambio.

ES 2 310 368 T3

e) *Errores causados por un cambio de la línea del sensor*

e) es compensado mediante *la calibración automática del sistema* (ver sección 5 anterior), que linealiza las curvas de retrodifusión aplicando criterios relacionados con las características del ruido.

5

La invención es definida por las características de la(s) reivindicación(es) independiente(s). Las realizaciones preferidas son definidas en las reivindicaciones dependientes. Cualquier número de referencia en las reivindicaciones está concebido como no limitante de su alcance.

10

Algunas realizaciones preferidas han sido mostradas en lo que antecede, pero debe ser enfatizado que la invención no está limitada a ellas, sino que puede ser realizada de otros modos (incluyendo modos que no están basados en técnicas de retrodifusión *óptica*) dentro del tema definido en las siguientes reivindicaciones.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Un método para calibrar un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW (10), el sistema comprendiendo una parte de evaluación y excitación (11) y un sensor que se extiende longitudinalmente (13), el sensor teniendo un primer extremo y un segundo extremo (134; 132) la parte de excitación y evaluación estando adaptada para excitar una señal de luz de frecuencia modulada con una frecuencia de modulación f_m y para evaluar una señal del sensor recibida desde el primer extremo del sensor (134), el sensor estando adaptado para capturar una señal de datos basada en la señal de luz de frecuencia modulada de la cual pueden ser extraídos parámetros físicos de los puntos de medición del sensor distribuidos espacialmente a lo largo de su longitud entre el primer y el segundo extremos, el método comprendiendo los pasos de
- A. Convertir dicha señal del sensor recibida en una señal eléctrica recibida compleja como función de dicha frecuencia de modulación f_m , dicha señal eléctrica recibida compleja siendo representada por una parte de la magnitud y una parte del desfase como una función de dicha frecuencia de modulación f_m ;
 - B. Realizar una transformación de dicha señal eléctrica recibida para proporcionar una señal de retrodifusión como una función de la ubicación entre dichos primer y segundo extremos de dicho sensor y más allá de dicho segundo extremo (132);
 - C. A partir de dicha señal de retrodifusión como una función de la ubicación determinar las características de una curva representativa de dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo;
 - D. Corregir dicha parte de la magnitud de dicha señal eléctrica recibida y dicha parte del desfase de dicha señal eléctrica recibida en una dependencia predeterminada de dicha curva;
 - E. Repetir el paso B) sobre la base de la señal eléctrica recibida corregida.
2. Un método de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende además un paso F, de repetir opcionalmente los pasos C, D, E hasta que sea satisfecho un criterio predeterminado.
3. Un método de acuerdo con la reivindicación 2 donde en el paso F, dicho criterio predeterminado es que dicha curva que representa dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo de dicho sensor pueda ser aproximada por una línea recta con una pendiente de aproximadamente 0.
4. Un método de acuerdo con la reivindicación 3 donde dicha pendiente es menos de 0.5 muestras, tal como menos de 0.05 muestra, tal como menos de 0.005 muestra.
5. Un método de acuerdo con de las reivindicaciones 1 a la 4 donde dicho criterio predeterminado comprende el criterio de que el valor medio de las muestras para una parte o para toda dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo es menos de 0.5 muestras tal como menos de 0.05 muestras.
6. Un método de acuerdo con las reivindicaciones 1 a la 5 donde en el paso D, dicha corrección de dicha parte de la magnitud de dicha señal eléctrica recibida comprende un sub-paso D1 de corregir los datos de la magnitud por una cantidad de corrección inicial $\Delta H_0(0)$ en la frecuencia de modulación f_m igual a 0.
7. Un método de acuerdo con la reivindicación 6 donde en el paso D1 dicha cantidad de corrección inicial de $\Delta H_0(0)$ es ajustada a un valor predeterminado, por ejemplo un valor estimado.
8. Un método de acuerdo con la reivindicación 6 ó 7 donde en el paso D1 dicha cantidad inicial de corrección $\Delta H_0(0)$ es determinado por la cantidad de desviación del valor medio del ruido en la curva de retrodifusión desde 0.
9. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 8,
- donde
- en el paso D, dicha corrección de dicha parte del desfase de dicha señal eléctrica recibida comprende el sub-paso D2 de determinar un valor de compensación inicial $\Delta \varphi_0(0)$ del desfase de la señal eléctrica recibida en función de dicha frecuencia de modulación f_m de alrededor de $f_m=0$; y corrigiendo posteriormente los datos que representan dicho desfase de la señal eléctrica recibida como una función de la frecuencia de modulación f_m con dicho valor de compensación.
10. Un método de acuerdo con la reivindicación 9 donde en el paso D2 dicho valor de compensación inicial $\Delta \varphi_0(0)$ es fijado a un valor predeterminado.
11. Un método de acuerdo con la reivindicación 9 ó 10, donde en el paso D2, dicho valor de compensación inicial $\Delta \varphi_0(0)$ es determinado mediante la extrapolación lineal de los datos de desfase para $f_m \rightarrow 0$ Hz.

ES 2 310 368 T3

12. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 11 donde los pasos A, B, C, D, E de dicho procedimiento de calibración son realizados en cada ciclo de medición.
13. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 9 a la 12 donde el paso D comprende además los sub-pasos D3 de determinar un factor de corrección residual $\Delta H_{\text{res}}(0)$ y D4 de determinar un valor de compensación residual $\Delta\varphi_{\text{res}}(0)$, ambos sub-pasos estando basados en los datos de retrodifusión calculados a partir de datos que representan dicha parte de la magnitud y dicha parte del desfase, respectivamente, como una función de dicha frecuencia de modulación f_m después de la corrección mediante dicha cantidad de corrección inicial $\Delta H_0(0)$ del sub-paso D1 y dicho valor de compensación inicial $\Delta\varphi_0(0)$ del sub-paso D2, respectivamente, en el cual en el sub-paso D3 el valor de dicho factor de corrección residual $\Delta H_{\text{res}}(0)$ está basado en el valor medio del nivel promedio de dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo de dicho sensor, y en el sub-paso D4 el valor de dicho valor de compensación residual $\Delta\varphi_{\text{res}}(0)$ está basado en el valor de la pendiente de dicha señal de retrodifusión más allá de dicho segundo extremo de dicho sensor.
14. Un método de acuerdo con la reivindicación 13 donde dichos pasos de corrección D3 y D4 están basados en curvas de retrodifusión promediadas, tales como más de 5 mediciones, tales como más de 10 mediciones, tales como más de 20 mediciones.
15. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 14 donde dicha calibración es realizada usando un sensor óptico estandarizado con características bien conocidas.
16. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 13 a la 14 donde es realizada dicha calibración si las características, tales como las características ópticas, del sensor cambian o si otras características del sistema han cambiado o se sospecha que han cambiado.
17. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 16 donde dicho sistema de medición es un sistema de retrodifusión de Raman adaptado para medir un perfil de temperatura distribuida espacialmente.
18. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 17 donde dicho método de calibración es realizado para señales que representan señales Anti-Stokes así como señales Stokes.
19. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 18 que comprende adicionalmente un procedimiento de corrección de la interferencia que comprende los pasos de
- G1. Determinar y almacenar la interferencia entre los canales de medición del sistema de medición por medio de un procedimiento específico de medición durante la fabricación del sistema, y
- G2. Dentro de cada ciclo de medición de operación normal sustraer los datos de interferencia memorizados a los datos de frecuencia compleja medidos.
20. Un método de acuerdo con la reivindicación 19 donde los pasos G1 y G2 son realizados antes que otros pasos de calibración correctiva.
21. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 20 donde el sensor comprende una parte de referencia conectable en serie a una parte de medición.
22. Un método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 21 que comprende adicionalmente pasos que toman en consideración la circunvolución teórica entre la frecuencia y el dominio espacial, donde
- en el paso H1, la curva de frecuencia compleja esperada es determinada a partir de un modelo matemático, y una función de error de frecuencia compleja constituida por la relación compleja de los datos *medidos* del sistema de retrodifusión de FMCW S_{RM} con respecto a la función de la frecuencia compleja *calculada* S_{R} es determinada, y almacenada en una memoria, y en
- el paso H2 al comienzo de un siguiente ciclo de medición, los datos de la frecuencia medidos S_{RM} son corregidos con la función de error de la frecuencia compleja.
23. Un método de acuerdo con la reivindicación 22 donde los pasos G1 y G2 son realizados después de otros pasos de calibración correctiva.
24. Un sistema de medición por retrodifusión óptica de FMCW, que comprende un medio legible por computadora que tiene almacenado en el mismo un código de programa legible por computadora para ejecutar un método de calibración de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 23.
25. Un medio legible por computadora que tiene almacenado en el mismo un programa legible por computadora que al ser ejecutado por una computadora puede ejecutar un método de calibración de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a la 23.

