

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 700 875**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02 (2006.01)

G02F 1/35 (2006.01)

G01B 11/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **24.06.2015 PCT/GB2015/051839**

87 Fecha y número de publicación internacional: **30.12.2015 WO15198044**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **24.06.2015 E 15744631 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.10.2018 EP 3161408**

54 Título: **Aparato y método de interferometría de barrido láser dual**

30 Prioridad:

24.06.2014 GB 201411206

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

19.02.2019

73 Titular/es:

**NPL MANAGEMENT LIMITED (100.0%)
Hampton Road, Teddington
Middlesex TW11 0LW, GB**

72 Inventor/es:

**MARTINEZ, JUAN JOSE;
COPNER, NIGEL JOSEPH;
WARDEN, MATTHEW STUARD;
HUGHES, EDWARD BENJAMIN y
CAMPBELL, MICHAEL ALOYSIUS**

74 Agente/Representante:

ISERN JARA, Jorge

ES 2 700 875 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

Aparato y método de interferometría de barrido láser dual

5 Campo de la invención

La presente invención se refiere a un sistema y método para uso en interferometría de barrido de frecuencia de láser dual (FSI de barrido dual).

10 Antecedentes de la invención.

15 La medición de la interferometría es una técnica para medir la distancia a un objetivo u objetivos utilizando longitudes de onda como la luz. Se puede usar en muchos campos y aplicaciones diferentes, incluyendo: medición de larga distancia, posicionamiento tridimensional donde la capacidad de medir simultáneamente a múltiples objetivos desde un solo interferómetro es particularmente ventajosa (principalmente, utilizando solo la frecuencia) y pequeños desplazamientos (utilizando también la fase) para aplicaciones de ingeniería y aeroespaciales; inspección de superficie e imagen para dispositivos de control de calidad; Imágenes detalladas de corto alcance para aplicaciones biológicas como las técnicas de tomografía de coherencia óptica (OCT).

20 La interferometría de escaneo de frecuencia (FSI, también conocida como interferometría de barrido de frecuencia) es un tipo de interferometría que se utiliza para medir la distancia a un objetivo reflectante cooperativo o superficie especular no cooperativo que utiliza luz. También se conoce como interferometría de cambio de longitud de onda, rango de onda continua de frecuencia modulada y radar láser. Una implementación de ejemplo se muestra en la figura 1.

25 La FSI utiliza un interferómetro para iluminar el punto objetivo (en el caso de un objetivo llamado no cooperativo) o puntos o un objetivo u objetivos retrorreflectantes cooperativos. El interferómetro proporciona algunos medios para dividir la luz de una fuente de luz en un haz de referencia y medición. El haz de medición se dirige hacia el punto (o puntos) objetivo, que refleja parte de la luz incidente hacia el interferómetro. El haz de referencia se refleja en un espejo de referencia dentro del interferómetro, de modo que los haces de referencia de retorno y los haces de medición se combinan en un detector o receptor.

30 La FSI utiliza un láser sintonizable como fuente de luz. La frecuencia de la luz del láser sintonizable se barre a través de un rango de frecuencias. Cuando se hace esto, se recibe una señal sinusoidal en el detector. La frecuencia de esta señal es proporcional a la distancia al objetivo, y por lo tanto medir la frecuencia de la señal permite medir la distancia al objetivo. Esto se muestra en la figura 2, donde las frecuencias reflejadas se representan frente al momento de llegada al receptor. La diferencia de frecuencia observada (frecuencia de golpe), ΔF es proporcional al tiempo de ida y vuelta del haz de medición, τ , que está relacionado con la distancia, D , con el objetivo a través de la velocidad de la luz, c .

40
$$D = c \frac{\tau}{2}$$

45 Aprovechando el barrido continuo, el tiempo de retardo causado por la diferente distancia crea una frecuencia de golpe. La frecuencia de este golpe es directamente proporcional a la distancia al objetivo si el barrido es lineal (o si está linealizado a través de otra referencia) y dado que el procesamiento de frecuencia a través de la FFT es más fácil y más confiable que una medición de retardo de tiempo, este método es particularmente útil para mediciones precisas.

50 Se han sugerido diferentes alternativas de este diseño, que van desde sistemas simples que dependen de la frecuencia hasta sistemas más complejos que agregan mediciones de fase (lo que mejora la precisión, pero el sistema es menos flexible debido a las referencias adicionales requeridas y surgen problemas si la señal se pierde en cualquier punto).

En FSI, la frecuencia óptica del láser durante una medición se puede describir con la siguiente ecuación:

55
$$f(t) = 2\pi(\alpha t + f_0)$$

Donde $f(t)$ es la frecuencia óptica de la luz láser, α es la tasa de cambio de la frecuencia del láser,

60 $-\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2}$ es el tiempo (donde T es el tiempo total de medición) y f_0 es la frecuencia del láser en $t = 0$. Con este barrido, la intensidad del campo después de la detección interferométrica, si eliminamos los componentes de DC y alta frecuencia, coincide con la siguiente expresión:

$$I(t, \tau) = A \cdot \cos \left[2\pi \left(\alpha\tau t + f_0\tau - \frac{\alpha\tau^2}{2} \right) \right]$$

5 τ es el retardo de tiempo entre el espejo de referencia y el objetivo, y $\alpha\tau$ es la frecuencia de señal de golpe medida ΔF en la figura 2. El término τ^2 es generalmente insignificante y, por lo tanto, se descarta. Esta expresión se puede evaluar fácilmente mediante un análisis de frecuencia de Fourier (por ejemplo, mediante la transformación rápida de Fourier, FFT) y si τ es constante, se obtendrá un pico claro en la frecuencia, ΔF , que corresponde a la distancia al objetivo. En situaciones no ideales, aparece un problema cuando el objetivo se está moviendo, ya sea intencionalmente o debido a la vibración, o si la trayectoria óptica está cambiando debido a, por ejemplo, movimiento del aire, y por lo tanto τ tiene una dependencia de t . Como f_0 es grande en comparación con los otros términos en el argumento del coseno, incluso pequeñas variaciones de τ durante una medición pueden causar una gran perturbación en la señal. Este cambio Doppler aumenta en gran medida la incertidumbre de la medición de la distancia, tanto al aumentar la varianza de las mediciones cuando el movimiento del objetivo es aleatorio entre las mediciones (por ejemplo, cuando es causado por la vibración), como por la presencia de errores sistemáticos presentes cuando el movimiento del objetivo es a una velocidad constante.

15 El uso de dos barridos diferentes (de dos fuentes ópticas diferentes) se ha aplicado para resolver este problema. Esto se conoce como FSI de barrido dual. Por ejemplo, el sistema descrito en el documento US8687173 utiliza dos láseres sintonizables operados a dos velocidades de sintonización diferentes y sintonizados en direcciones opuestas (una arriba y otra abajo en la frecuencia) para producir una sola señal en un único fotodetector con dos componentes de frecuencia; uno de cada láser. Al separar las dos señales en frecuencia, se pueden procesar de forma independiente para determinar una única medida de distancia que está en gran parte libre de error inducido por Doppler.

20 Una solución alternativa fue propuesta por Schneider *et al* (Schneider, R., Thürmel, P., y Stockmann, M. (2001), "Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar", Optical Engineering, 40 (1), 33-37 1 de enero de 2001) en el que dos láseres funcionaron a la misma tasa de sintonización, pero en direcciones opuestas para producir dos señales. Los láseres deben estar separados (en frecuencia, polarización u otra técnica) para que puedan ser detectados independientemente por dos receptores diferentes donde tendremos las siguientes señales:

$$I_1(t, \tau) = A \cdot \cos \left[2\pi \left(\alpha_1\tau t + f_{0,1}\tau - \frac{\alpha_1\tau^2}{2} \right) \right]$$

$$I_2(t, \tau) = A \cdot \cos \left[2\pi \left(\alpha_2\tau t + f_{0,2}\tau - \frac{\alpha_2\tau^2}{2} \right) \right]$$

Multiplicando $I_1(t, \tau)$ y $I_2(t, \tau)$, obtenemos

$$I_1(t, \tau) \cdot I_2(t, \tau) = \frac{1}{2} A_1 \cdot A_2 \cdot \left\{ \cos \left[2\pi \left((\alpha_1 - \alpha_2)\tau t + (f_{0,1} - f_{0,2})\tau \right) \right] + \cos \left[2\pi \left((\alpha_1 + \alpha_2)\tau t + (f_{0,1} + f_{0,2})\tau \right) \right] \right\}$$

Haciendo que los láseres barran sus frecuencias a la misma velocidad, pero en direcciones opuestas (en cuyo caso, $\alpha_1 = -\alpha_2$, y $f_{0,1} \approx f_{0,2}$) la expresión anterior se convierte en

$$I_1(t, \tau) \cdot I_2(t, \tau) = \frac{1}{2} A_1 \cdot A_2 \cdot \left\{ \cos(4\pi\alpha_1\tau t) + \cos(4\pi f_{0,1}\tau) \right\}$$

El primer término es un coseno con una frecuencia proporcional a la distancia a medir, pero que no sufre una gran perturbación cuando τ varía durante una medición. El segundo término es una señal de baja frecuencia y no interfiere con nuestro análisis.

Alternativamente, si $\alpha_1 = -\alpha_2$, y $f_{0,1} \neq f_{0,2}$, expresando el promedio de $f_{0,1}$ y $f_{0,2}$ como f_p , y multiplicando $I_1(t, \tau)$ y $I_2(t, \tau)$, obtenemos

$$I_1(t, \tau) \cdot I_2(t, \tau) = \frac{1}{2} A_1 \cdot A_2 \cdot \left\{ \cos(4\pi\alpha_1\tau t + (f_{0,1} - f_{0,2})\tau) + \cos(4\pi f_p\tau) \right\}$$

De nuevo, el primer término es un coseno con una frecuencia proporcional a la distancia a medir, pero que no sufre una gran perturbación cuando τ varía durante una medición. El segundo término es una señal de baja frecuencia que transmite información sobre el movimiento relativo (ya sea un movimiento mecánico o la variación de la longitud de la trayectoria óptica) entre el sensor y el objetivo.

En las ecuaciones anteriores, t representa el tiempo y se supone que α_1 y α_2 varían linealmente con el tiempo. Si α_1 y/o α_2 no varían linealmente con el tiempo, t , entonces el parámetro t podría reemplazarse con otro parámetro, i , con el que α_1 y α_2 varían linealmente.

5 Este esquema se puede realizar utilizando dos láseres sintonizables separados que se operan de forma sincronizada para sintonizar exactamente a la misma velocidad, pero en direcciones opuestas.

10 Los láseres ajustables requeridos en los sistemas FSI de barrido dual son a menudo el componente más costoso en este tipo de sistema (especialmente si se requiere alta precisión que requiere un amplio rango de sintonización sin salto de modo), y se puede sincronizar sus barridos de frecuencia con suficiente precisión puede ser difícil. La resolución/precisión de distancia que se puede lograr está directamente relacionada con el rango de frecuencia en el que el láser puede sintonizarse sin modo de salto. En general, cuanto mayor sea el rango de sintonización del láser, mayor será el coste.

