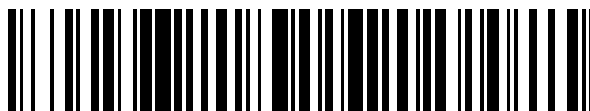


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 879 252**

51 Int. Cl.:

G01D 5/353 (2006.01)

G01H 9/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.01.2018** **PCT/EP2018/050793**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.07.2018** **WO18134137**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.01.2018** **E 18701282 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.03.2021** **EP 3571475**

54 Título: **Detección acústica distribuida**

30 Prioridad:

20.01.2017 GB 201700994

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

22.11.2021

73 Titular/es:

FOCUS SENSORS LTD. (100.0%)

77 Station Road

Netley Abbey SO31 5AE, GB

72 Inventor/es:

**ALFRED DENZIL AUSTIN, EDWARD y
ZHAO, WEIZHONG**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 879 252 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

Detección acústica distribuida

Esta descripción se refiere a sensores ópticos y, en particular, a la detección acústica distribuida que utiliza sensores basados en fibra óptica.

- 5 Los sensores basados en fibra óptica son conocidos por detectar diversos parámetros, incluidas señales acústicas, a través de cambios en la deformación de la fibra. Los sistemas se pueden caracterizar ampliamente por utilizar sensores discretos o distribuidos. Los sensores discretos se colocan normalmente una cavidad óptica dentro de la fibra óptica en la ubicación requerida del sensor. Los cambios de deformación de la fibra provocan un cambio en la longitud física de la cavidad óptica y, por tanto, la longitud de la fase óptica de la cavidad cambia para las señales ópticas que se propagan en la cavidad. La detección de señales de salida de la cavidad óptica permite inferir cambios de longitud de fase y, por tanto, detectar el parámetro de interés. Cada fibra puede proporcionar un número de ubicaciones de detección para permitir mediciones simultáneas desde múltiples ubicaciones. Una desventaja de los sensores discretos es que la posición y la longitud del calibre del sensor son fijas, lo que reduce la flexibilidad. Una aplicación común de tales sensores es en el lecho marino para detectar eventos sísmicos y, por lo tanto, no resulta práctico reposicionar los sensores para cambiar en particular una ubicación de detección.

Los sensores ópticos distribuidos no tienen una longitud de calibre definida o una posición del sensor, pero utilizan el análisis de las señales retornadas para inferir cambios de fase a lo largo de la fibra y, por lo tanto, detectar señales (generalmente acústicas). Por ejemplo, la retrodispersión de Rayleigh se puede utilizar como señal devuelta.

- 20 La figura 1 muestra un diagrama esquemático de un sensor óptico distribuido convencional comúnmente conocido como Sensor Acústico Distribuido (DAS). Un interrogador 10 lanza un pulso de luz de sonda 11 en un primer extremo de una fibra de medición 12. La fibra de medición 12 se coloca en el área en la que se requiere la detección. Una ventaja de los sensores ópticos, debido a la baja pérdida de fibra óptica, es la capacidad de colocar el interrogador en una ubicación diferente a la ubicación de detección. Por lo tanto, puede haber una longitud significativa de fibra de medición 12 que proporcione una entrada desde el interrogador 10 a la región de medición en la que no se toman mediciones.

- 25 A medida que el pulso 11 se propaga a través de la fibra óptica, una parte de la luz se dispersa mediante puntos de dispersión en la fibra óptica. Parte de esa luz dispersa es capturada por la apertura numérica de la fibra óptica y se propaga hacia el interrogador 10. El principal mecanismo de dispersión de interés es la dispersión de Rayleigh, que da como resultado una retrodispersión a la misma frecuencia que la luz que se propaga debido a colisiones elásticas con las ubicaciones de dispersión ("dispersores").

- 30 En el interrogador se recibe un pulso de retrodispersión 14. El tiempo de llegada al interrogador es proporcional a la distancia de ida y vuelta desde el interrogador hasta un punto a lo largo de la fibra. El pulso decae con el tiempo debido a pérdidas que aumentan a medida que aumenta la distancia. Tomando muestras del pulso 14 en momentos particulares, se puede determinar la retrodispersión de ubicaciones particulares a lo largo de la fibra. La perturbación de la fibra óptica afecta su estructura física (al nivel microscópico) y la velocidad de propagación de la luz y, por tanto, afecta al pulso de retrodispersión 14. Tales cambios pueden usarse para inferir la señal que perturba la fibra. Un DAS típico puede tener una resolución de 1 a 20 m a lo largo de una fibra de 1 a 40 km.

En un sistema típico, el pulso de sonda puede ser un pulso coherente de 10 ns, que en una fibra óptica típica tiene una longitud física de aproximadamente 2 m.

- 40 La figura 2 muestra un diagrama esquemático de un interrogador típico 10. El transmisor 20 emite pulsos de sonda y el receptor 21 comprende un sensor óptico y un sistema de muestreo para detectar los pulsos de retrodispersión. Un circulador óptico 22 acopla los pulsos de sonda del transmisor 20 en la fibra de medición 12 y acopla los pulsos de retrodispersión de retorno con el receptor 21.

- 45 A pesar de las ventajas de una longitud de calibre configurable y la ubicación del sensor, los sensores ópticos distribuidos adolecen de importantes desventajas. Su sensibilidad es significativamente menor que la de los sensores discretos, ya que la señal de retorno depende de eventos de dispersión débil, no de un reflector definido fuerte. Esta falta de sensibilidad puede ser tal que la sensibilidad sea insuficiente para determinar la deformación y, por lo tanto, detectar parámetros acústicos u otros. Los sistemas pueden tener sensibilidad cruzada para devolver la amplitud de retrodispersión, lo que conduce a distorsión y no linealidad en las mediciones de fase y, por lo tanto, en la deformación medida.

- 50 La retrodispersión se produce a partir de una serie de dispersores y la luz dispersada de cada dispersor se suma coherentemente para formar el pulso de retrodispersión. Dado que las ubicaciones de los dispersores son aleatorias, esta adición puede ser destructiva y no conducir a ninguna señal de retorno. Además, las ubicaciones de dispersión pueden cambiar con el tiempo, lo que da lugar a cambios en la adición y, por lo tanto, provocan el desvanecimiento de la señal con el tiempo. El desvanecimiento también puede ocurrir por efectos de birrefringencia.

Por lo tanto, se requieren sistemas mejorados de sensores ópticos distribuidos. Las realizaciones descritas a continuación no se limitan a implementaciones que resuelven cualquiera o todas las desventajas de los sistemas conocidos.

5 El documento WO2015/180786 describe un sistema de detección que transmite una pluralidad de pulsos ópticos a frecuencias distintas y detecta las correspondientes señales ópticas de salida limitadas en el tiempo.

El documento WO2016/039928 revela un sistema de detección acústica distribuida que opera transmitiendo pulsos ópticos a lo largo de una fibra óptica y detectando pulsos de retorno dispersos.

El documento US5,754,293 describe un sistema de detección óptica que utiliza una pluralidad de señales en diferentes frecuencias ópticas para detectar un cambio en la longitud de un sensor.

10 **Compendio**

Se proporciona un sistema de detección óptica, que comprende un generador de fuente configurado para generar un conjunto de n pulsos de sonda óptica alineados en el tiempo, cada pulso está en una frecuencia óptica distinta seleccionada de entre $f_1, f_2, \dots, f_n$, donde n es el número de pulsos y n es igual a 2 o más, cada frecuencia óptica está separada de su vecina por Δf , estando configurado el generador de fuente para transmitir los pulsos de sonda óptica a una fibra óptica de detección, en el que los pulsos de sonda óptica son retrodispersados por la fibra óptica de detección, al menos parte de la luz de retrodispersión capturada por la fibra óptica en una dirección inversa a la propagación de pulsos de sonda óptica, un receptor óptico sistema está configurado para recibir la luz retrodispersada de la fibra de detección óptica, en el que el sistema receptor óptico está configurado para mezclar una versión retardada de la luz retrodispersada con al menos una versión desfasada en frecuencia de la luz retrodispersada, en el que la frecuencia se desfasa en $-(\Delta f + f_m)$, donde f_m es una frecuencia predeterminada y f_m es menor que Δf . Además, se proporciona un método de detección de deformación en una fibra óptica de detección de acuerdo con la reivindicación 8.

En las reivindicaciones dependientes se expone una selección de características opcionales.

Breve descripción de los dibujos

25 Se describirán realizaciones de la invención, a modo de ejemplo, con referencia a los siguientes dibujos, en los que:

Las figuras 1 y 2 muestran diagramas esquemáticos de sistemas de detección óptica;

La figura 3 muestra un diagrama esquemático de pulsos lanzados y retrodispersados desde una fibra óptica de detección;

La figura 4 muestra una detección óptica utilizando pulsos de sonda y referencia;

30 La figura 5 muestra un conjunto de ejemplo de frecuencias ópticas;

La figura 6 muestra las señales de retrodispersión;

La figura 7 muestra un diagrama esquemático de las ubicaciones de dispersión óptica;

La figura 8 muestra un gráfico de fase óptica para un intervalo de ubicaciones de dispersión;

La figura 9 muestra un diagrama esquemático de un sistema de detección óptica y la arquitectura del receptor;

35 La figura 10 muestra un diagrama esquemático de un sistema de detección óptica que utiliza la mezcla de señales retrodispersadas y de señales retrodispersadas desfasadas en frecuencia;

Las figuras 11 y 12 muestran receptores para el sistema de la figura 10;

Las figuras 13 a 15 muestran ejemplos de procesos de procesamiento;

La figura 16 muestra los componentes de dispersión con referencia al desvanecimiento coherente entre pulsos;

40 La figura 17 muestra componentes de polarización;

Las figuras 18 a 21 muestran receptores de ejemplo para el sistema de la figura 10;

Las figuras 22 a 29 muestran fuentes de luz de ejemplo;

La figura 30 muestra un sistema que usa pulsos de compensación;

Las figuras 31 y 32 muestran un sistema de detección que usa una pluralidad de receptores;

45 La figura 33 muestra un sistema que usa detección directa; y

La figura 34 muestra un algoritmo de demodulación.

Descripción detallada

Ahora se describirán detalles, aspectos y realizaciones adicionales de la invención, a modo de ejemplo únicamente, con referencia a los dibujos. Los elementos de las figuras se ilustran por simplicidad y claridad y no necesariamente han sido dibujados a escala. Se han incluido números de referencia similares en los dibujos respectivos para facilitar la comprensión.

La figura 3 muestra un diagrama esquemático de pulsos de sonda y retrodispersión lanzados y devueltos a un interrogador 10 en un sistema similar a las figuras 1 y 2, pero configurado para transmitir pulsos de sonda como se describe a continuación.

El transmisor transmite un conjunto de pulsos de sonda 1010, 1020, 10n0 a diferentes frecuencias ópticas, estando cada frecuencia separada de su vecina por Δf . El ancho del pulso se muestra como T_p y la frecuencia de repetición como T_r . En el receptor se reciben una serie de pulsos de retrodispersión 1011, 1021, 10n0, nuevamente separados por Δf . En un sistema típico se pueden utilizar cientos de frecuencias. T_r y T_p se seleccionan para proporcionar la frecuencia de detección y el rendimiento requeridos. T_r también se selecciona dependiendo de la distancia máxima que se ha de detectar para evitar el solapamiento entre la señal de retrodispersión desde el extremo de la fibra, con la señal de retrodispersión del pulso de sonda subsiguiente al comienzo de la fibra de medición. Estas señales de retrodispersión de retorno se pueden usar en varios sistemas para mejorar los sistemas DAS de la técnica anterior como se describe a continuación.

La figura 4 muestra un diagrama esquemático de un sistema que utiliza señales de sonda como se describe en relación con la figura 3. El sistema puede denominarse reflectómetro en el dominio de la frecuencia. La salida de una fuente 300 está conectada al acoplador óptico 301 desde el cual una salida está conectada a la fibra de medición, y otra al receptor 42 para proporcionar una señal de referencia. El acoplador 301 puede ser un acoplador 50:50, o puede seleccionarse para dirigir una mayor porción de luz a la fibra de medición o al receptor con el fin de optimizar la relación señal/ruido.

La fuente 300 genera una señal óptica CW en una pluralidad de frecuencias, que son moduladas por un modulador acústico-óptico (AOM) 302 para generar pulsos de sonda 1010, 1020, 10n0 en $f_1, f_2 \dots f_n$, cada uno espaciado de su vecino por Δf . Se espera que n esté en cientos. Por ejemplo, n puede ser mayor que 50 o 100, dependiendo de los requisitos particulares del sistema.

Los AOM modulan la luz usando una señal de RF para difractar la luz que se propaga a través de un medio y, como resultado, la frecuencia de la luz de salida se desfasa por la frecuencia de RF. La frecuencia de RF para los AOM (f_{RF}) está típicamente en la región de 200MHz, y Δf puede seleccionarse de manera que $f_{RF} = (\Delta f + f_m)$, donde f_m es la frecuencia heterodina deseada. Las frecuencias ópticas enviadas por la fuente 40 vienen así dadas por $f_1 - (\Delta f + f_m), f_2 - (\Delta f + f_m) \dots f_n - (\Delta f + f_m)$. f_m suele ser pequeña en comparación con Δf , por ejemplo, unos pocos kHz. f_m podría elegirse para que sea cero, dando un sistema homodino.

Se puede elegir f_m para que sea $< 1/(T_r)$, permitiendo así una portadora heterodina separada para puntos a lo largo de la fibra de medición.

Los pulsos de sonda 1010, 1020, 10n0 pueden amplificarse 303 y filtrarse 304 antes de ser lanzados a la fibra de medición 1 a través del circulador óptico 2. La retrodispersión de retorno es acoplada por el circulador 2, opcionalmente a través de un amplificador 305 y un filtro 306, con el acoplador óptico 307. En el acoplador 307, la luz de retrodispersión se mezcla con la luz no modulada de la fuente 300 y se dirige al receptor 42.

En el receptor, los pulsos de retrodispersión en $f_1, f_2 \dots f_n$ se mezclan con las señales ópticas CW de la fuente (transmitidas a través de los acopladores 301, 307) en $f_1 - (\Delta f + f_m), f_2 - (\Delta f + f_m) \dots f_n - (\Delta f + f_m)$, como se muestra gráficamente en la figura 5. Cada frecuencia devuelta se mezcla con su frecuencia superior adyacente de la fuente generando una frecuencia heterodina de f_m , modulada en fase por cambios de fase en la luz retrodispersada causada por cambios en los dispersores que provocan la retrodispersión.

Considérese una longitud de calibre en la fibra de prueba correspondiente a la retrodispersión que regresa al interrogador con un retardo t_1 relativo al pulso de lanzamiento. Como se muestra en la figura 6, cada pulso de lanzamiento muestra una instantánea de la retrodispersión de este calibre. Las muestras posteriores se acumulan en una portadora con una frecuencia heterodina f_m , como se muestra en la figura, debido a que la diferencia de fase entre la fuente local y la retrodispersión retornada aumenta en 2π a la frecuencia f_m , por lo que circula a través de la interferencia constructiva y destructiva a una frecuencia de f_m . Cambia en la fase óptica total dentro de la fibra de prueba hasta el momento t_1 de sumar o restar de esta diferencia de fase total, cambiando el momento en el que ocurre la interferencia constructiva o destructiva y, por lo tanto, provocando modulaciones de fase en la portadora. De esta manera, la fase del portador heterodino con respecto al desfaseamiento f_m ($\phi(t_1)$) es una medida de los cambios de deformación integrados en la fibra de prueba hasta la distancia a lo largo de la fibra correspondiente a t_1 . Para calcular el cambio de fase dentro de la longitud de calibre (es decir, la longitud de la fibra recorrida durante un tiempo Δt) calculamos $\phi(t_1) - \phi(t_1 - \Delta t)$.

Como se señaló anteriormente, la luz retrodispersada se suma coherentemente a partir de una pluralidad de dispersores y, por lo tanto, puede sumar destructivamente de manera que no haya una señal de retorno que pueda medirse. Como se explica en detalle a continuación, el uso de un gran número de pulsos de sonda a frecuencias discretas puede reducir la probabilidad de que se produzca una adición destructiva.

- 5 El desvanecimiento coherente ocurre cuando se superpone la dispersión de múltiples dispersores para generar poca o ninguna señal de retrodispersión en el detector óptico. Cuando no se recibe retrodispersión de una sección de fibra, no se pueden realizar mediciones o se reduce la SNR. Este efecto es claramente indeseable.

La figura 7 muestra una sección de la fibra de medición, con la luz de sonda 70 propagándose de izquierda a derecha y la retrodispersión 71 volviendo de derecha a izquierda. El pulso de sonda tiene una duración T_p , típicamente del orden de 10 a 100 ns. La retrodispersión puede muestrearse durante el período T_d . Los dispersores 72 se distribuyen aleatoriamente a través de la fibra con un retraso medio entre los dispersores significativamente más corto que T_d . Cada ubicación proporciona un reflejo, cada uno de los cuales se suma de manera coherente. Cada muestra representa la superposición de todas las reflexiones iluminadas por el pulso de longitud T_p , durante el período de tiempo de ventana T_d . De esta manera, los dispersores dentro de una longitud de fibra correspondiente a $T_p + T_d$ contribuyen a la potencia de luz total muestreada durante T_d . Sin embargo, los dispersores correspondientes a las duraciones $T_d/2$ al principio y al final del pulso no se iluminan durante todo el tiempo de observación, por lo que pueden ignorarse.

La figura 8 muestra esquemáticamente la fase óptica ϕ_p con respecto a una referencia para la frecuencia óptica q de la ubicación de dispersión p . Para los propósitos de esta discusión se asume que todos los dispersores regresan con la misma potencia. La figura 8 representa dos frecuencias, 1, 2 y seis dispersores 1-6. Como puede verse visualmente en la figura 8, la fase de cada frecuencia de un dispersor particular es diferente, como era de esperar, y la diferencia aumenta con el tiempo (distancia a lo largo de la fibra). El retardo de tiempo de cada reflexión con respecto a la referencia es d_p , tal que:

$$\phi_p^2 = \phi_p^1 + 2 \cdot \pi \cdot d_p / \Delta f$$

- 25 Como el láser es coherente sobre T_p , puede ignorarse el número de 2π dentro de cada retardo de fase de dispersión, de modo que $-\pi < \phi_p \leq \pi$. Por lo tanto, para que una frecuencia de sonda se desvanezca por completo (es decir, sin señal de retorno), para cada dispersor p debe existir otro dispersor j con fases opuestas, de modo que $-\phi_p = \phi_j$ o

$$\sum_p \phi_p^1 = 0$$

- 30 Se puede seleccionar Δf de modo que la diferencia de fase entre la luz en f_1 y f_2 varíe menos de 2π dentro de T_d (es decir, $\Delta f < (1/T_d)$). Entonces es incluso menos probable que la retrodispersión tanto de f_2 como de f_1 se cancele por completo al mismo tiempo. Para los dispersores donde ϕ_p^1 es suficientemente pequeño para que $\phi_p^2 > \phi_p^1$, no puede existir un j tal que $\phi_j^2 = -\phi_p^2$, es decir

$$\sum_p \phi_p^2 - \sum_p \phi_p^1 = \sum_p \left(\phi_p^1 + 2 \cdot \pi \cdot d_p / \Delta f \right) - \sum_p \phi_p^1 = \sum_p 2 \cdot \pi \cdot d_p / \Delta f \neq 0$$

- 35 Para dispersores donde ϕ_p^1 , es lo suficientemente grande para envolver una oscilación, tal que $\phi_p^2 < \phi_p^1$, la situación es más compleja. Se puede demostrar que el conjunto de dispersores que logran un desvanecimiento coherente en ambas frecuencias es pequeño.