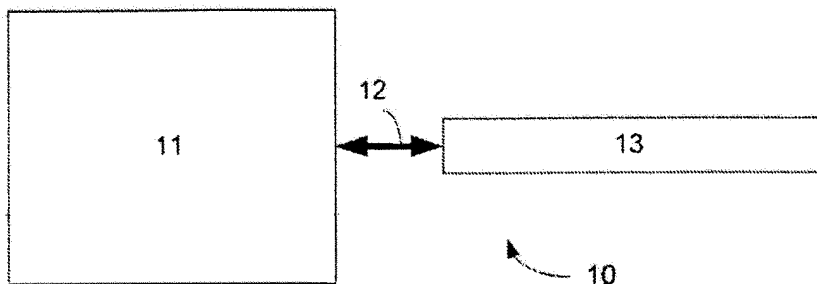


FIG. 1a

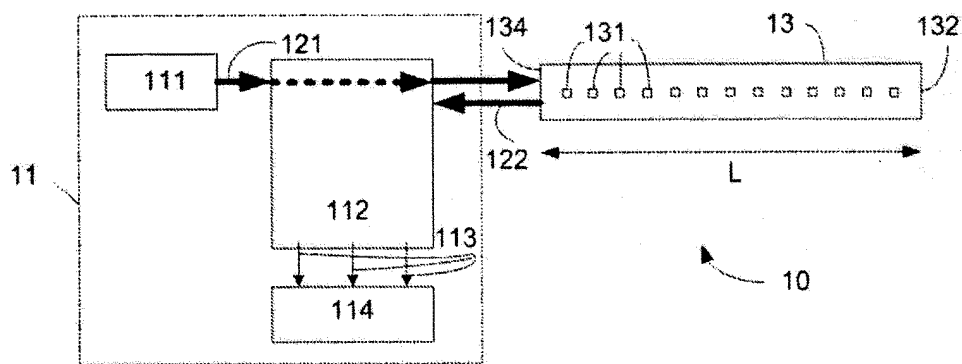


FIG. 1b

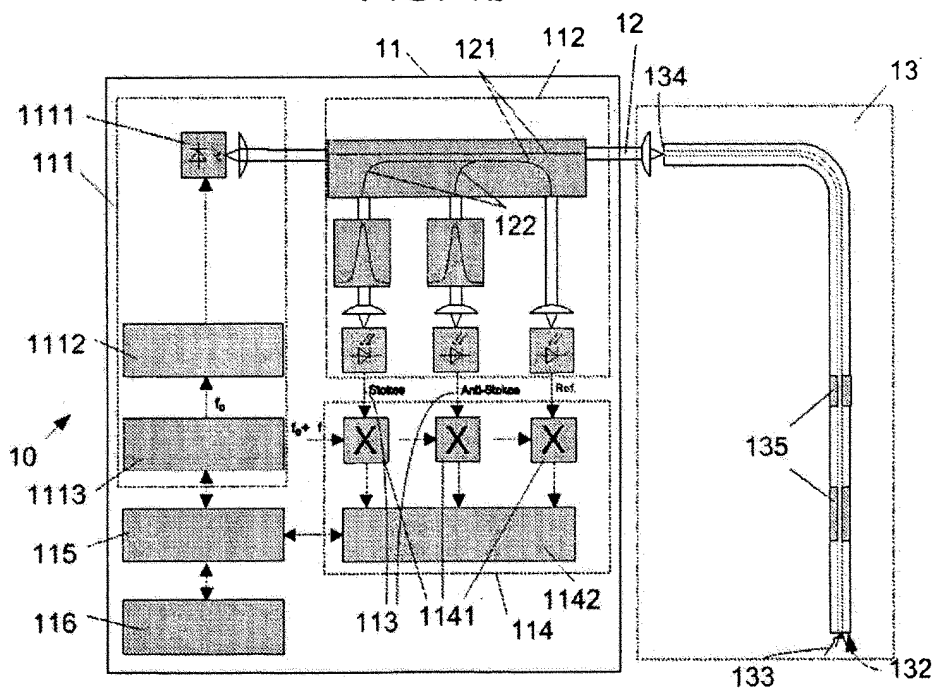


FIG. 1c

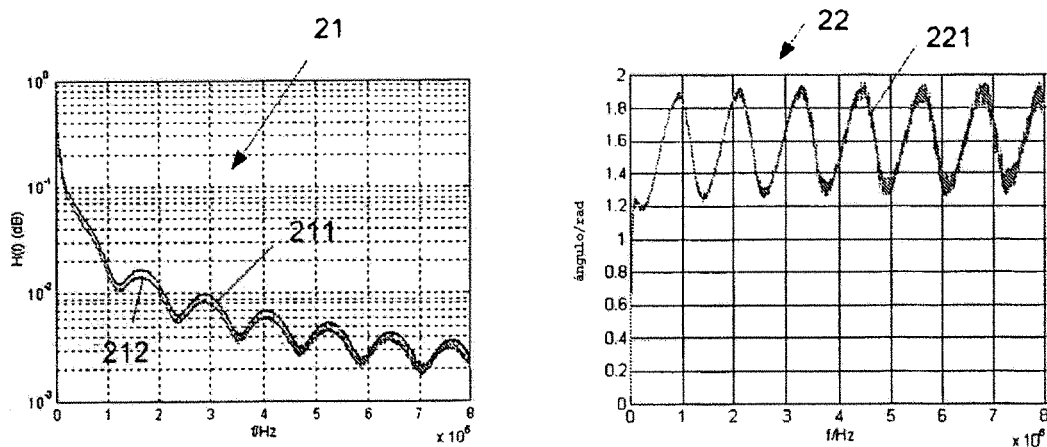


FIG. 2a

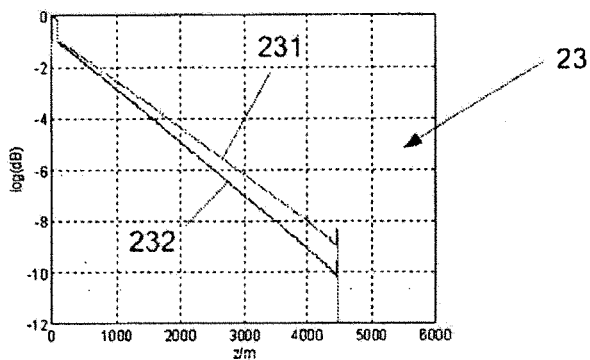


FIG. 2b

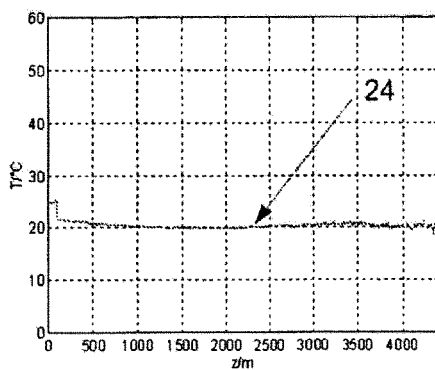


FIG. 2c

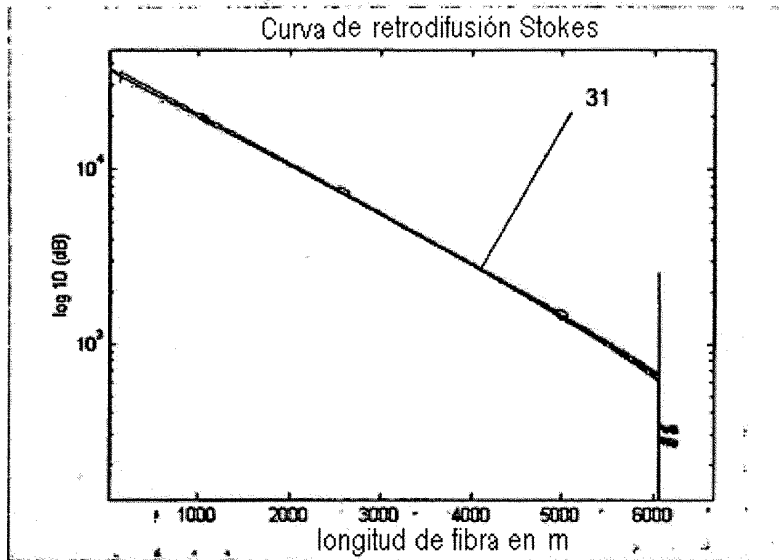


FIG. 3a
(izquierda)