15 Ha habido intentos de mejorar la precisión de los sistemas FSI de barrido dual que, por ejemplo, incluyen diferentes combinaciones de láseres y métodos de sincronización.

Sin embargo, a pesar de las mejoras, el enfoque sigue siendo muy costoso y complejo de implementar y mantener.

20 FSI utiliza la detección heterodina para generar una señal sinusoidal al golpear el haz de medición con el haz de referencia como se ilustra en la figura 11, que muestra un circulador que se utiliza para tomar una salida de láser sintonizada. Una fracción de la luz que pasa a través del circulador desde el láser se refleja de nuevo desde la cara de extremo de la fibra que forma la señal de referencia. La mayoría de la luz se proyecta en el espacio donde se refleja en uno o más objetivos. La luz reflejada regresa al extremo de la fibra y se acopla nuevamente a la fibra y es dirigida por el circulador junto con el haz de referencia a un fotodetector donde los haces interfieren y producen una señal. Por lo tanto, el haz de referencia desempeña el papel de oscilador local (LO). Generalmente se sabe que la amplitud de la señal es proporcional al producto de las amplitudes de los haces de LO y de medición. Por lo tanto, aumentar el LO o la amplitud del haz de medición da como resultado niveles de señal más altos. Pero, para aplicaciones industriales, el haz de medición debe mantenerse a la vista para evitar lesiones al usuario. Esto limita la cantidad de ganancia de señal que se puede obtener al aumentar la amplitud del haz de medición. Por lo tanto, la ganancia de señal mejorada se puede lograr mejor mediante el control de la amplitud del haz de referencia.

35 Una forma conveniente de generar el haz de LO es mediante una reflexión hacia atrás desde el extremo de una fibra óptica que se utiliza para transmitir la luz láser al punto en la medición. Esto coloca convenientemente el dato de medición en el extremo físico de la fibra (como en la figura 8). Una segunda ventaja de este enfoque es que las perturbaciones en los haces de medición y referencia a medida que se propagan hacia abajo de la fibra debido a las tensiones en la fibra (temperatura, tensión física, etc.) son de modo común y no contribuyen a la señal detectada en el detector.

40 Sin embargo, tomar la señal LO del extremo de la fibra de esta manera limita la cantidad de ganancia de señal que se puede lograr. Una fibra no modificada reflejará aproximadamente el 4% de la luz incidente, dando como resultado una señal LO débil. La reflectancia se puede aumentar recubriendo el extremo de la fibra. Pero al aumentar la reflectancia para aumentar la señal LO, se degrada la señal de medición, ya que se acopla nuevamente a la fibra al regresar de los objetivos. La reflectancia óptima es 33%.

45 Una forma alternativa de derivar la referencia LO es usar un divisor con una relación de división R:T como se ilustra en la figura 12. El divisor envía el R% de la luz al haz LO y el T% al haz de medición. Se usa de nuevo un circulador para dirigir el haz de medición hacia el espacio y devolver el haz de medición a la fibra de retorno. El LO y el haz de medición se combinan mediante un acoplador 50:50 para producir dos señales que pueden detectarse utilizando un detector equilibrado. Esta configuración tiene la ventaja de que la ganancia se puede controlar configurando la relación R:T y la potencia del láser de manera adecuada para obtener la ganancia de señal deseada al tiempo que se mantienen niveles de potencia seguros para el ojo en el haz de medición.

55 El inconveniente de este enfoque es que LO y el haz de medición ya no toman una trayectoria común a través de las fibras ópticas, por lo que cualquier perturbación de las fibras debida a, por ejemplo, el cambio de temperatura u otras tensiones dará como resultado una deriva en las mediciones de distancia. En otras palabras, el dato de medición no está bien definido.

60 Por lo tanto, el desafío es producir un sistema que sea rentable, pueda operar para medir múltiples objetivos simultáneamente (para aplicaciones de metrología de coordenadas), tenga suficiente ganancia óptica para proporcionar señales robustas y proporcione un dato de medición confiable y libre de deriva.

Declaración de la Invención

La presente invención pretende proporcionar un aparato y un método como se establece en las reivindicaciones que abordan los problemas mencionados anteriormente. De acuerdo con un aspecto de la presente invención, se proporciona un aparato como se reivindica en la reivindicación 1.

De acuerdo con otro aspecto de la presente invención, se proporciona un método como se reivindica en la reivindicación 10.

Realizaciones preferidas de la presente invención buscan utilizar un divisor R:T para controlar la relación de división y, por lo tanto, la ganancia óptica.

En una realización, la reflexión del extremo de la fibra se utiliza como referencia para compensar la deriva. En ciertas implementaciones, la ganancia óptica puede estar limitada por la potencia máxima segura para el ojo que se puede emitir desde el extremo de la fibra. Sin embargo, en realizaciones preferidas tales como las ilustradas en las figuras 12, 14, 15, la ganancia óptica puede aumentarse separando los osciladores locales (LO) para las dos frecuencias f_{barrido} y f_{FWM} . Esto permite que se utilicen LO más potentes sin afectar la potencia de salida máxima del extremo de la fibra, manteniendo así la seguridad.

En algunas realizaciones, la longitud de la trayectoria tomada por el LO y las señales de medición en las fibras pueden no coincidir. Esto agregará un desplazamiento a cualquier distancia medida. Este desplazamiento puede medirse analizando la señal obtenida por el reflejo hacia atrás de la luz en el extremo de la fibra.

En algunas realizaciones, la longitud de la trayectoria óptica recorrida en las fibras para las señales f_{barrido} y f_{FWM} será diferente debido a la dispersión por la fibra. Esto dará como resultado que las mediciones realizadas con cada señal tengan un desplazamiento de longitud diferente. Esto puede mitigarse incluyendo una longitud adecuada de fibra compensadora de dispersión en el sistema. Alternativamente, la diferencia en el desplazamiento entre las dos señales podría compensarse alineando las señales f_{barrido} y f_{FWM} en el espacio de frecuencia de manera que el componente de frecuencia obtenida de la reflexión de retorno de los extremos de la fibra coincida como se muestra en la figura 17.

Alternativamente, podría aplicarse alguna otra forma de procesamiento posterior.

El método puede comprender, además:

estimar la frecuencia de la luz muestreada del segundo haz de medición que regresa a lo largo de la fibra óptica; y, determinar la distancia a medir desde el mismo.

El método puede comprender, además:

calcular una transformación rápida de Fourier de la luz muestreada del segundo haz de medición que regresa a lo largo de la fibra óptica; y,

estimar la ubicación de un pico realizando un ajuste para determinar dicha distancia.

Las realizaciones de la presente invención buscan superar el problema de coste asociado con el despliegue de dos láseres sintonizables generando ópticamente una segunda señal óptica a partir de una primera salida de láser sintonizada. En realizaciones preferidas, el problema de la ganancia óptica se resuelve utilizando un divisor con una relación R:T optimizada para controlar la amplitud de la señal LO y superar el problema de la deriva potencial que este cambio introduce al disponer que se genere una señal de dato en el extremo de la fibra de salida. La reflexión desde el extremo de la fibra aparece como el primer pico en el espectro de frecuencias de la señal detectada. Las distancias entre los objetivos se pueden calcular a partir de la diferencia entre la frecuencia de la señal del objetivo y la señal del extremo de la fibra. La deriva en las señales debidas a la tensión en la fibra mueve todas las señales con la misma frecuencia, pero sus frecuencias relativas permanecen constantes como se ilustra en la figura 13.

Además, las realizaciones de la presente invención buscan extender el método de compensación de movimiento para trabajar en presencia de múltiples objetivos. Si el análisis descrito anteriormente se aplica a señales obtenidas de más de un objetivo, es decir, señales que contienen múltiples componentes de frecuencia, el proceso de multiplicación produce múltiples golpes a medida que cada componente de frecuencia en una señal golpea con cada componente en la otra señal dando como resultado múltiples frecuencias no deseadas que potencialmente pueden oscurecer o interferir con señales genuinas.

Realizaciones preferidas superan esto como sigue:

1. Calcular la FFT de ambas señales.

2. Identifique el componente de frecuencia asociado con cada objetivo.

3. Para cada objetivo:

- 5 a. Aislar el componente de señal en cada señal aplicando una ventana en el dominio de la frecuencia.
- b. Convertir las dos señales en el dominio de la frecuencia.
- 10 c. Ubicar de manera gruesa el pico en la magnitud de la señal convolucionada, por ejemplo, al encontrar el punto de datos más alto.
- d. Luego ubicar finamente el pico ajustando un modelo representativo (por ejemplo, Sinc al cuadrado) a los datos alrededor del pico y resolviendo el centro del pico.
- 15 El algoritmo descrito anteriormente podría implementarse de manera diferente, por ejemplo, algunos pasos podrían implementarse en el dominio del tiempo en lugar del dominio de la frecuencia.

Las realizaciones buscan optimizar la interferometría de barrido de frecuencia de láser dual (FSI de barrido dual) en relación con el nivel de la señal y el coste para permitir la detección sin errores Doppler de múltiples objetivos simultáneamente. Las realizaciones buscan mejorar la integridad de la señal con respecto a los errores inducidos por el movimiento (desplazamiento Doppler) y aumentar el rango de operación al mejorar la SNR. Las realizaciones pueden ser particularmente ventajosas cuando se usan en combinación con sistemas tales como los establecidos en el documento WO2013/144648.

25 En realizaciones de la presente invención, la operación de FSI de barrido dual se hace posible usando un láser de barrido de una sola frecuencia. Se utiliza una disposición óptica que genera una segunda frecuencia óptica de barrido por un fenómeno conocido como mezcla de cuatro ondas (FWM). La frecuencia óptica de barrido generada por FWM se usa en lugar de la salida de una segunda fuente de láser de barrido de frecuencia, que ya no es necesaria. Esto se traduce en varias ventajas. El sistema es mucho más barato que un sistema FSI de barrido dual convencional. También se evitan los problemas de sincronización experimentados cuando se utilizan dos fuentes de láser de barrido de frecuencia. Las ventajas adicionales incluyen varias simplificaciones en la obtención de mediciones en comparación con un sistema con dos láseres de barrido de frecuencia.

35 En realizaciones de la presente invención, puede usarse un único láser sintonizable para proporcionar un barrido de frecuencia, y el efecto no lineal de FWM se usa para generar un segundo barrido. Debido a la naturaleza del proceso de generación de FWM, el segundo barrido siempre será una copia reflejada exacta del barrido original en diferentes frecuencias. El coste de esta implementación es considerablemente más bajo que un sistema de láser dual sincronizado. Esta implementación tiene la ventaja práctica de que no se requiere sincronización adicional y esto lleva a una implementación simplificada y una mayor confiabilidad.

40 Nota para evitar la confusión: este documento hace numerosas referencias a "frecuencias ópticas". Este término se refiere a la frecuencia de la onda electromagnética, $f = c/\lambda$, donde c es la velocidad de la luz, y λ es la longitud de onda de la onda electromagnética. No se refiere a ningún tipo de modulación de una onda. Puede proporcionar luz de dos frecuencias ópticas, siendo f_1 una frecuencia variable y f_2 , que es una frecuencia fija o variable.

