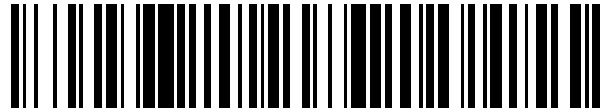


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 645 392**

51 Int. Cl.:

G01B 9/02 (2006.01)

G11B 20/24 (2006.01)

H03G 3/32 (2006.01)

H04B 10/00 (2013.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **17.03.2011 PCT/US2011/028826**

87 Fecha y número de publicación internacional: **22.09.2011 WO11116196**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **17.03.2011 E 11710638 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.09.2017 EP 2547982**

54 Título: **Métodos y aparatos de reducción de ruido de intensidad para sistemas de detección interferométrica y de formación de imágenes**

30 Prioridad:

17.03.2010 US 314759 P

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

05.12.2017

73 Titular/es:

**LIGHTLAB IMAGING, INC. (100.0%)
One Technology Park Drive
Westford, MA 01886, US**

72 Inventor/es:

**SCHMITT, JOSEPH, M. y
GRINBERG, VICTOR**

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 645 392 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

Métodos y aparatos de reducción de ruido de intensidad para sistemas de detección interferométrica y de formación de imágenes

5

Solicitudes relacionadas

Esta solicitud reivindica prioridad sobre la solicitud provisional de EE.UU. con número de serie 61/314759 presentada el 17 de marzo de 2010.

10

Campo de la invención

La invención se refiere al campo de detección y formación de imágenes y más específicamente al diseño e implementación de sistemas de detección y componentes relacionados para tomografía de coherencia óptica y otras tecnologías de recopilación de datos.

15

Antecedentes de la invención

Las fluctuaciones de intensidad de una fuente de luz pueden degradar marcadamente la sensibilidad y el intervalo dinámico de un sistema de medición interferométrico tal como un sistema de tomografía de coherencia óptica (OCT). En los sistemas de recopilación de datos en el dominio de la frecuencia, el ruido de intensidad puede ser particularmente problemático. Esto ocurre porque los láseres sintonizables de alta velocidad que se utilizan a menudo en tales sistemas pueden mostrar fluctuaciones rápidas de ganancia dependientes de la longitud de onda. Estas fluctuaciones pueden ocurrir al sintonizar una banda espectral ancha. El método convencional para mitigar los efectos del ruido de intensidad de fuente es combinar señales producidas por un par de fotodetectores a la salida de un interferómetro equilibrado, como se ilustra en la figura 1. La figura 1 representa un sistema pasivo en el sentido de que la retroalimentación activa u otros cambios a lo largo del tiempo con respecto a propiedades de los componentes o a señales de entrada no se monitorizan ni se utilizan. El sistema de la figura 1 se puede utilizar como el extremo delantero para un sistema de recopilación de datos OCT.

20

25

30

En un interferómetro equilibrado ideal, el componente de coherencia de fase del campo de referencia interfiere con el componente de coherencia de fase del campo de muestra (mostrado en el lado izquierdo de la figura 1) para generar un par de señales con fases opuestas en las salidas de los fotodiodos mostrados como dos fotodiodos equilibrados en la figura 1. Las dos intensidades de entrada I_+ y I_- de luz del campo de muestra y el campo de referencia se acoplan y luego se dirigen a los fotodiodos como se muestra. Cuando se restan, estos dos componentes de señal coherentes producen una señal de interferencia con el doble de la amplitud de las señales individuales.

35

40

Además, las fluctuaciones de intensidad incoherentes de la fuente de luz se cancelan, en promedio, después de la resta. En la práctica, sin embargo, es difícil lograr la supresión completa de las fluctuaciones de intensidad de la fuente. La dificultad surge porque las fotocorrientes deben igualarse y restarse con precisión. Este proceso de resta se realiza de manera pasiva para todas las frecuencias de entrada para el sistema de la figura 1. En la práctica, la amplitud del ruido de intensidad puede ser cientos de veces mayor que la amplitud de la señal coherente. Como resultado, la relación de rechazo en modo común (se rechaza una medida de las señales de extensión comunes a las entradas de un dispositivo) de los fotodetectores equilibrados y el fotoamplificador debe mantenerse alta en una banda de frecuencia ancha.