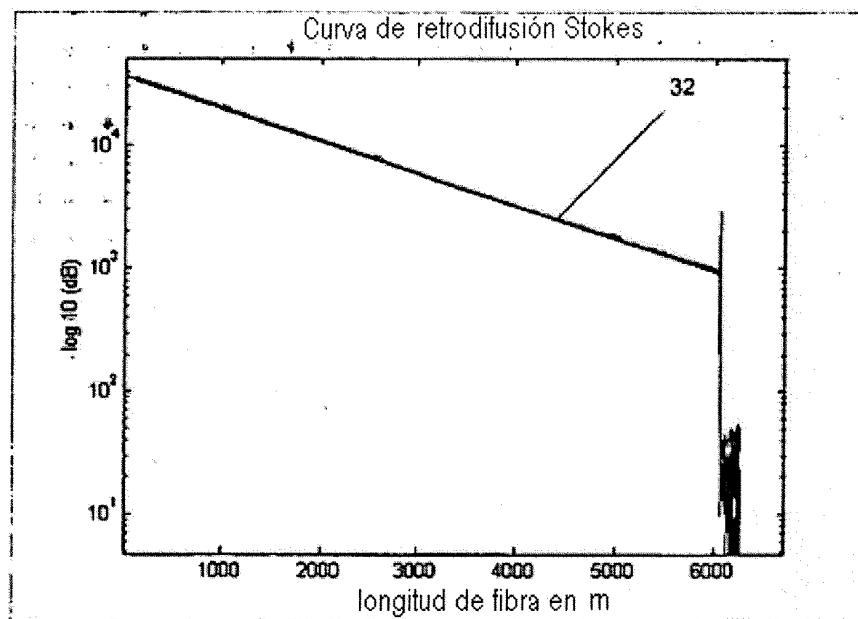


FIG. 3a
(derecha)

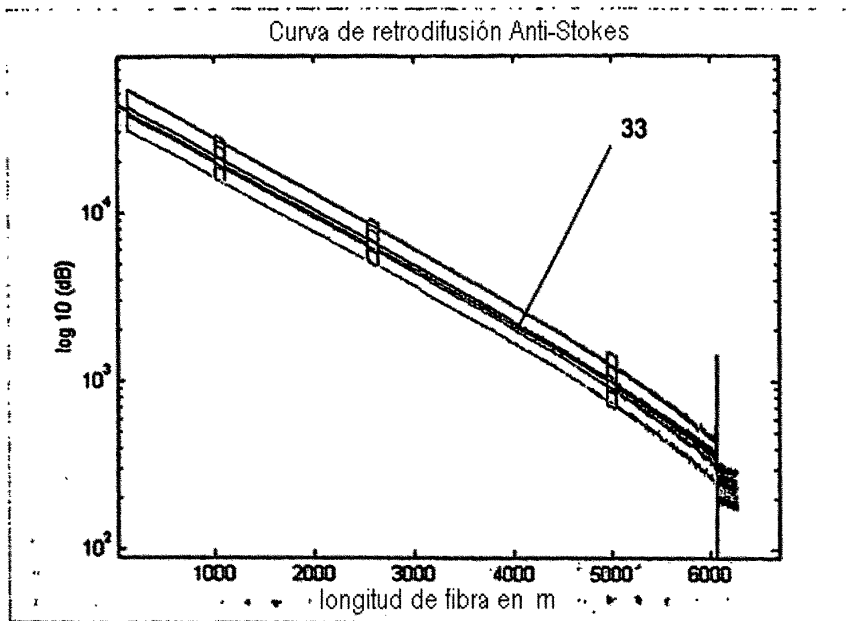


FIG. 3b

(izquierda)

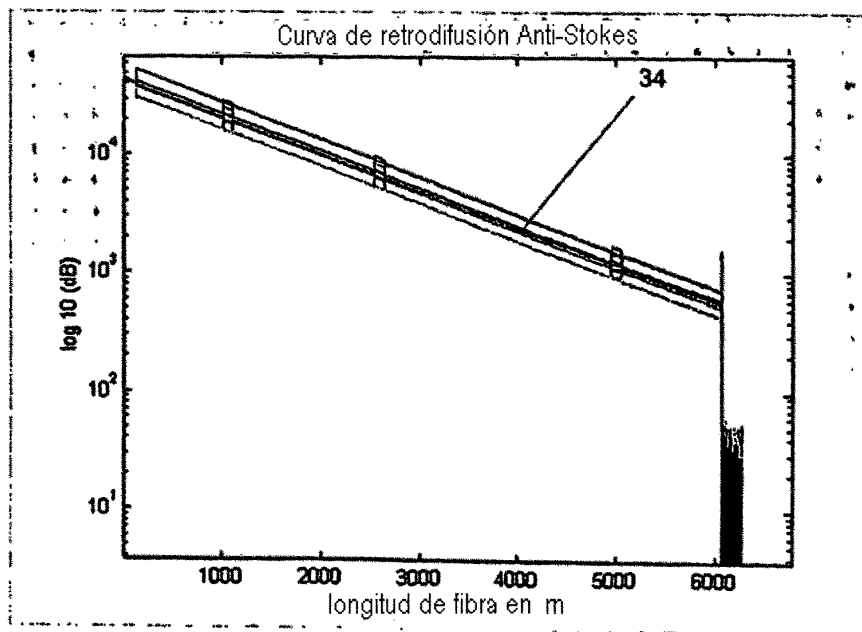


FIG. 3b

(derecha)