45 En realizaciones de la presente invención, una disposición óptica recibe luz (f_1) de una fuente de láser de barrido de frecuencia y una fuente (f_2) de láser de bomba que se dirige a través de un medio óptico no lineal de manera que dos frecuencias ($f_3 = 2f_1 - f_2$, y $f_4 = 2f_2 - f_1$) ópticas adicionales son generadas por mezcla de cuatro ondas.

50 La utilización de f_1 y f_3 o f_4 en un sistema de medición permite realizar una interferometría de escaneado de frecuencia de barrido dual.

55 En una realización preferida, la luz de la fuente de láser de barrido de frecuencia se divide entre al menos dos trayectorias, una se usa en el proceso de mezcla de cuatro ondas para generar una copia espejo y la otra se conserva como una de las dos fuentes para uso en interferometría de barrido de frecuencia de láser dual.

60 En una realización preferida, un sistema de medición recibe luz de la salida o salidas de la disposición óptica en un detector o detectores de luz. Las señales recibidas por las dos frecuencias de láser que se enviaron al sistema se aíslan y se tratan de forma independiente.

65 En una realización preferida, un sistema de análisis combina las señales recibidas para calcular la diferencia en la longitud de la trayectoria entre al menos un par de las trayectorias ópticas en el sistema de medición de una manera que es tolerante a una longitud o longitudes de la trayectoria óptica cambiante.

Ventajosamente, las realizaciones de la presente invención permiten la creación de una copia de espejo de las frecuencias suministradas, lo que es extremadamente complicado de lograr utilizando dos fuentes independientes, ya

que cualquier pequeña diferencia en la especificación de cada fuente óptica independiente da como resultado una copia no perfecta.

5 Ventajosamente, el aislamiento y el tratamiento de las frecuencias láser de detección se simplifican debido a que las frecuencias suministradas son una copia reflejada. Los relojes y los datos obtenidos de una de las señales serán inherentemente válidos para la otra.

10 El uso de FWM aplicado a un láser de barrido de frecuencia permite generar una copia reflejada sincronizada del barrido original. Las realizaciones de la presente invención permiten la creación de una segunda señal de barrido eficaz que es una copia sustancialmente perfecta de la original (hasta cualquier defecto pequeño o imperfección). Ventajosamente, esto se puede realizar a la velocidad del FWM (menos de picosegundos). Se entiende que la creación de una copia espejo de esta precisión no se puede lograr utilizando dos fuentes de barrido individuales. También se entiende que la operación de dos fuentes de barrido individuales no se puede operar a tal velocidad. Se cree que incluso los dispositivos y técnicas de compensación más sofisticados no pueden coincidir con la exactitud de la copia generada a través del dispositivo FWM. Como resultado, se espera que la calidad y la precisión de las mediciones que utilizan las señales generadas mejoren con respecto a los sistemas existentes de fuente de barrido dual. Además, se espera que el ruido en los resultados de la medición se reduzca sobre otros sistemas.

20 Ventajosamente, como consecuencia de la creación de una copia reflejada de las frecuencias suministradas, los componentes y dispositivos utilizados en las realizaciones de la presente invención para la medición y detección pueden simplificarse enormemente ya que la misma configuración utilizada para la linealización y la generación de reloj en un solo esquema de barrido será válido para las realizaciones de la presente invención que utilicen un segundo barrido FWM debido a la naturaleza exacta de la copia espejo. Con otros barridos duales que no proporcionan una copia duplicada, el número de elementos requeridos, así como su complejidad, serán mucho más altos (por lo general, el número doble de receptores que trabajan a doble frecuencia).

30 Las realizaciones de la presente invención son rentables debido, al menos en parte, a la sustitución de fuentes completas de frecuencia variable óptica (y al equipo requerido para sincronizar adecuadamente las señales) con fuentes fijas, elementos pasivos y un dispositivo no lineal. Las realizaciones de la presente invención presentan ahorros sustanciales de costes cuando se comparan con dos alternativas de fuente de barrido independiente. No solo por la complejidad de la reducción en la detección y la sincronización, sino también porque la fuente láser de barrido es el componente más caro del sistema por un amplio margen. Se espera que los componentes necesarios para construir el sistema de generación FWM cuesten al menos cuatro veces menos que el coste de un láser de barrido de frecuencia (teniendo en cuenta solo el coste de compra). Esta estimación se basa en el uso de elementos estándar, discretos y de mesa. Si los dispositivos utilizados en la generación FWM se integran en forma de módulo y se producen en grandes cantidades, se espera que la diferencia de coste sea aún mayor.

40 Ya que no hay necesidad de sincronizar (más que agregar algo de fibra de retardo a la fuente de señal barrido original para permitir que la señal generada por FWM se presente en la salida al mismo tiempo que la señal de barrido original) y no es necesario realizar una compensación dual para la linealidad. Esto hace que el proceso de detección sea más simple y también reduce los costes del dispositivo.

45 Como la fuente láser de barrido original y la copia espejo generada se rastrean mutuamente, este seguimiento exacto hace que las actividades como el muestreo o el nuevo muestreo sean mucho más simples y rápidas.

50 Las realizaciones de la presente invención también son escalables y flexibles. Debido a la naturaleza del FWM, la disposición óptica puede operar utilizando diferentes fuentes de láser de barrido de frecuencia, ya que el FWM funcionará para cualquier velocidad de barrido de las señales originales. En contraste, una solución de fuente de barrido dual requerirá un cambio en los elementos utilizados en la sincronización de las fuentes.

Breve descripción de los dibujos

55 Las realizaciones de la presente invención se describirán ahora a modo de ejemplo solamente con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

La figura 1 es un diagrama de un sistema de interferometría de escaneo de frecuencia.

60 La figura 2 es un gráfico que representa las frecuencias reflejadas en función del tiempo de llegada a un receptor del sistema de la figura 1;

La figura 3 es un diagrama esquemático de un sistema de generación de barrido que incluye una disposición óptica de acuerdo con una realización de la presente invención;

65 La figura 4 es un diagrama de frecuencias producidas por la disposición óptica de la figura 3;

La figura 5 es un gráfico que representa la frecuencia óptica de un láser de barrido contra el tiempo;

Las figuras 6-9 son diagramas esquemáticos que ilustran aspectos de un sistema de medición de acuerdo con una realización de la presente invención;

5 La figura 10 es una serie de gráficos que representan resultados experimentales de la distancia medida a un objetivo reflectante en movimiento sobre una serie de 100 mediciones;

La figura 11 muestra cómo se puede formar un interferómetro usando el extremo de una fibra como un divisor de haz con un circulador utilizado para dividir los haces de entrada y salida;

10 La figura 12 muestra cómo se puede modificar la configuración básica de la figura 11 con la inclusión de un divisor con relación de división R:T para permitir el control sobre la ganancia óptica. Esta configuración también facilita la detección equilibrada para una SNR mejorada;

15 La figura 13 muestra cómo la señal de referencia recibida desde el extremo de la fibra proporciona una referencia de medición estable en caso de deriva en las trayectorias ópticas a través de las fibras de la configuración que se muestra en la figura 12;

20 La figura 14 muestra cómo el barrido original y el barrido FWM generado pueden combinarse ópticamente y desacoplarse para producir señales desde uno o más objetivos con una reflexión de referencia desde el extremo de la fibra de salida;

La figura 15 muestra otra versión del esquema que se muestra en la figura 14, en la que se incluye un amplificador EDFA en la trayectoria LO para aumentar la señal LO;

25 La figura 16 muestra cómo se pueden alimentar múltiples sensores desde las mismas señales de fuente de láser; y,

La figura 17 muestra cómo se puede compensar la dispersión en la fibra mediante el desplazamiento de frecuencia de una señal, derivada de, por ejemplo, f_{barrido} , con respecto a la otra señal derivada de f_{FWM} .

30 Descripción detallada

La figura 3 es un diagrama esquemático del sistema 100 de generación de barrido que incluye una disposición óptica de acuerdo con una realización de la presente invención.

35 El sistema 100 de generación de barrido incluye una disposición 110 óptica que tiene una primera entrada 120, una segunda entrada 130, un artefacto 140 óptico no lineal y una salida 150.

40 La primera entrada 120 está dispuesta para recibir un primer haz 101 de un láser 180 de barrido de frecuencia. La segunda entrada 130 está dispuesta para recibir un segundo haz 102 de una fuente 190 de láser de bomba de frecuencia fija. La separación de frecuencia óptica de los haces primero 101 y el segundo 102 satisfacen la condición de longitud de coherencia del artefacto 140 óptico no lineal.

45 El artefacto 140 óptico no lineal está dispuesto para recibir, y para intermodularse mediante la mezcla de cuatro ondas, los haces primero 101 y segundo 102 para generar un tercer haz 103, siendo el tercer haz 103 una copia invertida del primer haz 101 reflejado con relación a la frecuencia fija de la fuente 190 de láser de bomba.

Los haces primero 101, segundo 102 y tercero 103 se emiten desde el artefacto 140 óptico no lineal.

50 Preferiblemente, los haces 101, 102 primero y segundo se eliminan en un filtro 160 antes de que el tercer haz salga por la salida 150 de la disposición óptica.

55 Preferiblemente, el primer haz 101 se divide en un divisor 170 antes de ingresar al artefacto 140 óptico no lineal, de manera que se retiene una copia del primer haz 101' y se puede combinar en la salida 150 con el tercer haz 103. Preferiblemente, la copia del primer haz se divide por segunda vez, de modo que la segunda copia 101" puede salir, así como la combinación de la copia del primer haz 101' y el tercer haz 103.

60 Proporcionar los haces primero y tercero combinados y también el primer haz permite utilizar técnicas de medición como se describe a continuación. Sin embargo, se apreciará que la combinación de los haces primero y tercero podría realizarse más adelante y no es necesario que forme parte de la disposición óptica que puede simplemente emitir un primer haz y un tercer haz, siendo el tercero una copia invertida del primero.

65 Los ejemplos de posibles artefactos no lineales que pueden usarse incluyen amplificadores ópticos semiconductores (SOA), fibras no lineales y guías de onda no lineales. Un ejemplo de SOA que se puede usar es el SOA no lineal de 1550 nm de Kamelian (http://www.kamelian.com/data/nlsoa_ds.pdf). Ejemplos de fibras no lineales que se pueden usar son los módulos de fibra altamente no lineal OFS de OFS Fitel, LLC (<http://ofscatalog.specialtyphotonics.com/viewitems/non-standard-optical-fibers/highly> módulos de fibra no lineal).

Las realizaciones de la presente invención utilizan propiedades del artefacto 140 óptico no lineal para inducir lo que se conoce como Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) entre el láser 180 de barrido de frecuencia y la fuente 190 de láser de bomba de frecuencia fija. El FWM es un fenómeno óptico por el que dos frecuencias ópticas pasan a través de un medio no lineal y se generan frecuencias adicionales.

