

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 634 659**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.07.2014 PCT/EP2014/064349**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.01.2015 WO15004026**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.07.2014 E 14738460 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.05.2017 EP 3019822**

54 Título: **Dispositivo óptico de medida de un parámetro físico y procedimiento asociado**

30 Prioridad:

08.07.2013 FR 1356675

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

28.09.2017

73 Titular/es:

**INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE
TOULOUSE (INPT) (50.0%)
6 allée Emile Monso, B.P. 34038
31029 Toulouse Cedex 4, FR y
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (C.N.R.S.) (50.0%)**

72 Inventor/es:

**BOSCH, THIERRY;
BONY, FRANCIS y
LUNA ARRIAGA, ANTONIO**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 634 659 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

Dispositivo óptico de medida de un parámetro físico y procedimiento asociado

Campo de la invención

5 La presente invención está relacionada con el campo de los dispositivos de medida optoelectrónicos. Más particularmente, la invención se refiere a un dispositivo óptico para la determinación de un parámetro físico relacionado con un objetivo, y a un procedimiento de tratamiento asociado, independientemente del estado de la superficie del objetivo y su distancia, en tiempo real. La invención está basada principalmente a partir del fenómeno de retroinyección óptica, y se usa ventajosamente para la medida del desplazamiento de un objetivo.

Estado de la técnica

10 Existen numerosos tipos de dispositivos de medida de desplazamiento, de vibración, de distancia, ..., de un objetivo, que permiten medidas denominadas no destructivas, es decir, que no deterioran el objetivo sobre el que se llevan a cabo.

15 A menudo se utilizan métodos ópticos porque presentan la ventaja de no estar en contacto con el objetivo y no son intrusivos. Se basan en la transmisión de un haz luminoso por una fuente luminosa láser hacia un objetivo, y la medida de los cambios de las propiedades ópticas del haz luminoso reenviado desde el objetivo por los medios de detección y de medida adaptados.

20 Entre los dispositivos ópticos existentes, se puede citar, entre otros, los interferómetros de tipo Michelson, los interferómetros de fibra óptica, los sensores por triangulación. Sin embargo, para estos tipos de dispositivos, la utilización de numerosos componentes ópticos es necesaria, lo que hace difícil la realización de sensores compactos, de utilización sencilla y de bajo coste. Estos dispositivos presentan además, para algunos, un intervalo de medida limitado a varios centímetros, incluso milímetros.

Los dispositivos basados en el fenómeno de retroinyección óptica, generalmente conocido bajo el nombre anglosajón de "self-mixing", ofrecen en comparación un sistema de realización compacto y flexible, de bajo coste.

25 Estos dispositivos son sencillos de realizar, y solamente necesitan una fuente luminosa láser que emita un haz luminoso de medida sobre el objetivo, cuyo desplazamiento, por ejemplo, hay que medir. Una parte del haz de medida es reflejada por el objetivo y reinyectada en una cavidad activa de la fuente láser, produciendo interferencias en la cavidad activa de la fuente láser.

30 Cuando un camino óptico recorrido por el haz de medida procedente de la fuente luminosa láser y que encuentra el objetivo varía, por ejemplo en función del desplazamiento del objetivo, se producen fluctuaciones especialmente de la potencia óptica emitida, causadas por estas interferencias. Estas fluctuaciones son detectadas por un fotodetector, tal como por ejemplo un fotodiodo situado sobre una cara trasera de la fuente luminosa láser, o bien directamente a través de una tensión de unión de la fuente luminosa láser. Las señales procedentes del fotodiodo o de la tensión de unión de la fuente luminosa láser son tratadas por medios de tratamiento adaptados, y de ellas se deduce la información relativa al desplazamiento del objetivo o a la variación del índice de refracción del medio. De esta forma, la fuente luminosa láser desempeña a la vez la función de una fuente luminosa y de un microinterferómetro, sin necesitar componentes ópticos externos. Sin embargo, cuando el objetivo está colocado más allá de algunos centímetros, puede intercalarse una lente de focalización entre la fuente luminosa láser y el objetivo.

40 La diferencia principal con las interferencias clásicas reside en el hecho de que las interferencias denominadas de tipo "self-mixing" tienen lugar en un medio activo (una cavidad semiconductor o un gas), mientras que las interferencias clásicas se observan generalmente en espacio libre o dieléctrico, es decir, en un medio pasivo. Esta diferencia notable se traduce en una forma no sinusoidal de la modulación de intensidad generada por las interferencias en el caso del "self-mixing", al contrario de las interferencias clásicas.

45 Las señales interferométricas típicas del fenómeno de retroinyección óptica representan franjas interferométricas que presentan una forma específica en dientes de sierra asimétricos más o menos pronunciada.

Estos dispositivos de medida por retroinyección óptica presentan de esta forma la ventaja de ser autoalineados, compactos y menos costosos que por interferometría tradicional.

50 Los dispositivos de medida existentes presentan el inconveniente de ser sensibles al índice de retroinyección en la fuente luminosa láser. Este índice de retroinyección, definido por el parámetro adimensional C, es función de la distancia de la fuente luminosa láser al objetivo y del estado de la superficie de ésta. Un objetivo que presenta un estado de superficie rugoso ocasiona una variación aleatoria y brusca del índice de retroinyección C en la cavidad activa de la fuente luminosa láser, lo que modifica y altera la forma de la señal interferométrica que ha de tratarse.

La forma de las franjas interferométricas de la señal interferométrica presenta, por una parte, una forma en dientes de sierra asimétricos que es tanto más marcada cuanto más fuerte es la retroinyección óptica en la fuente luminosa

láser, y por otra parte, una histéresis cuando el valor del índice de retroinyección óptica C es elevado, del orden de al menos 4,5.

Además, cuando el objetivo presenta un estado de superficie rugoso, un fenómeno de alteración aleatoria de la señal interferométrica resulta de la superposición incoherente de los haces reflejados. Este fenómeno, conocido con el nombre de "moteado" o "speckle" en inglés, ocasiona fuertes modulaciones de la envolvente de la señal interferométrica, pudiendo llegar hasta una pérdida de dicha señal de interferencia, por tanto una pérdida de información sobre el desplazamiento del objetivo, y altera igualmente el tratamiento de la señal interferométrica.

Como ejemplos de dispositivos de medida de retroinyección óptica que proponen trabajar con objetivos rugosos, se puede citar:

- 10 - Norgia et al. ("Interferometric measurements of displacement on a diffusing target by a speckle tracking technique", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 37, nº 6, junio 2001),
- Guiliani et al. ("Self-mixing laser diode vibrometer" Meas. Sci. Technol. 14, (2003) 24-32),
- Magnani et al. ("Self-mixing vibrometer with real-time digital signal elaboration" Applied Optics, vol. 51, nº 21, 20/07/2012).

15 En la publicación científica de Norgia et al., el dispositivo de medida por retroinyección óptica contiene componentes piezoeléctricos para utilizar una técnica de seguimiento del moteado. Esto consiste en hacer variar la posición transversal del punto del haz sobre el objetivo, en función de la amplitud máxima relativa de la señal recibida.

Este dispositivo de medida utiliza componentes externos que son incompatibles con el aspecto simplicidad de realización, y cuyo tamaño puede ser incompatible con numerosas aplicaciones, especialmente en el campo de los sistemas integrados.

En la publicación científica de Guiliani et al., el dispositivo de medida por retroinyección óptica utiliza un bucle de retroalimentación electrónica sobre el diodo láser, para estabilizar la señal interferométrica recibida. El dispositivo utiliza una modulación de corriente triangular sobre el haz emitido para distinguir la dirección de las franjas. El principio consiste en localizar el medio de las franjas interferométricas por su tensión electrónica, para poder garantizar su detección por una comparación de las tensiones.

Sin embargo, este dispositivo de medida no ofrece prestaciones correctas únicamente por el tipo de señales interferométricas que presentan una forma de dientes de sierra con un fenómeno de histéresis, señales típicas de superficies muy reflectantes y únicamente para amplitudes débiles de vibraciones del objetivo, como máximo 180 μm .

30 Además, se utilizan componentes externos, dos lentes espaciadas 40 cm, lo que es incompatible con la noción de tamaño y de fragilidad del dispositivo de medida.

En la publicación científica de Magnani et al., el dispositivo de medida por retroinyección óptica hace variar el diámetro del punto del haz por un mecanismo de autofocalización en la lente, similar a los aparatos de fotografía digitales del mercado, lo que necesita algunos segundos de adaptación cuando la forma de la señal se modifica (caso que se encuentra frecuentemente con los objetivos rugosos).

Además, el dispositivo está limitado a la medida de señales de amplitud sensiblemente constante, con el riesgo de efectuar un reinicio del mecanismo de autofocalización cuando el umbral prestablecido automáticamente ya no es válido.