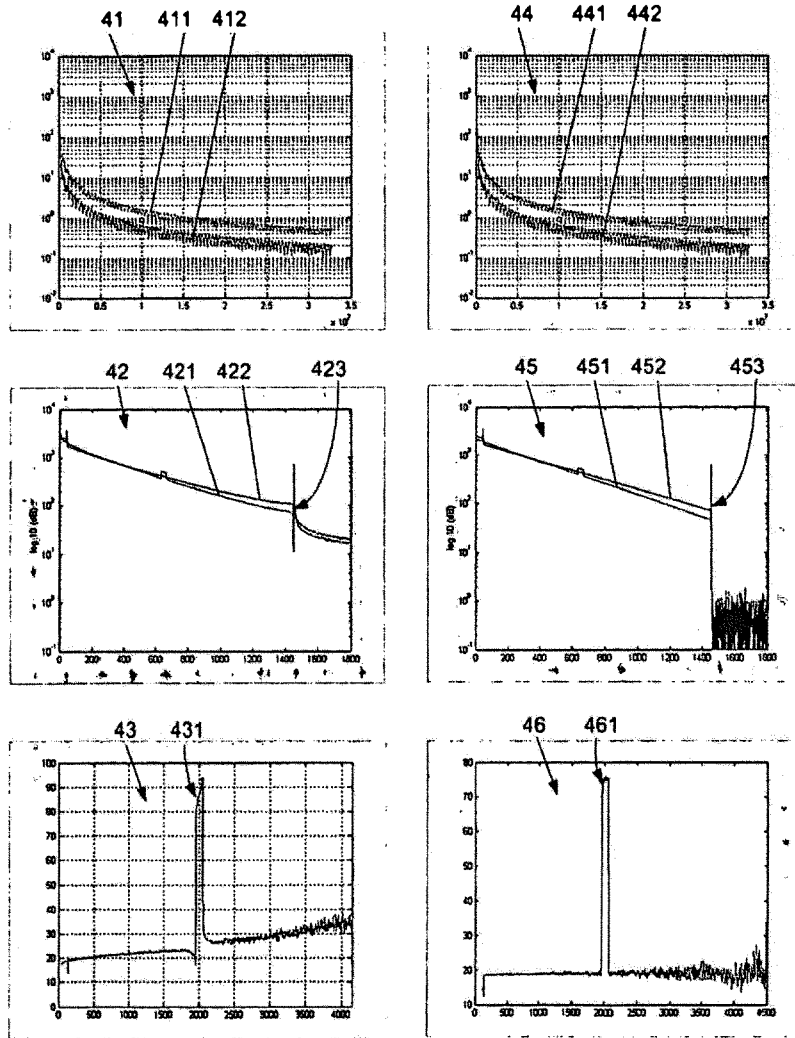


FIG. 4a

FIG. 4b

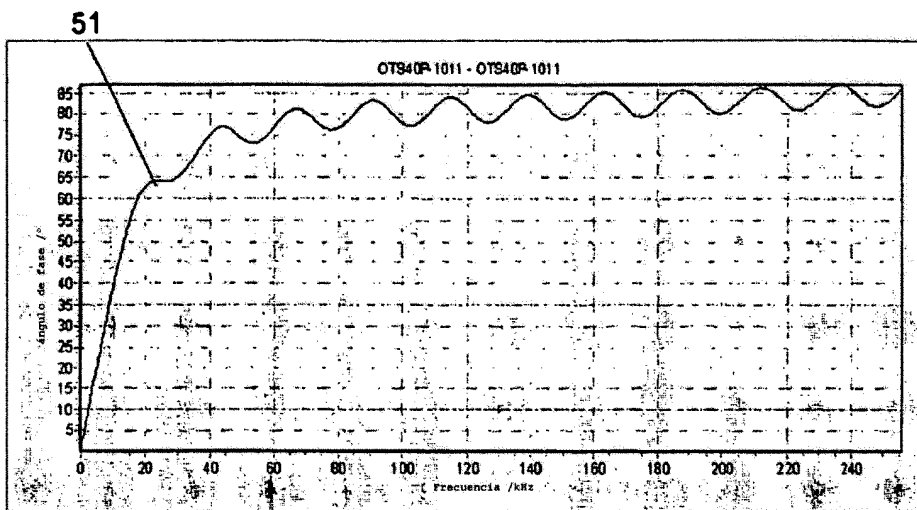


FIG. 5a

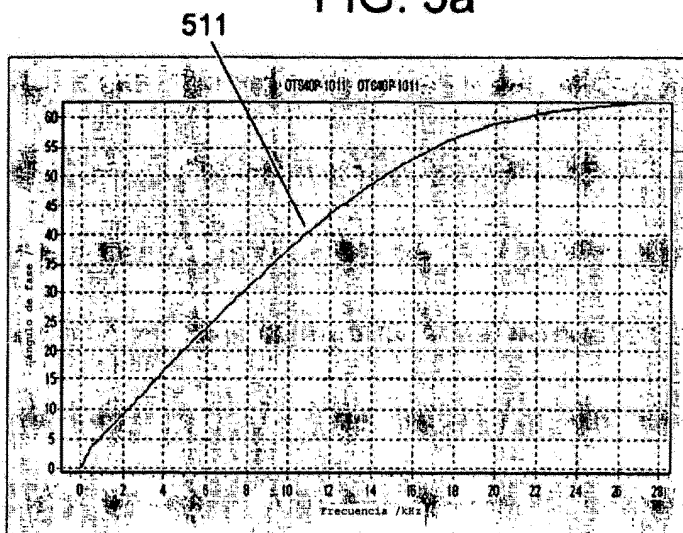


FIG. 5b

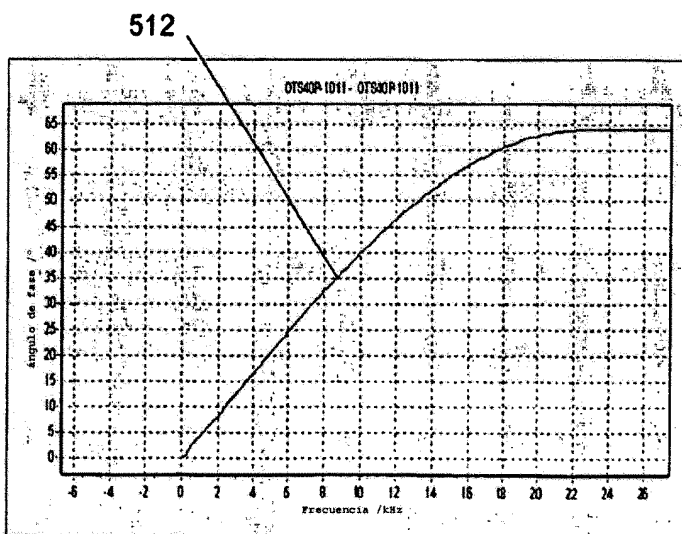


FIG. 5c

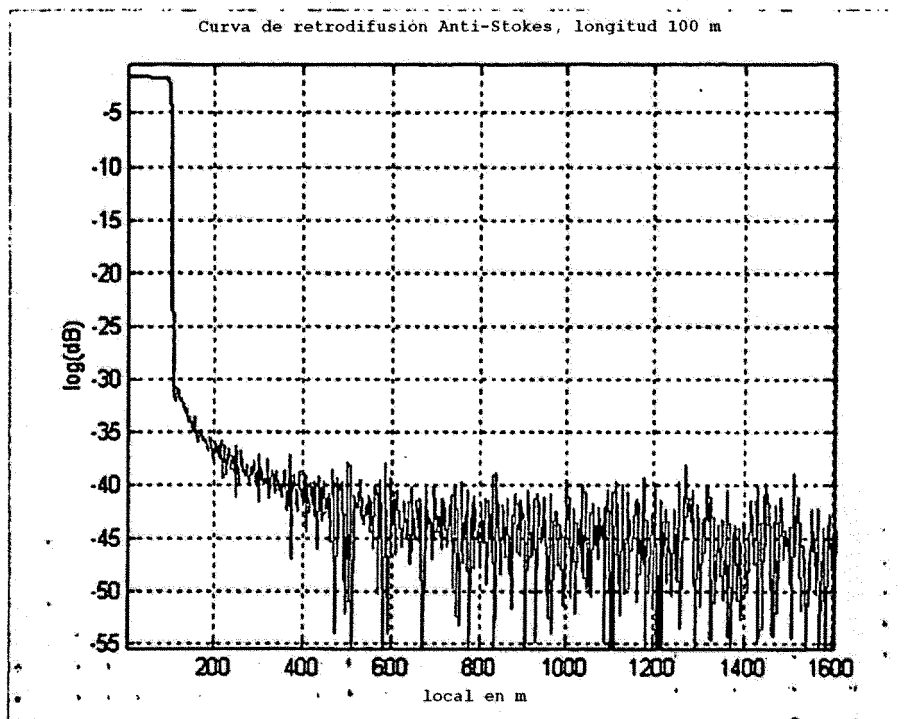


FIG. 6a

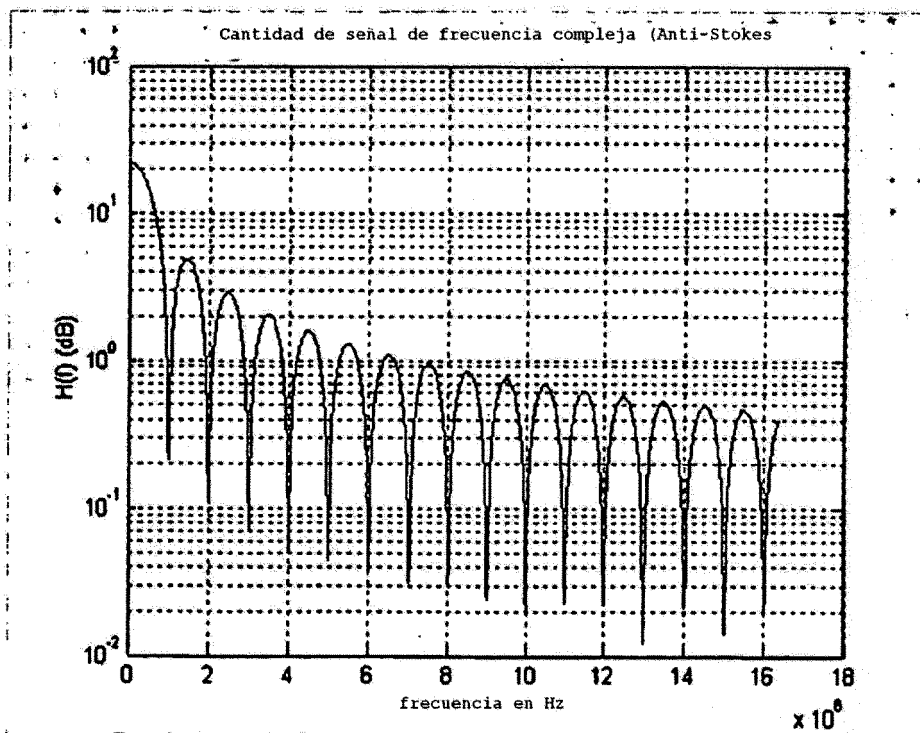


FIG. 6b

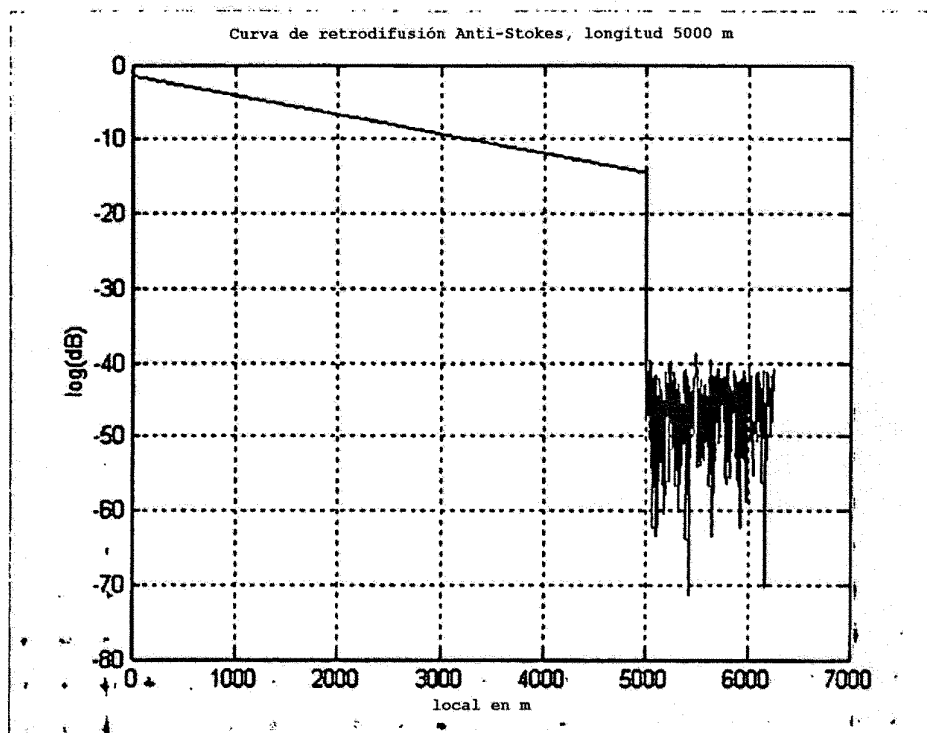


FIG. 7a

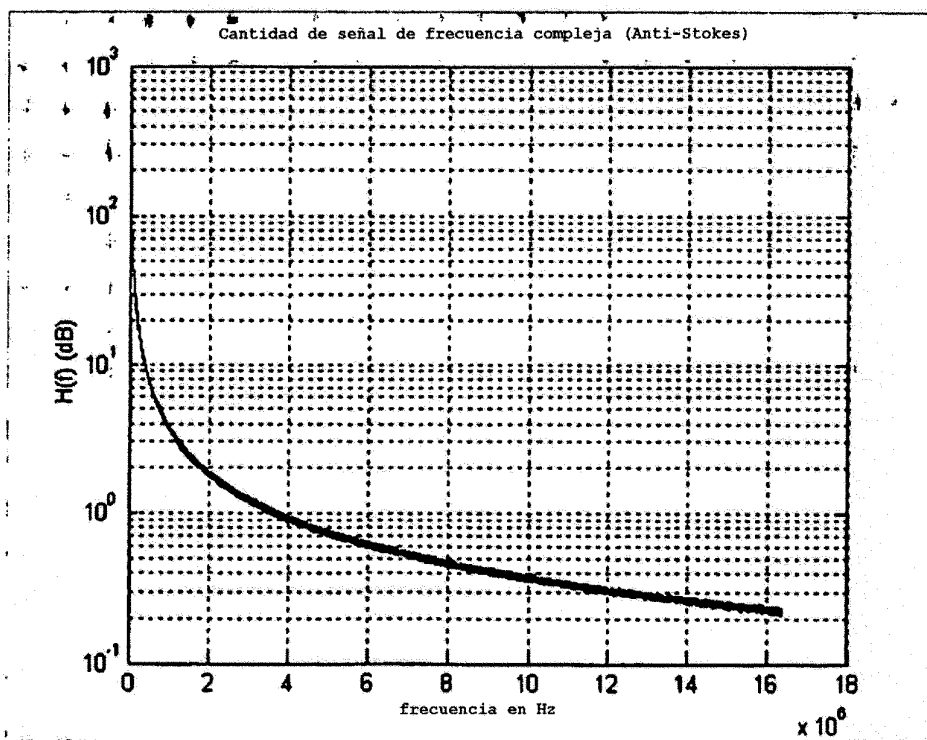


FIG. 7b

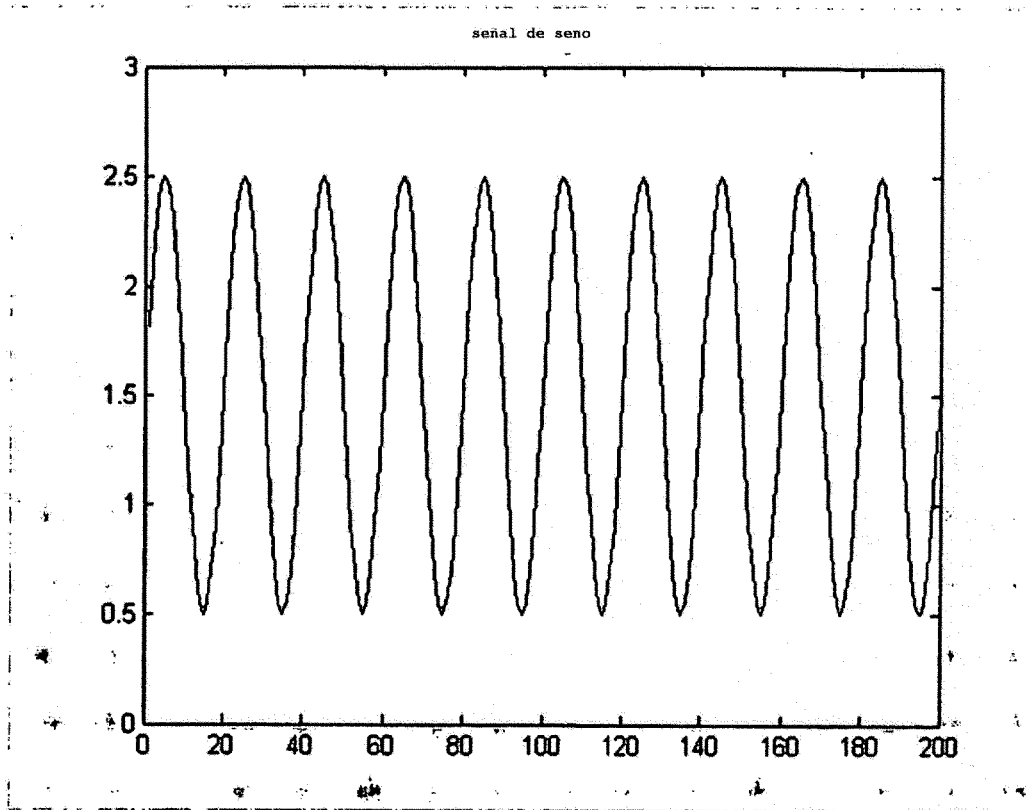


FIG. 8

ES 2 310 368 T3

<p>Paso 1: Procedimiento de evaluación, 'Interferencia'</p> <p>HW: Determinación de la interferencia de un sistema dedicado</p>	<p>Medición automática a ejecutar en la producción; Memorización de los datos de corrección en el sistema</p>
<p>Paso 2: Procedimiento de evaluación: 'Corrección de desplazamiento de fase'</p> <p>HW: Determinación del desplazamiento de fase relativo entre los canales de medición (dominio ZF)</p>	<p>Medición automática a ejecutar en la producción (automatizable como medición en línea); Memorización de los datos de corrección en el sistema</p>
<p>Paso 3: Procedimiento 'Determinación del valor de CC'</p> <p>Teoría de SW + HW + OPDR:</p> <p>Determinación del 'valor FFT-CC' sobre la base de una correlación consistente con la teoría entre la señal óptica de OC (medible) y el 'valor FFT-CC' real</p>	<p>Medición automática en línea para ejecutar en línea dentro de cada ciclo de medición</p>