5 Se apreciará que la fuente 190 de láser de bomba de frecuencia fija no necesita ser un láser de frecuencia fija - podría ser, por ejemplo, un láser de frecuencia variable que se opera a una frecuencia fija.

10 FWM es un fenómeno de intermodulación en la óptica no lineal donde la interacción entre tres longitudes de onda ópticas diferentes en un medio no lineal produce otras longitudes de onda. Dadas las frecuencias f_1 , f_2 y f_3 ópticas, el efecto crea picos adicionales en las frecuencias que son la combinación (suma y resta) de estos tres, con los picos principales que aparecen en $f_{ijk} = f_i + f_j - f_k$ (donde $i, j \neq k$).

15 Una variación específica de este efecto llamada mezcla degenerada de cuatro ondas (DFWM) se usa preferiblemente en realizaciones de la presente invención. En este caso específico, el efecto tiene lugar cuando solo hay dos frecuencias presentes ($i = j = 1, k = 2$), en este caso los picos principales están en $2f_1 - f_2$ and $2f_2 - f_1$. Estos picos a menudo se consideran perjudiciales en los sistemas ópticos, aunque ciertos dispositivos no lineales disponibles en el mercado explotan y amplifican este efecto, como los que se resaltaron anteriormente.

20 Mientras que el FWM degenerado se usa en realizaciones preferidas de la presente invención, el FWM que se induce cuando hay tres o más frecuencias presentes también se puede usar. En tal disposición, se requerirían una (o más) fuentes de láser adicionales.

25 En realizaciones de la presente invención, este efecto de conversión se utiliza sin modulación para generar una copia del haz láser de barrido original utilizando otra fuente de láser de frecuencia fija (y económica) como una bomba. La figura 4 muestra la distribución de los picos, que originalmente tenían una bomba de láser fija a una frecuencia central (f_{fijo}) y una fuente de láser de barrido ($f_{barrido}$) que cambia la frecuencia continuamente a una velocidad deseada desde " $f_{barrido\ inicio}$ " hasta " $f_{barrido\ parada}$ ".

30 Ambas señales se alimentan a un artefacto 140 óptico no lineal que emite las señales originales, y un componente de frecuencia en $f_{FWM} = 2f_{fijo} - f_{barrido}$. También hay un tercer pico móvil en $2f_{barrido} - f_{fijo}$ aunque esto puede eliminarse con un filtro óptico para dejar solo el componente como se presenta en la figura 4, que será una copia invertida exacta de la fuente de barrido original reflejada en relación con la frecuencia fija. Este segundo barrido imitará exactamente los cambios en la tasa de cambio de frecuencia del láser de barrido de frecuencia original. Al ser una copia exacta, ventajosamente no hay necesidad de sincronización adicional.

35 Para lograr una generación efectiva de la copia de barrido, hay algunas características en la disposición 110 óptica que pueden incluirse para favorecer la presencia de FWM. El efecto FWM es un fenómeno no lineal asociado con el efecto Kerr, lo que significa que las nuevas frecuencias generadas aparecen como consecuencia de la modulación del índice de refracción inducida por las especificaciones de las señales de luz de entrada (sus frecuencias, potencias y otras). El FWM está relacionado con el coeficiente $\chi^{(3)}$ del material y, por lo tanto, cualquier componente (fibra, semiconductor, guía de onda, etc.) que se utilice para generar la no linealidad debe tener preferiblemente un valor alto para esta especificación.

45 Los ejemplos de usos de las cuatro fallas de onda incluyen el documento US2010085992 en el que un sistema optoelectrónico usa láseres de semiconductores accionados por bucles ópticos bloqueados en fase que controlan la fase y frecuencia óptica del láser. El control de retroalimentación proporciona un medio para el control de banda ancha de la frecuencia óptica y la fase, aumentada por cuatro etapas de mezcla de ondas y formas de onda óptica independientes cosidas digitalmente para una mejor capacidad de ajuste. Otro ejemplo es el documento EP 0981189 que describe un método y un aparato que utiliza una mezcla de cuatro ondas para la conversión de longitud de onda óptica.

50 El artefacto no lineal se selecciona o configura (es decir, tiene propiedades o está sintonizado o de otra manera dispuesto o configurado) de modo que la separación de frecuencia óptica de los haces primero y segundo satisface la condición de longitud de coherencia del artefacto no lineal. Preferiblemente, para la bomba y las fuentes de láser de barrido de frecuencia, la separación de frecuencia óptica de las entradas debe estar por debajo del umbral de longitud de coherencia del artefacto no lineal que se requiere para mantener las entradas en el mismo número de onda para los valores de dispersión de índice de grupo de cada dispositivo.

60 Para generar un efecto FWM significativo en el medio no lineal, es necesario que ambas señales de entrada coincidan sustancialmente en número de onda. Para un espacio de frecuencia óptica dado entre las entradas, hay una longitud máxima del dispositivo (llamada longitud de coherencia) por encima de la cual se reduce considerablemente la eficiencia de la conversión. Esta condición de longitud de coherencia depende del artefacto no lineal. Basado en las características del artefacto no lineal usado, esto impondrá una limitación en la separación de frecuencia de las entradas y, por lo tanto, en el rango de conversión para el FWM. Viceversa, la separación de frecuencia de las entradas

puede seleccionarse, ajustarse o configurarse de otra manera para tener en cuenta la condición de longitud de coherencia de un artefacto a usar.

Las discusiones sobre las condiciones de la longitud de coherencia y la separación de frecuencia óptica se pueden encontrar en O. Aso, M. Tadakuma, S. Namiki, "Four-Wave Mixing in Optical Fibers and Its Applications", revisión de Furukawa, No 19, 2000 63-68, "Broadband four-wave mixing generation in short optical fibres" Electronics Letters, 36 (8), 709-711; Diez, S., Schmidt, C., Ludwig, R., Weber, HG, Obermann, K., Kindt, S., Koltchanov, I., Petermann, K., "Four-wave mixing in semiconductor optical amplifiers for frequency conversion and fast optical switching" Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal de, vol.3, no.5, pp.1131,1145, Oct 1997.

Se apreciará que las condiciones de longitud de coherencia podrían satisfacerse mediante la selección/configuración/ajuste adecuados del artefacto y/o de una o ambas fuentes de láser.

Las condiciones de longitud de coherencia identifican un rango de longitud de onda donde es posible generar una copia de la señal. En algunas realizaciones, por ejemplo, cuando se usan componentes largos (dispositivos semiconductores ultra largos o fibras de km), pueden requerirse modificaciones adicionales para garantizar una operación de separación de frecuencia amplia. Algo similar ocurre con la polarización, FWM no es un efecto dependiente de la polarización, ya que tendrá lugar para cualquier polarización arbitraria de las entradas. Sin embargo, la polarización de todas las entradas debe estar en el mismo estado para producir el efecto de manera más eficiente (una diferencia en los estados de polarización de las entradas causará una penalización de la potencia óptica en la salida convertida). Volver a ajustar la polarización para un dispositivo corto es fácil (por ejemplo, mediante el uso de un controlador de polarización en la entrada de una de las señales para que coincida con ambos estados), pero en fibras largas donde la dependencia de la longitud de onda por birrefringencia puede hacer que la polarización de las entradas difiera después de una cierta distancia recorrida a través de la fibra.

El amplificador óptico semiconductor (SOA) tiene cuatro frecuencias ópticas de salida. Cuando se barre la frecuencia óptica del láser de barrido, estas frecuencias varían en el tiempo, como se muestra en la figura 5. Se desea obtener una salida que consiste solo en f_{barrido} y f_{FWM} . Un método para hacer esto es enviar la salida de SOA a través de un filtro óptico que rechaza todas las frecuencias ópticas de f_{fijo} y más altas, que aísla solo f_{FWM} . Esto puede ser combinado con f_{barrido} . Otras implementaciones pueden ser posibles utilizando diferentes combinaciones de filtros ópticos, combinadores, etc. para lograr el mismo efecto. Por ejemplo, tomando la salida de SOA y usando un filtro que rechaza f_{fijo} y f_{dbl} ($f_{\text{dbl}} = (2 * f_{\text{barrido}}) - f_{\text{fijo}}$). Sin embargo, esto no sería ideal, ya que los rangos de frecuencia de f_{dbl} y f_{barrido} se superponen. Esto podría evitarse con una elección diferente de rango de barrido para f_{barrido} , pero restringe el rango de barrido, lo que reduce la precisión de la medición.

La figura 6 es un diagrama esquemático de un sistema de medición de acuerdo con una realización de la presente invención. El sistema de medición se divide en tres etapas, aunque se apreciará que se podrían usar más o menos etapas.

Una primera parte (sistema 100 de generación de barrido) genera luz que contiene frecuencias ópticas de barrido como se describió anteriormente. Esta luz se proporciona a la segunda parte (sistema 200 de medición) que envía esta luz a través de un sistema óptico que se medirá y detectará la salida de este sistema óptico. El sistema 300 de medición proporciona datos a la parte final (sistema 300 de análisis de datos) que procesa estos datos y calcula el resultado final de la medición: una medición de distancia.

La figura 7 es un diagrama esquemático de una realización de la fuente 100 de interferometría de la figura 6.

La luz del láser 180 de barrido se divide por un acoplador óptico, una parte 101 de la señal se usa para alimentar la conversión FWM y la otra parte 101' se conserva para el usuario posterior. El láser 190 fijo funciona en la longitud de onda central. La salida del láser fijo 190 se controla preferiblemente en polarización con un controlador 195 de paleta y alimenta la bomba.

Ambas señales (fija y de barrido) que entran en el medio no lineal preferiblemente tienen sustancialmente el mismo estado de polarización. De esta manera, el efecto FWM se maximiza. Ambas entradas están acopladas en el artefacto 140 no lineal, en este caso un amplificador óptico semiconductor (SOA) seleccionado o diseñado específicamente para mejorar los efectos no lineales: alto $\chi^{(3)}$ y su longitud es inferior a la longitud de coherencia para la máxima separación de frecuencia de las entradas. La ganancia en el artefacto no lineal reduce la necesidad de entradas potenciadas. En la salida SOA, se proporcionan las señales originales y el nuevo pico generado. Se aplica un filtro 160 óptico, por lo que solo queda el segundo pico de barrido invertido. Tanto la señal de barrido como las entradas fijas se descartan, por lo que solo se puede encontrar el FWM convertido en la salida. Finalmente, se utiliza un amplificador 165 EDFA para elevar el nivel de la señal de salida a valores similares del primer barrido. Este esquema genera las dos señales de barrido invertidas deseadas requeridas para una aplicación FSI dual.

Aunque esta configuración utiliza componentes adecuados para el funcionamiento en la banda C de telecomunicaciones (en longitudes de onda de 1530 nm a 1560 nm), se puede traducir a otras frecuencias ópticas utilizando un dispositivo no lineal con sus características adecuadas para el nuevo rango de longitud de onda, ya que

los efectos de FWM están presentes en muchas bandas ópticas donde podemos encontrar un material con las especificaciones deseadas (alto $\chi^{(3)}$, condición de longitud de coherencia satisfecha, coincidencia de polarización) (consulte 'Aumento de la resolución de coordenadas' a continuación). Por lo tanto, un diseño similar que cambia los componentes específicos de la banda C podría usarse para aplicaciones de interferometría que operan en otros rangos de longitud de onda. Se apreciará que esto abrirá las posibilidades de emplear la generación de barrido dual para mejorar otras aplicaciones fuera del rango de estimación, como la tomografía de coherencia óptica (OCT) o la evaluación de la superficie.