El documento XP 12162261 describe un dispositivo de medida por retroinyección óptica, para la determinación de desplazamiento de objetivos. La señal interferométrica se filtra para suprimir la componente continua, utilizando un filtro paso banda. El documento XP 031092534 describe un dispositivo óptico basado en el fenómeno de retroinyección óptica, para la determinación de desplazamiento de objetivos. La señal interferométrica se filtra con un filtro de mediana seguido de un filtro de media, para suprimir el ruido introducido por la presencia de motas sobre el objetivo. Los ejemplos de dispositivos de medida anteriormente descritos necesitan unas especificaciones muy precisas (intervalos de medida, tipo de superficie, tamaño, ...), utilizan componentes exteriores y pueden difícilmente cambiar cuando hay un cambio en las condiciones de utilización.

Exposición de la invención

La invención tiene por lo tanto por objetivo proponer un dispositivo de medida y un procedimiento de tratamiento de una señal interferométrica que se adapta a todo tipo de objetivos y de distancia con éstos, y éste, en tiempo real.

50 La invención tiene igualmente por objetivo proponer un dispositivo de medida basado en el fenómeno de retroinyección óptica que responde a restricciones de tamaño, de prestaciones y de coste, volviendo su utilización realista en un medio industrial.

A este efecto, la presente invención tiene como objetivo en un primer aspecto un dispositivo óptico para la determinación de un parámetro físico. El dispositivo contiene:

- una fuente luminosa láser configurada para generar un haz luminoso, denominado haz emitido, en dirección a un objetivo,
- 5 - un medio de detección de una señal interferométrica $SM(t)$, dicha señal interferométrica conteniendo la información sobre el parámetro físico que ha de determinarse, y estando generada por una interferencia entre el haz emitido y un haz luminoso reflejado por el objetivo, en una cavidad óptica de la fuente luminosa láser,
- 10 - medios de conversión de la señal interferométrica $SM(t)$ obtenida por el medio de detección en una medida del parámetro físico.

Los medios de conversión contienen:

- unos primeros medios de supresión de una componente continua $Off(t)$ de la señal interferométrica $SM(t)$,
- unos segundos medios de determinación de picos interferométricos de la señal interferométrica $SM(t)$, obtenidos a partir de la señal obtenida a la salida de los primeros medios, conteniendo los segundos medios un filtro de Hilbert.
- 15

El parámetro físico que es posible medir es principalmente un desplazamiento del objetivo, su velocidad y su distancia a la fuente luminosa láser.

La señal interferométrica $SM(t)$ obtenida es una señal típica de una retroinyección óptica, y se diferencia de las señales interferométricas, denominadas clásicas, en que representa franjas interferométricas no sinusoidales, presentando una forma específica en dientes de sierra asimétricos más o menos pronunciada. Tales franjas interferométricas presentan cada una un frente ascendente y un frente descendente. Se define un frente ascendente de una franja de interferencia como el frente que presenta el grado más grande de inclinación respecto al eje de abscisas, es decir, el que más asciende.

- 20

El grado de inclinación de los dientes de sierra aumenta con el índice de retroinyección óptica en la fuente luminosa láser.

- 25

Por componente continuo, se entiende el valor medio de la señal interferométrica.

Por supresión de un componente continuo, se entiende el ajuste de la señal interferométrica $SM(t)$ para centrarla alrededor de cero,

Por pico interferométrico, se entiende el frente ascendente de una franja de interferencia,

30 Tal dispositivo óptico permite ventajosamente la determinación de un parámetro físico sin condición sobre la forma de la señal interferométrica, es decir, sin condición sobre el estado de la superficie del objetivo, cooperativo o no, y sin condición sobre el índice de retroinyección óptica.

Conforme a los modos de realización preferidos, la invención responde además a las características siguientes, aplicadas separadamente o en cada una de sus combinaciones técnicamente eficaces.

35 Los segundos medios para determinar los picos interferométricos de la señal interferométrica contienen un filtro de Hilbert. Los primeros medios se configuran para suprimir la componente continua de forma local para cada una de las franjas de interferencia de la señal interferométrica.

40 En otros términos, la supresión de la componente continua no es una supresión global (supresión del valor medio del conjunto de las franjas de interferencias), como lo hace un filtro de mediana o un filtro de media. Para cada franja de interferencia, la componente continua asociada denominada local se suprime. Las componentes continuas locales se suprimen una por una, independientemente las unas de las otras. La supresión de estas componentes continuas locales se realiza sobre el conjunto de las franjas interferométricas.

En modos de realización particulares, el dispositivo óptico no contiene medios de calibración de la fuente luminosa láser y o de medios de calibración del índice C de retroinyección óptica del objetivo.

45 En modos de realización particulares, el dispositivo óptico no contiene componentes exteriores. Eventualmente, el dispositivo contiene una lente de focalización cuando el objetivo está situado unos centímetros más allá.

Tal dispositivo presenta una ventaja no insignificante en términos de tamaño y de instalación, por tanto de facilidad de aplicación, y vuelve por tanto su utilización realista en un medio industrial.

La invención es igualmente relativa a un procedimiento de tratamiento de una señal interferométrica $SM(t)$ obtenida por retroinyección óptica, estando caracterizada la señal por franjas de interferencias en forma de dientes de sierra asimétricos. El procedimiento consta de las etapas sucesivas de:

- 5
- supresión de una componente continua de la señal interferométrica $SM(t)$, para obtener una señal corregida $SM_c(t)$, después
 - determinación de picos interferométricos de dicha señal interferométrica $SM(t)$ a partir de la señal corregida $SM_c(t)$.

La etapa de supresión de una componente continua permite ventajosamente facilitar el tratamiento posterior de la señal interferométrica $SM(t)$.

- 10
- Tal procedimiento de tratamiento es ventajosamente insensible al fenómeno de alteración aleatoria de la señal de interferencia, debido a cualquier perturbación, y permite por consiguiente tratar todos los tipos de señales interferométricas obtenidas por retroinyección óptica.

Tal procedimiento proporciona igualmente un grado superior de eficacia en el tratamiento de las señales interferométricas, porque puede realizarse en tiempo real.

- 15
- Conforme a los modos de realización preferidos, la invención responde además a las características siguientes, aplicadas separadamente o en cada una de sus combinaciones técnicamente eficaces.

La componente continua $Off(t)$ de la señal interferométrica $SM(t)$ se suprime de forma local, para cada franja de interferencia de la señal interferométrica $SM(t)$.

La componente continua $Off(t)$ está compuesta de un conjunto de segmentos puestos uno tras otro.

- 20
- La componente continua $Off(t)$ está constituida de un conjunto de componentes continuas denominadas locales. Cada componente continua local se define respecto a una franja de interferencia de la señal interferométrica $SM(t)$. Se mide una componente continua local para cada franja de interferencia detectada de la señal interferométrica $SM(t)$.

- 25
- La determinación de los picos interferométricos se obtiene por aplicación de un filtro de Hilbert a la señal corregida $SM_c(t)$.

La supresión de la componente continua asociada a la utilización del filtro de Hilbert permite de este modo liberarse de los fenómenos de alteración aleatoria de la señal interferométrica, que son, entre otros, el fenómeno de histéresis o el fenómeno de desvanecimiento momentáneo de la amplitud, comúnmente conocidos con el término de fading, vinculado al "moteado".

- 30
- De este modo, tal procedimiento de tratamiento presenta un interés particular cuando está asociado a un dispositivo tal como el descrito anteriormente en al menos uno de sus modos de realización, para la medida sobre objetivos rugosos.

- 35
- Liberarse de los fenómenos de histéresis y de fading en la señal interferométrica $SM(t)$ permite recurrir de manera ventajosa solamente a un único algoritmo de tratamiento de la señal, sea cual sea la distancia y el estado de la superficie de un objetivo del que se busca medir un parámetro físico.

- 40
- El tratamiento de la señal interferométrica se simplifica mucho porque es automático, mediante un simple filtrado. Y al contrario de los otros procedimientos existentes, no es necesario trabajar sobre un periodo de la señal interferométrica para encontrar la información necesaria, únicamente dos franjas interferométricas son suficientes. Por lo tanto, no es necesario realizar un almacenamiento de puntos antes de iniciar el tratamiento de la señal. El número de puntos que ha de almacenarse al principio para reconstruir el parámetro físico también se reduce considerablemente, lo que disminuye los recursos necesarios para el tratamiento de la señal.

- 45
- Un método conocido de determinación de los picos interferométricos, citado como ejemplo, a partir de un cálculo de envolventes de la señal interferométrica, se describe en la publicación de Usman Zabit et al.: "Self-mixing Laser sensor for large displacements: signal recovery in the presence of speckle", IEEE Sensors Journal, vol. 13, nº 2, febrero 2013.

- 50
- La invención es igualmente relativa a un procedimiento de determinación de un parámetro físico, que consta de una etapa de tratamiento de una señal interferométrica $SM(t)$ conforme al procedimiento de tratamiento definido anteriormente en al menos uno de sus modos de aplicación, conteniendo dicha señal interferométrica la información sobre el parámetro físico que ha de determinarse, después una etapa de determinación del parámetro físico a partir de la determinación de los picos interferométricos de la señal interferométrica $SM(t)$.