Si se supone que los dispersores están distribuidos en promedio uniformemente a través de las secciones iluminadas T_d dentro de T_p , entonces en promedio la retrodispersión será fuerte en f_2 cuando la retrodispersión en f_1 se desvanece principalmente si la diferencia de fase entre ellos es π en el tiempo T_d , (es decir, $\Delta f = 1/(2 \cdot T_d)$). De esta manera, los pares de dispersores del principio y final de T_d , que se superponen para no generar luz en f_1 , se superponen para generar luz fuerte en f_2 . De esta manera, un sistema que usa dos frecuencias coherentes con una frecuencia de diferencia apropiada puede ser ampliamente inmune al desvanecimiento coherente.

- 45 En sistemas típicos, con T_d en la región de 4ns, un óptimo de $\Delta f = 1/(2 \cdot T_d)$ es 125MHz (un intervalo de 100 – 600 MHz puede ser apropiado para ciertos ejemplos). En algunos casos, T_d puede ser significativamente más largo para mejorar la SNR en el receptor. Esto puede conducir a valores Δf óptimos más bajos que se encuentran dentro de la banda de detección deseada, lo que hace imposible discriminar entre las perturbaciones cercanas en la fibra óptica.

En este caso, se puede usar una configuración de $\Delta f = (2v + 1)/(2 \cdot T_d)$, donde v es cualquier número entero que muy probablemente proporcione una fuerte retrodispersión de f_2 si f_1 se desvanece, lo que permite realizar mediciones.

En la práctica, la ventana de muestreo a través de T_d puede no ser rectangular, por lo que puede ser necesario un ajuste de Δf y T_d para minimizar el desvanecimiento.

- 5 El mismo principio se puede invertir para crear pulsos compuestos que tienen más probabilidades de sufrir un desvanecimiento coherente intrapulso que los pulsos de frecuencia única, estableciendo $\Delta f = v/T_d$ donde v es cualquier número entero distinto de cero (por ejemplo). Esto puede ser útil para crear sensores distribuidos donde los cambios en la deformación de la fibra provocan intencionalmente cambios en la magnitud de la retrodispersión desde cada punto de la fibra, que se decodifican directamente, como se muestra en la figura 33. A diferencia de otros sistemas descritos en la presente memoria, los pulsos de retrodispersión que retornan se detectan directamente en 309 (después del filtrado y amplificación opcionales en 305, 306).

- 15 Por tanto, se pueden determinar los cambios en la amplitud de los pulsos de retorno, pero no se puede extraer la información de fase. En ausencia de información de fase, la relación no lineal entre la deformación y la amplitud no se puede decodificar y, por lo tanto, no se pueden realizar mediciones cuantitativas de los cambios de deformación. Sin embargo, el sistema proporciona una indicación de que la deformación ha cambiado en una ubicación particular (la ubicación se determina a partir del tiempo de ida y vuelta). La información de que ha ocurrido un cambio de alguna forma puede ser útil en ciertas aplicaciones, particularmente en combinación con una medición a lo largo del tiempo que indica la frecuencia del cambio.

- 20 Volviendo a la realización de desvanecimiento mínimo, para una cancelación perfecta, la fibra debe capturar la misma potencia de cada reflejo. La probabilidad de un desvanecimiento coherente perfecto es pequeña, pero puede ocurrir. Sin embargo, no se requiere un desvanecimiento perfecto para degradar el rendimiento, ya que cualquier cantidad de desvanecimiento reduce los niveles de señal y, por lo tanto, reduce la relación señal/ruido.

En el ejemplo anterior, se han considerado dos frecuencias, pero la probabilidad de desvanecimiento completo puede reducirse aún más aumentando el número de frecuencias ópticas.

- 25 En el receptor, solo la luz en la misma polarización interfiere para agregar coherentemente y dar las señales requeridas. Por lo tanto, se requiere una alineación de polarización entre las señales de retroceso y la señal de referencia de la fuente. La birrefringencia en las fibras y los componentes puede provocar cambios en la polarización de la luz que se propaga. Aunque la polarización se puede ajustar para adaptarse a cambios lentos que afectan a toda la retrodispersión, la polarización también puede cambiar más rápidamente de lo que se puede acomodar (por ejemplo, dentro de cada traza de retrodispersión), lo que lleva al desvanecimiento por polarización de las señales recibidas. La temperatura y la deformación pueden causar variaciones en la birrefringencia, lo que conduce a una sensibilidad cruzada no deseada de la SNR de medición a la temperatura, vibraciones e incluso cambios de deformación que se pretenden medir.

- 35 La figura 9 muestra un diagrama esquemático de un sistema que utiliza los mismos principios descritos anteriormente, pero incluye un medio para mitigar el desvanecimiento por polarización. La fuente 300 genera una matriz de frecuencias espaciadas en Δf , como se describió anteriormente, pero en este ejemplo las frecuencias vecinas tienen polarizaciones diferentes (pero no ortogonales). Los componentes mostrados en la figura 9, con los mismos números de referencia que se encuentran en la figura 4, proporcionan funciones equivalentes. Si la birrefringencia no genera luz polarizada circularmente, las frecuencias vecinas pueden ser ortogonales.

- 40 En el receptor 91, la luz de la fuente 300 se divide por el acoplador 310 hacia los acopladores 311, 314. Una salida de cada acoplador 311, 314 se conecta a un detector 313, 316. Las señales de retrodispersión de la fibra de medición se dividen mediante el acoplador 318 hacia los acopladores 311, 314. Uno de las rutas incluye un controlador de polarización 317 que gira en 90° la polarización de la luz de retrodispersión. El controlador de polarización de ejemplo 317 también podría colocarse en cualquiera de las otras tres rutas.

- 45 Como los componentes de frecuencia vecinos (que interfieren en el receptor como se describió anteriormente) no están polarizados ortogonalmente, en ausencia de birrefringencia, aparecerán interferencias tanto en 313 como en 316. Siempre que el generador de fuente produzca luz con componentes de cada polarización (incluidos componentes polarizados circularmente), no importa entonces la birrefringencia de los componentes y la fibra de prueba, la interferencia siempre aparece en 313 o 316 o en ambos, y siempre se pueden realizar mediciones. Las polarizaciones lineales y circulares son transmitidas por el generador de fuente. Es posible que la birrefringencia forme una placa de un cuarto de onda para convertir la polarización lineal en circular en algún punto a lo largo de la longitud de la fibra. Si solo se lanzan polarizaciones lineales, esto puede evitar la interferencia (debida a que se bate una polarización lineal contra una circular). La transmisión de polarizaciones tanto lineales como circulares evita esta limitación.

- 55 Como se señaló anteriormente, los sistemas descritos con referencia a la figura 4 funcionan como un reflectómetro de dominio de frecuencia, comparando la luz de retrodispersión con una referencia directamente de la fuente. Tal sistema es simple y tiene una alta resolución espacial, pero también tiene desventajas. El sistema depende de una frecuencia de fuente estable y los cambios en esa frecuencia durante el período de retrodispersión son indistinguibles de los cambios de deformación que se están midiendo. Además, la medida de cada longitud de calibre se determina a partir

de la diferencia entre la deformación integrada a lo largo de toda la longitud de la fibra hasta el inicio de la longitud de calibre particular y la deformación integrada hasta el final de la longitud de calibre particular. Los errores en cualquiera de las mediciones, por ejemplo debido a un cambio de fase más allá de la frecuencia instantánea máxima que puede ser demodulada, en cualquier punto a lo largo de la fibra, conduce a una medición errónea. Es decir, un cambio excesivo en cualquier punto de la fibra conduce a un error en todas las distancias mayores.

La figura 10 muestra un diagrama de un sistema en el dominio del tiempo que utiliza principios similares a los del sistema de la figura 4, pero que puede superar algunas de las dificultades señaladas anteriormente del sistema en el dominio de la frecuencia. En particular, se calcula el cambio de deformación entre dos puntos que limitan la longitud del calibre, independientemente de los cambios de deformación en otras ubicaciones a lo largo de la fibra de medición.

La fuente 201 es equivalente a la fuente 300 y genera una matriz de frecuencias ópticas CW (al menos dos, pero típicamente cientos) espaciadas en Δf . La salida de CW está modulada por el modulador 202, que puede ser un AOM. Sin embargo, en este ejemplo no se requiere el desfasamiento de frecuencia utilizado anteriormente y, por lo tanto, se puede utilizar cualquier tipo de modulador. Los pulsos de sonda 1010, 1020, 10n0 del modulador 202 tienen una duración de T_p y un período de repetición T_r . Los impulsos de sonda 102 se acoplan con la fibra de medición mediante el circulador 2, que también acopla la luz retrodispersada que retorna al receptor 208. Pueden utilizarse amplificadores opcionales 203, 205 y filtros de paso de banda 204, 207 para mejorar la relación señal/ruido.

Se pueden controlar la temperatura y la vibración de una bobina de referencia de fibra 209 para proporcionar una referencia de señal cero.

La figura 11 muestra un módulo receptor de ejemplo para su uso como receptor 208 en el sistema de la figura 10. La retrodispersión entrante en la entrada 110 se divide en tres vías mediante el acoplador óptico 111. Una primera ruta óptica se retarda un tiempo T_i en el elemento de retardo 213. Una segunda ruta óptica comprende un desfasador descendente 211 que desfasa hacia abajo la frecuencia óptica en $(\Delta f + f_m)$, y un desfasador ascendente 212 en la tercera ruta óptica desfasa la frecuencia hacia arriba en $(\Delta f + f_m)$. El desfasador ascendente 212 y el desfasador descendente 211 pueden ser AOM ejecutados en un modo CW para proporcionar modulación de frecuencia, pero no modulación en amplitud.

Las señales de desfasadas hacia abajo y retardadas se combinan en el acoplador óptico 115 y son recibidas por el detector 214. De manera similar, las señales de desfasadas hacia arriba y retardadas se combinan en el acoplador óptico 117 y son recibidas por el detector 215.

En el detector 214, la luz retrodispersada retardada en f_{k+1} interfiere con la luz retrodispersada no retardada (pero desfasada hacia abajo en la frecuencia óptica) en f_k , para producir una portadora heterodina f_m . Cada par de frecuencias se combinan de esta manera para formar la portadora. De manera similar, en el detector 215, la luz retrodispersada retardada en f_{k-1} interfiere con la retrodispersión no retardada (pero desfasada hacia arriba en la frecuencia óptica) en f_k para producir también una portadora heterodina en f_m . Las combinaciones generadas se muestran en la mitad inferior de la figura 11.

Pueden incluirse controladores de polarización opcionales 209, 210 para tener en cuenta la birrefringencia dentro de los componentes ópticos del receptor. El desfasador descendente 211 o el desfasador ascendente 212 pueden configurarse para impartir una diferencia de fase en la señal de modo que se presente una diferencia de fase arbitraria entre las señales de los detectores 214, 215, lo que puede proporcionar ventajas al proceso de codificación.

El sistema receptor de la figura 11 puede aislarse de las vibraciones y estabilizarse la temperatura para evitar cambios en las longitudes relativas de la ruta que provocarían errores en las mediciones.

La figura 12 muestra una estructura de receptor alternativa a la de la figura 11 en la que el retardo se aplica tanto a las rutas con cambios ascendentes como descendentes, en lugar de a la ruta sin cambios. El funcionamiento del receptor de la figura 12 es como se describe en relación con la figura 11.

Como se explicó anteriormente, el desvanecimiento intrapulso se puede minimizar estableciendo Δf y el tiempo de observación T_d de tal manera que es poco probable que ambas frecuencias adyacentes se desvanezcan. De esta manera, si 1011 + 1022 que aparecen en el detector 214 se desvanecen, porque 1011 o 1022 se superpusieron a cero, entonces es muy poco probable que 1021 y 1012, que se unen en el detector 215, se desvanezcan. Por lo tanto, siempre debe estar presente una señal en uno de los detectores 211 o 213.

Sin embargo, debido a que en las realizaciones en el dominio del tiempo se tiene una combinación de retrodispersores retardados y no retardados, también se debe considerar el desvanecimiento coherente entre pulsos (figura 16). Debido a que el reflectómetro en el dominio del tiempo superpone la luz de retrodispersión con retrodispersión retardada procedente de más lejos a lo largo de la fibra de prueba, es posible que los componentes de los retrodispersores retardados y no retardados interfieran destructivamente, sin generar luz. Esta posibilidad se puede minimizar optimizando la frecuencia de diferencia Δf y el tiempo de retardo T_i . Considérese la combinación 1011+ 1022 en el detector 214. Si esta combinación genera interferencia destructiva, entonces los retrodispersores de 1011 deben sumar destructivamente con retrodispersión retardada desde 1022, habilitado por el retraso experimentado por la luz de frecuencia f_2 a través de T_i . Para la combinación equivalente en el detector 215 1012 + 1021, el retardo T_i es

experimentado por luz de frecuencia f_1 . Si la diferencia de frecuencia Δf se establece tal que $\Delta f = 1/(2 \cdot T_1)$, entonces la combinación 1012 + 1021 en el detector 215 debe sumar de manera constructiva. De esta forma, se puede minimizar el desvanecimiento coherente entre pulsos. Como antes, puede ser necesario un ajuste ligeramente subóptimo donde $\Delta f = (1 + 2w)/(2 \cdot T_1)$ donde w es un número entero.

- 5 Cuando se generan varios cientos de tonos de frecuencia, puede ser aconsejable desintonizar ligeramente de este ajuste, de modo que es poco probable que las combinaciones en f_1, f_3, f_5 , etc. se desvanezcan todas a la vez.

La figura 13 muestra un algoritmo de demodulación para realizar mediciones utilizando señales de los detectores mostrados en los receptores de las figuras 11 y 12. Este algoritmo de ejemplo se basa en disponer una diferencia de fase de 180 grados entre las portadoras observadas en los detectores 116 y 118, de modo que se logre una señal de portadora máxima cuando se restan las señales de los dos detectores 214 y 215. Esto da la ventaja de reducir el efecto del ruido de modo común, por ejemplo, ruido de frecuencia en la electrónica de mando del desfase ascendente/descendente. Las señales restadas de 502 se dividen y entran en 1 o más módulos de recogida de muestras (508, 510, 513, 516). Estos módulos extraen la retrodispersión de momentos que se corresponden con áreas de interés en la fibra de prueba (llegando a los detectores con retardos t_x en relación con los pulsos de sonda) y descartan el resto. Los módulos de recogida de muestras también pueden realizar promedios o filtrado según sea necesario. Los módulos 509, 511, 514 y 517 calculan la fase de las señales que existen en los módulos de recogida de muestras con respecto a una referencia de portadora en f_m .

En la figura 14 se muestra un ejemplo de módulo de demodulación de fase en cuadratura estándar que usa arco tangente. La fase demodulada representa el cambio de fase dentro del tiempo T_d en puntos de la fibra de prueba. El retorno de la retrodispersión con un retardo t_0 corresponde a la fibra de referencia no sensible, por lo que el ruido láser se puede reducir quitando esta señal de las señales demoduladas de otros puntos de la fibra, para obtener las señales de fase final 512, 515 y 518. Claramente, un número arbitrario de puntos de interés q , hasta un máximo de T_r/T_1 , se puede demodular de esta manera agregando más módulos de recogida de muestras y de demodulación de fase.

Con el tiempo, el retardo de fase y la birrefringencia de las fibras ópticas, se desviarán lentamente los componentes y las fuentes dentro del interrogador, por lo que es necesario realizar pequeños ajustes de los parámetros de funcionamiento del sistema para un mejor funcionamiento continuo. ϕ_{AOM} , la diferencia de fase impuesta por los módulos de desfase ascendente y descendente en el receptor, se recortará para mantener portadoras f_m antifase en los detectores 214 y 215. Esto se logra minimizando la portadora de modo común recibida de la bobina de referencia. La unidad sumadora 503 añade luz de los detectores 214 y 215. El recogedor de muestras 504 extrae la retrodispersión relacionada con la bobina de referencia. El módulo 505 extrae la magnitud de la potencia en la frecuencia portadora f_m .

Como se mencionó anteriormente, solo los componentes de luz de polarización similar se superponen para generar interferencia. Por lo tanto, existe la posibilidad de que la birrefringencia en la fibra óptica de prueba 1 y los componentes interconectados puedan conspirar de tal manera que no se genere luz de interferencia en los detectores 214 y 215. Esto se puede superar configurando el controlador de polarización 209 y 210 para compensar cualquier birrefringencia residual en el interferómetro del receptor. El generador de fuente se puede configurar entonces de manera que las frecuencias de los componentes de luz vecinos tengan una polarización relativa de 45 grados, con la polarización inicial configurada de tal manera que los componentes de luz de cada estado de polarización se lancen en el pulso compuesto. Como se muestra en la figura 17 para un par de componentes de frecuencia, sin importar la birrefringencia de la fibra de prueba, se observa interferencia en al menos un detector.

La figura 15 muestra un ejemplo de módulo de medición de magnitud de portadora. La fuerza de la portadora recibida se filtra en paso bajo por 506. Un módulo de retroalimentación 507 ajusta la diferencia de fase impuesta por los desfases ascendentes y descendentes ϕ_{AOM} de modo que la señal mínima sea emitida desde el módulo 506, asegurando así que las portadoras aparezcan en los dos detectores en antifase.

La figura 34 muestra un algoritmo de demodulación alternativo que combina por separado señales de los detectores. Aquí, la retrodispersión correspondiente a cada punto de la fibra de prueba se determina por separado desde cada uno de los detectores, lo que da como resultado dos corrientes de muestra recogidas para cada punto de interés en la fibra de prueba. A continuación, se determina la fuerza de la portadora dentro de cada uno de los flujos de muestra recogidas. Un paso de combinación selecciona o combina la retrodispersión de dos (o más) corrientes de muestras portadoras recogidas resultantes, para proporcionar una portadora codificada de una sola fase. Por ejemplo, el paso de combinación puede elegir la corriente de muestra recogida que se corresponda con la mayor magnitud de portadora. La portadora codificada de fase única combinada se demodula luego para representar cambios en la deformación en un punto particular de la fibra de prueba.