El sistema 100 de generación de barrido ilustrado proporciona dos salidas de luz a través de fibra óptica al sistema 200 de medición; una fibra contiene solo f_{barrido} , la otra contiene tanto f_{barrido} como f_{FWM} .

La figura 8 es un diagrama esquemático de una realización del sistema 200 de medición de la figura 6. El sistema 100 de generación de barrido proporciona luz que contiene f_{barrido} y f_{FWM} a través de una fibra óptica (que se muestra en la parte superior izquierda del diagrama). Esta fibra óptica guía la luz, a través de un circulador 210 de fibra óptica, hacia un interferómetro 220. La distancia a medir es la diferencia de la trayectoria óptica de este interferómetro 220, que estará dispuesta para corresponder a cierta longitud física que debe medirse. En este ejemplo, el interferómetro 220 está formado por dos trayectorias 221, 222 ópticas. La luz que llega al extremo 223 de fibra pulida plana experimenta una reflexión de aproximadamente el 4%, y la luz reflejada regresa a la misma fibra. El resto de la luz viaja hacia el espacio libre, donde parte se refleja nuevamente en la fibra mediante un retrorreflector 230 (en este ejemplo, una esfera de vidrio con un índice de refracción de 2 actúa como un retrorreflector).

La potencia óptica que resulta de la interferencia de estas dos trayectorias se desplaza hacia abajo a través de la fibra, y es dirigida por el circulador 210 de fibra óptica a un filtro 240 rojo/azul. Esto separa f_{barrido} y f_{FWM} en fibras separadas, cada una de las cuales guía su luz hacia un fotodiodo 250. Las señales del fotodiodo son grabadas por un ADC 295.

En la mitad inferior del diagrama, una fibra 260 óptica que contiene luz de frecuencia f_{barrido} guía esta luz a través de un interferómetro 270 de fibra Mach-Zehnder en un par de fotodiodos 280 equilibrados cuya diferencia de salida se envía a través de un comparador 290 de cero que genera una señal de disparo que se envía al ADC 295. El ADC registra muestras en momentos controlados por esta señal de disparo. Esto garantiza que los datos se muestreen a intervalos iguales de f_{barrido} (y, por lo tanto, también a intervalos iguales de f_{FWM} , ya que uno varía según la inversa del otro), incluso si la tasa de cambio de f_{barrido} varía (como suele ocurrir).

Para realizar una medición, el láser de barrido de frecuencia barre su frecuencia de salida, f_{barrido} , a través de un rango, mientras que el ADC registra los datos en los tiempos de muestreo controlados por el interferómetro Mach-Zehnder.

La figura 9 es un diagrama esquemático del sistema de análisis de datos de la figura 6. Las señales de interferencia de f_{barrido} y f_{FWM} se pasan preferiblemente a través de un filtro 310 de paso de banda y se multiplican. Se ha demostrado que esto elimina las perturbaciones en la señal causadas por el movimiento del objetivo durante la medición. La señal resultante contiene una señal sinusoidal que tiene una frecuencia que es proporcional a la distancia a medir. Se puede usar cualquiera de los muchos algoritmos de estimación de frecuencia existentes para medir esta frecuencia y, por lo tanto, la distancia a medir. Por ejemplo, la Transformación Rápida de Fourier (FFT) 320 de la señal puede calcularse, y la ubicación de un pico correspondiente a la señal sinusoidal de interés puede estimarse mediante un ajuste polinómico u otra técnica de ajuste.

Se pueden usar otros métodos de análisis de datos, por ejemplo, el método 'FSI dinámico' descrito en GB1013896.4.

La figura 14 muestra otra realización del sistema 200 de medición de la figura 6. La salida láser sintonizada original, el f_{barrido} y la señal reflejada producida por FWM, f_{FWM} , se combinan ópticamente y se usan para medir la distancia a uno o más objetivos en el campo de visión. La luz de los barridos originales y generados por FWM es amplificada opcionalmente por EDFA. Las salidas de EDFA se combinan y se dividen utilizando un combinador/divisor con una relación de división de R:T. Las porciones R forman los osciladores locales que luego se usaron para generar señales separadas en dos conjuntos de detectores equilibrados. Las porciones en T se pasan a un circulador. La salida del circulador está acoplada a una fibra óptica que transmite la mayor parte de la luz combinada, f_{barrido} original y FWM, f_{FWM} , hacia los objetivos. Una pequeña fracción de ambas señales es reflejada por el extremo de la fibra para proporcionar una señal de referencia contra la cual se deben medir las distancias objetivo. La luz transmitida es reflejada por los objetivos y devuelta a la fibra.

El circulador emite la luz reflejada (barrido original y barrido generado por FWM) desde los objetivos y el extremo de la fibra hacia el combinador que combina estas señales con las señales de LO derivadas anteriormente. Un par de filtros luego divide la señal de barrido original y las señales generadas por FWM y sus respectivas LO. Estas señales ópticas se mezclan de forma independiente con sus respectivas LO y se detectan en un par de detectores equilibrados. Esta configuración garantiza que los dos haces de medición sigan la misma trayectoria y que los dos haces LO sigan una trayectoria común (separada) hasta el combinador final, de modo que los retrasos inducidos por la fibra en cada trayectoria sean comunes a las señales derivadas del original y de las señales generadas por FWM. Después del filtro, cada señal y su LO siguen una trayectoria común, por lo que los cambios inducidos por la fibra son comunes y, por lo tanto, no inducen error de medición de distancia.

5 La figura 13 muestra un ejemplo del espectro de frecuencia que se obtendría de uno de los detectores. El pico de la mano izquierda corresponde a la reflexión desde el extremo de la fibra. Su frecuencia absoluta corresponde a la diferencia de longitud de la trayectoria óptica entre la luz reflejada desde el extremo de la fibra y la trayectoria recorrida por el haz de LO. El segundo pico corresponde al objetivo. Su frecuencia corresponde a la diferencia de longitud de la trayectoria óptica entre la luz reflejada desde el objetivo y la trayectoria recorrida por el haz de LO. Dado que la trayectoria recorrida por el haz LO es común a ambas señales, los cambios en la longitud de la trayectoria óptica del haz LO representan un cambio de frecuencia de ambas señales, pero no cambian su diferencia de frecuencia.

10 La figura 15 muestra una realización alternativa del sistema 200 de medición de la figura 6 en la que las señales de entrada, f_{barrido} y f_{FWM} pueden nuevamente amplificarse opcionalmente antes de la combinación y los haces LO se amplifican aún más mediante un EDFA adicional para aumentar aún más la ganancia óptica del sistema.

15 La figura 16 ilustra cómo el primer combinador/divisor en las figuras 14 y 15 se puede reconfigurar para suministrar múltiples sensores. Después de la amplificación opcional por EDFA, f_{barrido} y f_{FWM} se combinan/dividen usando un combinador/divisor 2:N. Cada salida del combinador/divisor se alimenta luego a un sensor separado que incluye un divisor R:T, un circulador, un combinador 50:50, dos filtros y pares de detectores equilibrados. Opcionalmente, se puede incluir un EDFA en la trayectoria LO.

20 La figura 17 muestra cómo las compensaciones diferenciales entre las señales obtenidas para los dos barridos pueden compensarse cambiando la frecuencia de una señal con respecto a la otra, de manera que las señales derivadas del extremo de la fibra estén alineadas en la frecuencia.

25 Son posibles realizaciones adicionales en las que se utilizan configuraciones ópticas alternativas. Además, algunos, o todos los combinadores, divisores, filtros, circuladores y fibras mostrados en las figuras podrían implementarse utilizando circuitos de guía de onda más planos en lugar de dispositivos de fibra óptica.

Resultados experimentales

30 Se ha construido una configuración correspondiente a la anterior, el barrido FWM generado y el barrido original se probaron al mismo tiempo en un experimento de medición de distancia real con el barrido generado por FWM como una copia reflejada perfecta del original.

35 El comportamiento de ambos barridos contra el mismo objetivo en movimiento presenta un desplazamiento de la frecuencia de golpe en direcciones opuestas para cada barrido, como debería ser cuando se usan tasas de barrido de signos opuestos, lo que demuestra que los barridos pueden usarse para cancelar las vibraciones de los objetivos. Además, el procesamiento de los datos medidos ha demostrado la eliminación de la ampliación de la señal que se produce con las vibraciones.

40 La figura 10a muestra tres gráficos diferentes de la distancia medida a un objetivo reflectante en movimiento en una serie de 100 mediciones tomadas en rápida sucesión. Las tres líneas corresponden a la distancia calculada utilizando tres métodos de análisis diferentes. Las líneas más bajas y más altas muestran la distancia calculada utilizando un método de análisis FSI de un solo láser. La línea inferior muestra la distancia calculada utilizando solo los datos del láser sintonizable. La línea superior muestra la distancia calculada utilizando solo los datos de la luz generada por FWM. La línea central muestra la distancia calculada utilizando el método de análisis FSI de barrido dual que se describe en la sección FSI de barrido dual.

45 Durante las 100 mediciones, el objetivo se movió de una posición estática a otra, y mientras se mueve, las ventajas del barrido dual frente al barrido simple se pueden ver claramente. Cuando el objetivo comienza a moverse, tanto la copia original como la copia de FWM comienzan a hacer las mediciones incorrectas (y por un factor significativo, en el orden de decenas de mm), mientras que el análisis de medición combinado proporciona una estimación precisa de la distancia al objetivo mientras está en movimiento. Las vibraciones del objetivo en movimiento también se pueden ver en los resultados de barrido único: las líneas negras y rojas presentan ondulaciones y son considerablemente menos suaves que la línea verde del análisis de barrido dual.