45

En la disposición ilustrada en la figura 1, las desviaciones de la relación de división 50:50 ideal del acoplador de fibra óptica, además de las diferencias en la capacidad de respuesta y la eficiencia de acoplamiento de los fotodiodos, típicamente dan como resultado desequilibrios de fotocorriente de al menos un pequeño porcentaje. Incluso si estos desequilibrios pueden compensarse mediante el ajuste manual en el momento de la fabricación del sistema, los desequilibrios reaparecen con el tiempo como resultado de los cambios a largo plazo en las propiedades de los componentes. En consecuencia, los métodos de equilibrio pasivo no son adecuados para su uso en muchas aplicaciones.

50

55

La nota de aplicación 14 de New Focus titulada "A survey of Methods Using Balanced Photodetection" divulga la detección pequeña de señal en el dominio del tiempo, detección de señal pequeña en el dominio de la frecuencia, y detección heterodina coherente. Sin embargo, no hay divulgación de una configuración de puente utilizada con fuentes de fotocorriente.

60

Por consiguiente, existe una necesidad de métodos, aparatos y sistemas de reducción de ruido que superen estas limitaciones.

Sumario de la invención

65

La presente invención se refiere a métodos, sistemas y aparatos de equilibrado electrónicos que reducen

5 sustancialmente el ruido tal como el ruido de intensidad y el ruido de línea de patrón en la tomografía de coherencia óptica de dominio de la frecuencia y en otros sistemas de detección interferométrica y de formación de imágenes. Un aspecto de la invención, como se establece en las reivindicaciones adjuntas, es su capacidad de suprimir activamente el ruido de banda ancha (CC - 250 MHz) mientras se amplifican las señales de interferencia deseadas y sin degradar la calidad de la señal. En este ejemplo de intervalo de ruido de banda ancha, CC (o corriente continua) corresponde a cero. En una realización, la inclusión de cero dentro de un método o dispositivo de autoequilibrio puede ayudar a evitar la saturación del fotoamplificador. Esto se logra muestreando el ruido de intensidad de baja frecuencia y aplicando retroalimentación electrónica activa para cancelar el ruido de modo común. Esta cancelación de ruido se puede realizar a altas y bajas frecuencias de forma automática utilizando una o más señales de control. Este enfoque activo o automático ofrece mejoras en relación con simplemente restar pasivamente dos señales como se discutió anteriormente.

15 Se divulgan métodos de atenuación electrónica que admiten el funcionamiento bidireccional en bandas de frecuencia ancha. En una realización, la banda de interés es de aproximadamente 0 a aproximadamente 250 MHz, incluyendo puntos y subintervalos entre ellos. En una realización, los funcionamientos bidireccionales se refieren a la característica de que los métodos y dispositivos de equilibrio activos o automáticos pueden acomodar la fotocorriente que es mayor que la otra, es decir, la atenuación se aplica automáticamente a la fotocorriente más alta, sin necesidad de desviar una de las fotocorrientes más alto que la otra.

20 Los métodos tienen la ventaja adicional del bajo coste y simplicidad. Actualmente, los fotorreceptores de autoequilibrio disponibles son costosos y están limitados al funcionamiento en una banda estrecha de baja frecuencia (típicamente <100 KHz). También se describen técnicas para extender los métodos a la detección de diversidad de polarización. En una realización, el uso de los métodos y dispositivos descritos en el presente documento da como resultado una reducción de ruido de al menos aproximadamente 25 dB. En una realización, la reducción de ruido alcanzada por una realización de la invención varía de aproximadamente 25 dB a aproximadamente 50 dB.