En resumen, estas disposiciones tienen una serie de ventajas:

- 55 1. Muchas combinaciones de frecuencias de componentes contribuyen cada una de ellas a la portadora f_m . Esto mejora la sensibilidad porque
- i. La potencia que se puede lanzar a una sola frecuencia está limitada generalmente por la Dispersión de Brillouin Estimulada y otros efectos no lineales. Debido a que el pulso compuesto consta de muchas frecuencias diferentes, la

potencia total que puede ser lanzada por el sistema descrito en la presente memoria excede con mucho la potencia que podría lanzarse por un sistema de frecuencia única. Esto conduce a una mayor potencia de retrodispersión y una mejor SNR.

ii. Debido a que una mayor proporción de la banda de detección óptica está ocupada por una señal deseada, la SNR de detección se mejora en comparación con los sistemas de frecuencia única.

iii. La detección diferencial elimina el efecto de las señales de modo común en los detectores, por ejemplo, ruido del desfasador, interferencia eléctrica y algunos de los ruidos ópticos.

2. Como se explicó anteriormente, al establecer Δf en un valor apropiado, la posibilidad de que se desvanezca la retrodispersión de ambas frecuencias vecinas se puede hacer muy pequeña. Dado que diferentes pares de retrodispersión forman la portadora en cada detector 214 y 215, en términos prácticos es imposible que se pueda desvanecer la luz de ambos detectores.

3. Al lanzar frecuencias vecinas con un estado de polarización relativo de 45 grados o próximo, la luz de 214 y 215 debe contener interferencia, independientemente de la birrefringencia en la fibra fuente durante el tiempo de retardo T_i . Si la birrefringencia hace que una luz de (por ejemplo) 1011 sea ortogonal a 1022, sin generar luz de interferencia a partir de esa combinación en el detector 214, entonces esa misma rotación debe causar que 1021 + 1012 genere luz de interferencia en 215. (La birrefringencia experimentada por la luz de diferencia de frecuencia alrededor de Δf será muy similar).

4. Una diferencia de fase puede imponerse mediante los desfasadores 211 y 212, de tal modo que la portadora f_m recibida en 214 y 215 puede tener una diferencia de fase arbitraria. Puede ser necesario un sistema de retroalimentación para compensar los cambios en la óptica del receptor y mantener la diferencia de fase requerida en los detectores 214 y 215. Esta diferencia de fase puede usarse de dos maneras.

i. Cuando se requiera la menor susceptibilidad al desvanecimiento y el ruido más bajo, una diferencia de fase de 180 grados permitirá que se forme una portadora fuerte cuando se tome 214 de 215, reduciendo así el ruido como se describió en detalle anteriormente.

ii. Cuando se requiera el intervalo dinámico más alto, una diferencia de fase de 90 grados permitirá decodificar el cambio de deformación dentro de cada parte de la fibra sin necesidad de hacer referencia a muestras anteriores mediante detección en cuadratura.

Alternativamente, la luz no retardada puede superponerse con luz retardada y disminuida o retardada y aumentada como se muestra en la figura 12.

La figura 18 muestra un ejemplo de implementación física de un receptor en el dominio del tiempo como se describió funcionalmente anteriormente en relación con las figuras 11 y 12.

La luz de retrodispersión recibida se divide por el acoplador 210, y cada salida dirige la luz a través del sistema en direcciones opuestas. Los acopladores 211, 221 dividen la luz respectiva, con una primera parte siguiendo la ruta de derivación 180 que puede incluir un atenuador opcional 212 para ajustar los niveles de potencia. Las otras salidas de los acopladores 211, 221 acoplan la luz en un par adicional de acopladores 214, 219 que dividen la luz entre dos rutas direccionales. Los aisladores ópticos 217, 218 limitan la propagación de la luz en la dirección requerida en cada ruta. Los aisladores se pueden colocar en cualquier orden apropiado con los otros componentes en cada ruta. Por ejemplo, puede ser preferible ubicar cada aislador en el extremo de entrada de cada ruta para evitar reflejos de los desfasadores 215, 216 o de los controladores de polarización 226, 227. El desfasador 215, por ejemplo, un AOM, aumenta la frecuencia óptica de la señal en $\Delta f + f_m$, y el desfasador 216, por ejemplo, un AOM, reduce la frecuencia óptica en $\Delta f + f_m$.

La luz desfasada hacia arriba y hacia abajo se propaga en la dirección opuesta a través de los acopladores 211, 214, 219, 221 y se recibe en los receptores 223, 225 donde la luz se mezcla de forma coherente con la que atraviesa la ruta de derivación 180.

La figura 19 muestra una implementación física adicional de un receptor en el dominio del tiempo. La luz de retrodispersión recibida se divide en tres componentes por el acoplador 3x3 231. Un componente se dirige a través de la bobina de retardo 232 que tiene retardo ($T_i/2$) y sobre un espejo de Faraday 233. El retorno de la luz al acoplador 231 ha sido así retrasado en T_i . El espejo de Faraday mitiga cualquier efecto de birrefringencia en la bobina de retardo 232.

Las otras dos salidas del acoplador 231 están dirigidas respectivamente a un desfasador ascendente 238 y un desfasador descendente 234, cada uno de los cuales puede ser un AOM como se describió anteriormente. La luz desfasada hacia arriba y hacia abajo se combina con luz retardada en los acopladores 235, 240 y se dirige a los receptores 237, 242 para su detección. Pueden incluirse controladores de polarización opcionales 239, 241 para asegurar la alineación de las polarizaciones de señales retardadas y desfasadas en los detectores 237, 242. El receptor de la figura 19 genera así las combinaciones requeridas de señales en los detectores.

La figura 20 muestra una implementación física adicional de un receptor en el dominio del tiempo. La luz de retrodispersión recibida se divide por el acoplador 250. Una salida del acoplador 250 está acoplada con el acoplador 251 que divide la luz en una ruta de retardo 254 y una ruta de desfase descendente. La otra salida del acoplador 250 está acoplada con el acoplador 257 que divide la luz en una ruta de retardo 254 y una ruta de desfase ascendente.

La ruta de desfase comprende un AOM 252 y un espejo de Faraday 253. La luz pasa por la ruta de desfase, es desfasada hacia abajo en frecuencia óptica en dos pasadas a través del desfase descendente 252 y vuelve al acoplador 251. El AOM 252 se opera a una frecuencia de RF de $(\Delta f + f_m)/2$, lo que proporciona un desfase de frecuencia total de $(\Delta f + f_m)$. La luz desfasada hacia abajo se mezcla con luz retardada en el acoplador 251 y se pasa al detector 261 donde se mezcla coherentemente y es detectada. De manera similar, el AOM 256 desfasa la luz hacia arriba y se mezcla con la luz retardada en el receptor 259, generando así los componentes requeridos. Puede incluirse un controlador de polarización opcional 262 para eliminar la birrefringencia en el sistema receptor.

La figura 21 muestra otro ejemplo de un receptor, que utiliza solo un desfase. La luz de retrodispersión recibida se acopla con el acoplador 270, una salida del cual está conectada a la primera ruta de derivación 282. La otra salida del acoplador 270 está conectada al AOM 271 que desfasa la frecuencia en $\Delta f + f_m$ (ya sea hacia arriba o hacia abajo). Un acoplador adicional 272 dirige la luz desfasada al espejo de Faraday 273, que refleja la luz a través del AOM 271 y a través del acoplador 270 hacia la segunda ruta de derivación 283. La otra salida del acoplador 272 acopla la luz a través del elemento de retardo 274 y luego a través de los acopladores 275, 276, 277 a los detectores 279, 281. En el detector 279, la luz desfasada y retardada se mezcla con la luz no desfasada y no retardada a través de la ruta de derivación 282. En el detector 281, la luz desfasada y retardada dos veces se mezcla con luz cambiada desfasada una sola vez. En ambos detectores, por lo tanto, hay una mezcla de componentes con un Δf entre ellos. Los controladores de polarización opcionales 283 y 282 están configurados para compensar la birrefringencia en el sistema óptico. La figura 22 muestra un ejemplo de generador de fuente de frecuencia de dos componentes. La luz de un láser de ruido de baja frecuencia 101 se divide mediante el acoplador 111 en dos componentes. Una ruta es desfasada en frecuencia en Δf por AOM112. La luz restante de 111 pasa a través del atenuador 115 opcional para equilibrar la amplitud del componente y el controlador 116 de polarización opcional, que se puede usar para establecer una diferencia entre la polarización de los dos componentes de la fuente de frecuencia. Las dos rutas se vuelven a combinar mediante el acoplador 117, a través del aislador 118 opcional, más tarde hacia la salida.

La figura 23 muestra un generador de fuente alternativo que produce tres componentes de frecuencia. La luz de la fuente de láser 131 se divide por el acoplador 132 de 3x3. Parte de la luz de salida se refleja sin desfase a través del FRM 133. La parte restante se dirige a través del desfase ascendente AOM137 y mediante el desfase de polarización 138 y es reflejada por el FRM 139 de regreso al acoplador 132. De esta forma aparecen tres componentes de luz en la salida. Al detectar componentes en Δf , la luz en el detector 133 se puede utilizar para equilibrar la potencia de los tres componentes. Los rotores de polarización 138 y 135 se pueden usar para establecer la polarización relativa de los tres componentes.

La figura 24 muestra un segundo ejemplo de configuración para generar frecuencias de tres componentes. Aquí la luz procedente de una fuente de láser de ruido de baja frecuencia 141 se divide por el acoplador 142. Parte de la luz se divide adicionalmente mediante el acoplador 143. Una parte no desfasada de la luz continúa a través de los acopladores 146 y 149, a través del aislador opcional 152 hacia la salida. Una parte adicional de la luz es desfasada por AOM 144, la polarización es ajustada por el controlador 145, luego recombinada para llegar a la salida. Una ruta adicional a través del acoplador 142 y AOM 147 (que se elige para desfasar la luz en el sentido opuesto al AOM 144) y el control de polarización 148 para aparecer en la salida. Los controladores de polarización se pueden usar para generar cualquier polarización relativa deseada entre los componentes. El componente Δf en 150 y 151 se puede supervisar para equilibrar la magnitud de la salida en las tres frecuencias.

La figura 25 muestra otra opción para generar tres componentes de frecuencia. La luz del láser 161 es dividida por el acoplador 162. Parte de la luz emergente no desfasada es reflejada por 170, a través del acoplador 162, mediante el aislador opcional 171 hacia la salida. 170 puede ser un espejo rotatorio de Faraday, para eliminar el efecto de birrefringencia en los componentes ópticos. La luz restante de 162 se dirige al acoplador 163, donde se divide aún más. Parte de la luz se desfasa hacia arriba en 164, la parte restante se desfasa hacia abajo en 167 y se refleja hacia la salida en 166 y 169, que pueden ser FRM. Los desfases de polarización opcionales, 165 y 168, que pueden ser rotores de Faraday, permiten que los componentes tengan una polarización relativa según se desee.

La figura 26 muestra una configuración de ejemplo para generar múltiples frecuencias basadas en un bucle de recirculación. La luz del láser de ruido de baja frecuencia 101 se acopla con el bucle mediante el acoplador 102. Parte de la luz continúa a través del AOM 103, donde es desfasada por Δf . El amplificador 104 compensa la pérdida del bucle, el filtro 105 limita el número de frecuencias generadas y mejora la SNR. El acoplador 106 divide parte de la luz del bucle hacia la salida a través del aislador opcional 110. La luz restante es acoplada por el aislador opcional 107 a través del rotador de polarización opcional 108 (que puede ser un rotador de Faraday de 45 grados), a través del atenuador opcional 109, y de regreso al bucle a través del acoplador 102. El atenuador 109 se puede utilizar para sintonizar el bucle y equilibrar la potencia de todos los componentes múltiples. El filtro 105 puede disponerse para

limitar el número de frecuencias generadas y proporcionar un énfasis previo con el fin de equilibrar el CNR de cada una de las frecuencias.

La figura 27 muestra una versión alternativa donde la luz de una fuente 181 es dividida por el acoplador 182, luego se desfasa a través del AOM 183, a través del controlador de polarización 184, una etapa de rotación de polarización 185, un filtro de paso de banda 186, a través del acoplador 187 y a través del aislador opcional 190 hasta la salida. El amplificador 188 recircula la luz, de tal modo que se generan múltiples componentes de luz en la salida. El filtro 186 se puede utilizar para equilibrar la SNR de los componentes y limitar el número de componentes que se generan.

La figura 28 muestra una disposición alternativa para generar múltiples frecuencias. Una fuente 142 de dos o tres frecuencias se amplifica con 143. Una fibra altamente no lineal (por ejemplo, fibra de cristal fotónico) 144 más la fibra de amplificador genera componentes de frecuencia adicionales mediante una mezcla de cuatro ondas. BPF 145 limita los componentes al número e intervalo de longitud de onda requeridos.

La figura 29 muestra una configuración alternativa. Aquí, la salida de un generador de peine se filtra por paso de banda al intervalo de interés. Téngase en cuenta que, para algunos tipos de generadores de peine, el número de frecuencias generadas vendrá dado por $T_1 \Delta f$, entonces puede ser necesario un T_1 más largo para garantizar que se lanzan suficientes componentes.

En la descripción anterior se ha transmitido una pluralidad de señales de sonda a frecuencias definidas. Una serie de pulsos alineados en cada frecuencia se transmite a la fibra de medición. Para mejorar la sensibilidad y el intervalo dinámico del sistema, se puede transmitir un segundo conjunto de señales de sonda como se muestra en la figura 30. El segundo conjunto de señales tiene las mismas características descritas anteriormente, pero están ubicadas en una segunda longitud de onda, discreta respecto de la longitud de onda en donde se ubican las primeras señales. Es decir, hay una pluralidad de señales ópticas en λ_0 y una pluralidad en λ_1 sin superposición en el dominio de frecuencia/longitud de onda entre las señales en λ_0 y en λ_1 . Las señales en λ_0 y en λ_1 son ambas una serie de pulsos en el dominio del tiempo como se describió anteriormente, pero con un desfase temporal entre la serie como se ve en la figura 30.

En el receptor, las dos longitudes de onda se separan y se detectan de forma independiente. Las arquitecturas de receptor descritas anteriormente se pueden utilizar para ambas longitudes de onda, dirigiéndose cada longitud de onda a un detector para la longitud de onda específica. Por ejemplo, utilizando un demultiplexor selectivo de longitud de onda inmediatamente antes de una pluralidad de detectores.

Este sistema aumenta el intervalo dinámico del sistema porque se duplica la frecuencia de muestreo, lo que permite una mayor tasa instantánea máxima de cambio de fase. La sensibilidad también aumenta debido a la duplicación de la frecuencia de muestreo.

También se pueden utilizar más de dos conjuntos de señales para mejorar aún más el rendimiento.

Las señales se pueden obtener dividiendo la luz de un generador de fuente de ancho de banda amplio o teniendo dos generadores de fuente separados derivados de dos láseres.

La longitud de retardo en el receptor en el dominio del tiempo establece la longitud de calibre sobre la que se calculan los cambios de fase en la fibra de prueba. Para diversas aplicaciones, pueden ser deseables diferentes longitudes de calibre. Esto se puede solucionar dividiendo la luz de retrodispersión en dos o más receptores, cada uno con un tiempo diferente, como se muestra en la figura 31. La disposición de la figura 31 permite medir simultáneamente diferentes longitudes de calibre. Además, los elementos de retardo variable se pueden utilizar en cualquier receptor para proporcionar longitudes de calibre variables.

El desfase de frecuencia en el sistema de receptor establece las combinaciones de retrodispersores que golpean sobre el detector para generar la portadora. Al introducir un segundo conjunto de receptores con diferentes desfases ascendentes y descendentes, como se muestra en la figura 32, se pueden dirigir diferentes combinaciones de frecuencias hacia los detectores. Cada receptor utiliza un desfase de frecuencia igual a $n \Delta f + f_m$ de tal modo que diferentes combinaciones de portadoras se mezclan para producir la misma portadora heterodina en f_m .

Esto puede tener ventajas cuando se observa una birrefringencia o desvanecimiento significativos, porque la probabilidad de que se desvanezcan las señales en todos los detectores 610-613 se reduce en comparación con la probabilidad de que se desvanezcan tanto 611 como 612.

La descripción anterior se ha dado principalmente con referencia a sensores puramente distribuidos. Sin embargo, las técnicas y el aparato también pueden aplicarse a sistemas con reflectores para producir señales de retorno específicas en ubicaciones definidas a lo largo de una fibra. Esto puede ser deseable para aumentar la sensibilidad de la fibra de medición en ubicaciones definidas a lo largo de la fibra de medición. Además, el sistema puede proporcionar suficiente sensibilidad para detectar eventos utilizando un transductor adecuado. Por ejemplo, una longitud de fibra puede enrollarse alrededor de un transductor, lo que se traduce aceleración en deformación de la fibra. El sistema descrito en la presente memoria puede detectar cambios en la longitud relativamente corta de fibra asociada con el transductor

para detectar la aceleración. En este caso, el sistema descrito tiene la ventaja de que la luz de retrodispersión derivada del interior de la longitud de la fibra modulada puede usarse para realizar mediciones sin la necesidad particular de que haya fibra insensible cerca del transductor. Esto se debe a que el sistema es insensible al desvanecimiento causado por cambios de deformación en la fibra del transductor.

- 5 Cualesquiera de los acopladores ópticos descritos en la presente memoria pueden ser acopladores iguales o pueden estar configurados con relaciones de acoplamiento desiguales para cada salida. Las relaciones requeridas se seleccionan para optimizar el rendimiento del sistema.

- 10 Aunque la presente invención se ha descrito en relación con alguna realización, no se pretende que esté limitada a la forma específica aquí expuesta. Más bien, el alcance de la presente invención está limitado únicamente por las reivindicaciones adjuntas. Además, aunque puede parecer que se describe una característica en relación con realizaciones particulares, los expertos en la técnica reconocerán que diversas características de las realizaciones descritas pueden combinarse de acuerdo con la invención. En las reivindicaciones, el término "que comprende" no excluye la presencia de otros elementos o pasos.