La determinación del conjunto de los picos interferométricos de la señal interferométrica $SM(t)$ a partir del procedimiento de tratamiento definido anteriormente en al menos uno de sus modos de aplicación, permite ventajosamente mejorar la precisión de la medida del parámetro físico buscado.

5 Ventajosamente, el procedimiento no consta de una etapa de calibración previa de la fuente luminosa láser, ni de una etapa de calibración del índice de retroinyección óptica C.

De este modo, liberarse de una etapa de calibración, sea cual sea, permite una implementación en tiempo real. En efecto, un error en una etapa de calibración impide el determinismo o la repetibilidad de las medidas del dispositivo asociado al procedimiento.

Además, la realización de una etapa de calibración necesita la mayoría de las veces recurrir a especialistas técnicos.

10 El procedimiento de la invención, no necesitando una etapa de calibración de la fuente luminosa láser y/o del índice de retroinyección óptica, permite de este modo volver accesible la utilización del procedimiento a personas que no son especialistas, lo que vuelve su utilización realista en un medio industrial.

En un ejemplo preferido de aplicación, el procedimiento permite la reconstitución del desplazamiento del objetivo a partir de la determinación de los picos interferométricos de la señal interferométrica $SM(t)$.

15 El procedimiento permite ventajosamente la reconstrucción del desplazamiento de un objetivo no cooperativo, sin adición de componente externo en el dispositivo asociado.

La determinación del conjunto de picos interferométricos de la señal interferométrica $SM(t)$ a partir del procedimiento de tratamiento definido anteriormente en al menos uno de sus modos de aplicación, permite ventajosamente mejorar la precisión del desplazamiento del objetivo.

20 **Presentación de las figuras**

La descripción que sigue, proporcionada únicamente a modo de ejemplo de un modo de realización de la invención, se hace en referencia a las figuras adjuntas, en las que:

La figura 1 ilustra esquemáticamente un ejemplo de dispositivo de medida del desplazamiento de un objetivo, basado en el fenómeno de retroinyección óptica conforme a la invención.

25 La figura 2 ilustra un diagrama esquemático del procedimiento de reconstrucción del desplazamiento de un objetivo conforme a la invención.

Las figuras 3a 3e ilustran un ejemplo de etapas de procedimiento de reconstrucción del desplazamiento de un objetivo a partir de una señal modelizada para un coeficiente de retroinyección óptica igual a 0,5.

30 Las figuras de 4a a 4e ilustran un ejemplo de etapas de procedimiento de reconstrucción del desplazamiento de un objetivo a partir de una señal modelizada para un coeficiente de retroinyección óptica igual a 3.

Las figuras de 5a a 5e ilustran un ejemplo de etapas de procedimiento de reconstrucción del desplazamiento de un objetivo a partir de una señal modelizada para un coeficiente de retroinyección óptica igual a 5.

Las figuras de 6a a 6e ilustran un ejemplo de etapas de procedimiento de reconstrucción del desplazamiento de un objetivo a partir de una señal real débilmente perturbada por "moteado".

35 Las figuras de 7a a 7d ilustran curvas de comparación entre la fase obtenida entre un método clásico de desdoblamiento de fase y el método de Hilbert, para una señal modelizada con un coeficiente de retroinyección óptica igual a 0,5, y para una señal real muy perturbada por "moteado".

Las figuras de 8a a 8d ilustran el principio de reconstrucción del desplazamiento del objetivo para un primer ejemplo de señal real muy perturbada por "moteado".

40 Las figuras de 9a a 9d ilustran el principio de reconstrucción del desplazamiento del objetivo para un segundo ejemplo de señal real muy perturbada por "moteado".

Descripción detallada de la invención

45 El ejemplo de realización del dispositivo de medida se describe de manera detallada en su aplicación al caso de una medida de desplazamiento de un objetivo. Esta elección no es limitativa, y la invención se aplica igualmente a otras medidas de parámetros físicos de un objetivo, tales como por ejemplo la medida de su velocidad o además de sus vibraciones o de su distancia absoluta.

La figura 1 ilustra esquemáticamente un dispositivo óptico 10 para la medida de desplazamiento de un objetivo 20 de acuerdo con un modo particular de realización de la invención y basado en el fenómeno de retroinyección óptica, anteriormente expuesto

ES 2 634 659 T3

El dispositivo óptico 10 contiene una fuente luminosa láser 11, una lente 12, un detector 13 y medios de conversión 15 de una señal interferométrica obtenida a la salida del detector 13.

La fuente luminosa láser 11, la lente 12 y el objetivo 20 se colocan sobre un eje óptico común 30.

5 La fuente luminosa láser 11 es sensible a la retroinyección óptica. Contiene una cavidad óptica (no representada) y está adaptada para emitir un haz óptico de medida, de longitud de onda λ , según el eje óptico 30 en dirección al objetivo 20 y para recibir el haz de medida reflejado por dicho objetivo

Preferentemente, la fuente luminosa láser 11 es un diodo láser, pero es posible la utilización de cualquier otro tipo de fuente luminosa láser, tal como por ejemplo un láser de gas.

10 En un modo preferido de realización, el diodo láser 11 es alimentado con una corriente de valor sensiblemente continuo en el tiempo.

En otro modo de realización, el diodo láser 11 es alimentado por una corriente variable a lo largo del tiempo, tal como una corriente periódica, por ejemplo de tipo sinusoidal o triangular.

15 Al contrario de los interferómetros clásicos, no es obligatorio estabilizar el diodo láser en longitud de onda por medio de sistemas de control que implican un sobre coste, siendo suficiente la precisión alcanzable sin control para numerosas aplicaciones que necesitan un dispositivo de bajo coste.

El diodo láser 11 está colocado a una distancia L_{ext} del objetivo.

La lente 12 está colocada en un camino óptico recorrido por el haz óptico de medida e interpuesta entre el diodo láser 11 y el objetivo 20.

20 Preferentemente, la lente 12 es utilizada para la medida de desplazamiento del objetivo situado para distancias L_{ext} superiores a algunos centímetros. Generalmente no es necesaria para distancias L_{ext} inferiores a algunos centímetros.

La lente 12 se elige, por una parte, para recibir un haz de medida procedente del diodo láser 11, y para colimar/focalizar dicho haz de medida en dirección al objetivo y, por otra, para recibir una fracción del haz de medida reflejado por el objetivo y para colimarlo/focalizarlo hacia la cavidad interna del diodo láser 11.

25 El objetivo 20 está en movimiento, como está indicado esquemáticamente a título de ejemplo por la flecha 23, según el eje óptico 30.

El dispositivo óptico de medida 10 de acuerdo con la invención está por lo tanto adaptado para medir la proyección del desplazamiento del objetivo 20 a lo largo de la dirección del eje óptico 30.

30 El objetivo 20 está adaptado para recibir al menos una parte del haz de medida procedente del diodo láser, y presenta una superficie 21 apta para reflejar todo o parte de dicho haz de medida

Preferentemente, la superficie 21 del objetivo 20 es sensiblemente perpendicular al eje óptico 30 a fin de obtener la mejor precisión posible. Sin embargo, una perpendicularidad con respecto al eje óptico no es esencial para obtener una medida de desplazamiento del objetivo conforme a la invención.

35 En caso de no perpendicularidad del desplazamiento, la medida del desplazamiento del objetivo se hará según la proyección conforme al eje óptico 30.

En un ejemplo de realización, el objetivo 20 puede ser una parte de un objeto del que debe medirse el desplazamiento.

Alternativamente, el objetivo 20 puede estar separado del objeto pero ligado al objeto, de modo que la medida de desplazamiento del objetivo es equivalente a la medida del desplazamiento del objeto.

40 La superficie 21 del objetivo 20 puede ser sensiblemente plana o presentar un estado de superficie rugosa.

El haz de medida, no colimado, procedente del diodo láser 11, se dirige hacia la lente 12 que le colima/focaliza hacia el objetivo 20. El objetivo 20 refleja una fracción.

El haz de medida reflejado, después del paso por la lente 12, es reinyectado en la cavidad óptica del diodo láser 11, creando interferencias con el haz de medida emitido por el diodo láser.

45 Cuando el objetivo 20 está desplazándose según el eje óptico 30, la longitud de camino óptico recorrido por el/los haz/haces, es decir, la distancia de ida y vuelta entre el diodo láser 11 y el objetivo 20, varía, las interferencias dependientes del desplazamiento del objetivo generan una variación de la potencia óptica del haz de medida emitido por el diodo láser 11.

El detector de medida 13 detecta la variación de la potencia óptica del haz de medida emitido por el diodo láser y la convierte en una señal, denominada señal interferométrica $SM(t)$, que contiene las interferencias dependientes del desplazamiento del objetivo a lo largo del tiempo. Esta señal interferométrica $SM(t)$ puede ser, por ejemplo, una señal de intensidad de corriente, de tensión, de potencia o además una señal digital.