30 Un ejemplo se refiere a un método para reducir o suprimir el ruido de intensidad de una fuente de láser en un sistema de tomografía de coherencia óptica. El método incluye transmitir luz desde un láser a un interferómetro; generar una pluralidad de fotocorrientes durante una sesión de recopilación de datos de tomografía de coherencia óptica, cada una de las fotocorrientes proporcional a la luz recibida del interferómetro; convertir la pluralidad de fotocorrientes en una señal amplificada que comprende un componente de ruido de intensidad de láser que utiliza un amplificador; y transmitir una primera señal de control para controlar la atenuación de al menos una de la pluralidad de fotocorrientes. La primera señal de control se puede generar utilizando el componente de ruido de intensidad de láser. El método también puede incluir el paso de transmitir una segunda señal de control para controlar la atenuación de al menos una de la pluralidad de fotocorrientes. El método también puede incluir el paso de generar la primera señal de control filtrando la señal amplificada, integrando la señal amplificada filtrada y amplificando la señal amplificada filtrada integrada. En un ejemplo, la atenuación de al menos una de la pluralidad de fotocorrientes se cambia en respuesta a la señal de control que es recibida por un atenuador seleccionado del grupo de un fotorreceptor, un transistor, un diodo, una resistencia, un atenuador óptico variable, un amplificador de ganancia variable, un par de resistencias en comunicación eléctrica con un par de transistores y combinaciones de los mismos. El método también puede incluir el paso de equilibrar activamente un primer fotorreceptor y un segundo fotorreceptor repitiendo el paso de transmitir la señal de control hasta que el componente de ruido de láser alcance un mínimo.

45 En una realización, la invención se refiere a un sistema de tomografía de coherencia óptica establecido en las reivindicaciones adjuntas. El sistema incluye un primer fotorreceptor para recibir luz de un interferómetro en comunicación óptica con un láser que tiene ruido de intensidad de láser; un primer atenuador en comunicación con el primer fotorreceptor, en el que el primer atenuador está configurado para cambiar una de una primera propiedad óptica o primera propiedad eléctrica del primer atenuador en respuesta a una primera señal de control; un segundo fotorreceptor para recibir luz del interferómetro; un segundo atenuador en comunicación con el segundo fotorreceptor, en el que el segundo atenuador está configurado para cambiar una de una segunda propiedad óptica o una segunda propiedad eléctrica del segundo atenuador en respuesta a una segunda señal de control; un amplificador que tiene una primera entrada en comunicación eléctrica con el primer fotorreceptor y una primera salida, configurado el amplificador para transmitir, desde la primera salida, una señal amplificada que comprende un componente de ruido de intensidad de láser; y una red de retroalimentación en comunicación eléctrica con el amplificador, configurada la red de retroalimentación para recibir la señal amplificada y generar la primera señal de control y la segunda señal de control al menos en respuesta al componente de ruido de intensidad de láser. En un ejemplo, los atenuadores primero y segundo se seleccionan del grupo que consiste en un atenuador óptico variable, un transistor bipolar, un MOSFET, un diodo, un atenuador de división de corriente y una resistencia.

65 La red de retroalimentación puede incluir (a) un filtro que transmite frecuencias por debajo de una banda de señal de interferencia, (b) un integrador en comunicación eléctrica con el filtro y (c) un par de amplificadores rectificadores en comunicación eléctrica con el integrador. Además, en otro ejemplo, la red de retroalimentación puede incluir (a) un filtro de paso de banda que transmite frecuencias por debajo o por encima de una banda de señal de interferencia, (b) un detector RMS en comunicación eléctrica con el filtro de paso de banda, (c) un convertidor de analógico a

digital en comunicación eléctrica con el detector RMS, (d) un microprocesador en comunicación eléctrica con el convertidor de analógico a digital, y (e) un convertidor de digital a analógico en comunicación eléctrica con el microprocesador. La red de retroalimentación puede configurarse para transmitir una de las señales de control primera o segunda utilizando el convertidor de digital a analógico para mantener un valor nulo en una señal de ruido RMS recibida en el detector RMS.

