

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 757 811**

51 Int. Cl.:

H04B 10/071 (2013.01)

G01B 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.11.2015 PCT/IB2015/058819**

87 Fecha y número de publicación internacional: **19.05.2016 WO16075672**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.11.2015 E 15859673 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.10.2019 EP 3219027**

54 Título: **Reflectometría óptica espectralmente eficiente en el dominio de la frecuencia usando detección I/Q**

30 Prioridad:

16.11.2014 US 201462080329 P
27.10.2015 IL 24229815

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
30.04.2020

73 Titular/es:

DSIT SOLUTIONS LTD. (50.0%)
2 Rehavam Zeevi Street
5401777 Givat Shmuel, IL y
RAMOT AT TEL-AVIV UNIVERSITY LTD. (50.0%)

72 Inventor/es:

EYAL, AVISHAY;
GABAI, HANIEL;
BOTSEV, YAKOV y
HAHAMI, MEIR

74 Agente/Representante:

GARCÍA GONZÁLEZ, Sergio

ES 2 757 811 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

Reflectometría óptica espectralmente eficiente en el dominio de la frecuencia usando detección I/Q

5 Campo de la invención

En general, la presente invención se refiere a reflectometría de fibra óptica y, en particular, a procedimientos y sistemas de reflectometría de fibra óptica usando detección en-fase/cuadratura (I/Q).

10 Antecedentes de la invención

Las técnicas de reflectometría de fibra óptica se usan para detectar y analizar degradaciones y eventos que afectan las propiedades ópticas de una fibra óptica. Diversas técnicas de reflectometría de fibra óptica son conocidas en la técnica. Tales técnicas se describen, por ejemplo, por Takada et al., en "New measurement system for fault location in optical waveguide devices based on an interferometric technique (Nuevo sistema de medición para localización de fallos en dispositivos de guías de ondas ópticas basados en una técnica interferométrica)", *Óptica Aplicada*, volumen 26, número 9, 1987, páginas 1603-1606; por Bamoski y Jensen, en "Fiber waveguides: a novel technique for investigating attenuation characteristics (Guías de ondas de fibra: una técnica novedosa para investigar las características de atenuación)", *Óptica Aplicada*, volumen 15, número 9, 1976, páginas 2112-2115; y por Bar-Am et al., en "OFDR with double interrogation for dynamic quasidistributed sensing (OFDR con doble interrogación para detección dinámica cuasi distribuida)", *Optics Express*, volumen 22, número 3, 2014, páginas 2299-2308.

Ejemplos adicionales de esquemas de reflectometría de fibra óptica se describen por Arbel y Eyal, en "Dynamic optical frequency domain reflectometry (Reflectometría óptica dinámica en el dominio de la frecuencia)", *Optics Express*, volumen 22, número 8, 2014, páginas 8823-8830; y por Zhang y Bao, en "Distributed optical fiber vibration sensor based on spectrum analysis of Polarization-OTDR system (Sensor de vibración de fibra óptica distribuida basado en análisis de espectro del sistema Polarization-OTDR)", *Optics Express*, volumen 16, número 14, 2008, páginas 10240-10247.

Algunas técnicas de reflectometría de fibra óptica se basan en la reflectometría óptica en el dominio del tiempo (OTDR). Los esquemas basados en OTDR se describen, por ejemplo, por Juárez et al., en "Distributed fiber-optic intrusion sensor system (Sistema distribuido de sensores de intrusión de fibra óptica)", *Journal of Lightwave Technology*, volumen 23, número 6, 2005, páginas 2081-2087; y por Yuelan et al., en "Distributed vibration sensor based on coherent detection of phase-OTDR (Sensor de vibración distribuida basado en la detección coherente de fase-OTDR)", *Journal of Lightwave Technology*, volumen 28, número 22, 2010, páginas 3243-3249.

Otras técnicas de reflectometría de fibra óptica se basan en la reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR). Los esquemas basados en OFDR se describen, por ejemplo, en los artículos de Bar-Am et al. y de Arbel y Eyal, citados anteriormente, así como por Ito et al., en "Long-range coherent OFDR with light source phase noise compensation (OFDR coherente de largo alcance con compensación de ruido de fase de fuente de luz)", *Journal of Lightwave Technology*, volumen 30, número 8, 2012, páginas 1015-1024.

En el artículo titulado "Reflectometría óptica dinámica en el dominio de la frecuencia" de Dror Arbel et al. publicado en *Optics Express*, volumen 22, no. 8, se divulga un sistema de reflectometría óptica dinámica en el dominio de la frecuencia que permite la detección acústica en tiempo real, de largo alcance, a una alta tasa de muestreo. El sistema se basa en un láser de escaneo rápido y un esquema de detección coherente. La detección distribuida se obtiene al sondear la luz retrodispersada de Rayleigh. El sistema se probó mediante la interrogación de una fibra monomodo del tipo de comunicación de 10 km y detectó con éxito impulsos localizados y excitaciones sinusoidales.

Sumario de la invención

Una realización de la presente invención que se describe en la presente memoria descriptiva proporciona un sistema para reflectometría de fibra óptica. El sistema incluye una fuente óptica, un módulo de detección de pulsos y un procesador. La fuente óptica está configurada para generar una señal de interrogación óptica que se transmite por una fibra óptica. El módulo de detección de pulsos está configurado para recibir de la fibra óptica una señal de retrodispersión óptica en respuesta a la señal de interrogación óptica, y para mezclar la señal de retrodispersión óptica con una réplica de referencia de la señal de interrogación óptica usando mezclado en-fase/cuadratura (I/Q), para producir una señal de pulso compleja que tiene componentes en-fase (I) y en cuadratura (Q). El procesador está configurado para detectar uno o más eventos que afectan la fibra óptica mediante el análisis de los componentes I y Q de la señal de pulso compleja. El procesador está configurado para analizar la señal de pulso compleja definiendo en la señal de pulso compleja al menos: un primer intervalo de tiempo, durante el cual se garantiza que una frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica sea menor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia; y un segundo intervalo de tiempo, durante el cual

se garantiza que la frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica sea mayor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia.