55 La figura 10b muestra resultados similares a los de la figura 10a, pero con tres objetivos que se mueven a tres velocidades diferentes.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de medición de distancia que comprende una disposición (110) óptica y un sistema de interferometría de escaneo de frecuencia de barrido dual, la disposición (110) óptica que incluye:
- 5 un láser (180) de barrido de frecuencia;
- una fuente (190) de láser de bomba de frecuencia fija;
- 10 una primera entrada (120) para recibir un primer haz (101) del láser (180) de barrido de frecuencia;
- una segunda entrada (130) para recibir un segundo haz (102) de la fuente (190) de láser de bomba de frecuencia fija;
- 15 un artefacto (140) óptico no lineal para recibir, y para intermodular, los haces primero (101) y segundo (102) para generar un tercer haz (103), el tercer haz (103) es una copia invertida del primer haz (101) reflejada en relación con la frecuencia fija de la fuente (190) del láser de la bomba;
- un filtro (160) para extraer el tercer haz (103) de la salida del artefacto (140) óptico no lineal; y,
- 20 un elemento de combinación para combinar y emitir el primer haz (101) y el tercer haz (103) filtrado al sistema (200, 300) de interferometría de escaneo de frecuencia,
- en donde el artefacto (140) no lineal se selecciona o configura de tal manera que la separación de frecuencia óptica de los haces primero (101) y segundo (102) satisface la condición de longitud de coherencia del artefacto (140) no lineal e induce la mezcla de cuatro ondas en el artefacto óptico no lineal para generar el tercer haz (103) cuando los haces primero (101) y segundo (102) son intermodulados, el sistema (200, 300) de interferometría de escaneo de frecuencia de barrido dual incluye un interferómetro (220) y es dispuesto para dirigir los haces primero y tercero combinados a través del interferómetro (220) para iluminar un punto objetivo, para recibir una señal reflejada, y para determinar la distancia al punto objetivo desde allí.
- 25
- 30 2. El sistema de medición de distancia de la reivindicación 1, que incluye además un primer acoplador (170) para recibir el primer haz (101), para dividir el haz en una primera y segunda porción (101, 101') y proporcionar la primera porción (101) al artefacto (140) óptico no lineal y la segunda porción (101') al sistema (200, 300) de interferometría de escaneo de frecuencia.
- 35 3. El sistema de medición de distancia de la reivindicación 1 o 2, en el que el artefacto (140) óptico no lineal comprende un amplificador óptico de semiconductor.
- 40 4. El sistema de medición de distancia de cualquier reivindicación precedente, que comprende además un amplificador (165) óptico entre el filtro (160) y el elemento de combinación, estando configurado el amplificador (165) óptico para elevar el nivel del tercer haz (103) a sustancialmente el del primer haz (101).
- 45 5. El sistema de medición de distancia de cualquier reivindicación precedente, la fuente (180) de láser de barrido de frecuencia está acoplada a la primera entrada (120) y la fuente (190) de láser de bomba está acoplada a la segunda entrada (130).
- 50 6. El sistema de medición de distancia de la reivindicación 2 o cualquiera de las reivindicaciones 3 a 5 cuando depende de la reivindicación 2, en el que el sistema de interferometría de escaneo de frecuencia está configurado directamente en la segunda porción (101') del primer haz de la fuente (180) de láser de barrido de frecuencia recibido del acoplador (170) en un interferómetro (270) adicional y para derivar una señal de muestreo del mismo correspondiente a intervalos iguales del primer haz de medición, estando dispuesto el sistema de interferometría de escaneo de frecuencia para muestrear la señal reflejada a una frecuencia controlada por la señal de muestreo para medir la frecuencia de la señal reflejada.
- 55 7. El sistema de medición de distancia de la reivindicación 6, en el que el sistema de interferometría de escaneo de frecuencia está dispuesto además para pasar señales de interferencia desde el primer y el tercer haz desde el interferómetro (220) a través de un filtro (310) de paso de banda y multiplicarlas juntas para eliminar las perturbaciones y obtener una señal a partir de la cual se mide la frecuencia para determinar la distancia al punto objetivo.
- 60 8. El sistema de medición de distancia de la reivindicación 7, en el que el sistema de interferometría de escaneo de frecuencia está dispuesto para medir la frecuencia sinusoidal de la señal para determinar la distancia al punto objetivo.
- 65 9. El sistema de medición de distancia de la reivindicación 8, que comprende además un sistema de análisis de datos dispuesto para calcular una transformación rápida de Fourier de la señal sinusoidal y estimar la ubicación de un pico correspondiente a la señal sinusoidal realizando un ajuste polinomial para determinar dicha distancia al punto objetivo.

10. Un método para medir una distancia utilizando interferometría de escaneo de frecuencia de barrido dual que comprende:

generar una señal de barrido de frecuencia de láser dual que incluye:

- 5 recibir un primer haz (101) de un láser (180) de barrido de frecuencia;
- recibir un segundo haz (102) de una fuente (190) de láser de bomba de frecuencia fija;
- 10 intermodular, los haces (101, 102) primero y segundo en un artefacto (140) óptico no lineal para generar un tercer haz (103), siendo el tercer haz (103) una copia invertida del primer haz (101) reflejado con relación a la frecuencia fija de la fuente (190) láser de bomba; y,

15 filtrar el tercer haz (103) desde la salida del artefacto (140) óptico no lineal;

generar salida de los haces (101, 103) primero y segundo a un sistema (200, 300) de interferometría de escaneo de frecuencia,

- 20 en donde el artefacto (140) no lineal se selecciona o configura de tal manera que la separación de frecuencia óptica de los haces (101, 102) primero y segundo satisface la condición de longitud de coherencia del artefacto (140) no lineal e induce la mezcla de cuatro ondas en el artefacto (140) óptico no lineal para generar el tercer haz (103) cuando los haces primero y segundo están intermodulados,

- 25 el sistema (200, 300) de interferometría de escaneo de frecuencia de barrido dual que incluye un interferómetro (220), el método comprende además dirigir los haces (101, 103) primero y tercero a través del interferómetro (220) para iluminar un punto objetivo, recibir una señal reflejada, y determinar la distancia al punto objetivo desde el mismo.

- 30 11. El método de la reivindicación 10, que incluye además dividir el primer haz en una primera y segunda porción (101, 101') y proporcionar la primera porción (101) al artefacto óptico no lineal y la segunda porción (101') al sistema (200, 300) de interferometría de escaneo de frecuencia.

12. El método de la reivindicación 11, que incluye:

- 35 dirigir la segunda porción (101') del haz desde el láser (180) de barrido de frecuencia hacia un interferómetro (270) adicional y derivar una señal de muestreo desde allí correspondiente a intervalos iguales del primer haz de medición; y,

muestrear la luz del segundo haz de medición que regresa a lo largo de la fibra óptica a una frecuencia controlada por la señal de muestreo para medir la frecuencia de la señal reflejada.

- 40 13. El método de la reivindicación 12, que comprende además pasar señales de interferencia desde el interferómetro desde los haces primero y tercero desde el interferómetro (220) a través de un filtro (310) de paso de banda, multiplicándolas para eliminar las perturbaciones y obteniendo la señal desde la cual se mide la frecuencia para determinar la distancia al punto objetivo.

- 45 14. El método de la reivindicación 13, que comprende además medir la frecuencia sinusoidal de la señal para determinar la distancia al punto objetivo.

- 50 15. El método de la reivindicación 14, que comprende además calcular una transformación rápida de Fourier de la señal sinusoidal y estimar una ubicación de un pico correspondiente a la señal sinusoidal realizando un ajuste polinomial para determinar dicha distancia al punto objetivo.