En un ejemplo, la red de retroalimentación está configurada para funcionar de manera síncrona con un período de barrido del láser. La red de retroalimentación puede calcular la primera señal de control durante un ciclo de formación de imágenes del interferómetro y transmite la primera señal de control durante un ciclo de formación de imágenes para reducir o suprimir el componente de ruido de láser. En un ejemplo, la luz emitida por el láser está modulada en amplitud a una frecuencia fija para crear una primera señal en un brazo de referencia del interferómetro y en el que una segunda señal en una salida del sistema se demodula para generar una señal de error sensible a las fases que es procesada por la red de retroalimentación. En un ejemplo, el primer atenuador es un primer transistor y el segundo atenuador es un segundo transistor, en el que los transistores primero y segundo están configurados para desviar diferencialmente las fotocorrientes en la primera entrada del amplificador en respuesta a las señales de control primera y segunda.

En un ejemplo, el primer atenuador es un primer amplificador de ganancia variable que tiene una entrada y una salida y en el que el segundo atenuador es un segundo amplificador de ganancia variable que tiene una entrada y una salida. El sistema también puede incluir un transformador, en el que las salidas de cada uno de los amplificadores de ganancia variable primero y segundo están en comunicación eléctrica con el transformador. El sistema también puede incluir un desfasador, en el que una señal del primer amplificador de ganancia variable pasa a través del desfasador antes de combinarse con otra señal del segundo amplificador de ganancia variable.

En un ejemplo, el primer atenuador incluye un atenuador óptico variable que tiene una entrada de control electrónica configurada para recibir la primera señal de control, interpuesto el atenuador óptico variable entre una salida del interferómetro y el primer fotorreceptor. Además, el primer fotorreceptor y el segundo fotorreceptor pueden incluir un primer receptor activamente equilibrado y además comprende un divisor de polarización de dos canales configurado para dividir la luz del interferómetro en la luz de una primera polarización y la luz de una segunda polarización, un segundo receptor activamente equilibrado que comprende un tercer fotorreceptor y un cuarto fotorreceptor, en el que el primer receptor activamente equilibrado está posicionado para recibir la luz de una primera polarización y el segundo receptor activamente equilibrado está posicionado para recibir la luz de la segunda polarización. El sistema puede incluir un segundo amplificador que tiene una primera entrada en comunicación eléctrica con el segundo fotorreceptor y una primera salida, configurado el segundo amplificador para transmitir, desde la primera salida, una señal amplificada que comprende un componente de ruido de intensidad de láser y datos de medición del interferómetro. En un ejemplo, el amplificador es un amplificador de transimpedancia y en el que el segundo amplificador es un amplificador de transimpedancia.

Un ejemplo se refiere al sistema de tomografía de coherencia óptica. El sistema incluye un interferómetro que tiene una salida de señal de muestra y una salida de señal de referencia; un láser en comunicación óptica con el interferómetro, teniendo el láser tiene un ruido de intensidad de láser; un fotorreceptor activamente equilibrado para recibir luz de la salida de señal de muestra y la salida de señal de referencia, comprendiendo el fotorreceptor activamente equilibrado un atenuador y una entrada de señal de control; una red de retroalimentación en comunicación eléctrica con el fotorreceptor activamente equilibrado, configurada la red de retroalimentación para generar una señal de control al menos en respuesta al componente de ruido de intensidad de láser de manera que el ruido de intensidad de láser o el ruido de línea de patrón se reduzca o se suprima mediante el atenuador en respuesta a recibir la señal de control en la entrada de la señal de control. El atenuador puede incluir una primera resistencia y una segunda resistencia conectadas en un primer nodo y un primer transistor y un segundo transistor conectados en un segundo nodo y en comunicación eléctrica con la primera resistencia y la segunda resistencia. En un ejemplo, el atenuador se selecciona del grupo que consiste en un atenuador óptico variable, un transistor, un MOSFET, un diodo, un atenuador de división de corriente, una resistencia, un amplificador de ganancia variable y un transistor de microondas. En un ejemplo, la red de retroalimentación incluye (a) un filtro que transmite frecuencias por debajo de una banda de señal de interferencia, (b) un integrador en comunicación eléctrica con el filtro y (c) un par de amplificadores rectificadores en comunicación eléctrica con el integrador.