5 En una realización, la señal de interrogación óptica incluye una señal de fluctuación de longitud de onda ('chirp') periódica. En una realización divulgada, el módulo de detección de pulsos incluye un híbrido óptico de 90° configurado para realizar el mezclado I/Q. En una realización a modo de ejemplo, el módulo de detección de pulsos incluye un par de detectores ópticos que están configurados para detectar los componentes I y Q de la señal de pulso compleja.

10 En una realización a modo de ejemplo, el procesador está configurado para calcular un perfil de retrodispersión de la fibra óptica mediante: calcular una primera transformada compleja en el dominio de la frecuencia de la señal de pulso compleja en el primer intervalo de tiempo, y retener solo una parte de frecuencia positiva de la primera transformada compleja en el dominio de la frecuencia; y calcular una segunda transformada compleja en el dominio de la frecuencia de la señal de pulso compleja en el segundo intervalo de tiempo, y retener solo una parte de frecuencia negativa de la segunda transformada compleja en el dominio de la frecuencia. En una
15 realización, el procesador está configurado para detectar los eventos en una primera parte de la fibra óptica en base a la primera transformada compleja en el dominio de la frecuencia, y para detectar los eventos en una segunda parte de la fibra óptica en base a la segunda transformada compleja en el dominio de la frecuencia.

20 En algunas realizaciones, la fuente óptica está configurada para generar la señal de interrogación óptica con una tasa de repetición de escaneo f_{scan} , en la que una longitud de la fibra óptica se denota L , en la que una velocidad de la luz en la fibra óptica se denota v , y en la que el procesador está configurado para detectar el evento mientras $f_{scan}L \leq v/2$. En una realización, el procesador está configurado para detectar el evento mientras $v/4 < f_{scan}L \leq v/2$.

25 En algunas realizaciones, la fibra óptica es parte de un sistema de comunicación óptica, y el uno o más eventos incluyen un fallo en la fibra óptica. En otras realizaciones, la fibra óptica es parte de un sistema de defensa perimetral, y uno o más eventos incluyen una violación del sistema de defensa perimetral. En otras realizaciones adicionales, la fibra óptica se instala en una infraestructura de servicios públicos, y el uno o más eventos incluyen un fallo en la infraestructura de servicios públicos.
30

Adicionalmente, de acuerdo con una realización de la presente invención, se proporciona un procedimiento para reflectometría de fibra óptica. El procedimiento incluye transmitir una señal de interrogación óptica por una fibra óptica, recibir de la fibra óptica una señal de retrodispersión óptica en respuesta a la señal de interrogación óptica y mezclar la señal de retrodispersión óptica con una réplica de referencia de la señal de interrogación óptica usando mezclado en-fase/cuadratura (I/Q), para producir una señal de pulso compleja que tiene componentes en-fase (I) y en cuadratura (Q). Uno o más eventos que afectan la fibra óptica se detectan analizando los componentes I y Q de la señal de pulso compleja.
35

40 Además, de acuerdo con una realización de la presente invención, se proporciona un sistema para reflectometría de fibra óptica. El sistema incluye una fuente óptica, un módulo de detección de pulsos y un procesador. La fuente óptica está configurada para generar una señal de interrogación óptica que se transmite por una fibra óptica. El módulo de detección de pulsos está configurado para recibir de la fibra óptica una señal de retrodispersión óptica en respuesta a la señal de interrogación óptica, para mezclar la señal de retrodispersión óptica con una réplica de referencia de la señal de interrogación óptica para producir una señal de pulso y para distinguir en la señal de pulso entre (i) un primer componente en el que la frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica es menor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia y (ii) un segundo componente en el que la frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica es mayor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia. El procesador está configurado para detectar uno o más eventos que afectan la fibra óptica mediante el análisis del primer y segundo componentes de la señal de pulso.
45
50

Además, de acuerdo con una realización de la presente invención, también se proporciona un procedimiento para reflectometría de fibra óptica. El procedimiento incluye transmitir una señal de interrogación óptica por una fibra óptica, recibir de la fibra óptica una señal de retrodispersión óptica en respuesta a la señal de interrogación óptica y mezclar la señal de retrodispersión óptica con una réplica de referencia de la señal de interrogación óptica, con el fin de producir una señal de pulso. Se hace una distinción en la señal de pulso entre (i) un primer componente en el que una frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica es menor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia y (ii) un segundo componente en el que la frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica es mayor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia. Uno o más eventos que afectan a la fibra óptica se detectan analizando el primer y segundo componentes de la señal de pulso.
55
60

La presente invención se entenderá más completamente a partir de la siguiente descripción detallada de las realizaciones de la misma, tomada junto con los dibujos, en los que:

65

Breve descripción de los dibujos

- La Figura 1 es un diagrama de bloques que ilustra esquemáticamente un sistema de reflectometría de fibra óptica que usa detección I/Q, de acuerdo con una realización de la presente invención;
- 5 La Figura 2A es un gráfico que muestra frecuencias de señal instantáneas en función del tiempo en un sistema de reflectometría de fibra óptica que usa detección de señal real;
- La Figura 2B es un gráfico que muestra frecuencias de señal instantáneas en función del tiempo en un sistema de reflectometría de fibra óptica que usa detección I/Q, de acuerdo con una realización de la presente invención; y
- 10 La Figura 3 es un diagrama de flujo que ilustra esquemáticamente un procedimiento para reflectometría de fibra óptica que usa detección I/Q, de acuerdo con una realización de la presente invención.

Descripción detallada de realizaciones15 Descripción general

Las realizaciones de la presente invención que se describen en la presente memoria descriptiva proporcionan procedimientos y sistemas mejorados para reflectometría de fibra óptica. Las técnicas divulgadas se pueden utilizar para implementar diversos tipos de sensores para su uso en una amplia variedad de aplicaciones. Las aplicaciones de ejemplo incluyen monitoreo de redes ópticas, defensa perimetral, así como monitoreo de infraestructuras tales como tuberías, ferrocarriles y carreteras, por nombrar solo algunas.

En las realizaciones divulgadas, un sistema de reflectometría óptica en el dominio de la frecuencia (OFDR) genera una señal de interrogación óptica en una fibra óptica de longitud L . La señal de interrogación comprende una señal óptica periódica cuya longitud de onda instantánea varía en función del tiempo y tiene una tasa de repetición f_{scan} . Una señal óptica retrodispersada se recibe desde la fibra en respuesta a la señal de interrogación. El sistema mezcla ópticamente la señal de retrodispersión con una réplica de referencia de la señal de interrogación para producir una señal de pulso. El sistema detecta y digitaliza la señal de pulso, y la transforma en el dominio de frecuencia, para producir un perfil de retrodispersión en el dominio de frecuencia de la fibra. Posteriormente, el sistema analiza el perfil de retrodispersión según la aplicación.