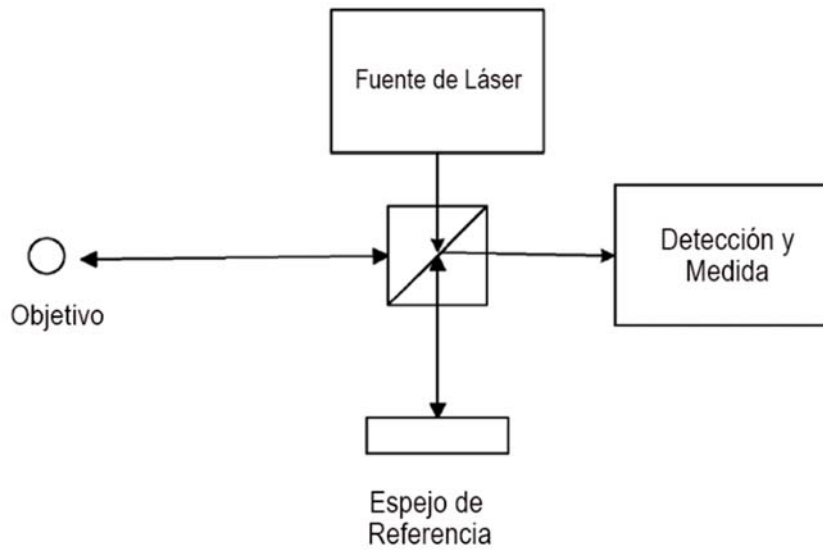


FIG. 1

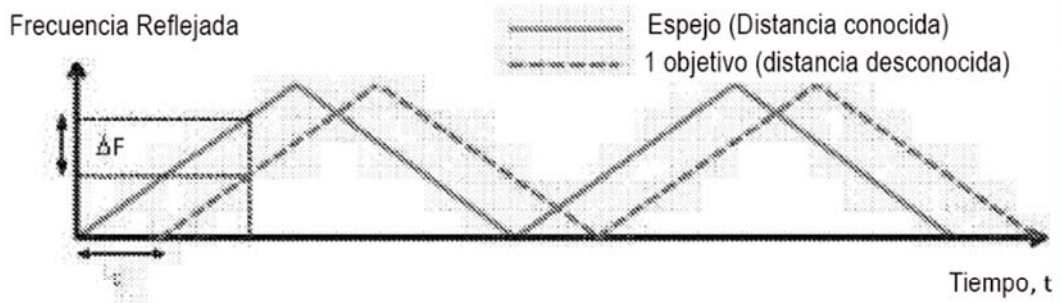


FIG. 2

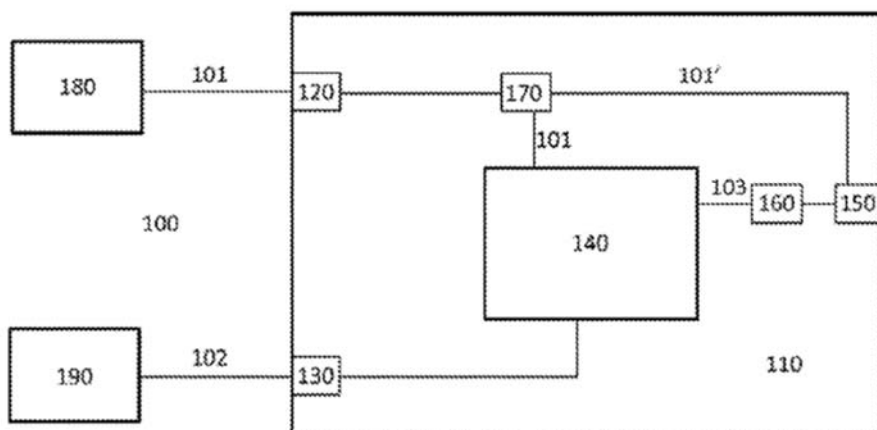


FIG. 3

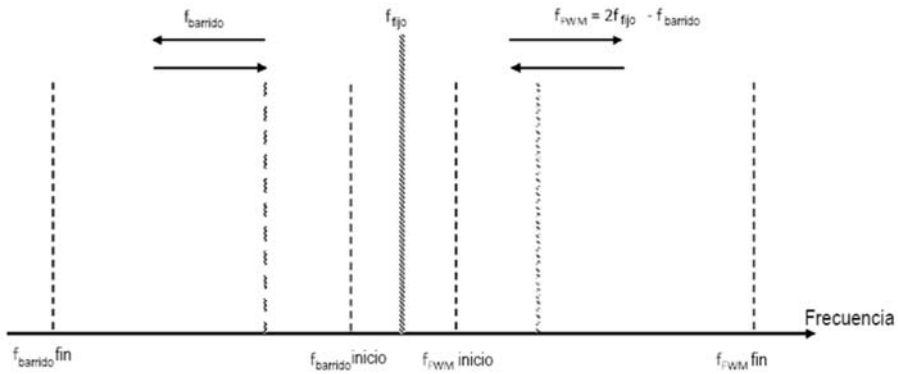


FIG. 4



FIG. 6

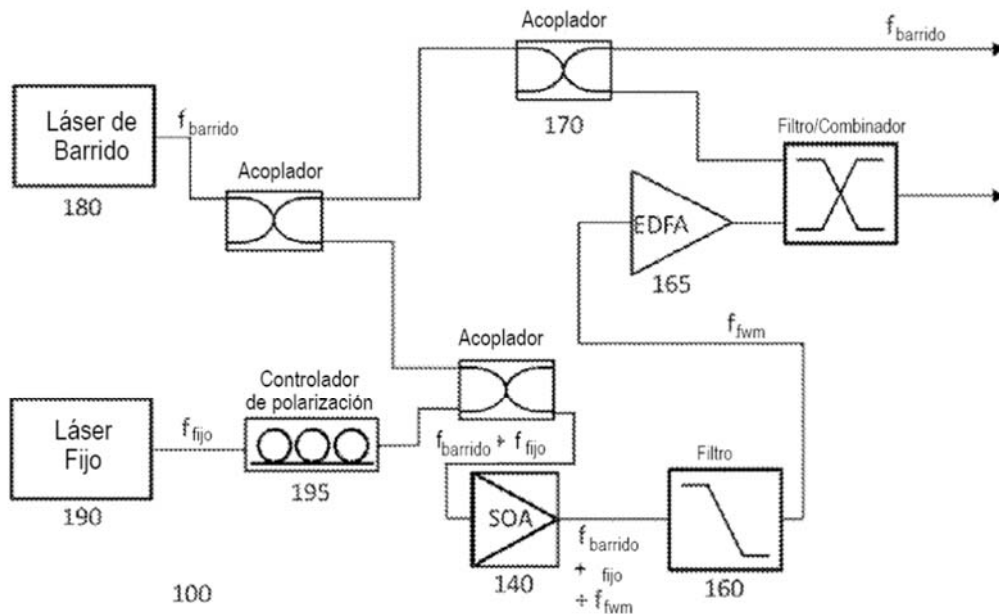


FIG. 7

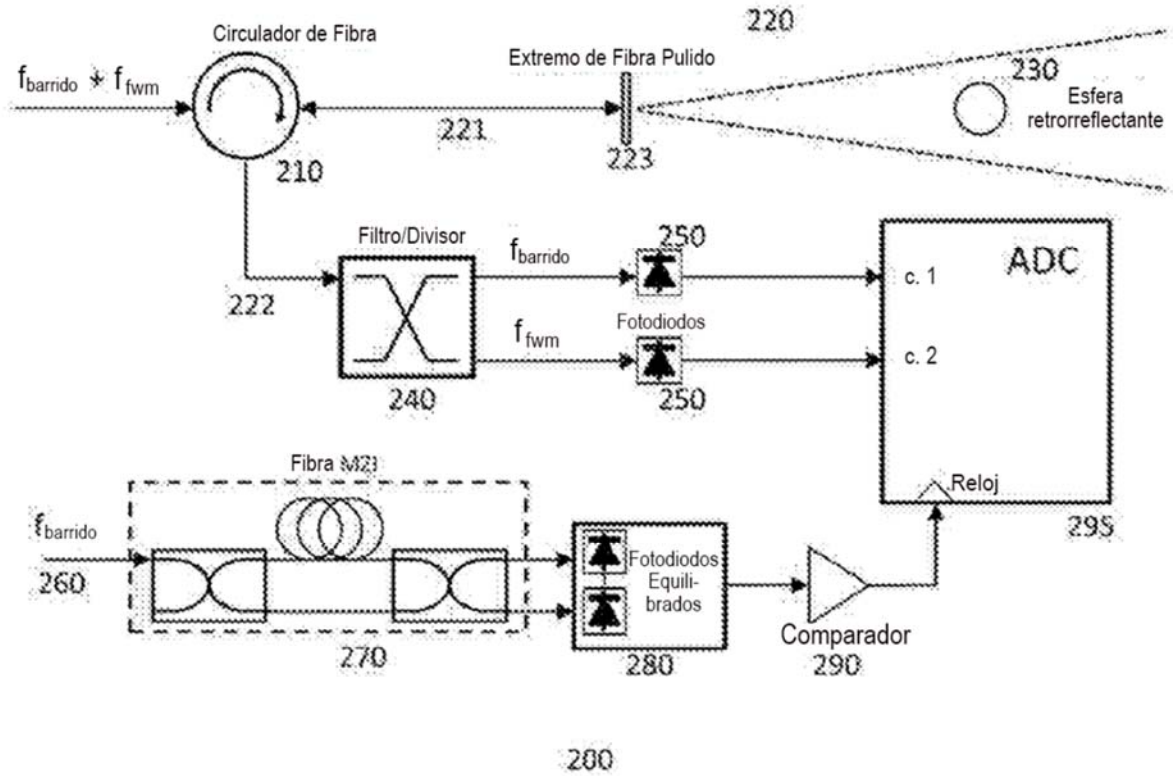


FIG. 8

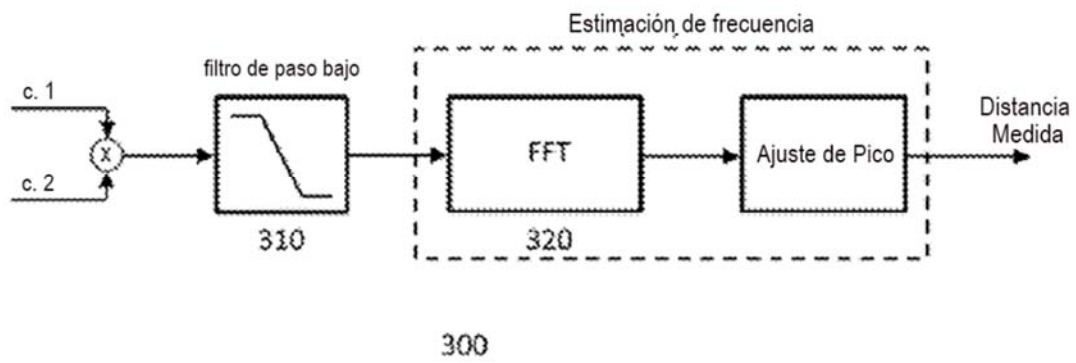


FIG. 9

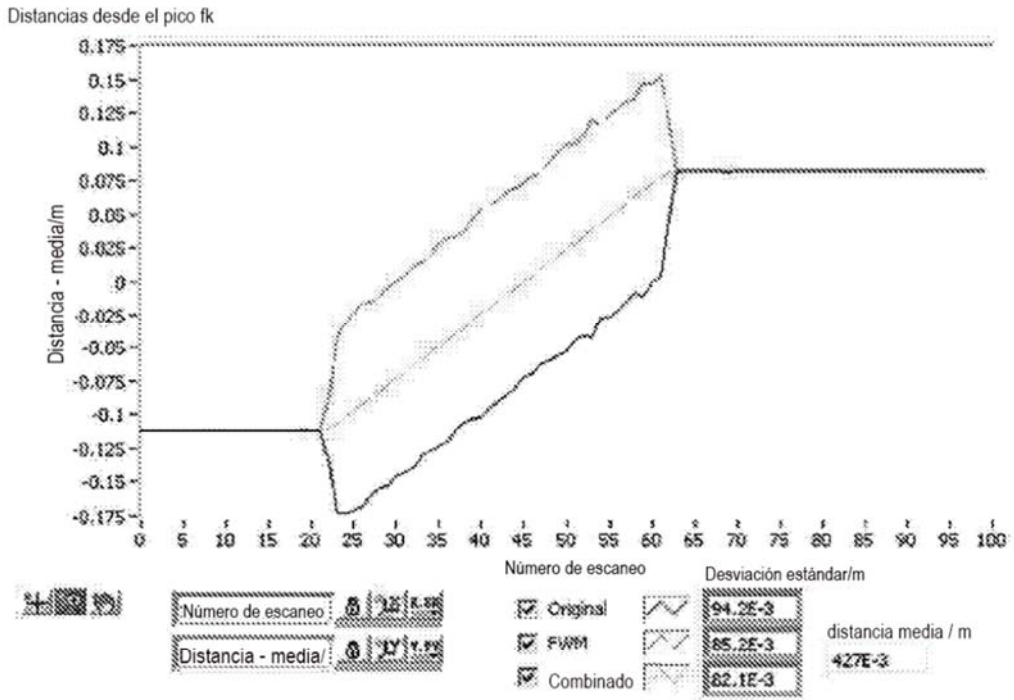


FIG. 10a

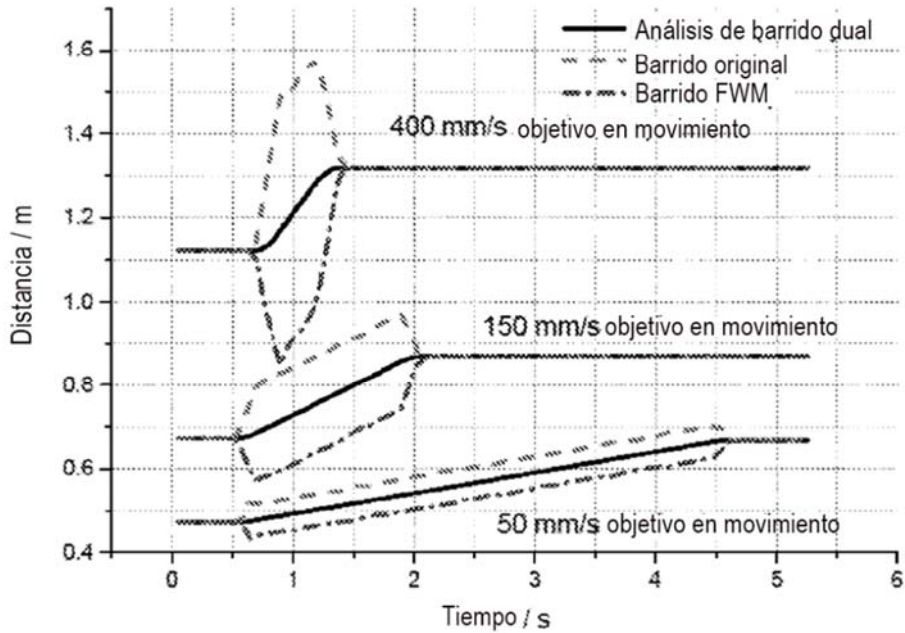