Además, en un ejemplo, la red de retroalimentación incluye (a) un filtro de paso de banda que transmite frecuencias por debajo o por encima de una banda de señal de interferencia, (b) un detector RMS en comunicación eléctrica con el filtro de paso de banda, (c) un convertidor de analógico a digital en comunicación eléctrica con el detector RMS, (d) un microprocesador en comunicación eléctrica con el convertidor de analógico a digital, y (e) un convertidor de digital a analógico en comunicación eléctrica con el microprocesador. En un ejemplo, los métodos y dispositivos se seleccionan para funcionar al menos en parte en el intervalo de aproximadamente 1 MHz a aproximadamente 250 MHz.

En un aspecto, la invención se refiere a un aparato para suprimir o reducir el ruido de intensidad en un sistema de detección interferométrica o formación de imágenes. El aparato puede incluir un par de fotodetectores conectados a al menos una salida de un interferómetro equilibrado; un par emparejado de atenuadores variables de banda ancha

asociados con el par de fotodetectores, configurados los atenuadores variables de banda ancha para restar al menos una corriente generada por el par de fotodetectores; un amplificador de banda ancha que tiene una salida, configurado el amplificador para amplificar las fotocorrientes diferenciales para producir una señal con ruido de intensidad reducida; y una red de retroalimentación configurada para muestrear continuamente el ruido de intensidad residual en respuesta a una señal de interferencia en la salida del amplificador de banda ancha y producir un par de señales dirigidas de manera opuesta para controlar la atenuación de al menos una fotocorriente. En un ejemplo, el aparato incluye atenuadores tales como uno o dos pares de transistores de microondas con señales de control complementarias que dirigen las fotocorrientes hacia el terminal inversor o no inversor de un amplificador de transimpedancia de banda ancha con entradas y salidas diferenciales. En otro ejemplo, las salidas diferenciales se combinan en un transformador tal como un transformador de radiofrecuencia de banda ancha.

En un aspecto, la invención se refiere a dos receptores independientes activamente equilibrados con equilibrio electrónico para supresión de ruido. En otro ejemplo, un primer fotodetector en el primer receptor se conecta a una salida de polarización vertical de un divisor de polarización en una salida de un interferómetro desequilibrado. En otro ejemplo, un fotodetector segundo en el primer receptor se conecta a la salida de un divisor de haz insensible a la polarización que muestrea la potencia de referencia. En un ejemplo, el fotodetector segundo en el primer receptor se conecta a la salida de polarización horizontal de un divisor de polarización en la salida de un interferómetro desequilibrado y el fotodetector segundo en el primer receptor se conecta a la salida de un divisor de haz insensible a la polarización.

Las realizaciones descritas en el presente documento son adecuadas para su uso con fuente barrida y fuentes sintonizables tales como láseres y otras fuentes electromagnéticas.

Breve descripción de los dibujos

Las figuras no son necesariamente a escala, poniendo en cambio énfasis por lo general en los principios ilustrativos. Las figuras deben considerarse ilustrativas en todos los aspectos y no destinadas a limitar la invención, cuyo alcance solo está definido por las reivindicaciones.

La figura 1 es un diagrama esquemático de un fotoamplificador pasivamente equilibrado a la salida de un interferómetro.

La figura 2 es un diagrama esquemático de un sistema de tomografía de coherencia óptica (FD-OCT) de dominio de la frecuencia que emplea un fotorreceptor de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

La figura 3 es un diagrama esquemático de un fotorreceptor activamente equilibrado para la reducción del ruido de intensidad de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

La figura 4 es un diagrama esquemático de un fotorreceptor activamente equilibrado que incluye uno o dos pares de transistores u otros elementos de conmutación.

La figura 5 es un diagrama esquemático de un fotorreceptor activamente equilibrado que incluye uno o más amplificadores de ganancia variable.

La figura 6 es un diagrama esquemático de un fotorreceptor activamente equilibrado que incluye uno o más atenuadores.