- 15 Además, el orden de las características en las reivindicaciones no implica ningún orden específico en el que se deban realizar las características y, en particular, el orden de los pasos individuales en una reivindicación de método no implica que los pasos deban realizarse en este orden. Más bien, los pasos se pueden realizar en cualquier orden adecuado. Además, las referencias singulares no excluyen una pluralidad. Por lo que las referencias a "uno", "una", "primera", "segunda", etc., no excluyen una pluralidad. En las reivindicaciones, el término "que comprende" o "que incluye" no excluye la presencia de otros elementos.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de detección óptica, que comprende un generador de fuente configurado para generar
un conjunto de n pulsos de sonda óptica alineados en el tiempo, estando cada pulso a una frecuencia óptica
distinta selección de entre $f_1, f_2 \dots f_n$, donde n es el número de pulsos y n es igual a 2 o más, estando cada
frecuencia óptica separada de su vecina por Δf ,
estando configurado el generador de fuente para transmitir los pulsos de sonda óptica a una fibra óptica de
detección; en el que los pulsos de sonda óptica son retrodispersados por la fibra de detección óptica, siendo
capturada al menos parte de la luz retrodispersada por la fibra óptica en una dirección inversa a la
propagación del pulso de sonda óptica,
un sistema receptor óptico configurado para recibir la luz retrodispersada de la fibra óptica de detección, en
el que el sistema receptor óptico está configurado para mezclar una versión retardada de la luz
retrodispersada con al menos una versión desfasada en frecuencia de la luz retrodispersada, en el que la
frecuencia se desfasa en $-(\Delta f + f_m)$, donde f_m es una frecuencia predeterminada y f_m es menor que Δf .
2. Un sistema óptico según la reivindicación 1, en el que la fibra óptica de detección comprende al menos una región
de detección adaptada para aumentar la sensibilidad del sistema a cambios que ocurren en al menos una región de
detección.
3. Un sistema óptico según la reivindicación 1, en el que las amplitudes detectadas se decodifican para proporcionar
una indicación de cambios de deformación a lo largo de la fibra óptica de detección.
4. Un sistema óptico según la reivindicación 1, en el que $\Delta f = v/T_d$, donde T_d es el tiempo de observación óptica y v es
cualquier entero distinto de cero.
5. Un sistema óptico según la reivindicación 1 donde $\Delta f = (1 + 2w)/(2 \cdot T_i)$ y/o $(1 + 2v)/(2 \cdot T_d)$ donde w y v son
cualesquiera números enteros, T_d es el tiempo de observación de la señal óptica y T_i es el tiempo de retardo de
retrodispersión.
6. Un sistema óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en el que Δf es aproximadamente 100-600MHz.
7. Un sistema óptico según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que n es 50 o mayor.
8. Un método para detectar deformación en una fibra óptica de detección, comprendiendo el método los pasos de
generar un conjunto de n pulsos de sonda óptica alineados en el tiempo, estando cada pulso en una
frecuencia óptica distinta seleccionada de entre $f_1, f_2, \dots f_n$, donde n es el número de pulsos y n es igual a 2 o
más, estando separada cada frecuencia óptica de su vecina por Δf ,
transmitir los pulsos de sonda óptica a una fibra óptica de detección, en el que los pulsos de sonda óptica
son retrodispersados por la fibra óptica de detección, siendo capturada al menos parte de la luz
retrodispersada por la fibra óptica en una dirección inversa a la propagación del pulso de sonda óptica,
recibir luz retrodispersada de la fibra óptica de detección,
un sistema receptor óptico configurado para recibir la luz retrodispersada desde la fibra de detección óptica,
en el que el sistema receptor óptico está configurado para mezclar una versión retardada de la luz
retrodispersada con al menos una versión desfasada en frecuencia de la luz retrodispersada, en el que el
desfasamiento de frecuencia es $-(\Delta f + f_m)$, donde f_m es una frecuencia predeterminada y f_m menor que Δf , y
determinar cambios de fase en ubicaciones a lo largo de la fibra óptica de detección basados en cambios en
la amplitud detectada y en el tiempo de las muestras que indica los cambios en amplitud.
9. El método de la reivindicación 8, en el que $\Delta f = (1 + 2v)/T_d$ y/o $\Delta f = (1 + 2w)/T_i$ donde T_d es el tiempo de observación
óptica, T_i el tiempo de retardo de retrodispersión, y v y w son números enteros.
10. El método de la reivindicación 8, en el que el conjunto de pulsos de sonda óptica se genera mediante la modulación
de un conjunto de señales ópticas de fuente, estando cada señal óptica de fuente a una frecuencia óptica distinta
seleccionada de entre $f_1, f_2 \dots f_n$.
11. El método de las reivindicaciones 8 a 10, en el que la polarización de cada pulso de sonda óptica es diferente a la
polarización de los pulsos de sonda óptica, a frecuencias ópticas adyacentes.
12. El método de la reivindicación 11, en el que la polarización de pulsos de sonda óptica adyacentes no es ortogonal.
13. El método de cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que Δf está entre 100MHz -600MHz.

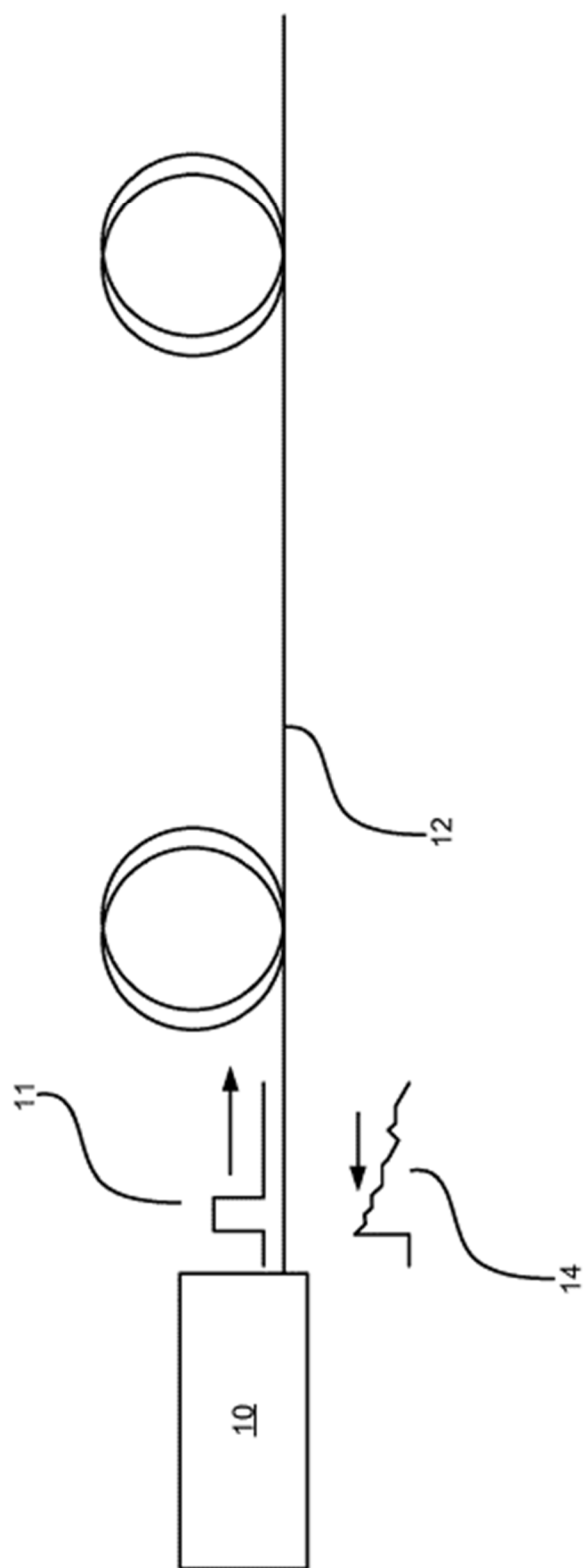


FIG. 1

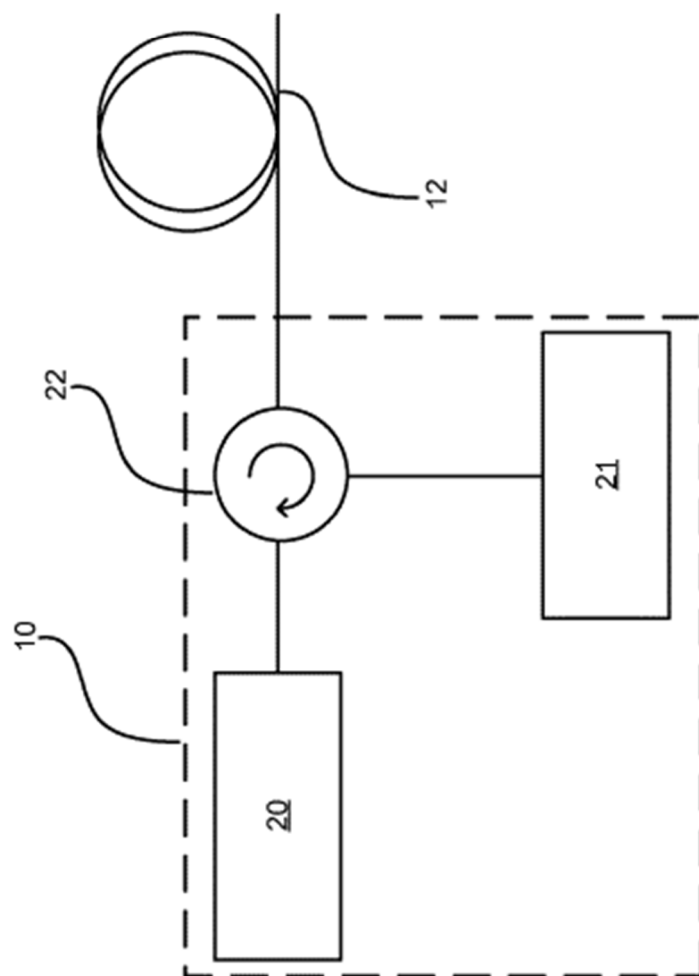


FIG. 2

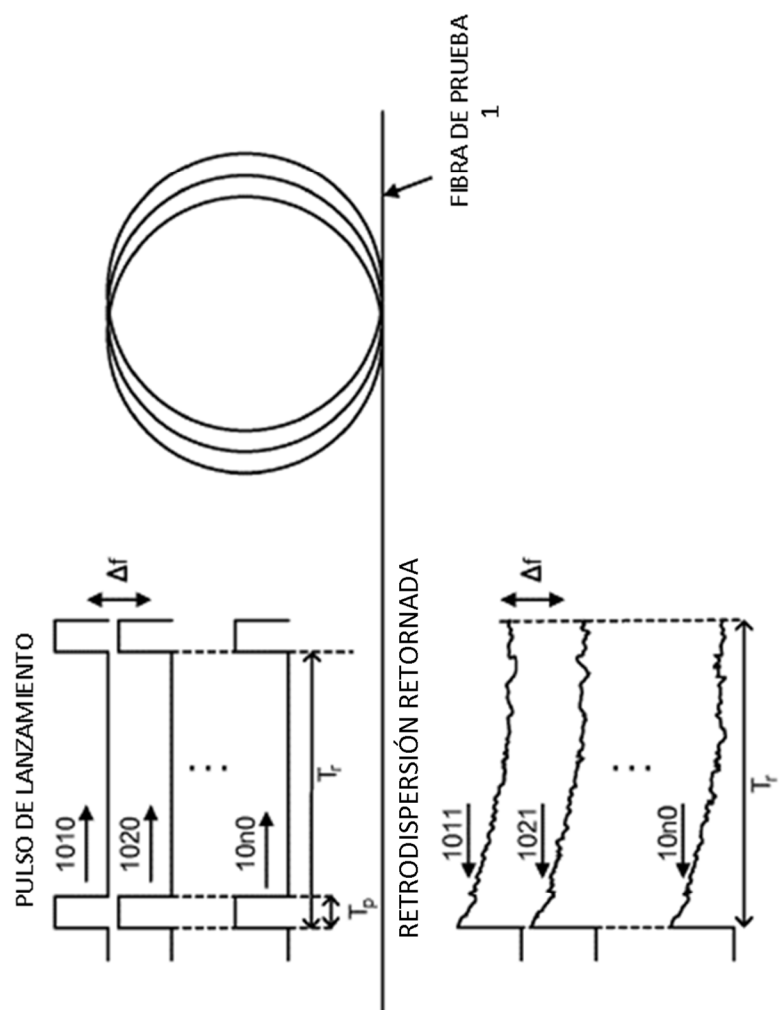
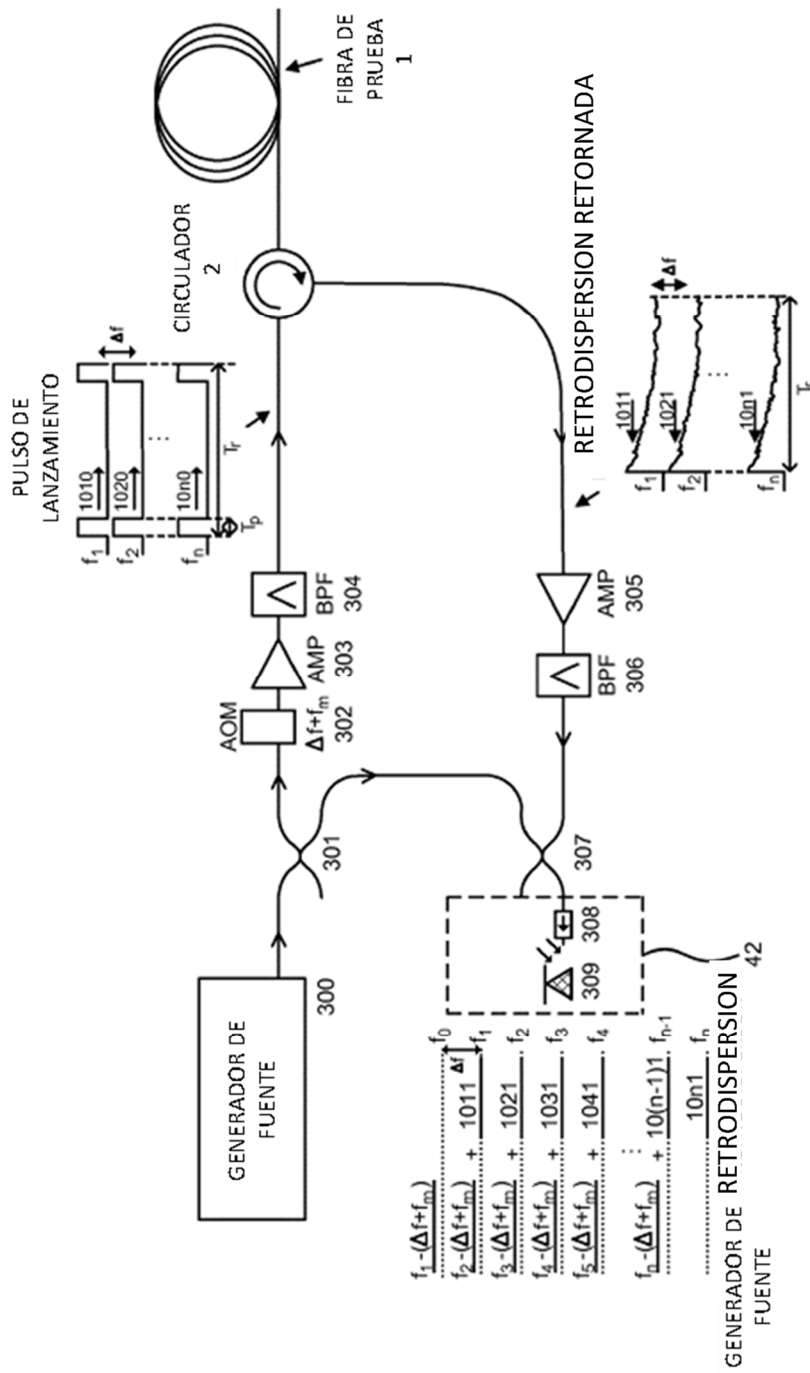


FIG. 3



$$\begin{array}{rcl}
 \frac{f_1 - (\Delta f + f_m)}{\dots\dots\dots} & & f_0 \\
 \frac{f_2 - (\Delta f + f_m)}{\dots\dots\dots} + \frac{1011}{\dots\dots\dots} & \Delta f \updownarrow & f_1 \\
 \frac{f_3 - (\Delta f + f_m)}{\dots\dots\dots} + \frac{1021}{\dots\dots\dots} & & f_2 \\
 \frac{f_4 - (\Delta f + f_m)}{\dots\dots\dots} + \frac{1031}{\dots\dots\dots} & & f_3 \\
 \frac{f_5 - (\Delta f + f_m)}{\dots\dots\dots} + \frac{1041}{\dots\dots\dots} & & f_4 \\
 \vdots & & \\
 \frac{f_n - (\Delta f + f_m)}{\dots\dots\dots} + \frac{10(n-1)1}{\dots\dots\dots} & & f_{n-1} \\
 \dots\dots\dots + \frac{10n1}{\dots\dots\dots} & & f_n
 \end{array}$$