Como se mostrará a continuación, si el mezclado óptico y la posterior detección de la señal de pulso se realizan utilizando un esquema de receptor de señal real, la longitud de la fibra y la tasa de repetición de escaneo deben satisfacer $f_{scan}L \leq v/4$, en el que v denota la velocidad de la luz en la fibra. Por lo tanto, la fibra más larga o la tasa de repetición de escaneo más rápida se logran cuando $f_{scan}L = v/4$.

En contraste, en las realizaciones de la presente invención el mezclado óptico y la detección posterior se realizan usando un esquema de receptor de señal compleja en-fase/cuadratura (I/Q). En algunas realizaciones, el sistema mezcla la señal de retrodispersión con la señal de referencia usando un híbrido óptico de 90° y detecta la señal de pulso usando un par de detectores ópticos balanceados en cuadratura.

Como se explicará en detalle a continuación, el esquema de detección I/Q permite al sistema distinguir entre frecuencias de pulso positivas y negativas. Como resultado, el límite superior del producto $f_{scan}L$ se duplica en relación con la detección de señal real. En otras palabras, cuando se usa el esquema I/Q divulgado, la fibra más larga o la tasa de repetición de escaneo más rápida se logran cuando $f_{scan}L = v/2$.

En resumen, los procedimientos y sistemas descritos en la presente memoria descriptiva usan mezclado y detección ópticos I/Q para proporcionar un aumento considerable en la tasa de repetición de escaneo y la longitud de fibra alcanzables, sin degradación en la resolución espacial u otro rendimiento. Las técnicas divulgadas son particularmente beneficiosas en aplicaciones de detección dinámica, es decir, aplicaciones que requieren detección con una alta tasa de actualización.

Descripción del sistema

55 La Figura 1 es un diagrama de bloques que ilustra esquemáticamente un sistema de reflectometría de fibra óptica 20 que usa detección I/Q, de acuerdo con una realización de la presente invención. El sistema 20 transmite una señal óptica a través de una fibra óptica 24, denominada fibra de detección, y analiza la señal óptica reflejada desde la fibra.

60 En particular, el sistema 20 detecta la retrodispersión desde varios reflectores en varios puntos a lo largo de la fibra 24, y estima las ubicaciones a lo largo de la fibra en las que se produce dicha retrodispersión. La retrodispersión puede ser causada por fallos mecánicos permanentes o transitorios o deformaciones en la fibra, o por cualquier otro fenómeno o evento adecuado que afecte las propiedades ópticas de la fibra en ciertos puntos. La detección y el análisis de la retrodispersión pueden servir como base para una amplia variedad de aplicaciones de detección, como se explicará a continuación.

En el presente ejemplo, el sistema 20 comprende un generador de forma de onda 28, una unidad de interrogación óptica 32 y un procesador de análisis 36. La unidad de interrogación óptica comprende un láser de escaneo 40, un divisor óptico 44, un circulador 48, un híbrido óptico de 90° 52 y un par de detectores ópticos balanceados 56A y 56B (también denominados receptores ópticos). El híbrido 52 también se puede denominar como híbrido, mezclador, demodulador o convertidor descendente I/Q o en cuadratura.

El generador de forma de onda 28 genera una forma de onda variable en el tiempo que modula la frecuencia óptica (la longitud de onda) del láser 40. Como resultado, el láser 40 genera una señal óptica cuya longitud de onda instantánea varía en función del tiempo. En el presente ejemplo, el generador de forma de onda 28 genera señales que tienen una forma de onda de diente de sierra, lo que hace que el láser 40 produzca una señal de fluctuación de longitud de onda periódica, es decir, una señal óptica periódica cuya longitud de onda instantánea cambia linealmente con el tiempo. En cada período, la frecuencia se barre sobre un intervalo de frecuencia deseado con alguna tasa de barrido predefinida.

Aunque la siguiente descripción se refiere principalmente a una señal óptica de fluctuación de longitud de onda lineal, en aras de la claridad, las técnicas divulgadas no se limitan en modo alguno a este tipo de señal. En el contexto de la presente patente y en las reivindicaciones, el término “señal de fluctuación de longitud de onda” se refiere a cualquier señal cuya longitud de onda instantánea varía en función del tiempo. La longitud de onda puede variar de acuerdo con cualquier función de tiempo adecuada, por ejemplo, una función lineal, polinómica, logarítmica, escalonada, pseudoaleatoria u otra.

Como alternativa, el láser 40 bajo el control del generador de forma de onda 28 puede producir formas de onda de cualquier otra señal de escaneo adecuada, por ejemplo, una señal óptica cuya longitud de onda instantánea es una función de tiempo sinusoidal, triangular u otra función adecuada.

La señal óptica producida por el láser 40 se divide usando el divisor 44 en una señal de interrogación y una señal de referencia. La señal de interrogación se lanza en la fibra de detección 24, y se recibe una señal de retrodispersión desde la fibra en respuesta. La señal de retrodispersión recibida se mezcla con la señal de referencia para producir una señal de pulso que a su vez se analiza.

En el ejemplo de la Figura 1, la señal de interrogación se transmite a través del circulador 48 (a través de los puertos 1⇒2 del circulador) a la fibra 24. La señal de referencia (una réplica de referencia de la señal de interrogación) se aplica al puerto de Oscilador Local (LO) del híbrido 52. La señal de interrogación se refleja (por ejemplo, se retrodispersa) desde varios puntos a lo largo de la fibra 24. La superposición de estas reflexiones, que regresa de la fibra 24 a la unidad de interrogación 32, es una señal óptica a la que —en la presente memoria— se hace referencia como la señal retrodispersada. La señal retrodispersada pasa a través del circulador 48 (a través de los puertos 2⇒3 del circulador) y se aplica al puerto de señal del híbrido 52.