- 5 El detector de medida es preferentemente un fotodiodo 13. En un ejemplo preferido de realización, el fotodiodo 13 es un fotodiodo integrado en una misma carcasa que el diodo láser 11, y situado en una cara trasera de dicho diodo láser. Este fotodiodo, que habitualmente sirve para controlar la potencia de emisión del diodo láser, es utilizado para detectar las variaciones de la potencia óptica del diodo láser, inducidas por el fenómeno de retroinyección óptica.

- 10 A la salida de dicho fotodiodo, los medios de conversión 15 tratan la señal interferométrica $SM(t)$ procedente del fotodiodo 13 y la convierten en una medida de desplazamiento $D_c(t)$ del objetivo.

Las figuras 3a, 4a, 5a y 6a representan cuatro formas típicas de señales interferométricas obtenidas por cuatro tipos de objetivos.

La figura 3a, y respectivamente las figuras 4a y 5a, ilustra una señal interferométrica $SM(t)$ en función del tiempo, para un índice de retroinyección C de 0,5, y respectivamente de 3 y 5.

- 15 Las señales interferométricas son representadas por franjas interferométricas no sinusoidales, que presentan una forma específica en dientes de sierra asimétricos más o menos pronunciada conforme al valor del parámetro C . La señal interferométrica $SM(t)$ presenta una forma casi sinusoidal para un C débil, por ejemplo inferior a 0,5. Presenta una forma en dientes de sierra cada vez más pronunciada, después con un fenómeno de histéresis a medida que el parámetro C aumenta.

- 20 Cada franja interferométrica presenta un frente ascendente F_m y un frente descendente F_d . Se define un frente ascendente F_m de una franja de interferencia respecto a un frente descendente, como el frente que presenta el grado de inclinación más grande, y un frente descendente F_d como el frente que presenta el grado de inclinación más bajo. Las figuras 3a, 4a y 5a ilustran claramente los frentes ascendentes y descendentes de las franjas interferométricas conforme al valor del parámetro C .

- 25 La figura 6a ilustra una señal interferométrica perturbada por "moteado".

Los medios de conversión 15, detallados en la figura 2, contienen:

- unos medios 16 de tratamiento de la señal interferométrica $SM(t)$ para determinar picos interferométricos,
- unos medios 19 de reconstrucción del desplazamiento $D_c(t)$ del objetivo 20 a partir de los picos interferométricos obtenidos a la salida de los medios de tratamiento 16.

- 30 Estos medios de conversión 15 pueden ser analógicos y/o digitales.

Los medios 16 de tratamiento contienen:

- unos primeros medios 17 de supresión de una componente continua $Off(t)$ de la señal interferométrica $SM(t)$,
 - unos segundos medios 18 de determinación de los picos interferométricos a partir de la señal obtenida a la salida de los primeros medios 17.
- 35

Los primeros medios 17 son configurados para suprimir la componente continua localmente para cada una de las franjas de interferencias de la señal interferométrica $SM(t)$.

En otros términos, la componente continua $Off(t)$ de la señal es descompuesta en un vector de N componentes continuas locales.

- 40 N representa el número de franjas de interferencias determinadas de la señal de interferencia $SM(t)$.

Cada componente continua local está asociada a una franja de interferencia de la señal interferométrica $SM(t)$.

Una componente continua local de la franja de interferencia asociada se mide al nivel de ésta.

La componente continua $Off(t)$ de la señal interferométrica $SM(t)$ se resta a continuación a la señal interferométrica $SM(t)$.

- 45 La supresión de esta componente continua permite ventajosamente liberarse de los fenómenos de histéresis que aparecen en la señal interferométrica con un fuerte índice de retroinyección óptica C del objetivo, por ejemplo, cuando $C > 4,7$, como por ejemplo la señal ilustrada en la figura 5a.

Esta supresión de esta componente continua permite igualmente liberarse de los fenómenos de desvanecimientos momentáneos de la amplitud, comúnmente conocidos con el término de fading, vinculados al "moteado", como para la señal ilustrada en la figura 9a.

5 Liberarse de los fenómenos de histéresis y de fading en la señal interferométrica $SM(t)$ permite recurrir de manera ventajosa solamente a un único algoritmo de tratamiento de la señal, sea cual sea la distancia y el estado de la superficie del objetivo del que se busca medir el desplazamiento.

Los segundos medios 18 contienen:

- 10 - un filtro de Hilbert para determinar los componentes en fase y en cuadratura de la señal interferométrica de la señal interferométrica $SM(t)$ a partir de la señal obtenida a la salida de los primeros medios 17; la señal obtenida presenta una forma analítica,
- un medio de cálculo para calcular la fase de la señal interferométrica a partir de estos componentes; la fase obtenida es módulo 2π ,
- un medio de obtención de los picos interferométricos a partir de la fase de la señal interferométrica.

15 La utilización del filtro de Hilbert permite determinar el conjunto de los picos interferométricos, sea cual sea la rugosidad del objetivo y sea cual sea la forma de la señal interferométrica (fenómeno de fading, de histéresis, ...).

La utilización del filtro de Hilbert asociado a una señal interferométrica procedente del fenómeno de retroinyección óptica permite suprimir la influencia del desvanecimiento momentáneo de la señal interferométrica vinculado a la rugosidad del objetivo.

20 La determinación del conjunto de los picos interferométricos de la señal interferométrica conduce por consiguiente a la mejora de la precisión de la medida del desplazamiento del objetivo.

La ventaja de tal filtro de Hilbert reside igualmente en el hecho de que puede implementarse en equipos informáticos, por medio de un filtro analógico, o programas informáticos, por medio de un filtro digital, según las necesidades.

25 En un ejemplo de medios de reconstrucción 19, dichos medios de conversión utilizan un método de desdoblamiento de fases para reconstruir el desplazamiento del objetivo.

Este método es un método conocido como tal, y por lo tanto no será descrito.

Estos métodos de reconstrucción 19 pueden ser analógicos y/o digitales dependiendo de la señal interferométrica $SM(t)$.

30 Los medios de cálculo 15 descritos anteriormente del dispositivo de medida presentan la ventaja de no necesitar medios de calibración del diodo láser, a través de la determinación de su factor de ensanchamiento de línea α , y/o del parámetro C .

35 A título representativo de la invención, las figuras 3a-d, 4a-d, 5a-d y 6a-d ilustran un ejemplo de etapas que permiten obtener la supresión de la componente continua de la señal interferométrica, realizadas por medio de los primeros medios 17. Para las figuras 3a-d, se ha simulado una señal interferométrica teórica con un índice de retroinyección C de 0,5.

Las tres señales (figuras 3a-d, 4a-d y 5a-d) interferométricas se realizan a partir del programa informático Matlab®. Las señales interferométricas se crean a partir de un modelo comportamental de las señales interferométricas procedentes del fenómeno de retroinyección óptica descrito en la publicación de Plantier et al., "Behavioral model of a self-mixing laser diode Sensor", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 41, nº 9, septiembre 2005.

40 Las tres señales interferométricas simuladas corresponden a un desplazamiento del objetivo equivalente a cinco veces el valor de la longitud de onda del diodo láser simulado. La distancia láser-objetivo no se introduce de manera directa, pero la variación del valor de retroinyección C pone en evidencia esta relación del hecho de que depende del tipo de superficie y de la distancia láser-objetivo.

45 Las figuras 3a, 4a, 5a y 6a ilustran como se ha descrito anteriormente la señal interferométrica $SM(t)$ obtenida a la salida del fotodiodo 13.

En una primera etapa, la señal interferométrica $SM(t)$ es filtrada, por medio por ejemplo de un filtro de paso alto, que es el equivalente de un derivador. La señal filtrada $SM_f(t)$ está representada en las figuras 3b, 4b, 5b y 6b por la curva 1. La señal $SM_f(t)$ presenta picos interferométricos P . En el ejemplo de las figuras 3b y 4b, el número de picos interferométricos P es de 18. En el ejemplo de la figura 5b, el número de picos interferométricos es de 17.

En una etapa posterior, se establecen un límite positivo y un límite negativo. Los límites se calculan de manera automática con el tamaño de la ventana de muestreo recibida. Los dos límites son igualmente representados en las figuras 3b, 4b, 5b y 6b para las dos curvas 2.

5 Los tiempos de activación en los que los picos interferométricos P aparecen más allá de uno de los dos límites se detectan a continuación. Las figuras 3c, 4c, 5c y 6c ilustran estos tiempos de activación. La señal interferométrica SM(t) está igualmente representada en estas figuras.

La señal interferométrica SM(t) comprendida entre dos tiempos de activación sucesivos representa una pseudofranja de dicha señal interferométrica SM(t).

10 Se constata que una pseudofranja corresponde generalmente a una franja de interferencia de la señal interferométrica SM(t), como se ilustra en las figuras 3c, 4c, 5c y 6c.