GENERADOR DE RETRODISPERSIÓN
FUENTE

FIG. 5

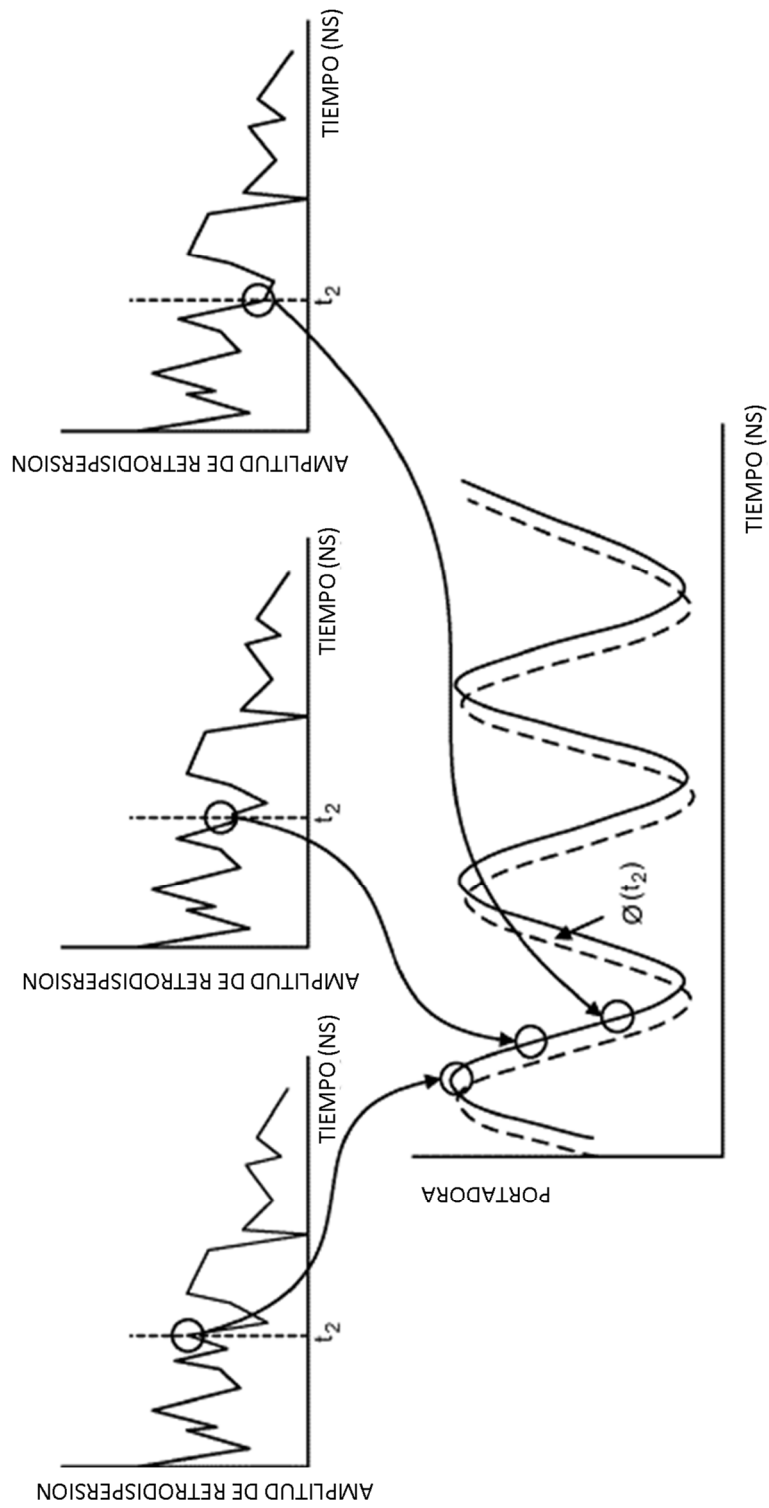


FIG. 6

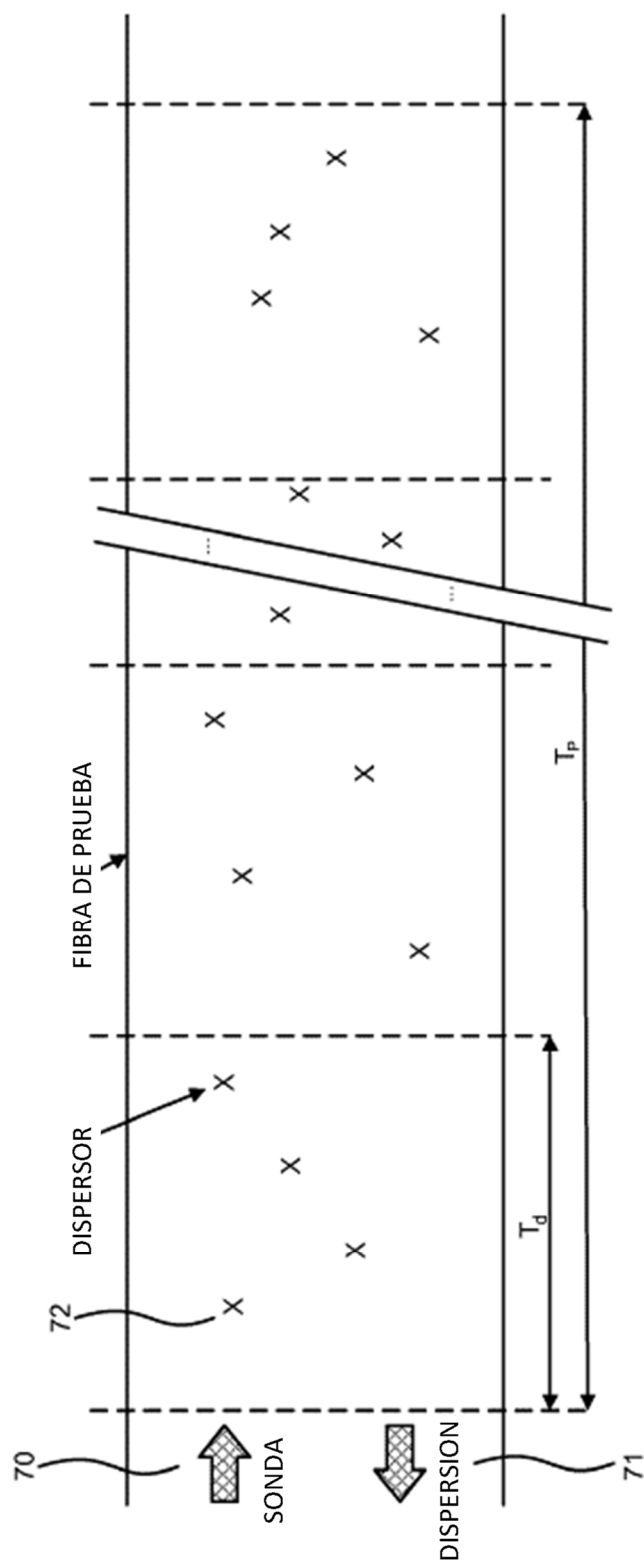


FIG. 7

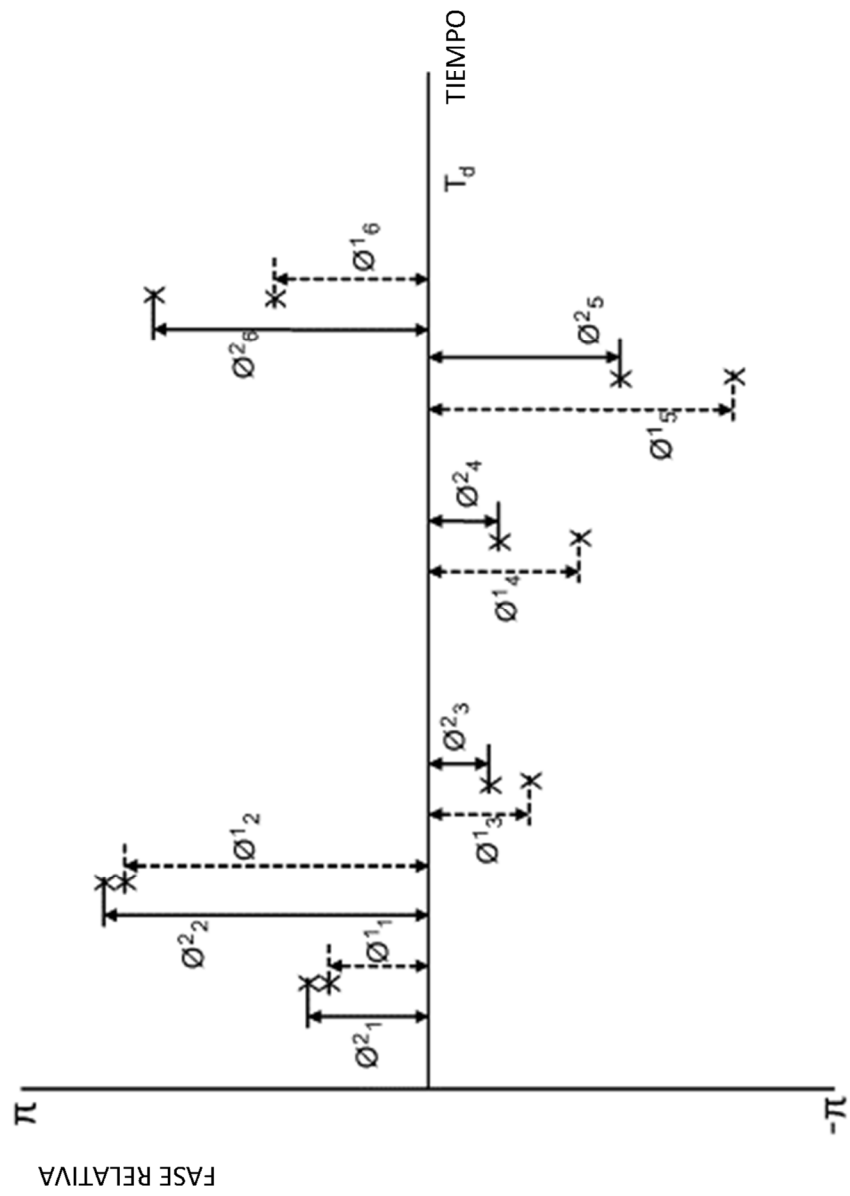
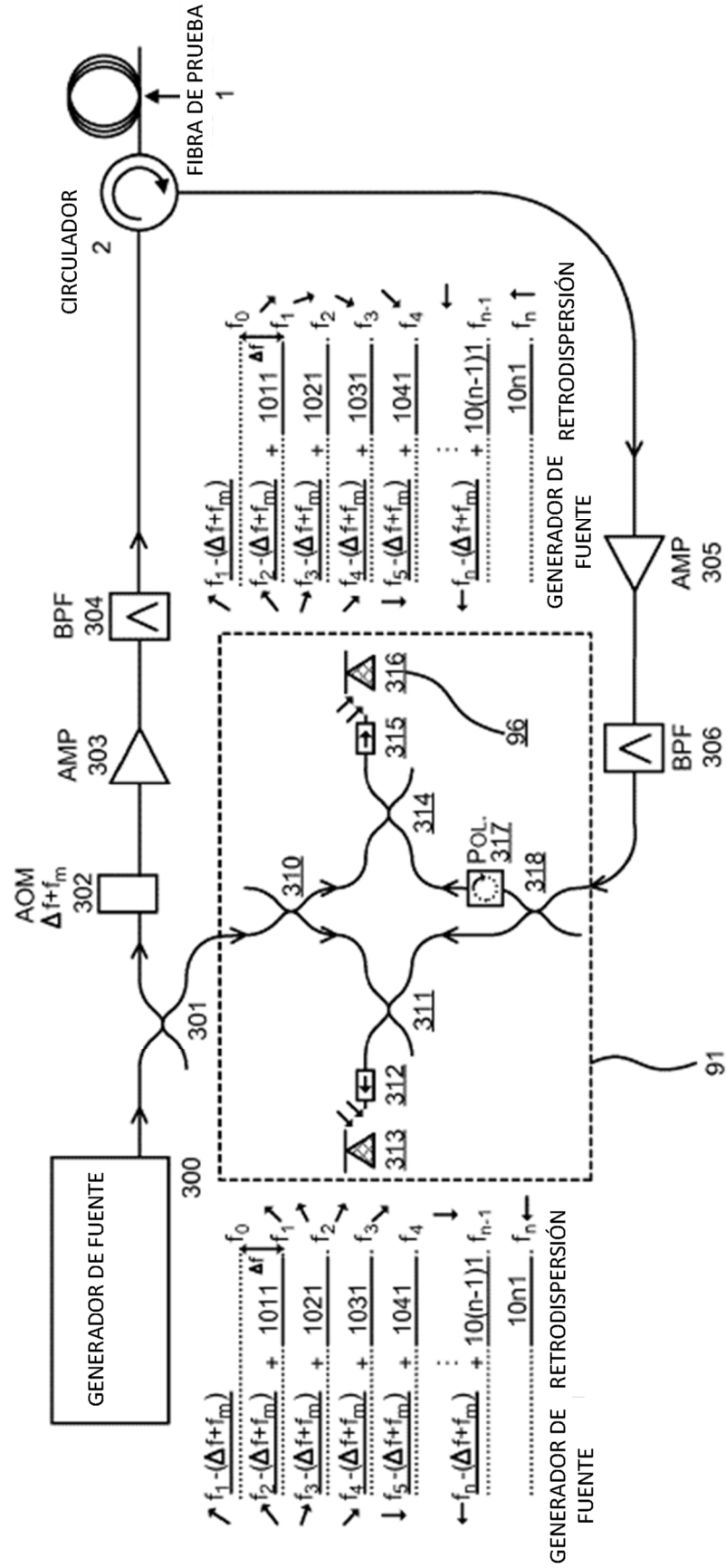
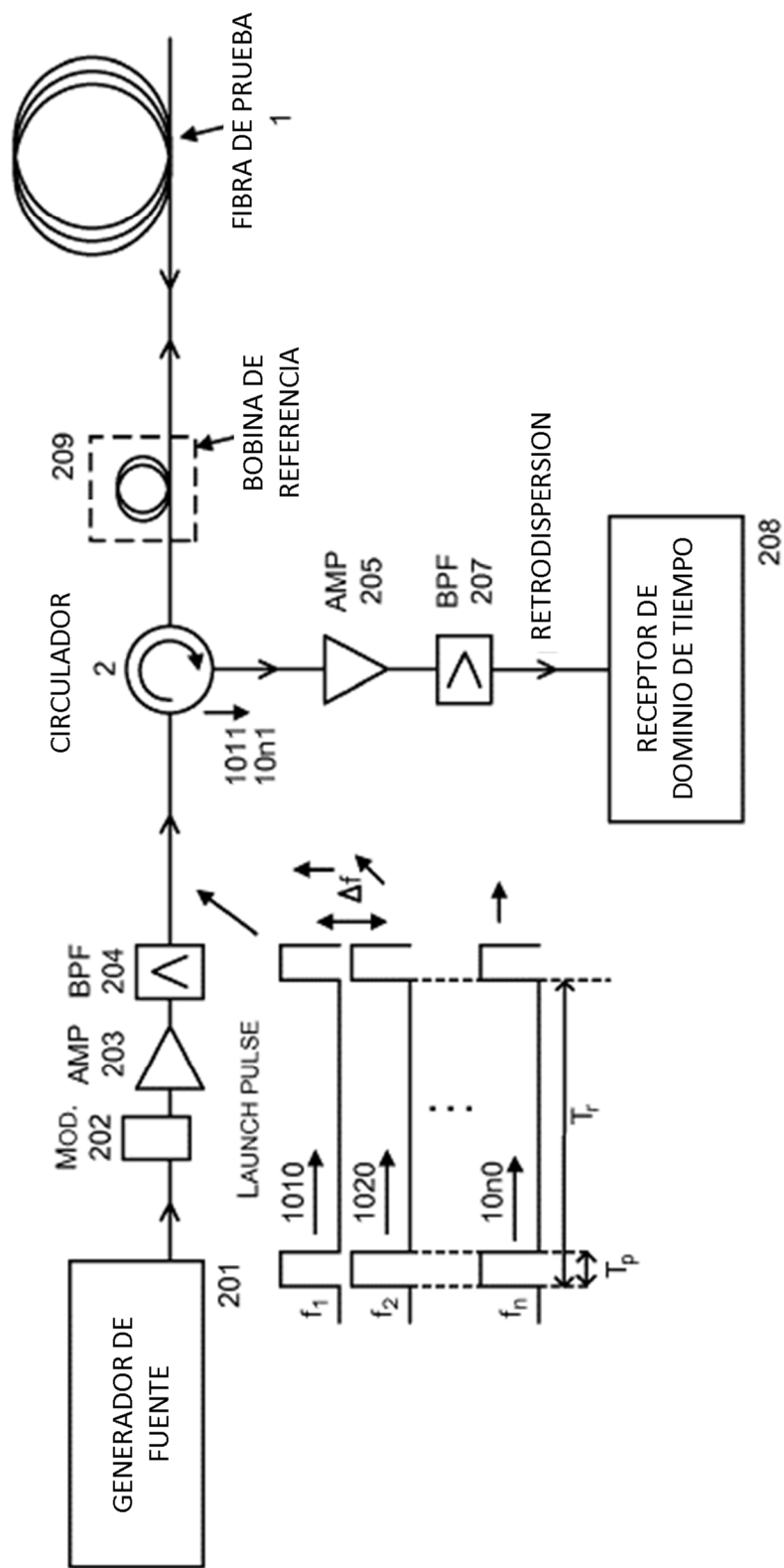