<p>Paso 4: "Calibración automática del sistema"</p> <p>Método iterativo que usa criterios de "linealidad del ruido"</p> <p>Eliminación de los errores de medición implícitos en el Paso 2 y el Paso 3.</p> <p>Dos criterios independientes son aplicados para la Corrección del desplazamiento de fase y el valor FFT-CC que linealiza las curvas de retrodifusión.</p> <p>Observación: El valor FFT-CC es ligeramente dependiente de la fibra usada.</p>	<p>Medición automática ejecutada</p> <ul style="list-style-type: none"> - en la producción, - en el encaro, - en el mantenimiento; <p>Memorización de los datos de corrección en el sistema</p>
<p>Paso 5: "Calibración de la Frecuencia"</p> <p>Determinación de parámetros de fibra óptica. Cálculo de los datos de frecuencia. Cálculo del conjunto de datos de calibración compleja en el dominio de la frecuencia.</p> <p>Observación: Es necesaria una fibra de calibración con perfiles de temperatura definidos</p>	<p>Medición automática ejecutada en la producción; Memorización de los datos de corrección en el sistema</p>
<p>Paso 6: Calibración de la Temperatura (tipo específico de fibra)</p> <p>Eliminación de repetición del error de medición en el valor FFT-CC (véase el Paso 5, Parte Valor de CC). Validación de la atenuación de fibra. Determinación del valor de compensación de la temperatura. Corrección de la sensibilidad de la temperatura.</p>	<p>Medición específica del tipo de fibra; Memorización de los datos de corrección en el sistema</p>
<p>Paso 7: Calibración de Campo (análogo al Paso 5 con fibra específica)</p> <p>Eliminación de repetición de los errores de medición en la corrección de compensación de fase y el valor FFT-CC (véase el Paso 5, Parte Valor de CC).</p> <p>Validación del perfil de temperatura.</p>	<p>Procedimiento de recalibración automática; Memorización de los datos de corrección en el sistema</p>