El híbrido 52 tiene dos pares de fibras de salida que están conectadas respectivamente a los detectores ópticos balanceados 56A y 56B. Los detectores 56A y 56B producen señales eléctricas respectivas que representan los componentes en-fase (I) y en cuadratura (Q) de la señal de pulso (la señal retrodispersada después de que ha sufrido una conversión descendente al mezclarla con la señal de referencia). En otras palabras, los detectores 56A y 56B producen una representación de señal compleja de la luz retrodispersada en la fibra 24.

El par de señales eléctricas (es decir, la señal de pulso compleja) producida por los detectores 56A y 56B se proporciona al procesador de análisis 36. El procesador 36 digitaliza la señal de pulso compleja y la analiza en el dominio de la frecuencia, para detectar y localizar los puntos a lo largo de la fibra 24 en los que se produce la retrodispersión. Usualmente, el procesador 36 transforma la señal de pulso en el dominio de frecuencia, por ejemplo, aplicando una transformada de Fourier, para producir un perfil de retrodispersión en el dominio de frecuencia de la fibra. En términos generales, cada frecuencia de pulso (y, por lo tanto, cada intervalo de frecuencia de la transformada de Fourier) se asigna a una ubicación respectiva a lo largo de la fibra. Las funciones del procesador 36 se abordan con mayor detalle más abajo.

La configuración del sistema 20 que se muestra en la Figura 1 es una configuración de ejemplo, que se elige únicamente por razones de claridad conceptual. En realizaciones alternativas, se puede usar cualquier otra configuración adecuada del sistema. En el presente contexto, el generador de forma de onda 28 y el láser 40 se denominan conjuntamente como fuente óptica. El híbrido 52 y los detectores 56A y 56B se denominan conjuntamente como un módulo de detección de pulsos. En realizaciones alternativas, el sistema 20 puede implementarse usando cualquier otra configuración adecuada de la fuente óptica y/o el módulo de detección de pulsos.

Los diferentes elementos del sistema 20 pueden implementarse usando diversos componentes de hardware ópticos y/o electrónicos, integrados o discretos adecuados. En una realización a modo de ejemplo, la fibra 24 comprende una fibra Corning SMF-28, el láser 40 comprende un láser por Koheras Adjustik de NKT Photonics, el divisor 44 comprende un dispositivo TW1550R5A2 proporcionado por Thorlabs, el circulador 48 comprende un

dispositivo 6015-3-APC proporcionado por Thorlabs, el híbrido 52 comprende un dispositivo COH24-X proporcionado por Kylaia, los detectores 56A y 56B comprenden dispositivos PDB470C-AC proporcionados por Thorlabs. En realizaciones alternativas, sin embargo, se puede usar cualquier otro componente adecuado.

5 Algunos elementos del sistema, por ejemplo, el generador de forma de onda 28, pueden implementarse utilizando equipos de prueba estándar o modificados. Algunos elementos del sistema, por ejemplo, el procesador de análisis 36, pueden implementarse usando hardware, por ejemplo, usando uno o más Circuitos Integrados de Aplicación Específica (ASIC) o Arreglos de Compuertas Programables en Campo (FPGA), usando software o usando una combinación de hardware y elementos de software.

10 En algunas realizaciones, el procesador 36 puede implementarse usando uno o más procesadores de propósito general, que están programados en software para llevar a cabo las funciones descritas en la presente memoria. El software puede descargarse a los procesadores en forma electrónica, por ejemplo, a través de una red, o puede, alternativa o adicionalmente, proporcionarse y/o almacenarse en medios tangibles no transitorios, como memorias magnéticas, ópticas o electrónicas.

Detección y análisis OFDR (I/Q) de señal real vs. señal compleja

20 Considere una aplicación dinámica de reflectometría de fibra óptica, en la que las deformaciones o fallos de la fibra que deberían detectarse varían con el tiempo. En tales aplicaciones, la tasa de actualización, es decir, la tasa con la que se estima el perfil de retrodispersión, a menudo es una consideración importante de diseño. Normalmente existe una compensación entre la tasa a la que se transmiten los ciclos de interrogación (denominada tasa de repetición de escaneo, e indicada como f_{scan}) y la longitud de la fibra de detección (indicada como L). Esta compensación se debe a la restricción de que, después de un ciclo de interrogación, la señal de retrodispersión resultante debe salir completamente de la fibra antes de que comience el siguiente ciclo de interrogación.

25 Para cumplir con esta restricción, la tasa de repetición de escaneo y la longitud de la fibra deben satisfacer $f_{scan}L \leq v/2 = 10^8$ m/s, en la que v denota la velocidad de la luz en la fibra. Por lo tanto, con todos los demás parámetros fijos, la fibra más larga y/o la tasa de repetición de escaneo más rápida se logran cuando $f_{scan}L = v/2$.

30 Como se explicó anteriormente, el sistema 20 detecta la señal de pulso (la señal óptica retrodispersada después de mezclarla con la señal óptica de referencia) usando detección I/Q en lugar de usar detección de señal real. El esquema de detección I/Q proporciona una compensación superior de f_{scan} , L y la resolución espacial alcanzables, en comparación con la detección de señal real. Este beneficio de rendimiento se demuestra en las Figuras 2A y 2B a continuación.

35 Las Figuras 2A y 2B son gráficos que muestran frecuencias de señal instantáneas en función del tiempo para la detección de señal real y para la detección I/Q, respectivamente. La Figura 2B ilustra el principio de operación del sistema 20, de acuerdo con una realización de la presente invención. La Figura 2A sirve como línea de base para la comparación. En ambas figuras, el eje horizontal representa el tiempo (t), que también es proporcional a la coordenada longitudinal z a lo largo de la fibra. El eje vertical representa la frecuencia de señal instantánea (f).

40 Ahora, se hace referencia a la Figura 2A, que ilustra un escenario de detección de señal real. Una línea 60 traza la frecuencia instantánea de la señal de referencia, y las líneas 64 y 68 trazan la frecuencia instantánea de la señal retrodispersada, durante el intervalo de tiempo $0 \leq t \leq T$, en la que $T = 1/f_{scan}$.

45 Una "ventana de procesamiento" 72 se define como el intervalo de tiempo entre $t = 2L/v$ y $t = T$. La ventana de procesamiento es el intervalo de tiempo en la señal de pulso detectada, sobre la que el procesador 36 estima el perfil de retrodispersión. Como se señaló anteriormente, el perfil de retrodispersión se estima usualmente calculando una transformada de Fourier de la señal de pulso entre la señal retrodispersada y la señal de referencia.