FIG. 8





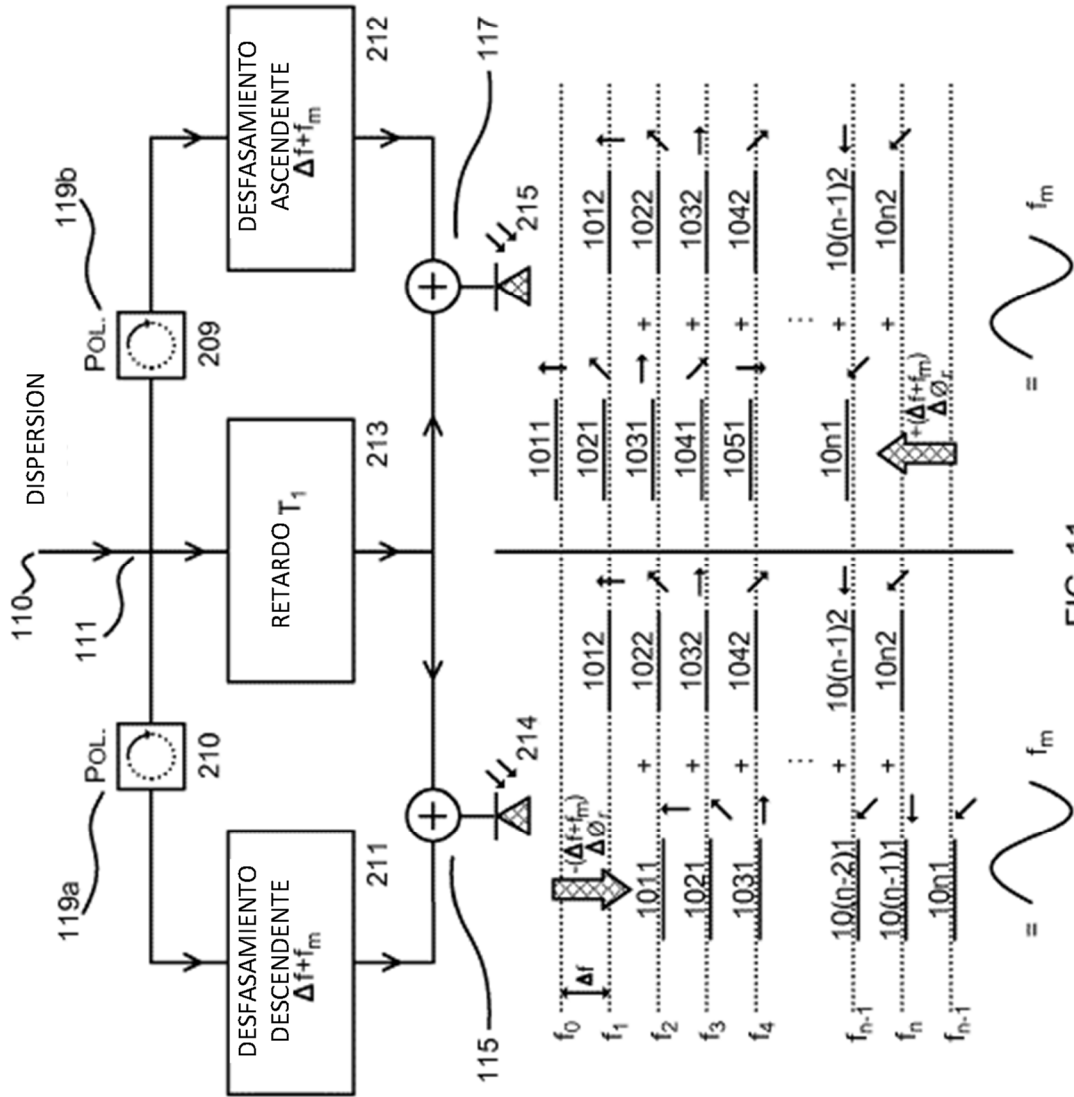


FIG. 11

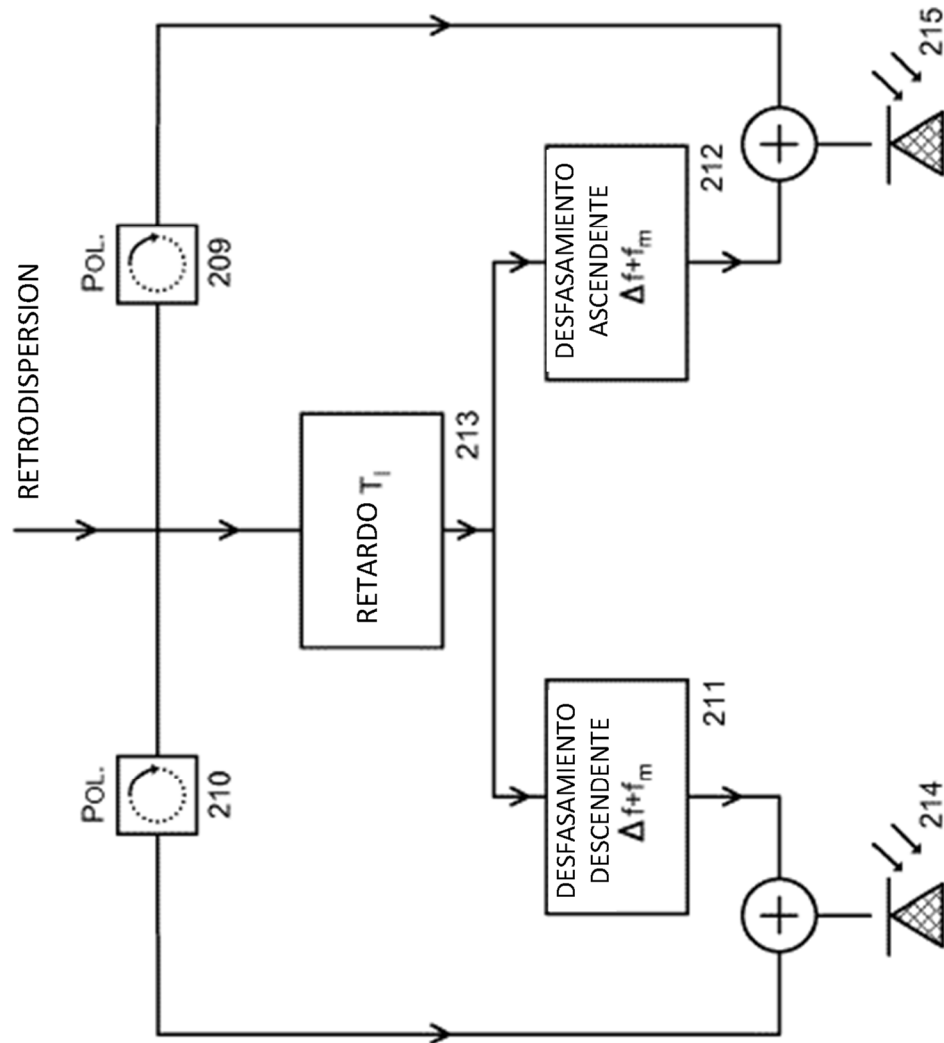


FIG. 12

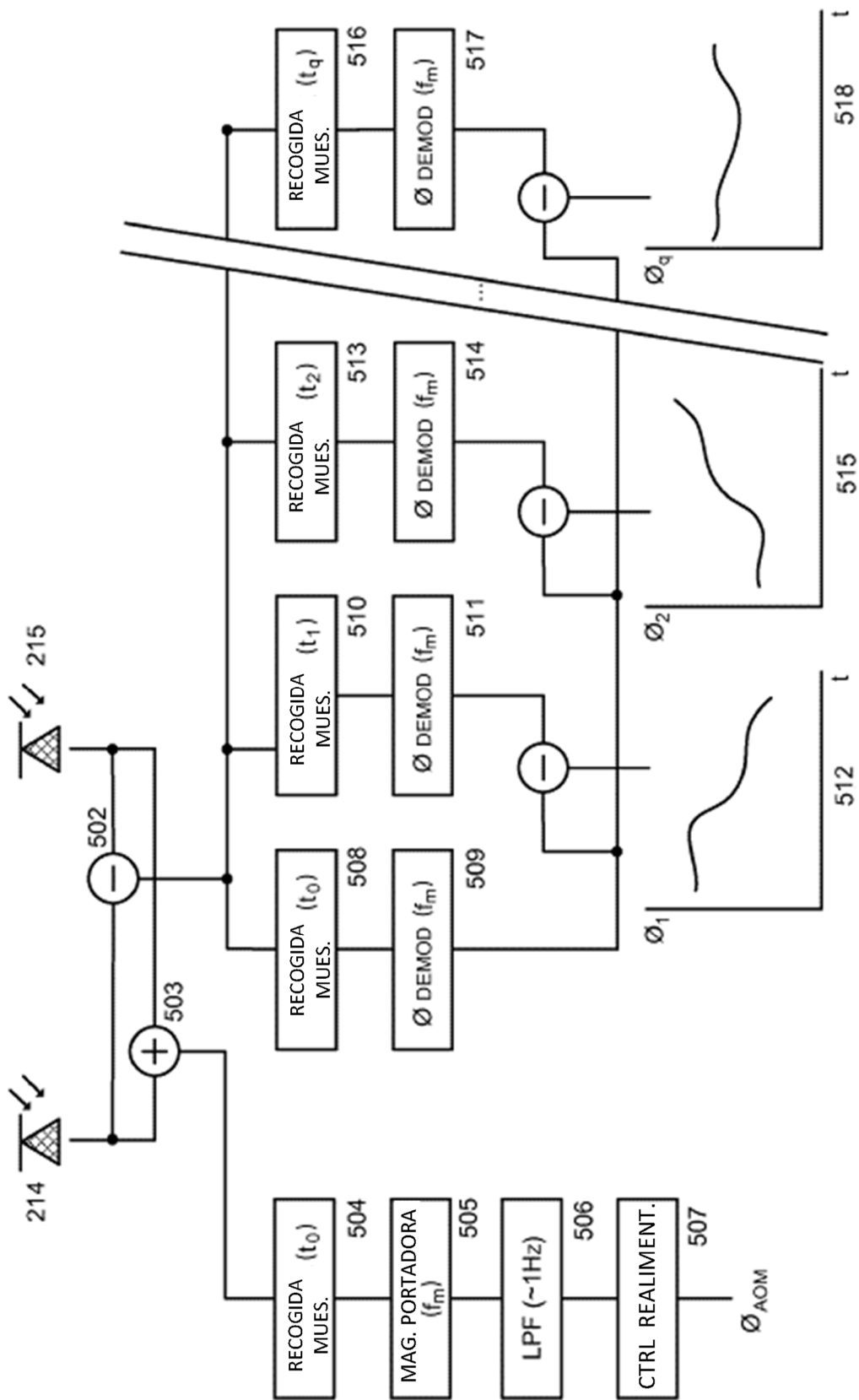


FIG. 13

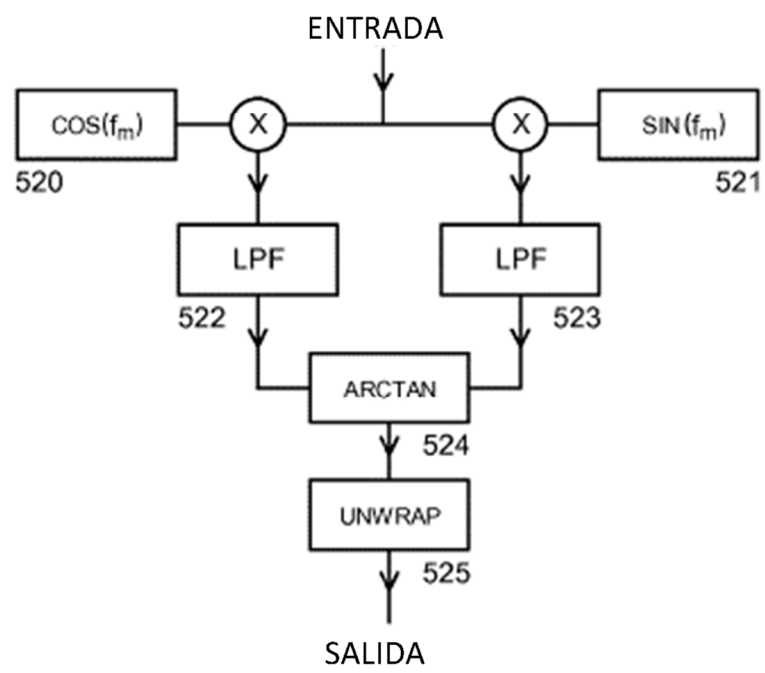


FIG. 14

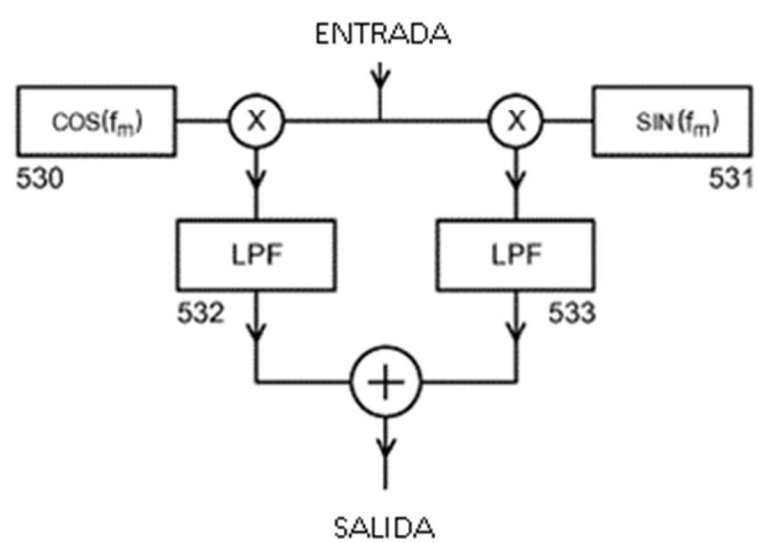


FIG. 15

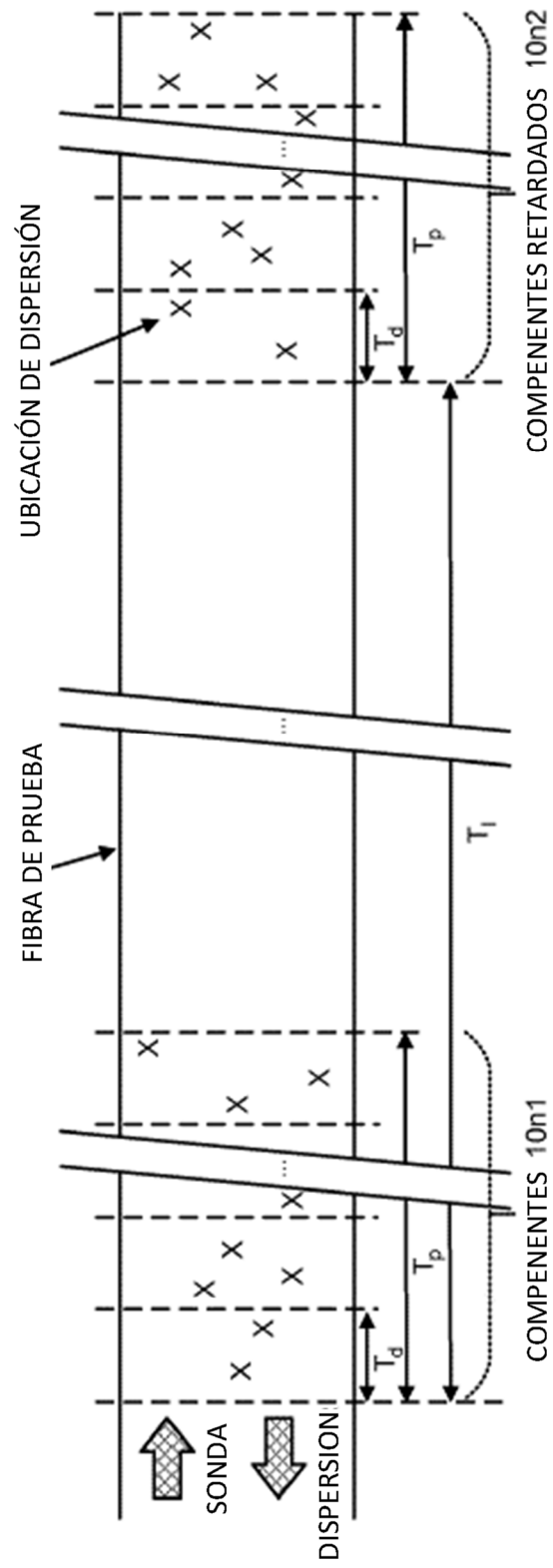


FIG. 16

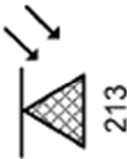
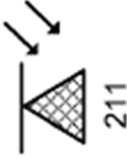
		
SIN BIRREFRINGENCIA	$1022 \nearrow + 1011 \uparrow = \text{MID}$	$1012 \uparrow + 1021 \nearrow = \text{MID}$
BIRREFRINGENCIA PERO CASO	$1022 \rightarrow + 1011 \uparrow = 0$	$1012 \nearrow + 1021 \nearrow = \text{FUERTE}$