Fig. 10b

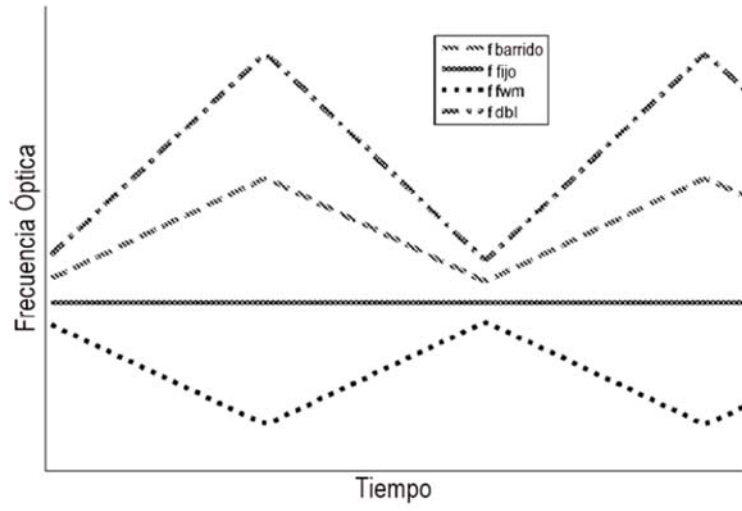


FIG. 5

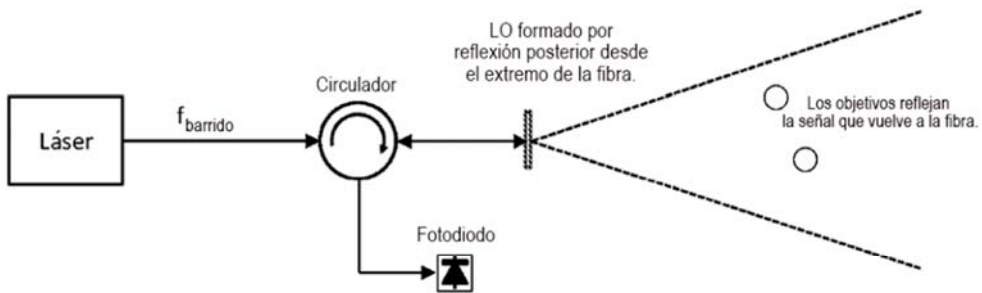


FIG. 11

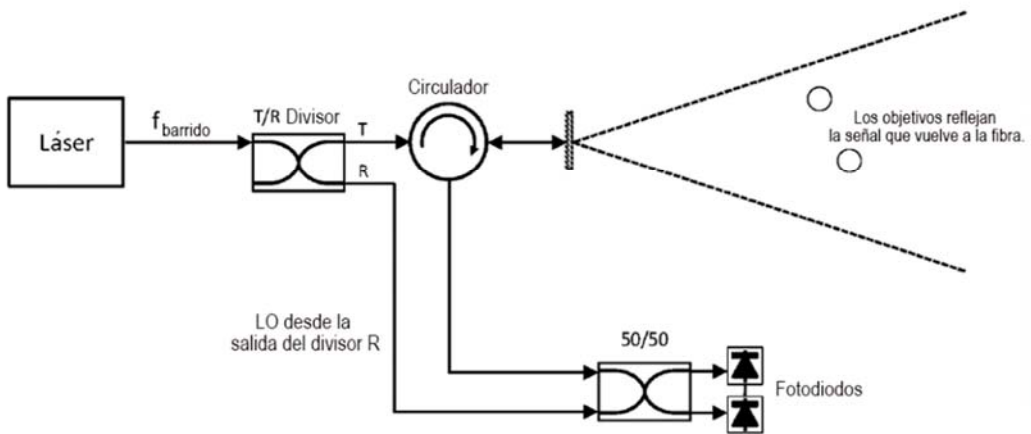


FIG. 12

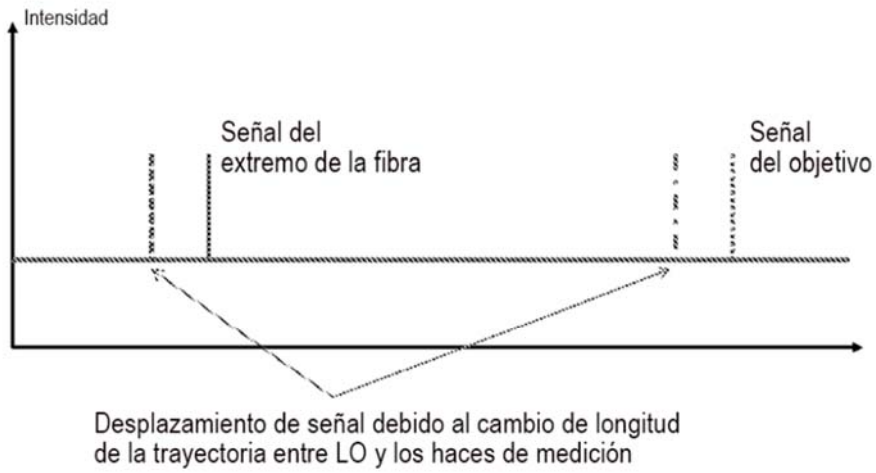


FIG. 13

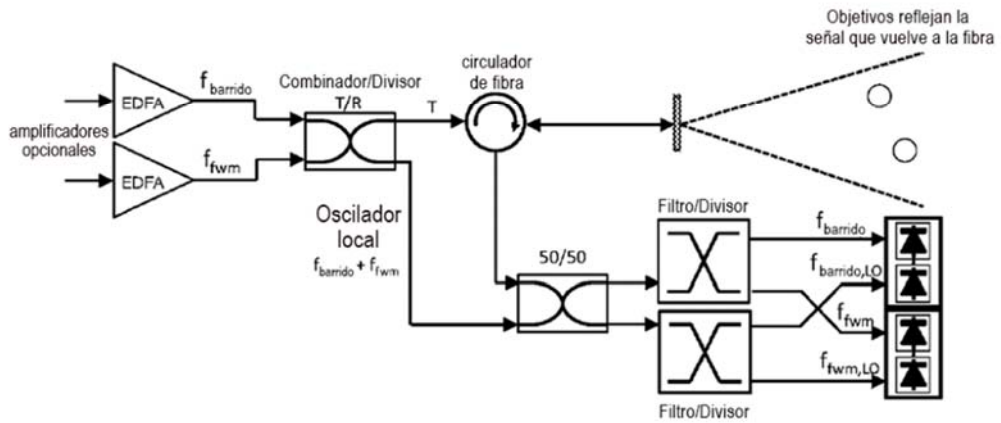


FIG. 14

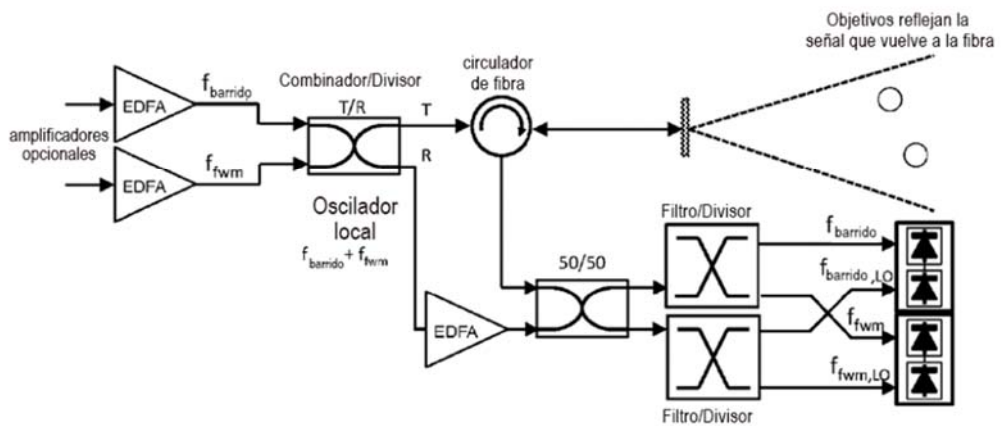


FIG. 15

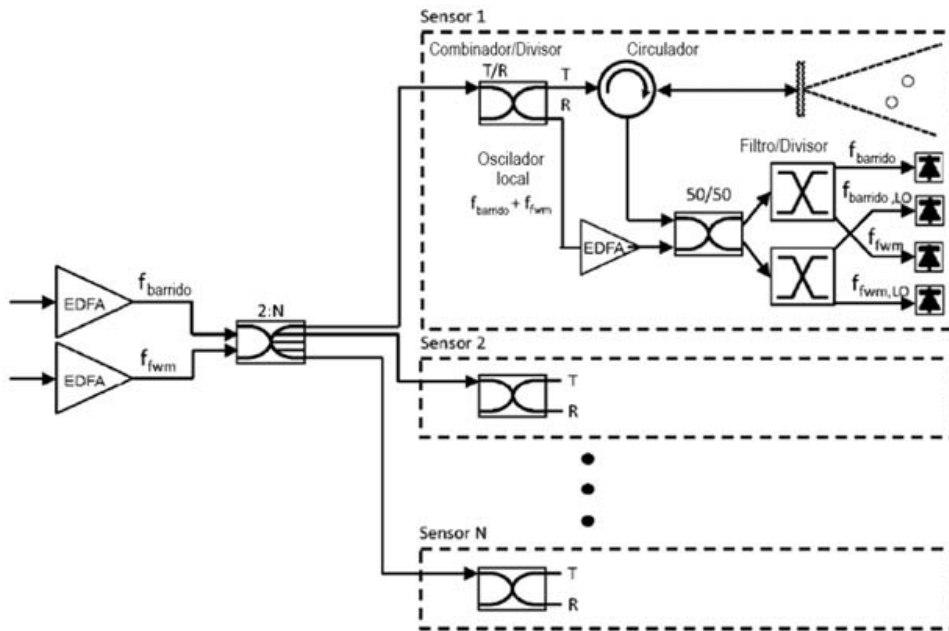


FIG. 16

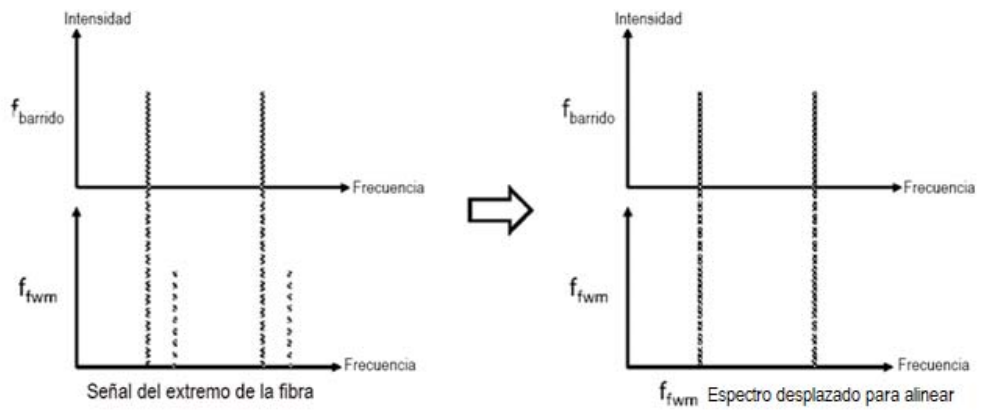


FIG. 17