50 En el presente ejemplo, los parámetros se eligieron de modo que $f_{scan}L = v/4$. Esta elección garantiza que la frecuencia instantánea de la señal retrodispersada (línea 64) sea inferior a la frecuencia instantánea de la señal de referencia (línea 60) en toda la ventana de procesamiento 72.

55 Sin pérdida de generalidad, una frecuencia de pulso que se genera cuando la frecuencia instantánea de la señal retrodispersada es menor que la frecuencia de la señal de referencia, en la presente memoria se denomina frecuencia de pulso positiva. De manera similar, una frecuencia de pulso que se genera cuando la frecuencia instantánea de la señal retrodispersada es mayor que la frecuencia de la señal de referencia, en la presente memoria se denomina frecuencia de pulso negativa.

60 Como se puede apreciar en la Figura 2A, $f_{scan}L = v/4$ es el rendimiento más alto (fibra más larga, escaneo más rápido) que se puede lograr con el esquema de detección de señal real. Si todos los demás parámetros son fijos,

cualquier aumento en la longitud de la fibra L causaría la presencia de frecuencias de pulso negativas en al menos parte de la ventana de procesamiento 72. Dado que la detección de señal real no puede distinguir entre las frecuencias de pulso positivas y negativas, las frecuencias de pulso negativas en la ventana de procesamiento de la Figura 2A se consideran como solapamiento y distorsionan el cálculo del perfil de retrodispersión.

Por lo tanto, en el esquema de detección de señal real de la Figura 2A, para aumentar la longitud de la fibra L es necesario reducir la tasa de repetición de escaneo f_{scan} o disminuir el tamaño de la ventana de procesamiento 72. Sin embargo, ambas soluciones degradarían el rendimiento. La reducción de f_{scan} degrada el rendimiento dinámico del sistema, por ejemplo, la capacidad de detectar cambios temporales en el perfil de retrodispersión. La reducción del tamaño de la ventana de procesamiento degrada la resolución espacial alcanzable.

Como se demostrará usando la Figura 2B, el esquema de detección I/Q del sistema 20 permite que $f_{scan}L$ alcance el límite teórico $f_{scan}L = v/2$, sin introducir solapamiento ni degradar la resolución espacial. En particular, a diferencia de los esquemas basados en señales reales, el sistema 20 puede generar y analizar el perfil de retrodispersión mientras $v/4 < f_{scan}L \leq v/2$.

En el esquema de detección del sistema 20, la fibra de detección 24 puede modelarse como un reflector distribuido cuya reflectividad se denota $R(z)$, en la que z denota la coordenada longitudinal a lo largo de la fibra. Las señales eléctricas en-fase y en cuadratura a la salida de los detectores 56A y 56D se pueden escribir como:

$$I(t) = a \int_{z=0}^L R(z) \cos[2\pi f_{pulso}(z, t)t + \phi(z)] dz$$

$$Q(t) = a \int_{z=0}^L R(z) \sin[2\pi f_{pulso}(z, t)t + \phi(z)] dz$$

en las que $\phi(z)$ denota la fase acumulada por la señal de interrogación en el viaje de ida y vuelta a z y de regreso, $f_{pulso}(z, t)$ denota la frecuencia de pulso que resulta de mezclar la señal retrodispersada de z con la señal de referencia, y factor de escala que depende de la capacidad de respuesta de los detectores 56A y 56B.

La frecuencia de pulso durante un período de escaneo puede escribirse como:

$$f_{pulso}(z, t) = \begin{cases} \gamma 2z/v - \Delta f & 0 \leq t < 2z/v \\ \gamma 2z/v & 2z/v \leq t < T \end{cases}$$

en la que γ denota la frecuencia de barrido de frecuencia de la señal de interrogación en [Hz/seg] y v es la velocidad de la luz en la fibra. La señal de retrodispersión compleja se obtiene tomando la suma:

$$V(t) = I(t) + jQ(t) = a \int_{z=0}^L \tilde{R}(z) e^{j2\pi f_{pulso}(z, t)t} dz$$

en la que $\tilde{R}(z) \equiv R(z)e^{j\phi(z)}$ denota el coeficiente de reflexión complejo de la fibra 24 como una función de z .

Ahora se hace referencia a la Figura 2B, que ilustra las señales en el sistema 20 cuando $f_{scan}L$ se establece en el valor teórico óptimo $f_{scan}L = v/2$. Una línea 80 muestra la frecuencia instantánea de la señal de referencia. Las líneas 84 y 88 muestran la frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión.

En el caso de la detección I/Q, se definen dos ventanas de procesamiento 92 y 96 en la señal de pulso detectada, cada una de tamaño $T/2$. La primera ventana de procesamiento (ventana 92, $T/2 \leq t < T$) corresponde a la mitad de la fibra 24 más cercana al sistema 20 ($0 \leq z < L/2$). A través de esta ventana, se garantiza que las frecuencias de pulso serán positivas. La segunda ventana de procesamiento (ventana 96, $0 \leq t < T/2$) corresponde a la mitad de la fibra 24 que está más lejos del sistema 20 ($L/2 \leq z < L$). A través de esta ventana, se garantiza que las frecuencias de pulso serán negativas.

En algunas realizaciones, el procesador 36 calcula el perfil de retrodispersión para la mitad cercana de la fibra 24 calculando una transformada de Fourier de la señal compleja de retrodispersión $V(t)$ sobre la primera ventana de procesamiento (ventana 92, $T/2 \leq t < T$), y reteniendo solo los componentes de frecuencia positiva de la

transformada resultante.

De manera similar, el procesador 36 puede calcular el perfil de retrodispersión para la mitad distante de la fibra 24 calculando una transformada de Fourier de la señal compleja de retrodispersión $V(t)$ sobre la segunda ventana de procesamiento (ventana 96, $0 \leq t < T/2$), y reteniendo solo los componentes de frecuencia negativa de la transformada resultante.

La descripción de la Figura 2B anterior se refiere al caso óptimo en el que $f_{scan}L = v/2$. Sin embargo, las técnicas divulgadas también se pueden usar en otros escenarios y otras opciones de parámetros que cumplen la condición $f_{scan}L \leq v/2$. Mientras se cumpla esta condición, el procesador 36 puede dividir la señal de pulso de valor complejo detectada en una o más primeras ventanas de procesamiento (en las cuales las frecuencias de pulso son positivas) y una o más ventanas de procesamiento (en las cuales el pulso se garantiza que las frecuencias serán negativas).