FIG. 17

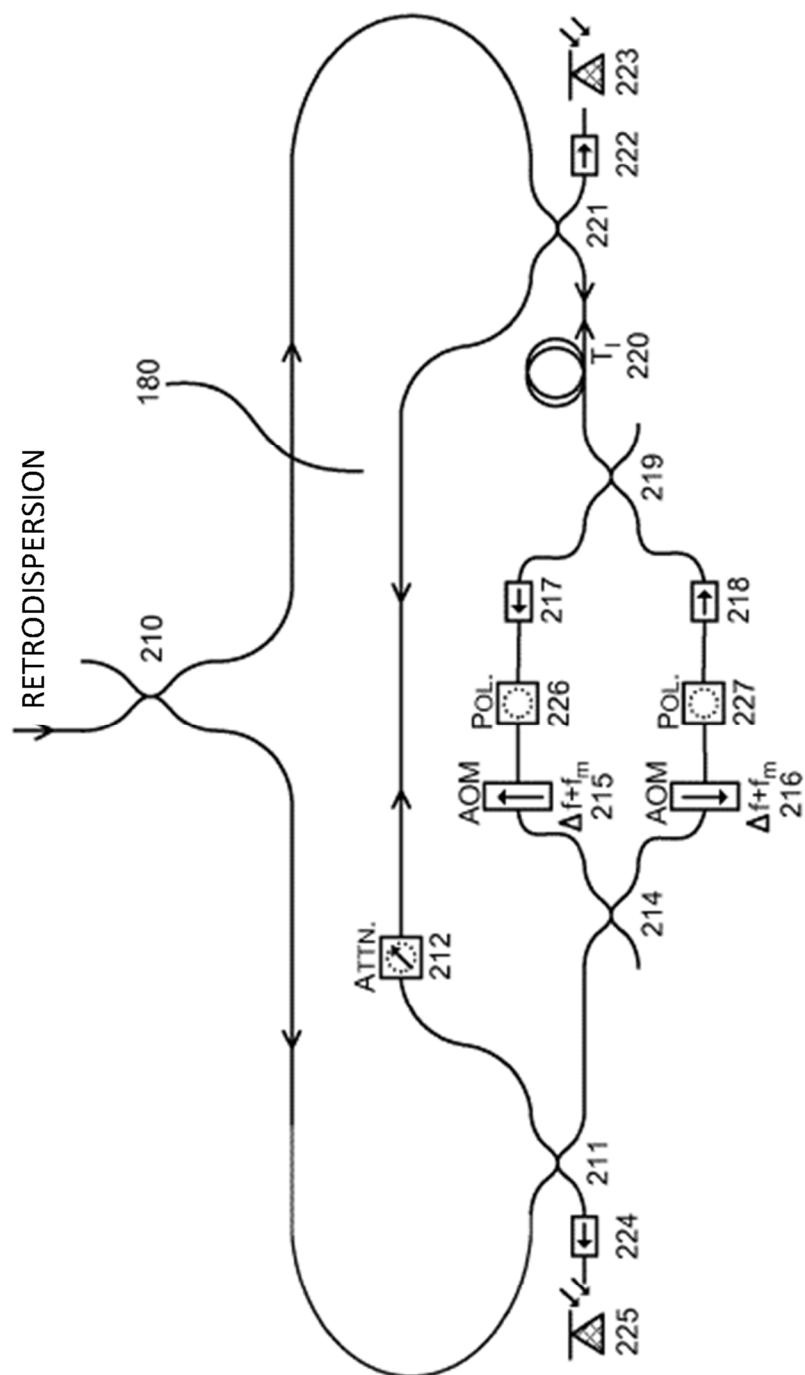


FIG. 18

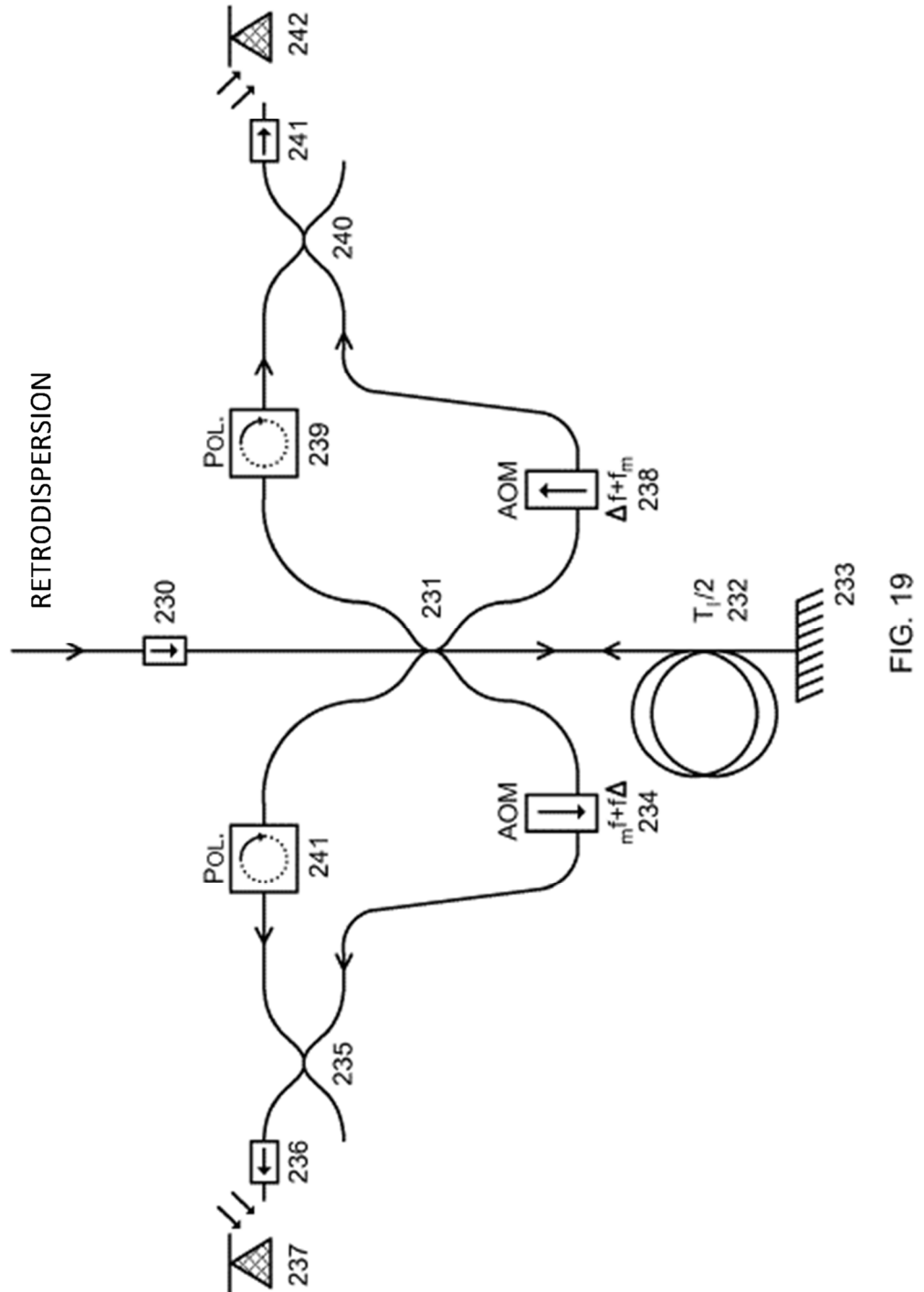


FIG. 19

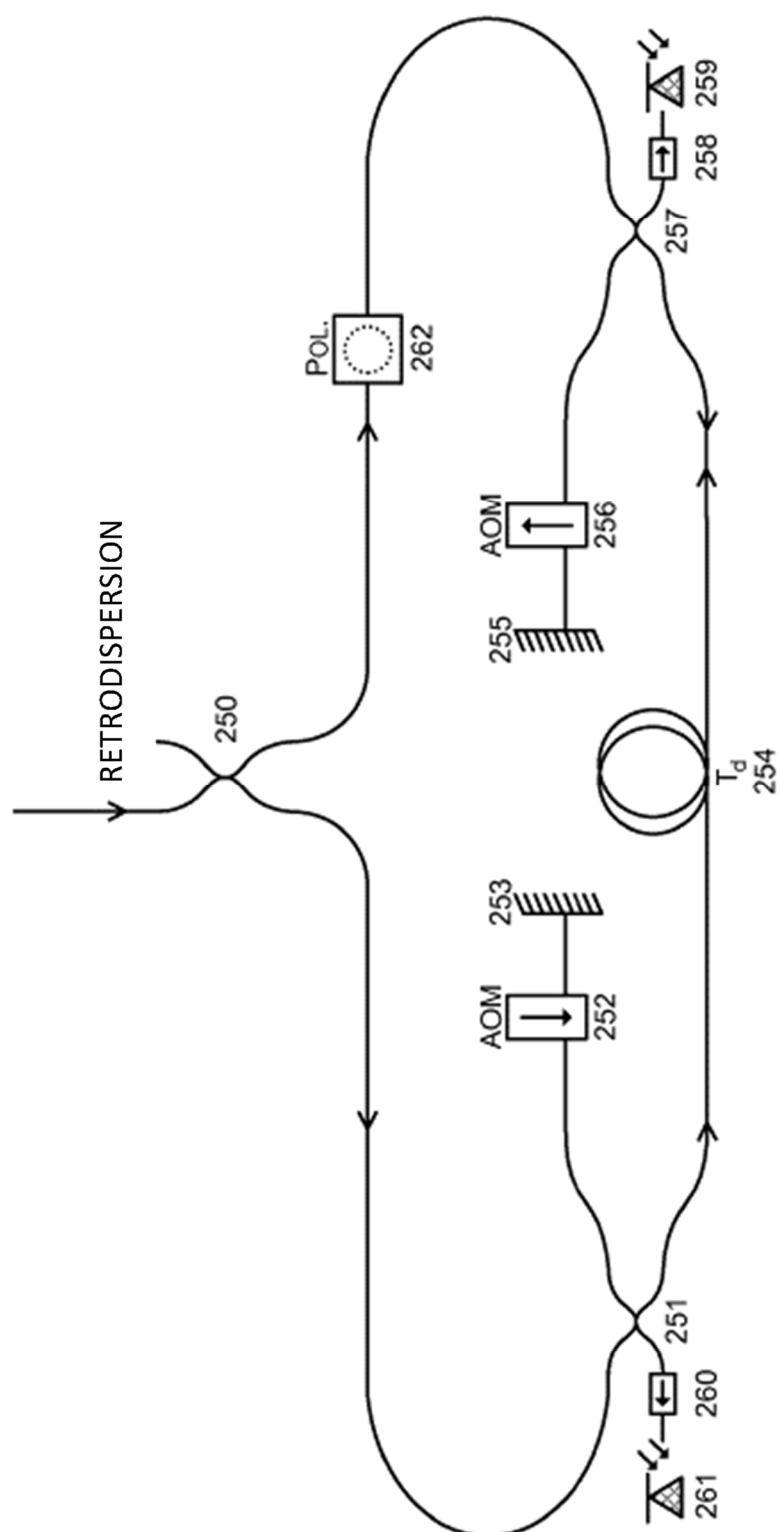


FIG. 20

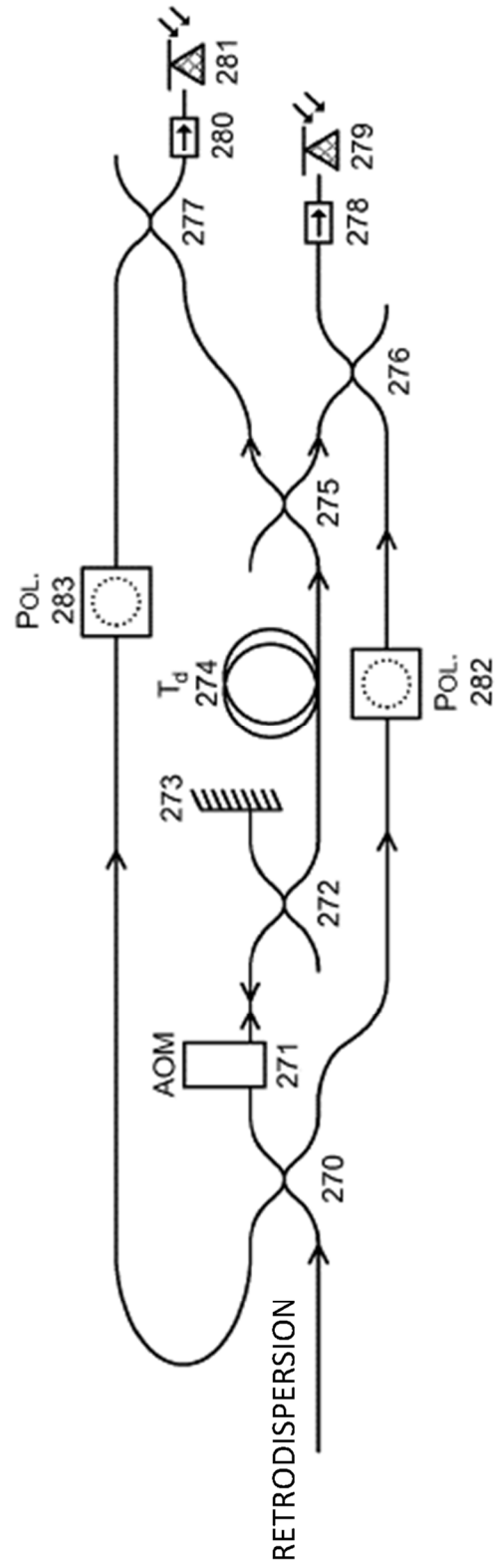


FIG. 21

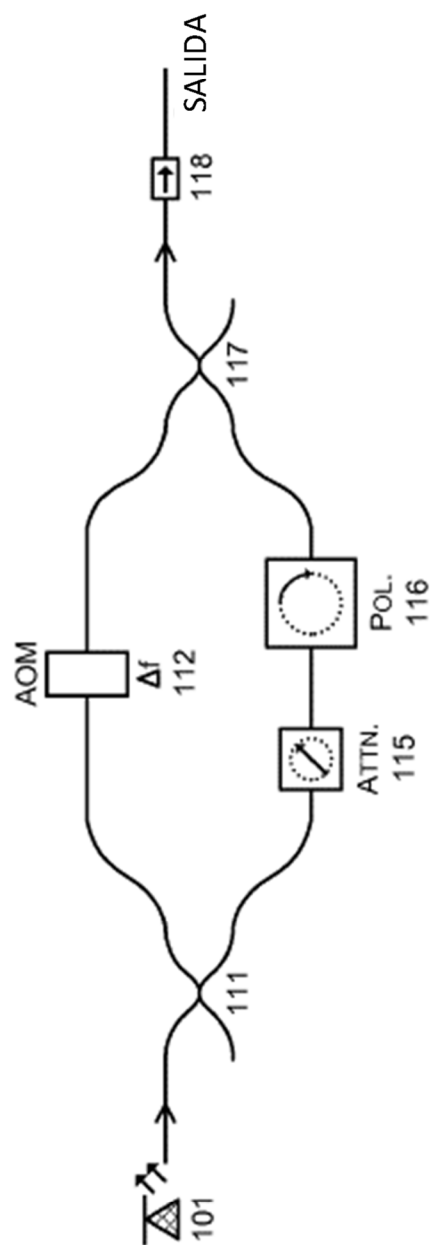


FIG. 22

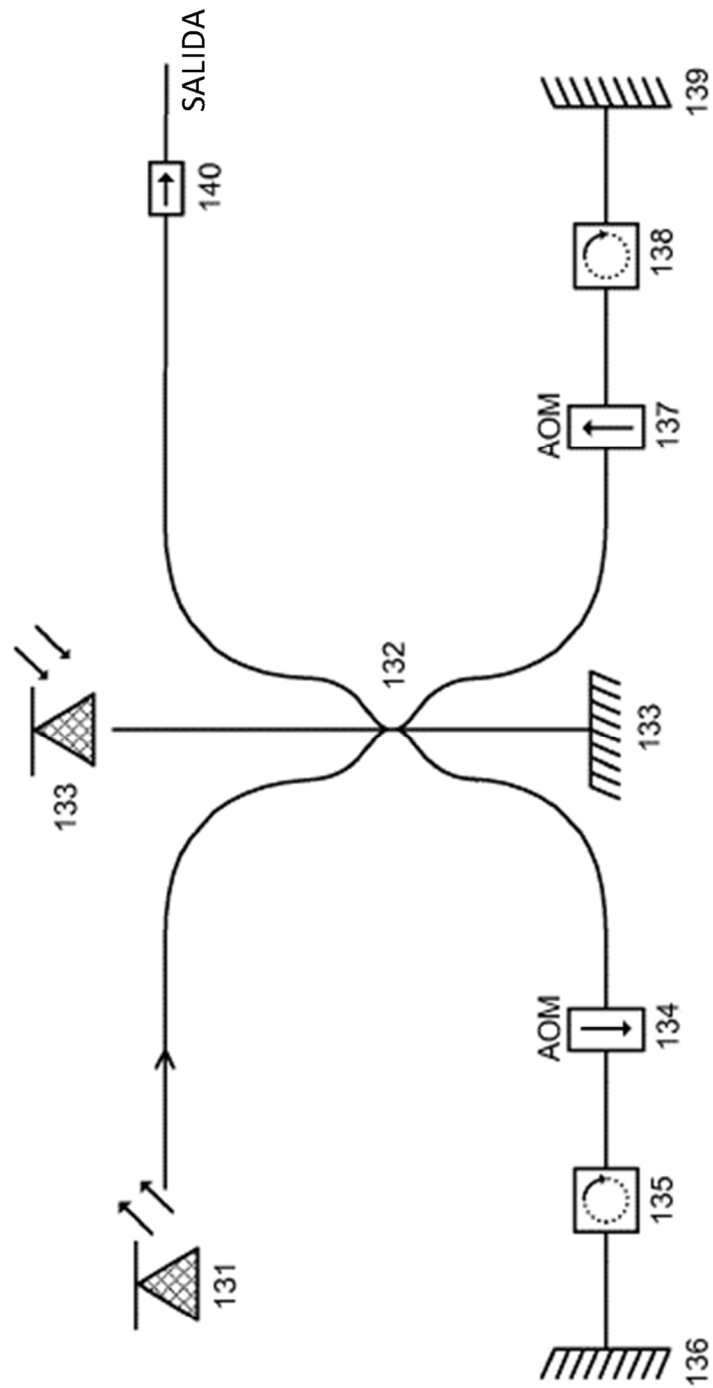


FIG. 23

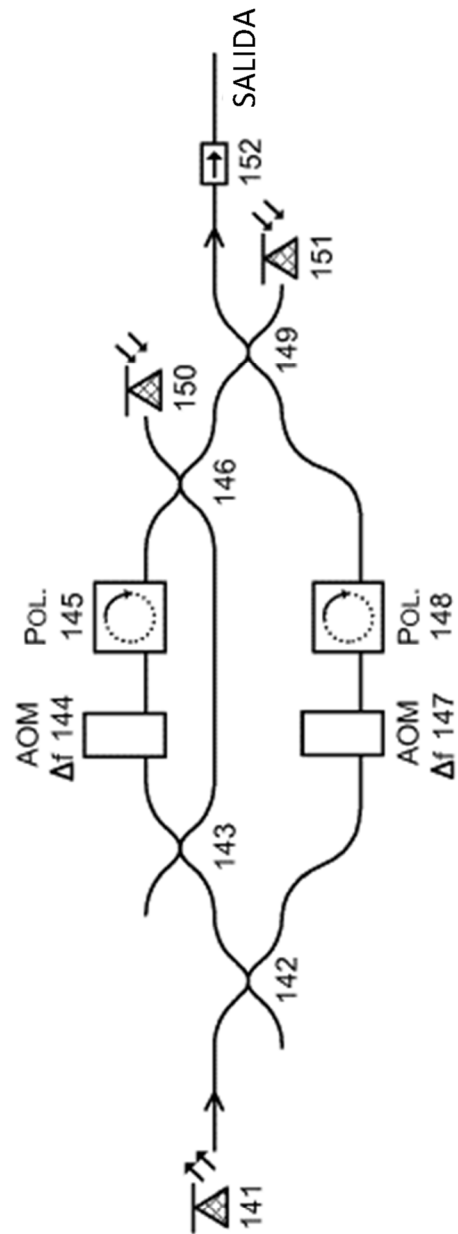


FIG. 24

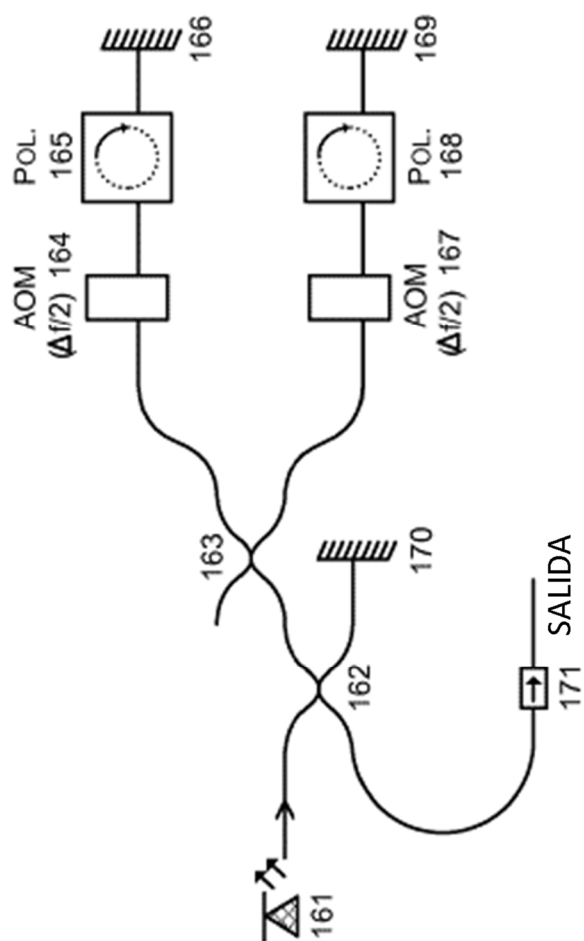


FIG. 25