En ciertos casos, dependiendo del valor definido de los límites, ciertos picos interferométricos no son detectados. Una pseudofranja corresponde entonces a una pluralidad de franjas de interferencia sucesivas, como se ilustra en la figura 6c.

15 Los picos interferométricos P que sobrepasan uno de los dos límites provocan la activación de un filtro de media sobre la señal interferométrica SM(t). Se determinan, por medio de este filtro de media, las medias locales, o componentes continuas locales, de la señal interferométrica SM(t) entre dos tiempos de activación, que corresponden a cada pseudofranja determinada, como se ilustra en las figuras 3d, 4d, 5d y 6d. La señal interferométrica SM(t) se representa igualmente sobre estas figuras.

20 El conjunto de las componentes continuas locales, denominada componente continua Off(t), se resta a continuación a la señal interferométrica SM(t).

La señal interferométrica obtenida es una señal denominada señal interferométrica corregida SM_c(t).

La señal interferométrica SM(t) es de este modo desplazada localmente alrededor de cero.

La supresión de cada componente continua local asociada a cada pseudofranja garantiza de este modo que no hay restricción para el uso de la transformada de Hilbert que se va a describir más adelante.

25 De este modo es fácil constatar, en vista de las diferentes figuras, el efecto no intrusivo del tratamiento sobre las señales interferométricas modelizadas que no presentan fenómenos de histéresis u otros fenómenos que perturban la señal, tal como el fading.

Todas las etapas descritas anteriormente se realizan por medio de los primeros medios 17.

30 Durante una etapa posterior, realizada por medio de los segundos medios 18, la forma analítica de la señal interferométrica SM(t) es determinada por medio de un filtro de Hilbert para calcular su fase módulo 2π . La ventaja de la utilización del filtro de Hilbert se ilustra (figuras de 7a a 7d) en comparación con un método clásico de cálculo de fase.

A título de ejemplo, en la figura 7a, se ha simulado una señal interferométrica SM(t) con un índice de retroinyección C igual a 0,5.

35 El cálculo de la fase asociada se ha realizado de dos maneras:

- a partir de una función clásica "arccos" de tipo conocido en sí,
- a partir de la función analítica (transformada de Hilbert).

La señal de amplitud constante, obtenida a partir de la función clásica, está situada en el intervalo $[0 ; \pi]$, como se ilustra en la figura 7b por la curva continua "arcocoseno".

40 La señal de amplitud constante, obtenida a partir de la función analítica, está situada en el intervalo $[-\pi ; \pi]$, como se ilustra en la figura 7b por la curva de puntos "analítica".

Se constata que, sobre las dos señales de amplitud, la distinción de las franjas de interferencia es fácilmente utilizable por un único límite, de valor π .

En la figura 7c, una señal interferométrica SM(t) simulada presenta una atenuación aleatoria en amplitud.

45 La señal de amplitud constante, obtenida a partir de la función clásica, está situada en el intervalo $[0 ; \pi]$, como se ilustra en la figura 7d por la curva continua "arcocoseno".

La señal de amplitud constante, obtenida a partir de la función analítica, está situada en el intervalo $[-\pi ; \pi]$, como se ilustra en la figura 7d por la curva de puntos "analítica".

Se constata que la elección de fijar un valor de límite en π , no permite distinguir las franjas de interferencia por la función clásica.

5 Por el contrario, la distinción de las franjas de interferencia es siempre utilizable por el único límite, de valor π , para la función analítica. La utilización de la transformada de Hilbert no necesita seguir la envolvente, ni la forma de la señal para el cálculo de fase de la señal interferométrica.

Cuando la fase de la señal interferométrica $SM(t)$ es determinada, el conjunto de los picos interferométricos es determinado.

En una última etapa, el desplazamiento del objetivo 20, tanto en dirección como en amplitud, es determinado a partir del conjunto de los picos interferométricos.

10 Esta etapa es conocida como tal, y por lo tanto no será descrita en la presente memoria.

A título indicativo, la orientación de los dientes de sierra de las franjas interferométricas da el sentido de desplazamiento del objetivo. Cuando el diente de sierra cambia de inclinación, el objetivo cambia de dirección de movimiento.

15 Las figuras 3e, 4e, 5e y 6e ilustran el desplazamiento $D_c(t)$ reconstituido del objetivo obtenido a partir de la señal corregida $SM_c(t)$, y después de paso en el filtro de Hilbert.

20 Es interesante señalar que los primeros medios 17 no tienen como objetivo determinar todos los picos interferométricos P necesarios para la reconstrucción del desplazamiento del objetivo. El interés de los primeros medios 17 es realizar un prefiltrado para fijar la señal interferométrica sensiblemente alrededor de cero. Son los segundos medios 18 los que permiten encontrar el conjunto de los picos interferométricos para volver a sacar la fase de la señal interferométrica $SM(t)$, comprendida entre $-\pi$ y π , a partir del filtro de Hilbert.

A fin de ilustrar la precisión obtenida sobre el desplazamiento reconstituido del objetivo a partir del dispositivo de medida según la invención, se han realizado numerosos experimentos, y se sintetizan a continuación en forma de dos ejemplos.

Para todos los experimentos:

- 25 - la fuente luminosa láser es un diodo láser de tipo HL 7851G LD de Hitachi® que emite a una longitud de onda λ de 785 nm, con fotodiodo integrado. El diodo láser está alimentado por una corriente de inyección constante de 70 mA, y tiene una potencia de salida máxima de 20 mW. El haz emitido es colimado a través de una lente de distancia focal de 5 mm, y se focaliza sobre un objetivo de 80 mm de diámetro.
- 30 - el objetivo se coloca a una distancia de 45 cm del diodo láser, y el desplazamiento de éste es generado por un generador de función de tipo AFG3022 de Tektronix®. El objetivo vibra a una frecuencia fija de 300 Hz de manera sinusoidal, con una amplitud de pico a pico de 10 V. El objetivo se desplaza según el eje 30.

Las señales interferométricas se observan y registran por medio de un amplificador de transimpedancia y un osciloscopio de tipo HRO 66Zi de LeCroy®.

Las señales interferométricas son tratadas para reconstruir el desplazamiento $D(t)$ del objetivo.

35 Ahora se presentan dos experimentos. Los resultados obtenidos se ilustran respectivamente en las figuras 8a-d y 9a-d.

Ejemplo 1: el objetivo 20 está recubierto con un papel de lija P40 que presenta una rugosidad media de 425 μm .

Los resultados se obtienen en las figuras de 8a a 8d.

40 La figura 8a ilustra la señal interferométrica $SM(t)$ medida por el fotodiodo. Se constata que la señal se degrada en amplitud debido al efecto del "moteado".

La figura 8b ilustra la señal interferométrica filtrada SM_f .

La figura 8c ilustra la señal interferométrica $SM(t)$ y la componente continua $Off(t)$ calculada (conjunto de componentes locales medidos por franja).

La figura 8d ilustra el desplazamiento reconstituido $D_c(t)$.

45 Este primer ejemplo ilustra claramente el hecho de que el dispositivo de medida conforme a la invención permite reconstituir el desplazamiento real de un objetivo rugoso.

Ejemplo 2: el objetivo está recubierto de un material de fósforo activo en el infrarrojo, que conlleva un desvanecimiento lento, de tipo VRC2 de Thorlabs®.

Los resultados se obtienen en las figuras de 9a a 9d.

- 5 La figura 9a ilustra la señal interferométrica $SM(t)$ medida por el fotodiodo. Se constata que la señal se degrada mucho más en amplitud por el "moteado" que en la figura 8a. Se constata igualmente una pérdida de la señal interferométrica $SM(t)$ en los tiempos $t = 0,5$ ms y $t = 2,7$ ms.

La figura 9b ilustra la señal interferométrica filtrada SM_f .

La figura 9c ilustra la señal interferométrica $SM(t)$ y la componente continua $Off(t)$ calculada.

La figura 9d ilustra el desplazamiento reconstruido $D_c(t)$.

- 10 Este segundo ejemplo ilustra perfectamente el hecho de que el dispositivo de medida conforme a la invención permite reconstituir el desplazamiento real de un objetivo incluso en presencia de una pérdida temporal de información.

Estos ejemplos confirman claramente la robustez del dispositivo de medida y el tratamiento de señal asociado para diferentes estados de superficie de un objetivo.

- 15 El dispositivo de medida conforme a la invención, así como el tratamiento de señal asociado, permite ventajosamente reducir el error de medida de desplazamiento del objetivo provocado por los errores de recuento de picos. Permite, por medio de un tratamiento de señal en tiempo real adaptado, tratar todas las formas de señales interferométricas según el estado de la superficie del objetivo y sin condición sobre la forma de la señal interferométrica.

- 20 El dispositivo de medida conforme a la invención es un dispositivo sencillo de realizar, poco voluminoso (sin componentes externos de tipo óptico, mecánico o electrónico suplementarios a la configuración de base), autoalineado y robusto, para la medida de desplazamiento sea cual sea el estado de la superficie del objetivo utilizado y su distancia respecto a la fuente láser. Presenta igualmente la ventaja de tener un coste asequible y ser transportable en un medio industrial.