En resumen, la comparación anterior entre la detección de señal real (Figura 2A) y la detección I/Q (Figura 2B) muestra que la detección I/Q es capaz de realizar reflectometría de fibra óptica basada en OFDR mientras aumenta el producto $f_{scan}L$ por hasta un factor de dos. Por ejemplo, en relación con un sistema comparable que utiliza detección de señal real, el sistema 20 puede soportar el doble de la longitud de fibra para la misma tasa de repetición de escaneo, o el doble de la tasa de repetición de escaneo para la misma longitud de fibra, sin degradar la resolución espacial.

Los inventores han verificado el rendimiento de la técnica divulgada usando una simulación por ordenador. La descripción de la configuración de la simulación y los resultados de la simulación de ejemplo se proporcionan en la Solicitud de Patente Provisional de Estados Unidos 62/080,329, citada anteriormente.

La Figura 3 es un diagrama de flujo que ilustra esquemáticamente un procedimiento para reflectometría de fibra óptica usando detección I/Q, de acuerdo con una realización de la presente invención. El procedimiento comienza con el generador de forma de onda 28 modulando el láser 40 con una forma de onda de fluctuación de longitud de onda, en una etapa de modulación 100. Como resultado, el láser 40 genera una señal óptica de interrogación: un tren de ciclos de interrogación cuya longitud de onda instantánea varía linealmente en función del tiempo. En una etapa de transmisión 104, el sistema 20 transmite la señal óptica de interrogación por la fibra de detección 24.

La señal óptica de referencia se aplica al puerto LO del híbrido 52, en una etapa de entrada de referencia 108. La señal óptica retrodispersada se aplica al puerto de señal del híbrido 52, en una etapa de entrada de retrodispersión 112. Los detectores 56A y 56B detectan las salidas I y Q del híbrido 52, respectivamente, en una etapa de detección I/Q 116. En otras palabras, los detectores 56A y 56B emiten los componentes I y Q respectivos de la señal de pulso compleja entre la señal de interrogación y la señal de referencia.

En una etapa de análisis 120, el procesador 36 analiza la señal de pulso compleja en el dominio de frecuencia, como se explicó anteriormente, para identificar los reflejos que ocurren en la fibra 24. El análisis puede implicar, por ejemplo, determinar la presencia, intensidad y las coordenadas z de los reflejos en fibra 24.

Ejemplos de aplicaciones

En diversas realizaciones, los sistemas tales como el sistema 20 de la Figura 1 pueden usarse en una amplia variedad de aplicaciones que implican detectar diversos tipos de eventos que afectan a una fibra óptica. Usualmente, aunque no necesariamente, el sistema 20 se usa en aplicaciones de detección dinámica que se benefician de una rápida tasa de actualización.

En algunas realizaciones, el sistema 20 se usa para monitorear fibras ópticas en una red de comunicación óptica, por ejemplo, para detectar y localizar fallos en las fibras. En esta aplicación, los eventos detectados son usualmente fallos en la fibra óptica que afectan el rendimiento de la comunicación de la red.

En otras realizaciones, la fibra de detección 24 se instala como parte de un sistema de defensa perimetral para proteger un área o estructura determinada. En tales aplicaciones, los eventos detectados generalmente se relacionan con la entrada ilegítima, es decir, la violación ilegítima del sistema de defensa perimetral.

En otras realizaciones, la fibra de detección 24 está instalada en algún elemento de infraestructura de servicios públicos, con el fin de detectar fallos relacionados con la fatiga u otro tipo de fallos en la infraestructura. La fibra se puede instalar, por ejemplo, en una tubería de petróleo o agua, en una línea de ferrocarril o en una carretera o puente. En este tipo de aplicación, los eventos detectados generalmente están relacionados con fallos en el elemento de infraestructura.

Las aplicaciones enumeradas anteriormente se representan únicamente a modo de ejemplo. En realizaciones

alternativas, las técnicas divulgadas pueden usarse como parte de cualquier otro sistema adecuado y para cualquier otra aplicación adecuada.

5 Por lo tanto, se apreciará que las realizaciones descritas anteriormente se citan a modo de ejemplo, y que la presente invención no se limita a lo que se ha mostrado y descrito particularmente anteriormente. Por el contrario, el ámbito de la presente invención incluye tanto combinaciones como subcombinaciones de las diversas características descritas anteriormente, así como variaciones y modificaciones de las mismas que podrían ocurrírseles a los expertos en la técnica al leer la descripción anterior y que no se divulgan en el estado de la técnica. Los documentos incorporados por referencia en la presente patente deben considerarse una parte
10 integral de la misma, excepto en la medida en que los términos se definan en dichos documentos incorporados de una manera que entre en conflicto con las definiciones hechas explícita o implícitamente en la presente memoria descriptiva, únicamente se deben considerar las definiciones en la presente memoria descriptiva.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