FIG. 9

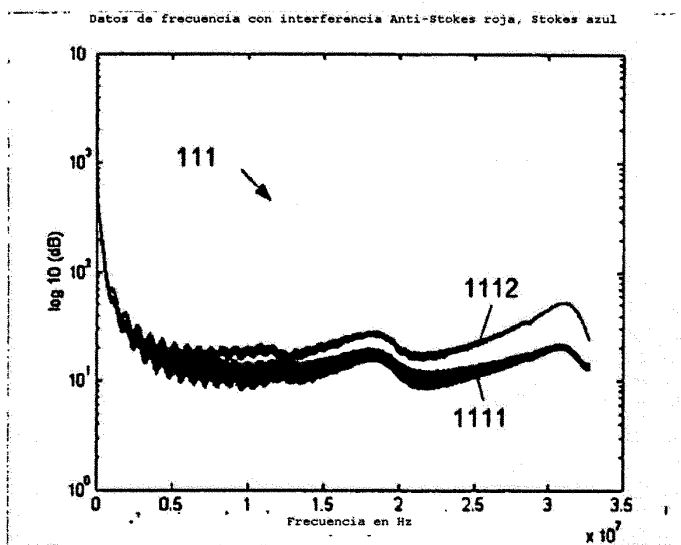


FIG. 10a

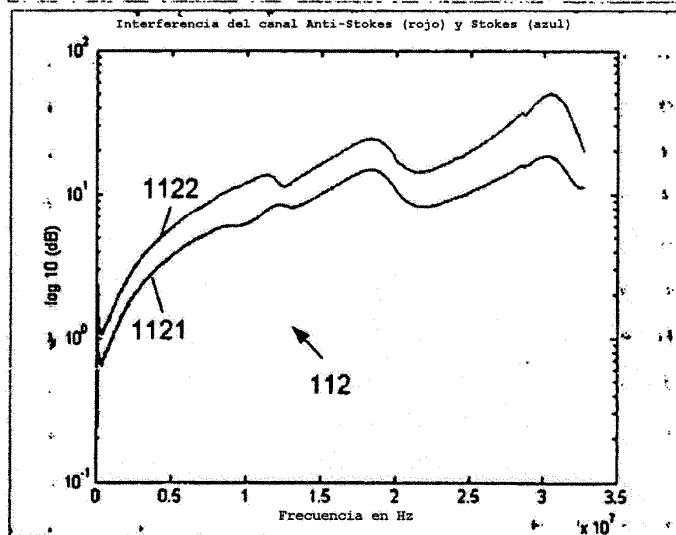


FIG. 10b

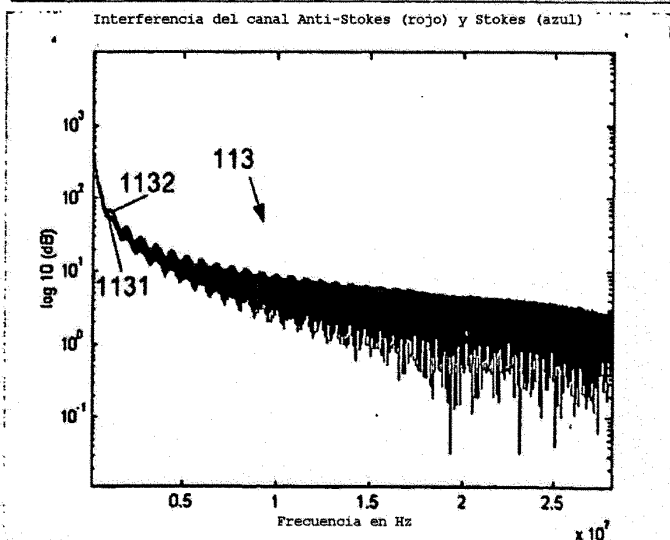


FIG. 10c

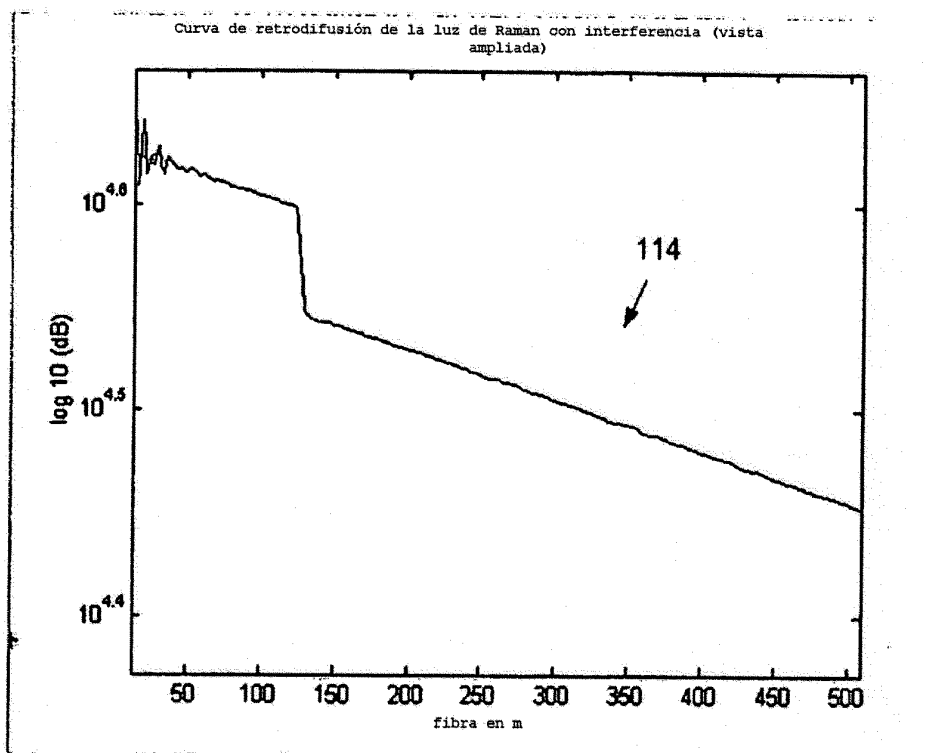


FIG. 10d

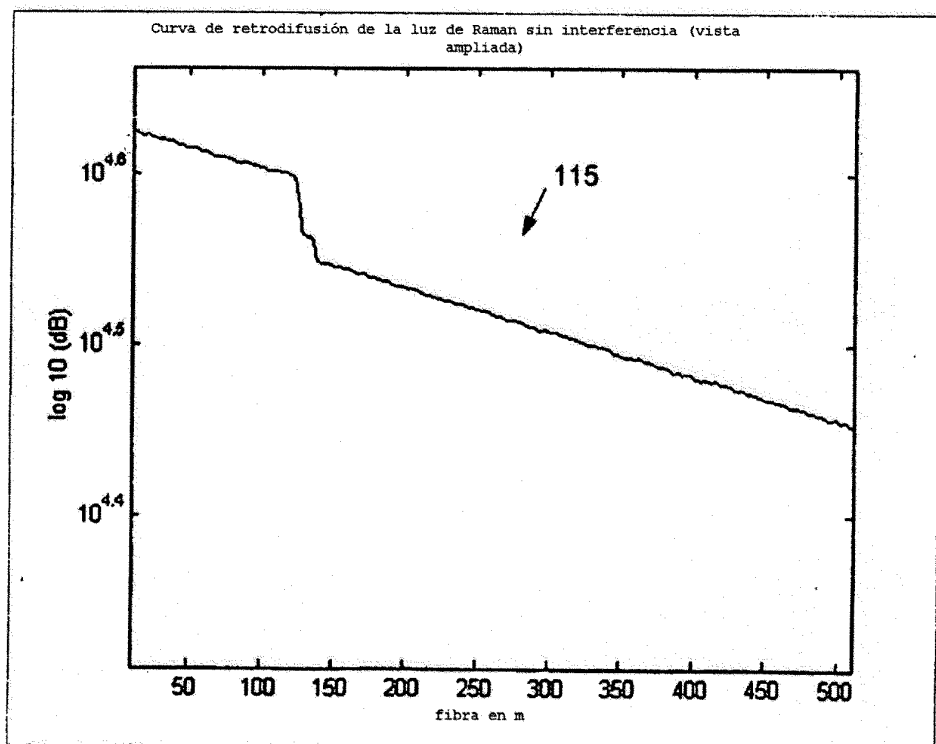