25

Reivindicaciones

- 5
1. Dispositivo óptico (10), basado en el fenómeno de retroinyección óptica, para la determinación de un parámetro físico que contiene:
- una fuente luminosa láser (11) para generar un haz luminoso, denominado haz emitido, en dirección a un objetivo,
 - un medio de detección (13) de una señal interferométrica $SM(t)$, dicha señal interferométrica conteniendo franjas de interferencias, la información sobre el parámetro físico que ha de determinarse, y estando generada por una interferencia entre el haz emitido y un haz luminoso reflejado por el objetivo,
 - medios de conversión (15) de la señal interferométrica $SM(t)$ obtenida por el medio de detección (13) en una medida del parámetro físico,
- 10
- caracterizado porque dichos medios de conversión (15) contienen:
- unos primeros medios (17) de supresión de una componente continua $Off(t)$ de la señal interferométrica $SM(t)$, estando dichos primeros medios configurados para suprimir la componente continua localmente para cada una de las franjas de interferencia de la señal interferométrica,
 - unos segundos medios (18) de determinación de picos interferométricos de la señal interferométrica $SM(t)$ obtenidos a partir de la señal obtenida a la salida de los primeros medios (17), conteniendo los segundos medios (18) un filtro de Hilbert.
- 15
2. Dispositivo óptico (10) conforme a la reivindicación 1 que no contiene medios de calibración de la fuente luminosa láser.
- 20
3. Procedimiento de tratamiento de una señal interferométrica $SM(t)$ obtenida por retroinyección óptica, por medio de un dispositivo óptico (10) conforme a una de las reivindicaciones 1 o 2, dicha señal interferométrica conteniendo franjas de interferencias, caracterizado porque consta de las etapas sucesivas de:
- supresión de una componente continua $Off(t)$ de la señal interferométrica $SM(t)$, para obtener una señal corregida $SM_c(t)$, por los primeros medios (17), dicha componente continua $Off(t)$ de la señal interferométrica estando suprimida de forma local, para cada franja de interferencia detectada de la señal interferométrica $SM(t)$,
 - determinación de picos interferométricos de dicha señal interferométrica $SM(t)$ a partir de la señal corregida $SM_c(t)$ por los segundos medios (18), obteniéndose dicha determinación de los picos interferométricos por aplicación de un filtro de Hilbert a la señal corregida $SM_c(t)$.
- 25
4. Procedimiento de determinación de un parámetro físico que consta de una etapa de tratamiento de una señal interferométrica $SM(t)$ según el procedimiento conforme a la reivindicación 3, conteniendo dicha señal interferométrica la información sobre el parámetro físico que ha de determinarse, después una etapa de determinación del parámetro físico a partir de la determinación de los picos interferométricos de la señal interferométrica $SM(t)$.
- 30
5. Procedimiento conforme a la reivindicación 4, que consta de una etapa previa de adquisición de la señal interferométrica $SM(t)$ obtenida a partir del dispositivo conforme a una de las reivindicaciones 1 o 2.
- 35
6. Procedimiento conforme a la reivindicación 5, que no consta de una etapa de calibración de la fuente luminosa láser.
- 40
7. Procedimiento de determinación de un desplazamiento de un objetivo que consta de una etapa de tratamiento de una señal interferométrica $SM(t)$ según el procedimiento conforme a la reivindicación 3, conteniendo dicha señal interferométrica la información sobre el parámetro físico que ha de determinarse, después una etapa de reconstitución del desplazamiento del objetivo a partir de la determinación de los picos interferométricos de la señal interferométrica $SM(t)$.
- 45
- 50