1. Un sistema (20) de reflectometría de fibra óptica, comprendiendo el sistema:

- 5 una fuente óptica (40), que está configurada para generar una señal de interrogación óptica que se transmite por una fibra óptica (24);
 un módulo de detección de pulsos, que está configurado para recibir de la fibra óptica (24) una señal de retrodispersión óptica en respuesta a la señal de interrogación óptica, y para mezclar la señal de retrodispersión óptica con una réplica de referencia de la señal de interrogación óptica usando
 10 mezclado en-fase/cuadratura (I/Q), con el fin de producir una señal de pulso compleja que tiene componentes en-fase (I) y en cuadratura (Q); y
 un procesador (36), que está configurado para detectar uno o más eventos que afectan la fibra óptica mediante el análisis de los componentes I y Q de la señal de pulso compleja, **caracterizado porque**:
- 15 el procesador está configurado para analizar la señal de pulso compleja definiendo en la señal de pulso compleja al menos:
- un primer intervalo de tiempo, durante el cual se garantiza que una frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica sea menor que la frecuencia instantánea de la réplica de
 20 referencia; y
 un segundo intervalo de tiempo, durante el cual se garantiza que la frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica sea mayor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia.
- 25 2. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la señal de interrogación óptica comprende una señal de fluctuación de longitud de onda periódica.
3. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el módulo de detección de pulsos comprende un híbrido óptico de 90° configurado para realizar el mezclado I/Q.
- 30 4. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el módulo de detección de pulsos comprende un par de detectores ópticos (56A; 56B) que están configurados para detectar los componentes I y Q de la señal de pulso compleja.
- 35 5. El sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el procesador está configurado para calcular un perfil de retrodispersión de la fibra óptica por medio de:
- calcular una primera transformada compleja en el dominio de la frecuencia de la señal de pulso compleja en el primer intervalo de tiempo, y retener solo una parte de frecuencia positiva de la primera transformada compleja en el dominio de la frecuencia; y
 40 calcular una segunda transformada compleja en el dominio de la frecuencia de la señal de pulso compleja en el segundo intervalo de tiempo, y retener solo una parte de frecuencia negativa de la segunda transformada compleja en el dominio de la frecuencia.
- 45 6. El sistema de acuerdo con la reivindicación 5, en el que el procesador está configurado para detectar los eventos en una primera parte de la fibra óptica en base a la primera transformada compleja en el dominio de la frecuencia, y para detectar los eventos en una segunda parte de la fibra óptica en base a la segunda transformada compleja en el dominio de la frecuencia.
- 50 7. El sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4, en el que la fuente óptica está configurada para generar la señal de interrogación óptica con una tasa de repetición de escaneo f_{scan} , en el que una longitud de la fibra óptica se denota L , en el que una velocidad de la luz en la fibra óptica se denota v , y en el que el procesador está configurado para detectar el evento mientras $f_{scan}L \leq v/2$.
- 55 8. El sistema de acuerdo con la reivindicación 7, en el que el procesador está configurado para detectar el evento mientras $v/4 < f_{scan}L \leq v/2$.
9. El sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-4, en el que la fibra óptica es parte de un sistema de comunicación óptica, y en el que uno o más eventos comprenden un fallo en la fibra óptica.
- 60 10. El sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la fibra óptica es parte de un sistema de defensa perimetral, y en el que uno o más eventos comprenden una violación del sistema de defensa perimetral.

11. El sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en el que la fibra óptica está instalada en una infraestructura de servicios públicos, y en el que uno o más eventos comprenden un fallo en la infraestructura de servicios públicos.

5 12. Un procedimiento de reflectometría de fibra óptica, comprendiendo el procedimiento:

transmitir (104) una señal de interrogación óptica por una fibra óptica (24);
recibir de la fibra óptica una señal de retrodispersión óptica en respuesta a la señal de interrogación óptica;

10 mezclar la señal de retrodispersión óptica con una réplica de referencia de la señal de interrogación óptica usando mezclado en-fase/cuadratura (I/Q), para producir una señal de pulso compleja que tiene componentes en-fase (I) y cuadratura (Q); y

detectar uno o más eventos que afectan la fibra óptica (24) mediante el análisis de los componentes I y Q de la señal de pulso compleja, **caracterizado porque:**

15 analizar la señal de pulso compleja comprende definir en la señal de pulso compleja al menos:

un primer intervalo de tiempo, durante el cual se garantiza que una frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica sea menor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia; y

20 un segundo intervalo de tiempo, durante el cual se garantiza que la frecuencia instantánea de la señal de retrodispersión óptica sea mayor que la frecuencia instantánea de la réplica de referencia.

25 13. El procedimiento de acuerdo con la reivindicación 12, en el que la señal de interrogación óptica comprende una señal de fluctuación de longitud de onda periódica.