FIG. 10e

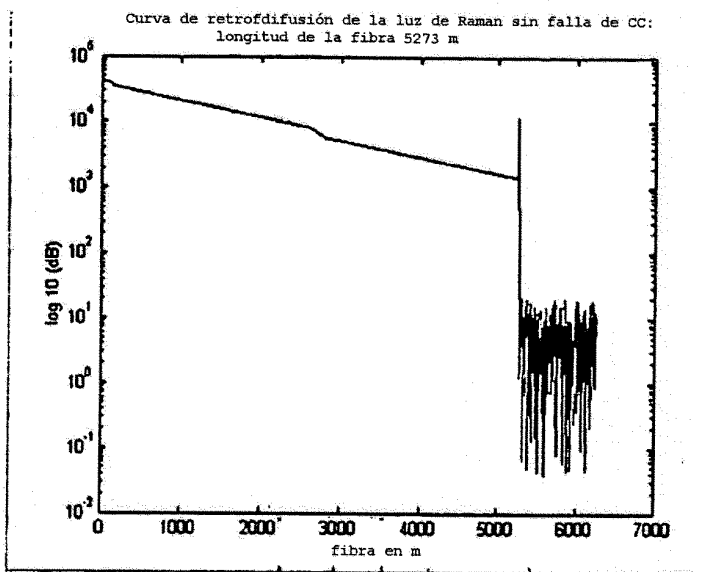


FIG. 11a

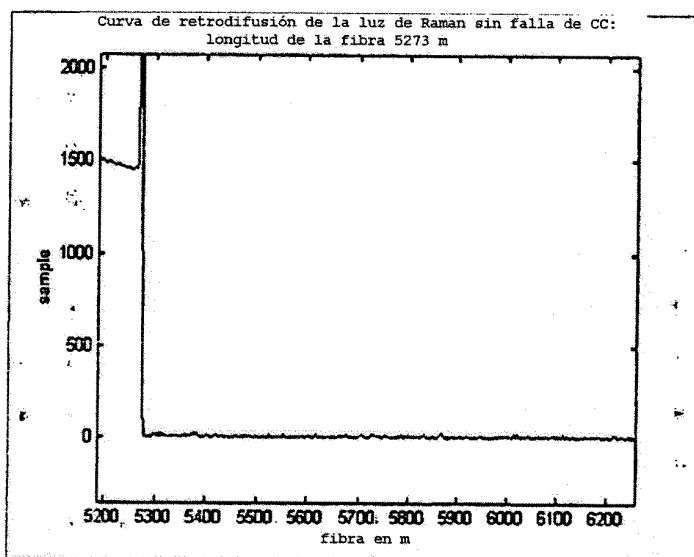


FIG. 11b

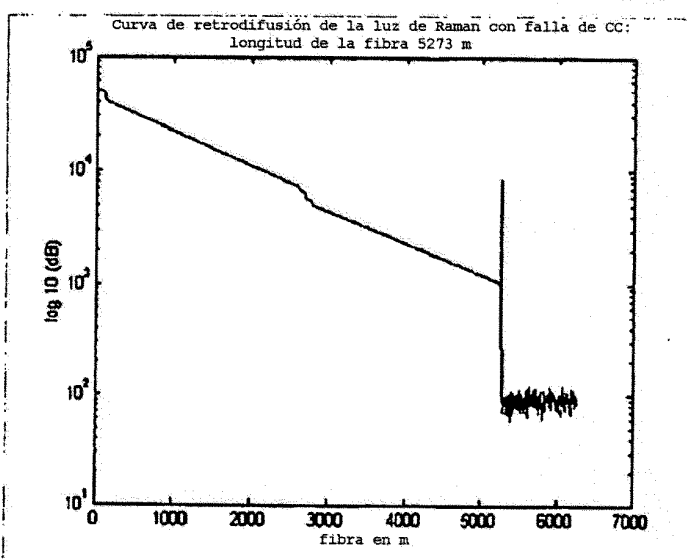
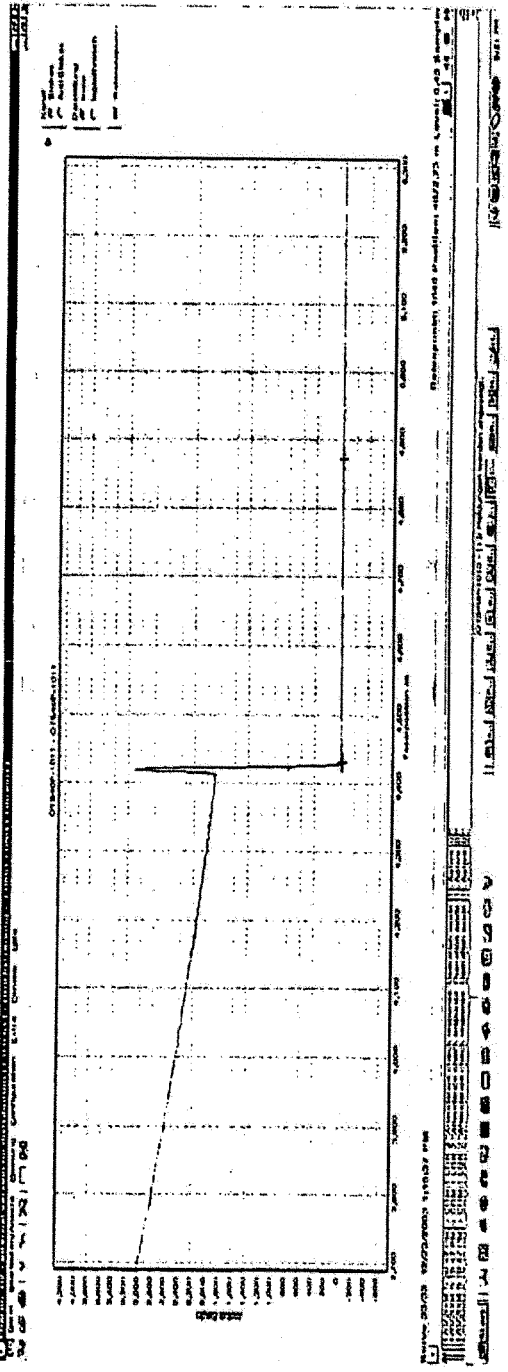
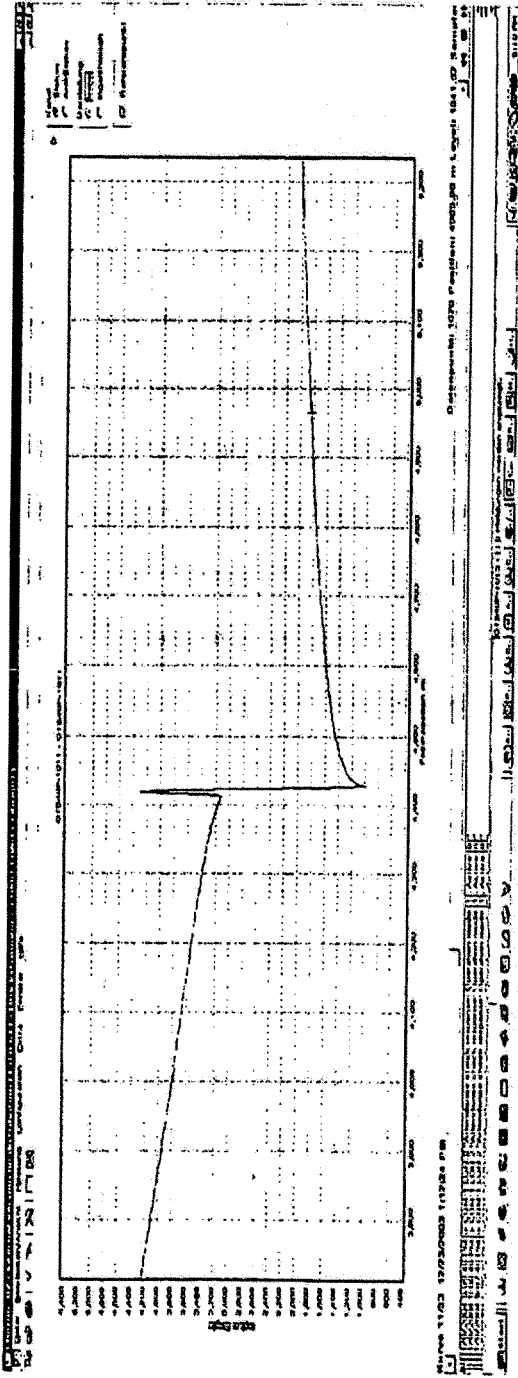