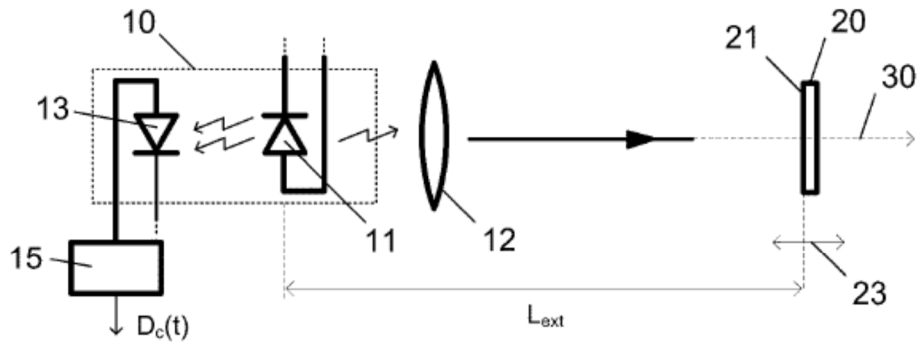


Fig. 1

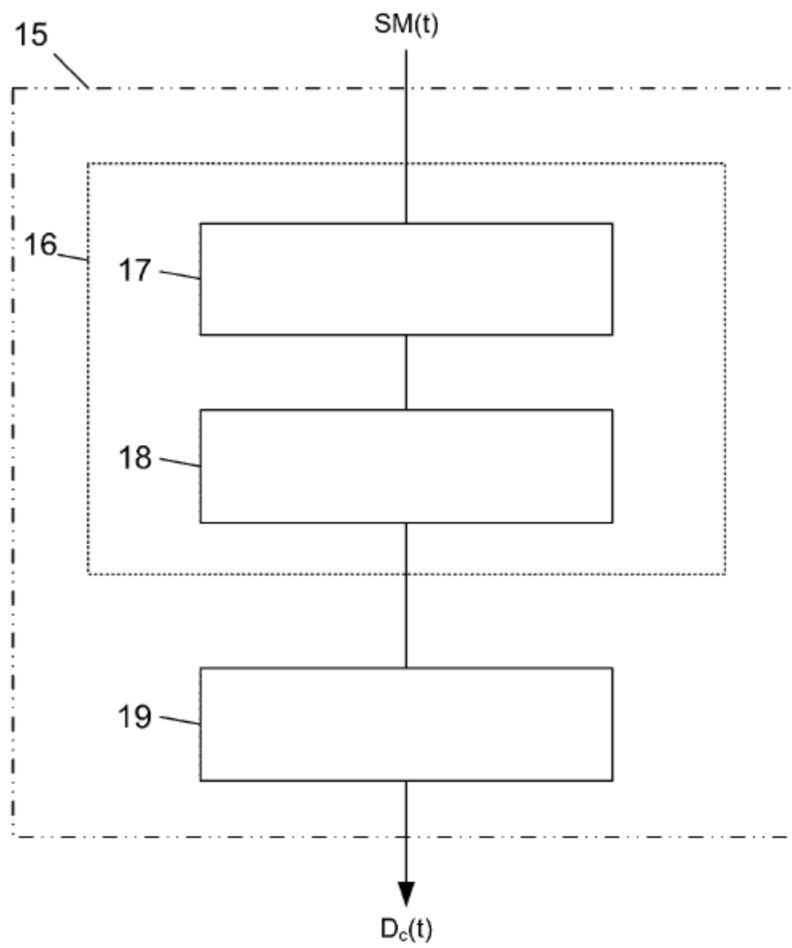


Fig. 2

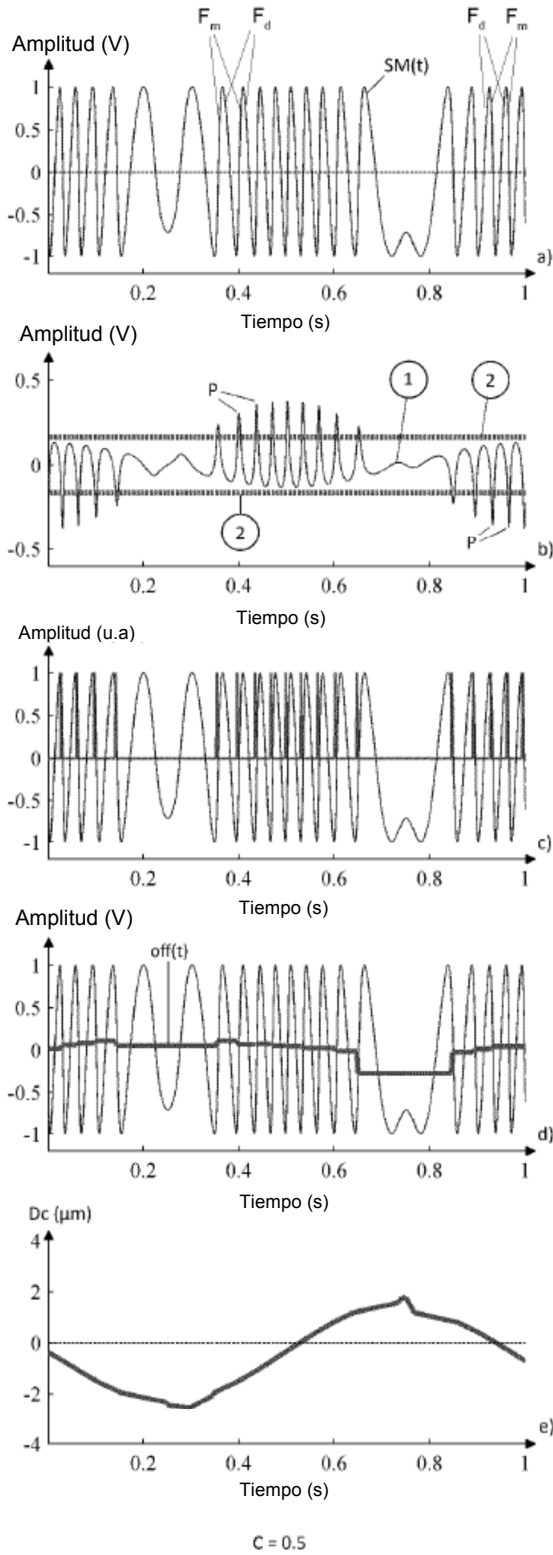


Fig. 3

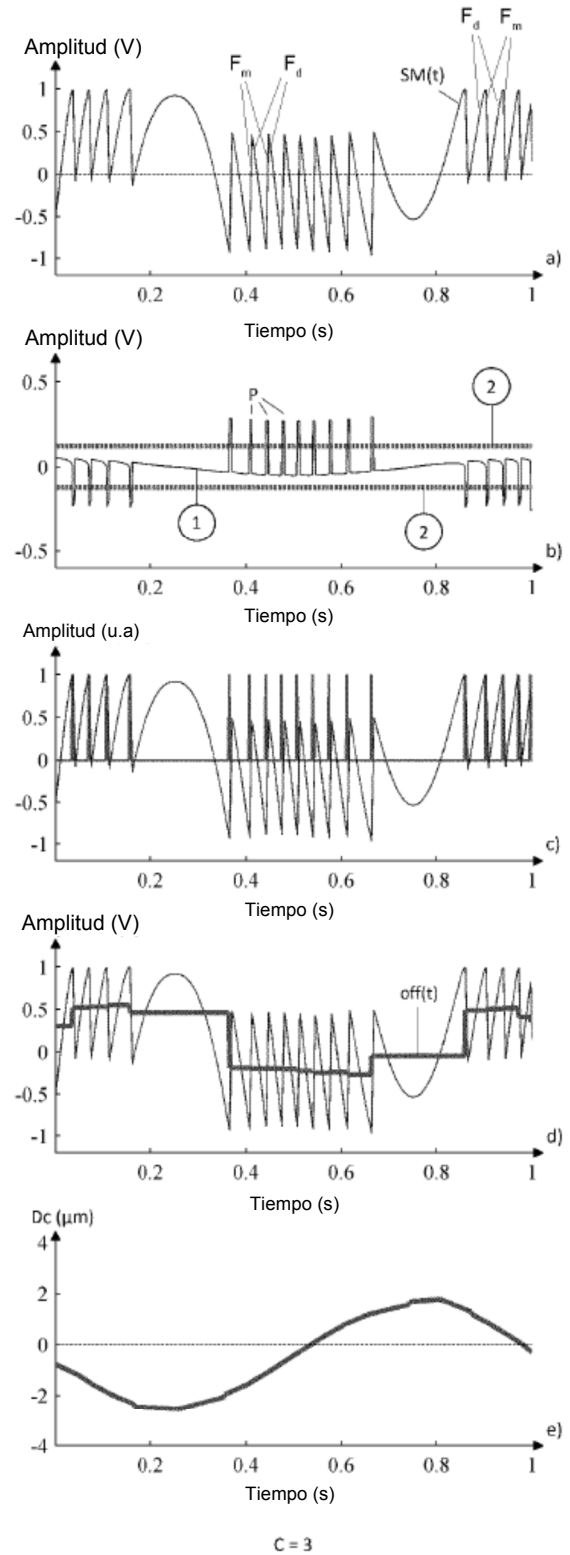
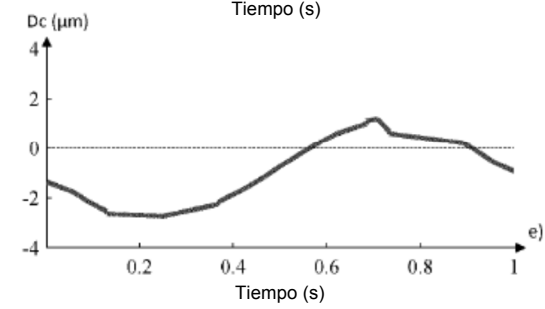
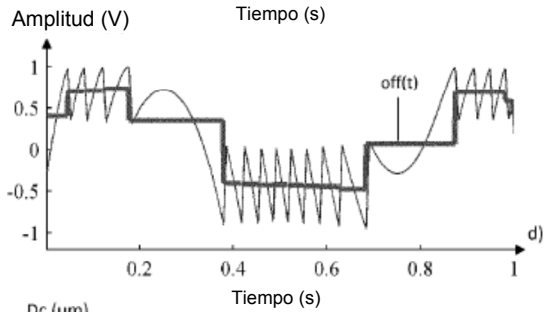
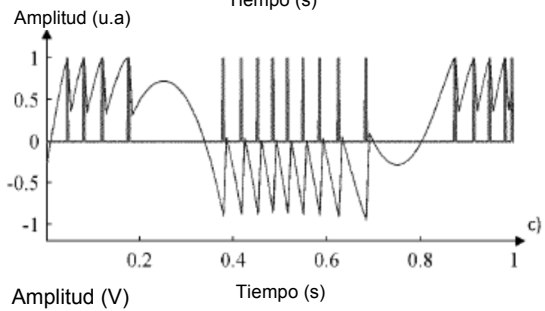
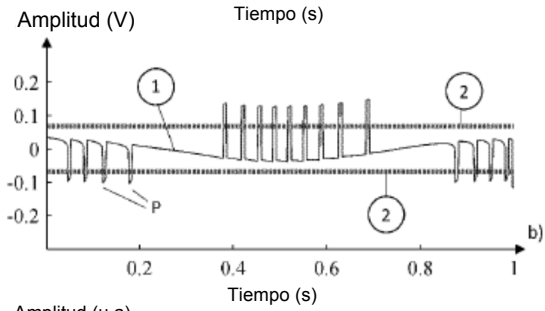
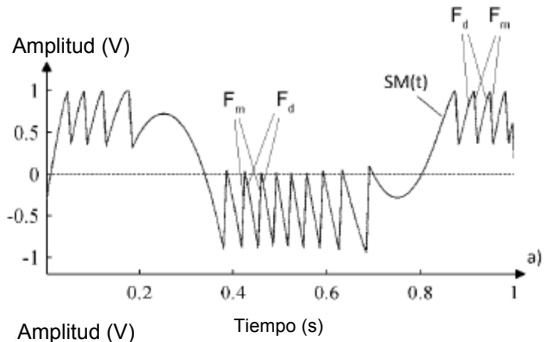


Fig. 4



C=5

Fig. 5

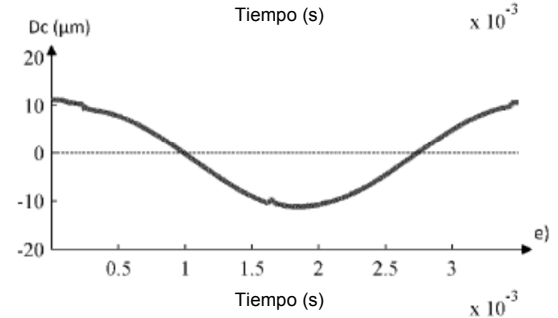
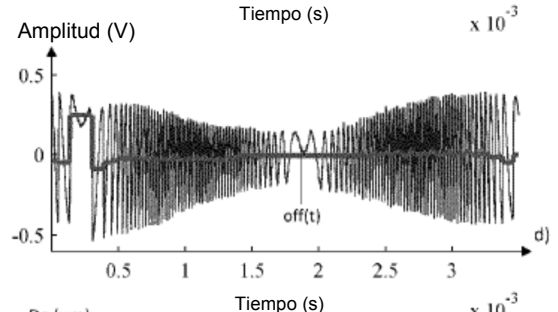
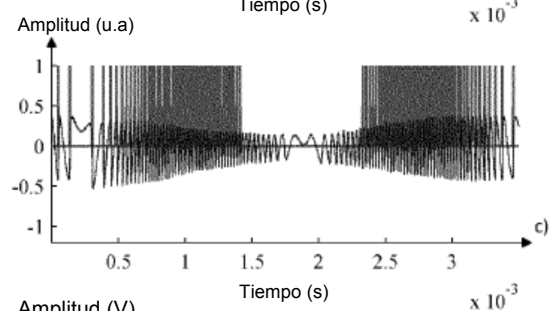
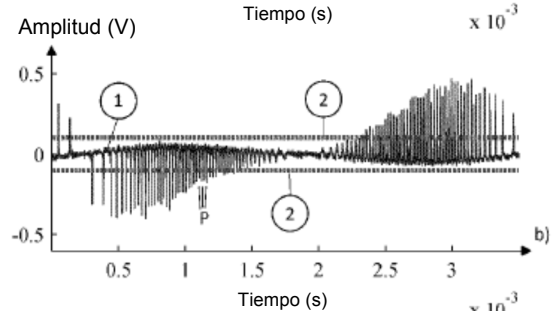
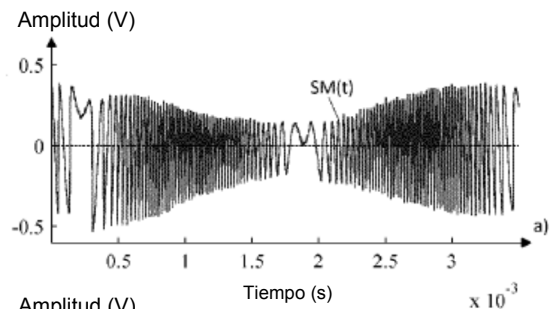