30

35

40

45

50

55

60

65

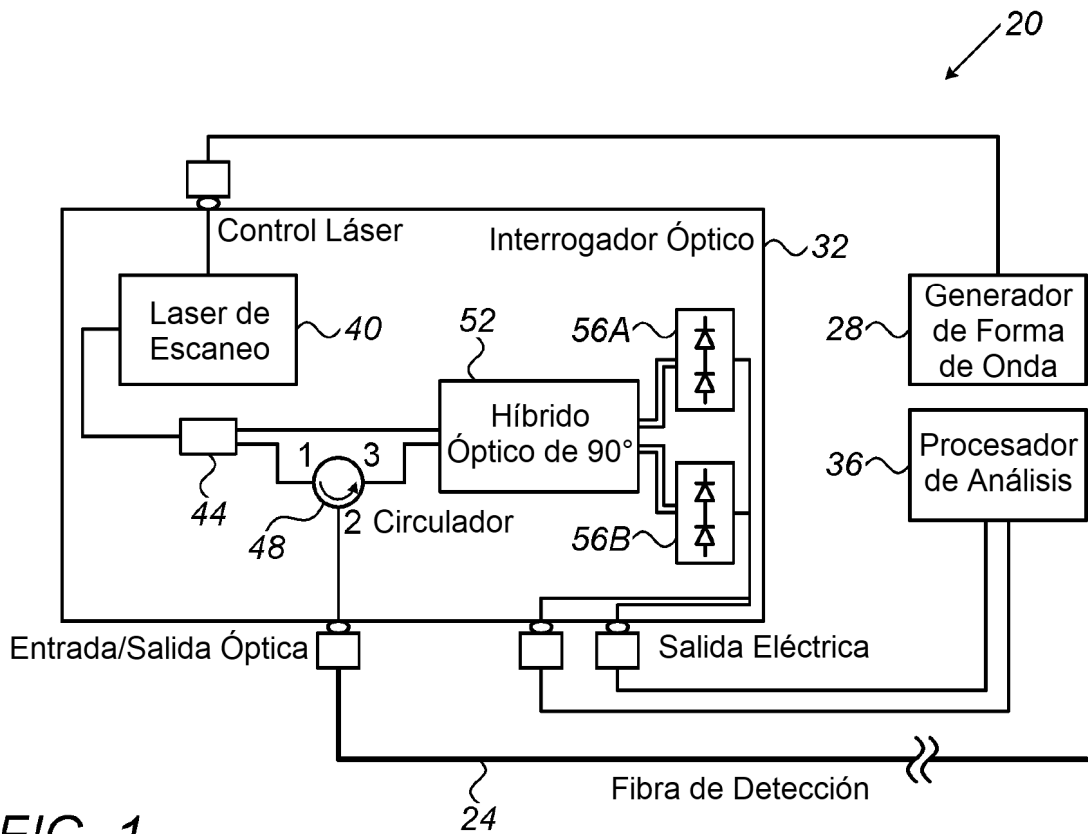
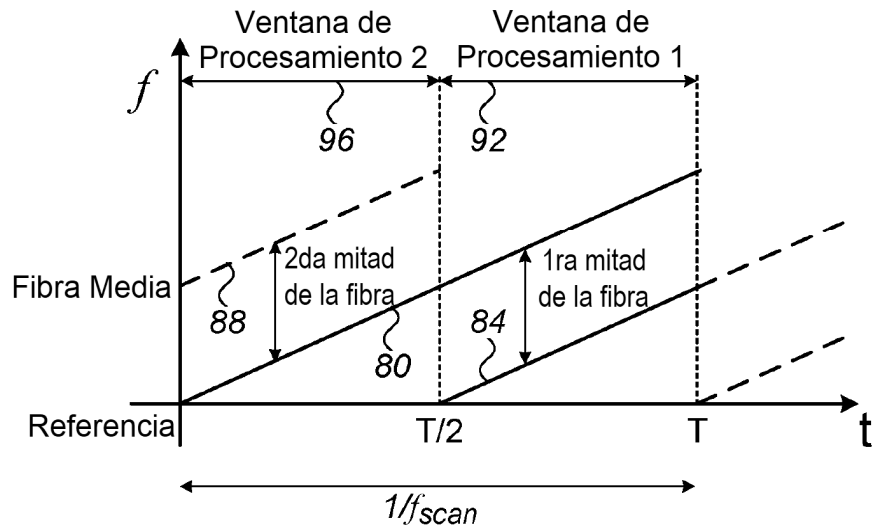
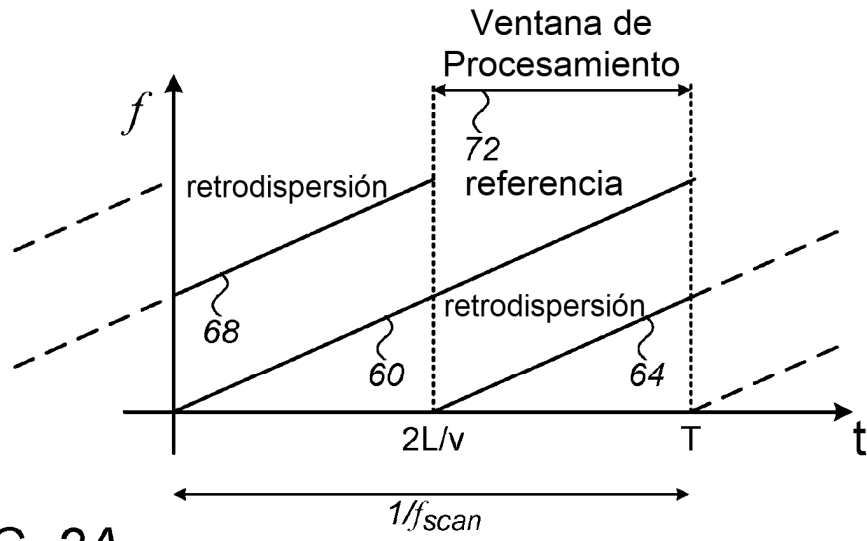


FIG. 1



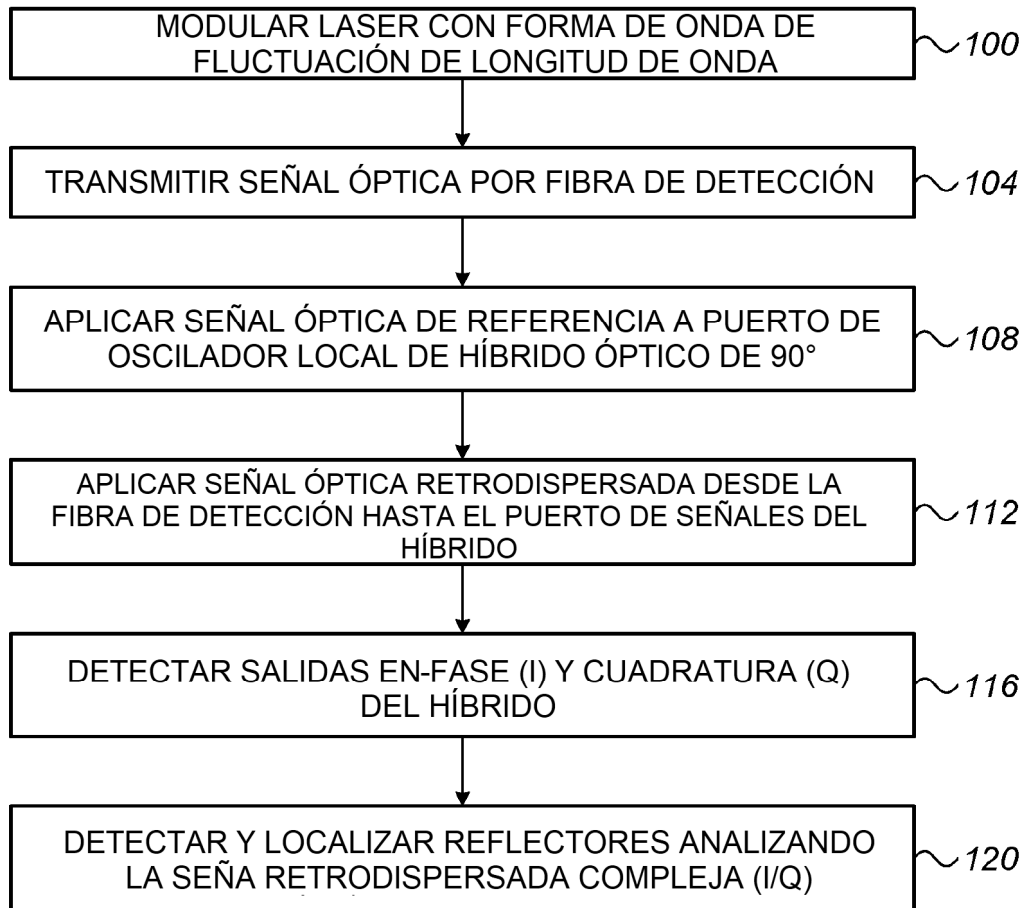


FIG. 3