FIG. 11c



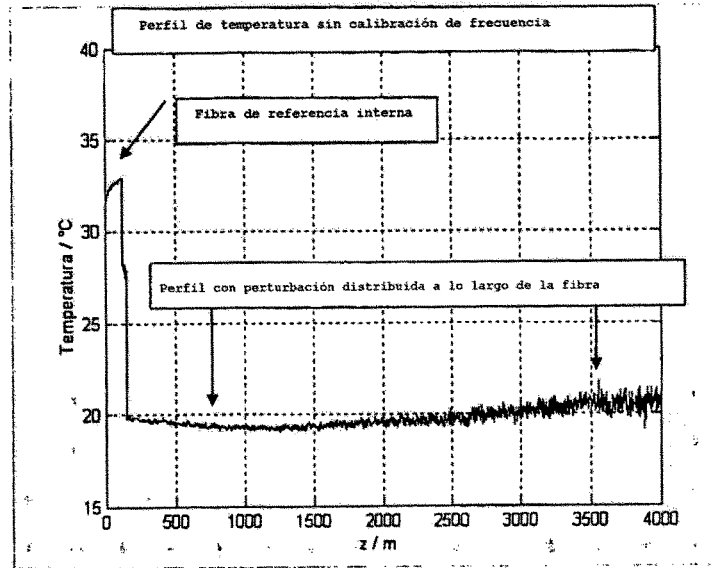


FIG. 12a

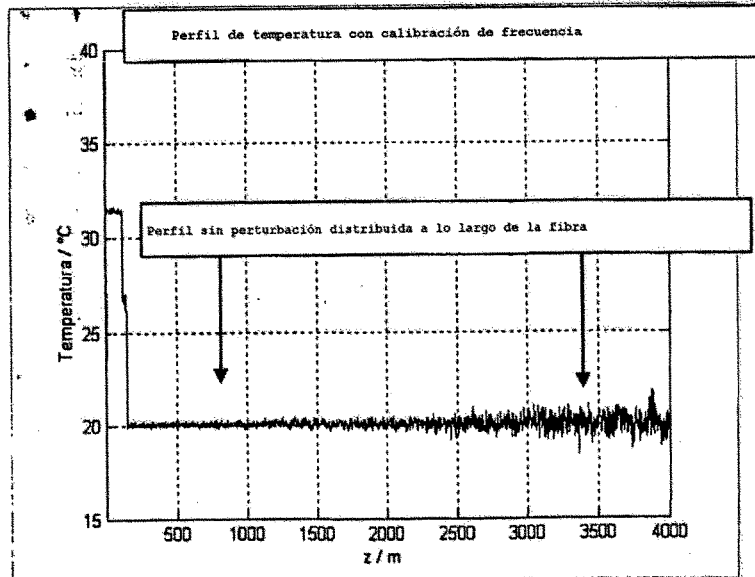


FIG. 12b

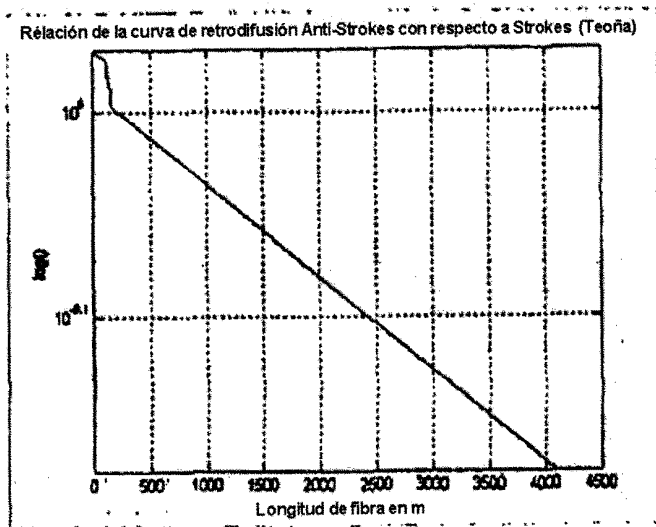


FIG. 14a

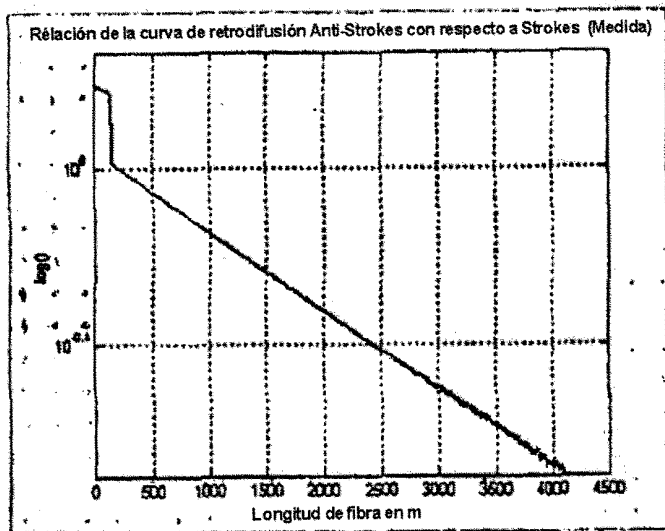


FIG. 14b

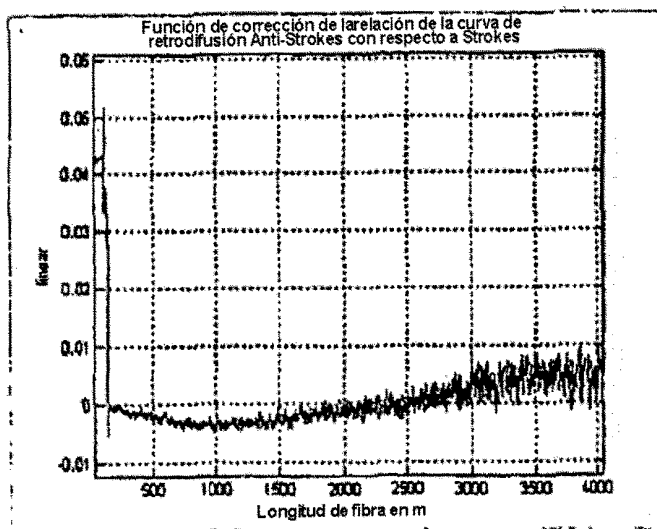


FIG. 14c