Fig. 6

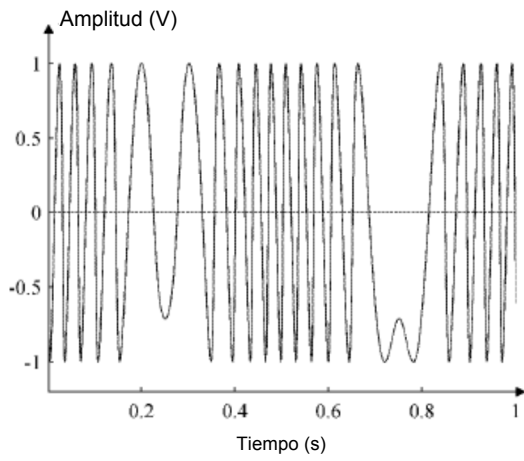


Fig. 7a

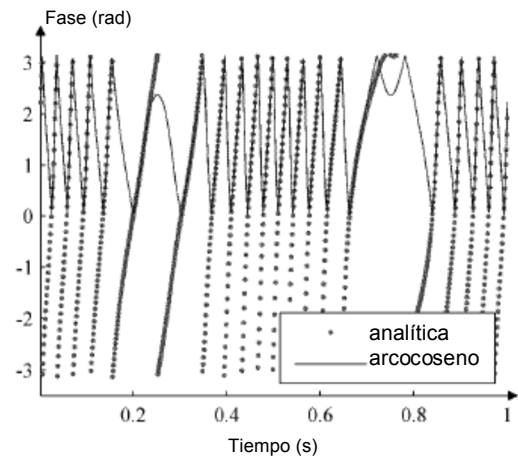


Fig. 7b

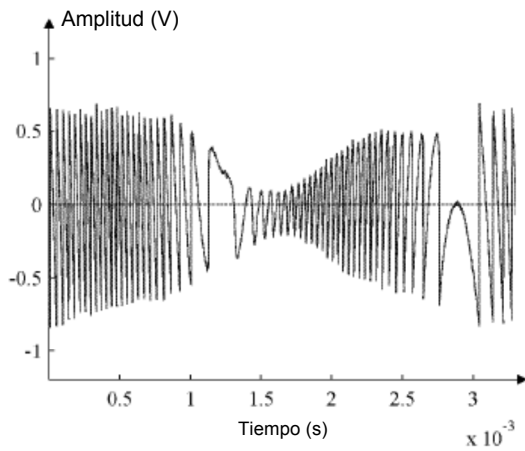


Fig. 7c

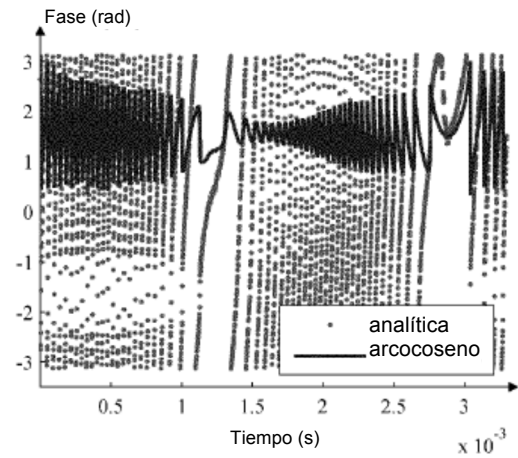


Fig. 7d

Fig. 8a

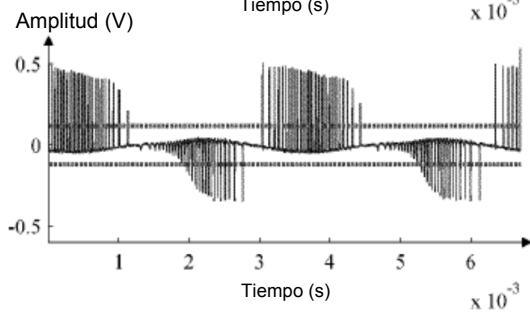
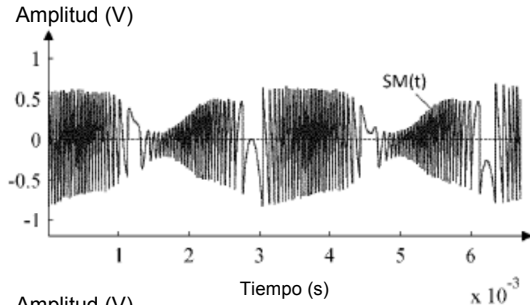


Fig. 8b

Fig. 9a

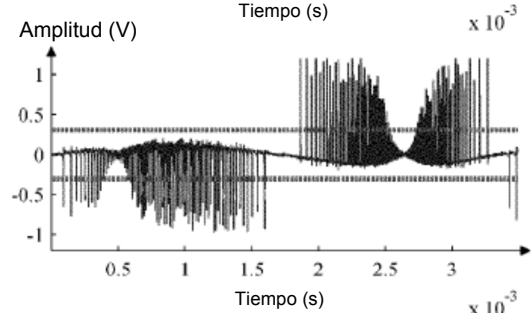
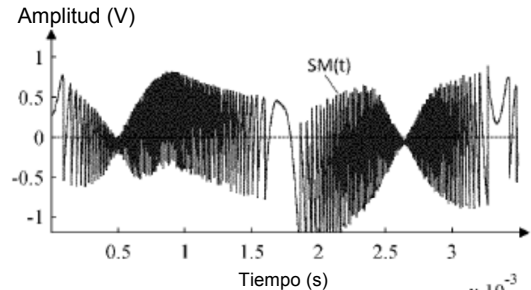


Fig. 9b

Fig. 8c

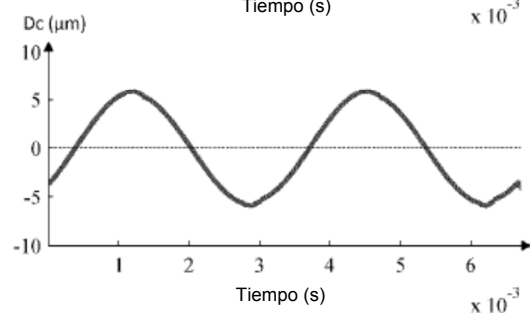
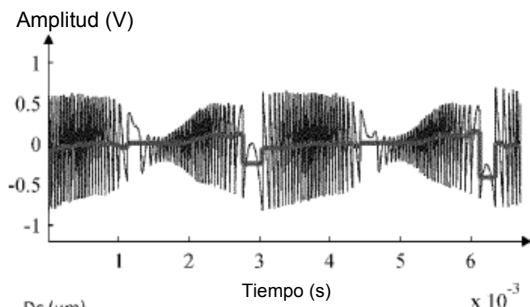


Fig. 8d

Fig. 9c

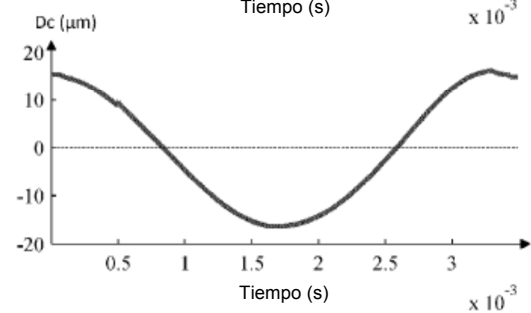
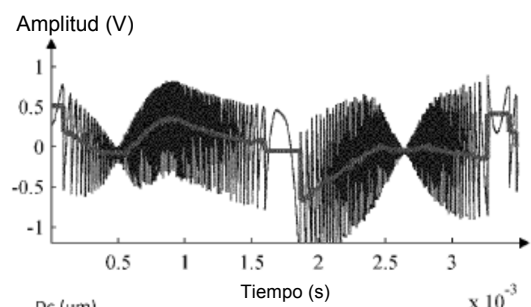


Fig. 9d