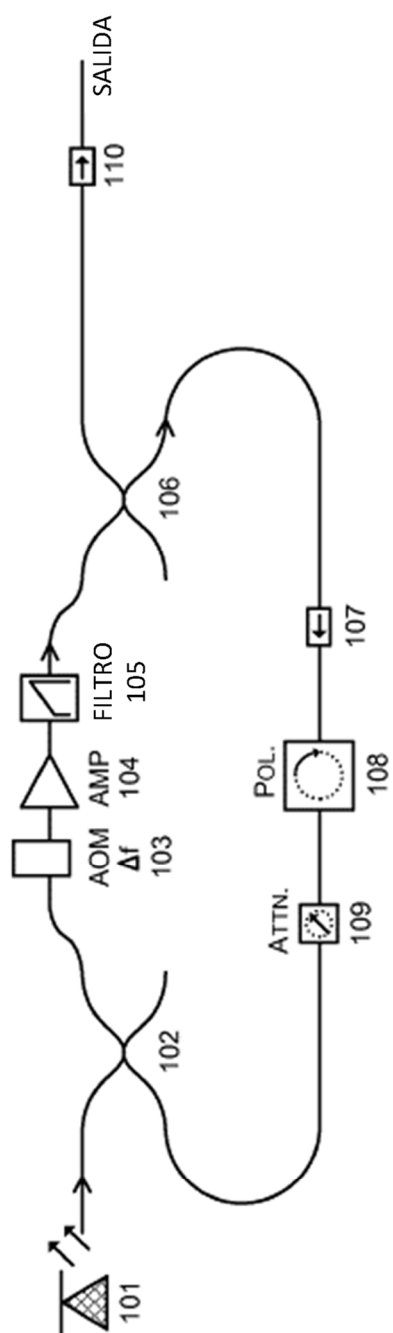


FIG. 26

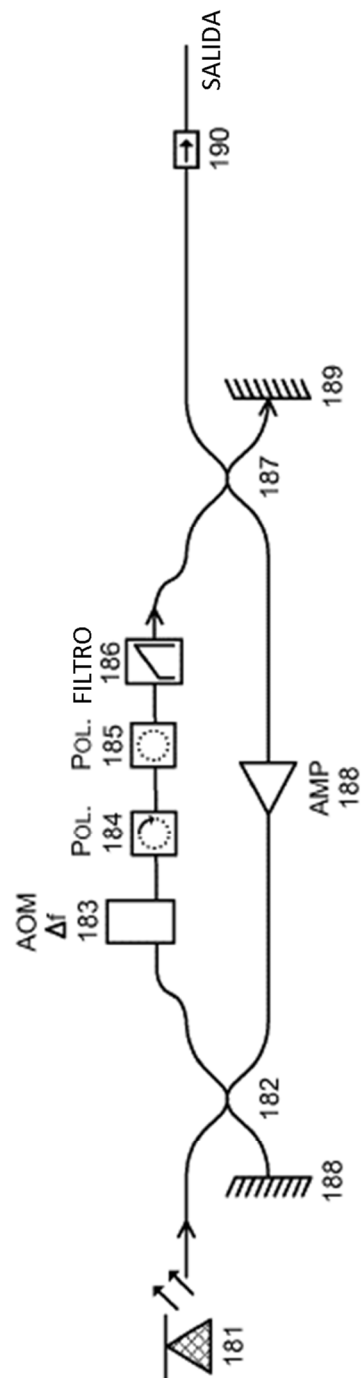


FIG. 27

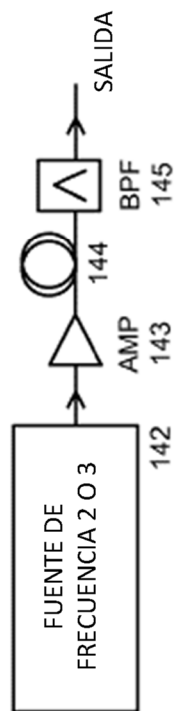


FIG. 28

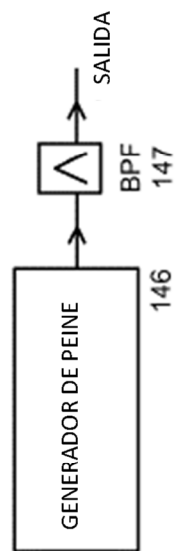


FIG. 29

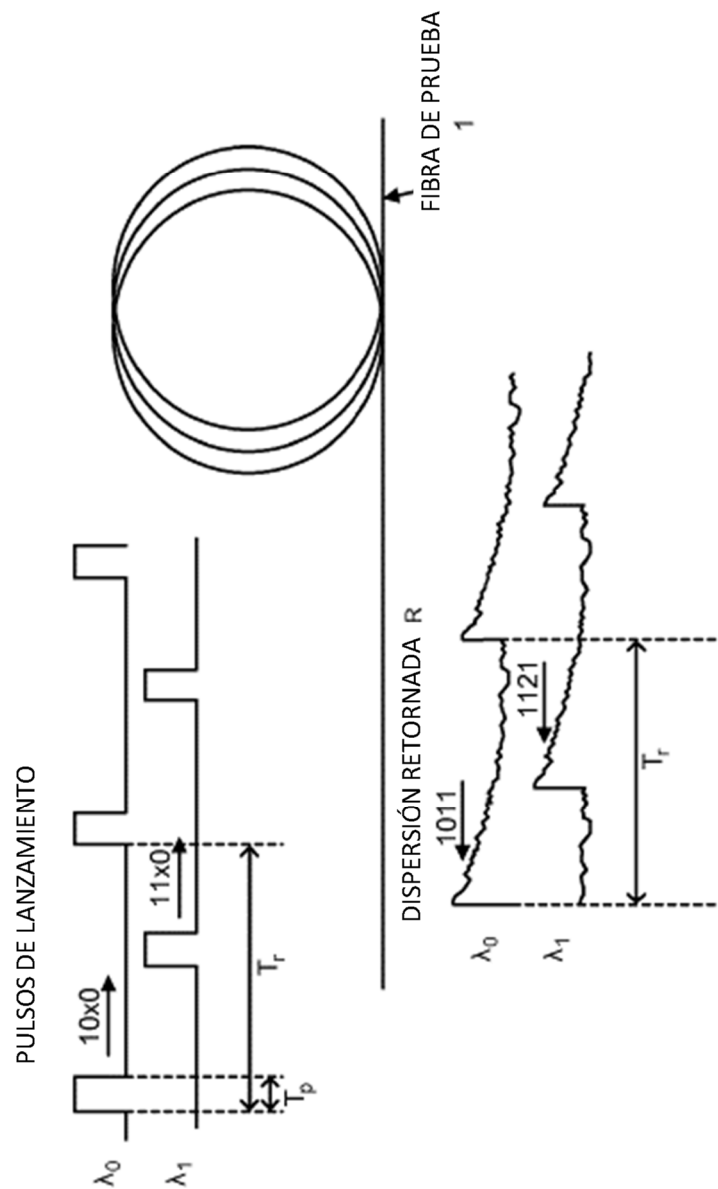


FIG. 30

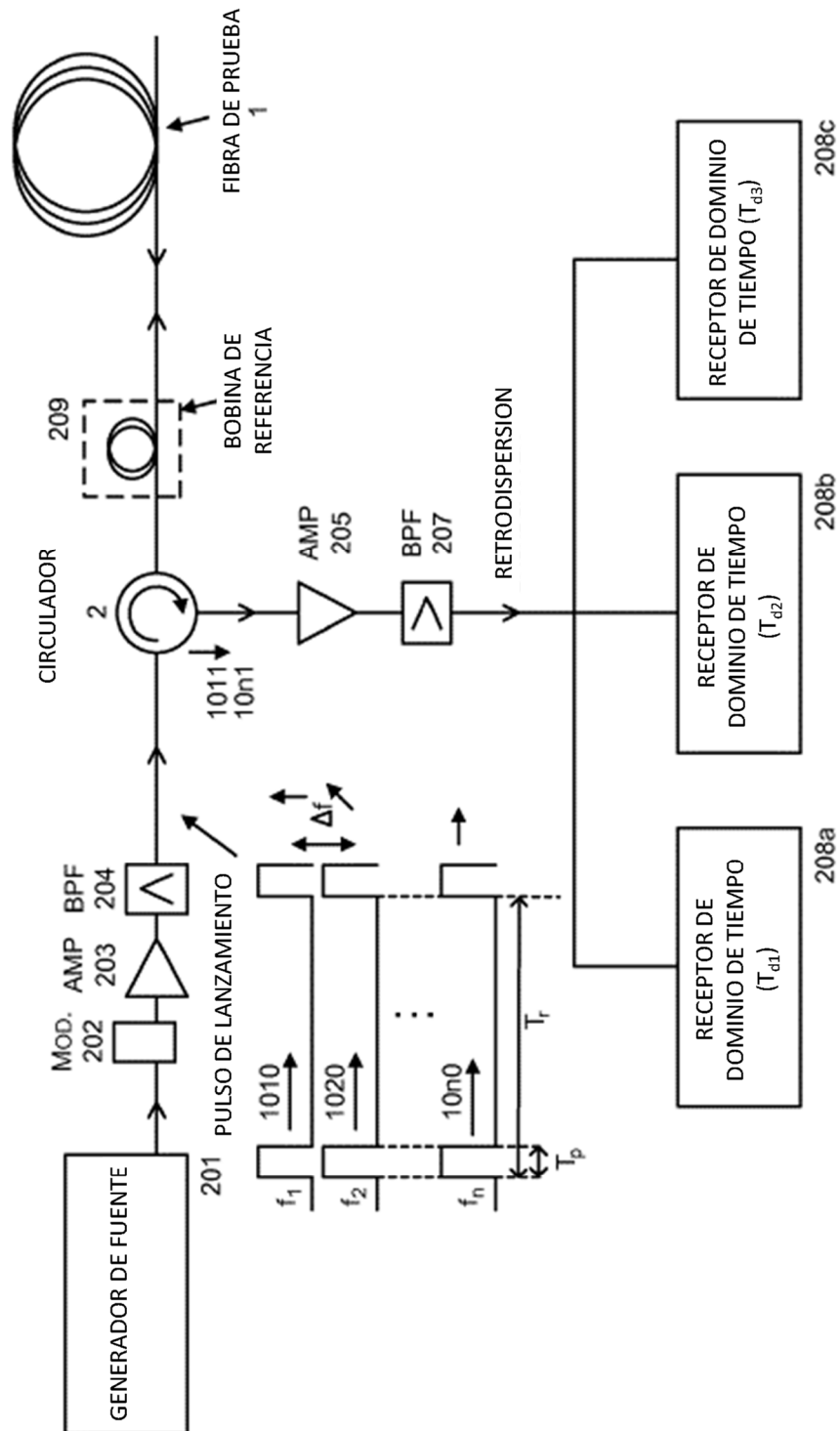


FIG. 31

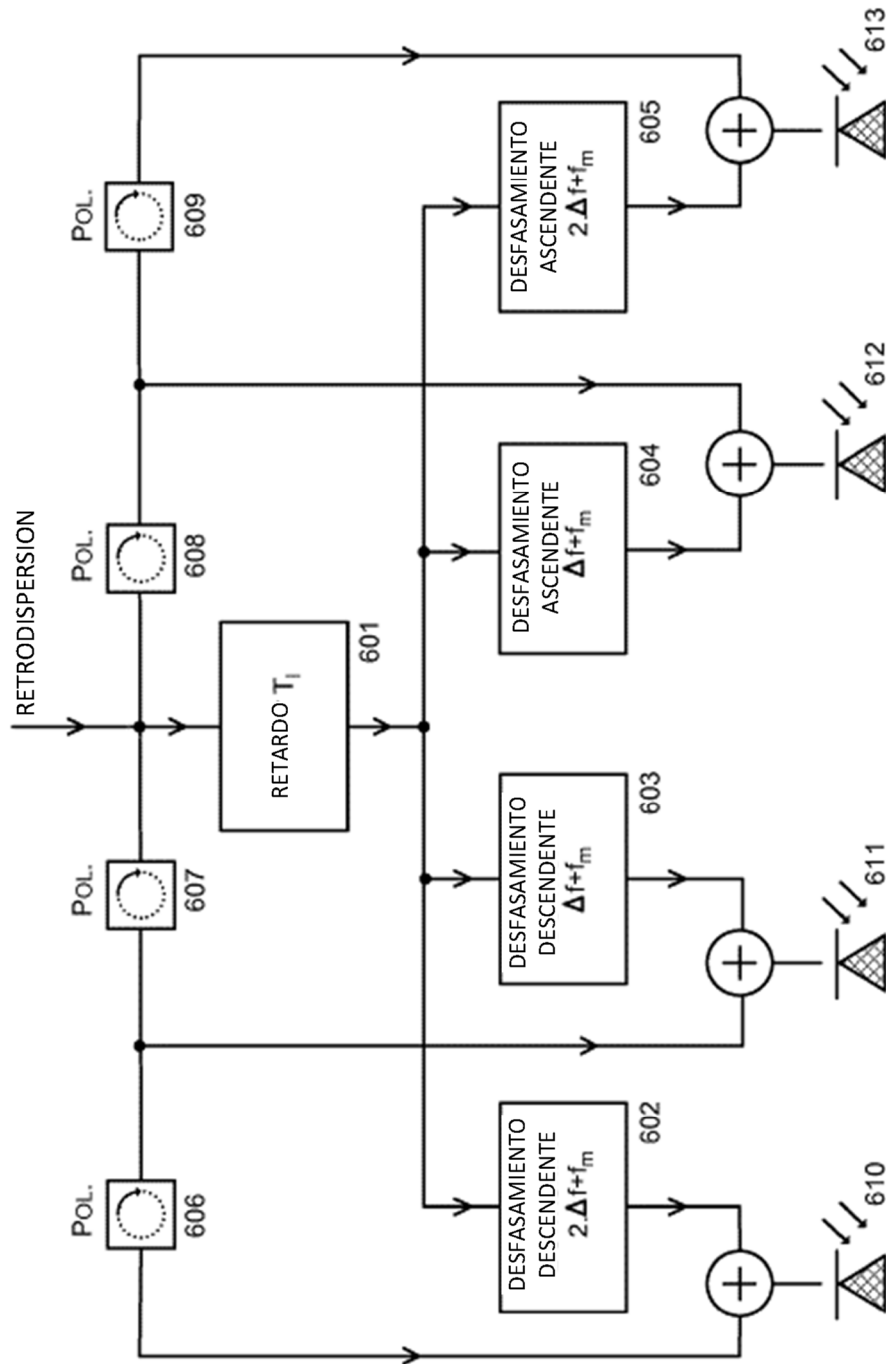


FIG. 32

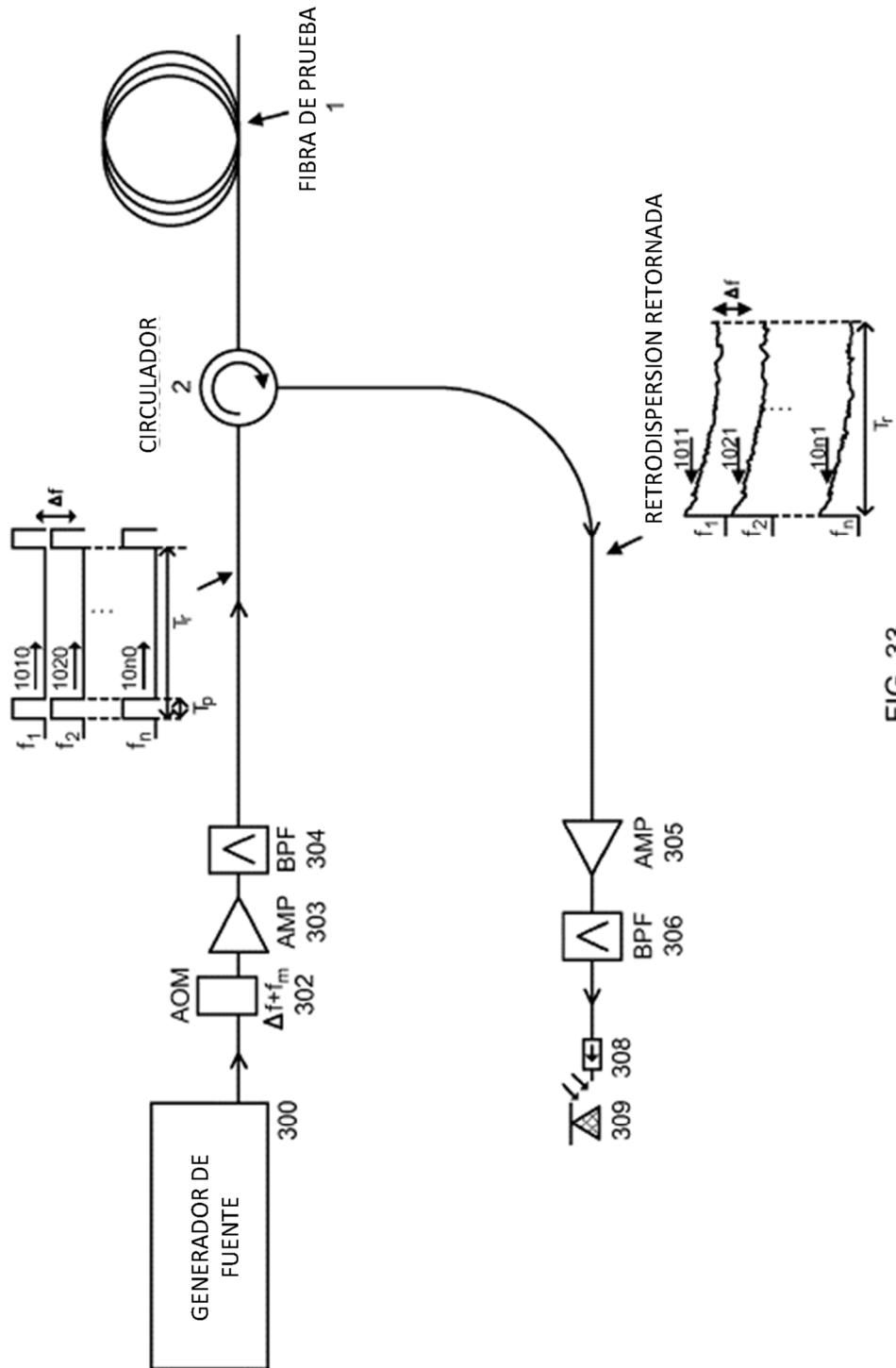


FIG. 33

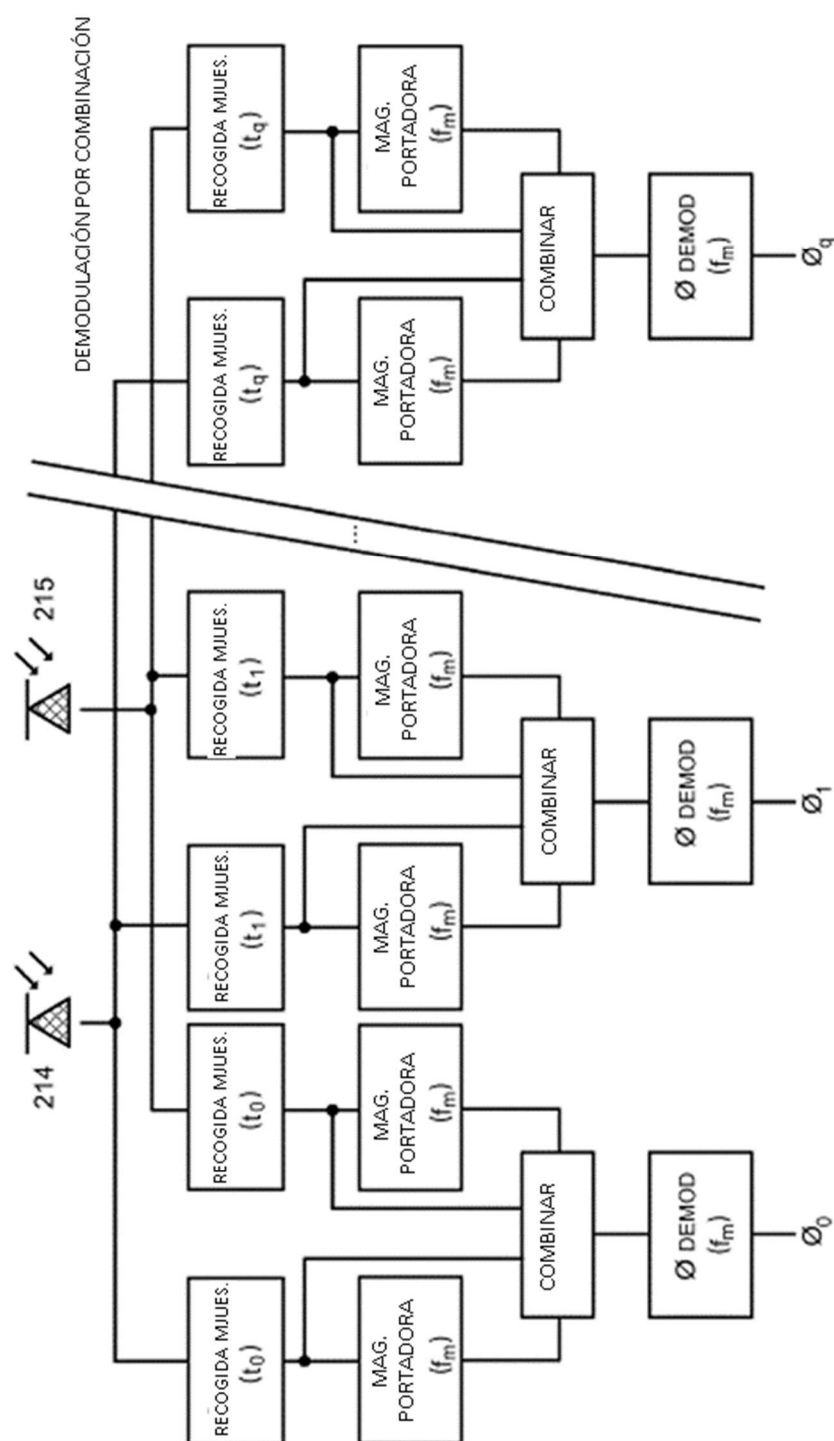


FIG. 34