La figura 7 es un diagrama esquemático de una realización de red de retroalimentación adecuada para su uso con los diversos sistemas, métodos y componentes descritos en el presente documento de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

La figura 8 es una gráfica de un espectro de frecuencias de ruido de intensidad de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

La figura 9 es un diagrama esquemático que muestra realizaciones alternativas para la(s) banda(s) de paso de un filtro utilizado en una red de retroalimentación de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

La figura 10 es un diagrama esquemático que representa una red de retroalimentación de microcontrolador digital adecuada para su uso con los diversos sistemas, métodos y componentes descritos en el presente documento de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

La figura 11 es un diagrama de temporización esquemático de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

La figura 12 es un diagrama esquemático que representa un sistema de FD-OCT de diversidad de polarización que emplea dos fotorreceptores activamente equilibrados de acuerdo con un ejemplo.

La figura 13 es un diagrama esquemático de un sistema de FD-OCT que incluye dos fotorreceptores activamente equilibrados que funcionan de forma independiente para suprimir o reducir el ruido de intensidad de láser de acuerdo con una realización ilustrativa de la invención.

5 **Descripción detallada**

La siguiente descripción se refiere a los dibujos adjuntos que ilustran ciertas realizaciones de la invención. Son posibles otras realizaciones y se pueden hacer modificaciones a las realizaciones sin apartarse del alcance de la invención. Por lo tanto, la siguiente descripción detallada no pretende limitar la presente invención. Más bien, el alcance de la presente invención está definido por las reivindicaciones adjuntas.

15 El ruido de intensidad de láser juega un papel importante en la tomografía de coherencia óptica de dominio de la frecuencia (FD-OCT). La FD-OCT puede emplear una fuente de láser rápidamente sintonizada para medir la luz retrodispersada de una muestra a diferentes tiempos de retardo óptico. Las imágenes bidimensionales de reflectividad frente a profundidad a una resolución de 5 - 15 μm se pueden adquirir a partir de un volumen de dispersión a velocidades de trama superiores a 100 fotogramas/s. La FD-OCT se ha aplicado ampliamente en oftalmología, cardiología y otros campos de la medicina.

20 La figura 2 muestra la configuración óptica de un sistema 5 de FD-OCT. La luz procedente de un láser de longitud de onda de barrido (alternativamente un láser sintonizable) L (a la izquierda) está dirigida por un interferómetro 6 en trayectorias de referencia y muestra separadas que conducen a la muestra y a un espejo de referencia, respectivamente. La luz retrodispersada de la muestra se combina con la luz reflejada desde el espejo de referencia. Específicamente, esta luz combinada genera señales de interferencia en los fotodetectores. Las frecuencias recibidas como estos fotodetectores corresponden a las diferencias entre las distancias recorridas por los campos ópticos en la muestra y las trayectorias de referencia.

30 En una realización, el campo de muestra incluye luz recopilada utilizando una sonda de tomografía de coherencia óptica que incluye una fibra óptica giratoria. Cuando la luz se dirige a lo largo de la fibra y se refleja desde la muestra, una o más veces, esto puede constituir un ejemplo de una sesión de recopilación de datos de tomografía de coherencia óptica. Durante una sesión de este tipo, uno o más fotorreceptores reciben luz del interferómetro que se correlaciona con la luz reflejada desde la muestra. En una realización, esto da como resultado la generación de una pluralidad de fotocorrientes en uno o más de los fotorreceptores.

35 En una realización, las señales de interferencia son transformadas por Fourier para generar una matriz de datos (una "línea A") que corresponde a las amplitudes de las reflexiones desde la muestra a profundidades crecientes. Se genera una imagen de la muestra mediante la adquisición de una serie de líneas A como el rayo de muestra escanea la muestra. Los láseres de anillo de fibra y los láseres de semiconductor de cavidad corta se utilizan normalmente para satisfacer los requisitos de ancho de línea y tasa de barrido requeridos para la FD-OCT. La mayoría de estos láseres emiten niveles relativamente altos de ruido de intensidad, porque coexisten múltiples modos estrechamente espaciados dentro de la banda de emisión de los láseres.

45 Por lo tanto, los interferómetros utilizados con los sistemas de FD-OCT, como el sistema 5 de ejemplo que se muestra en la figura 2, generalmente se configuran para la detección equilibrada pasiva para reducir el ruido de intensidad de láser (de manera que los atenuadores y las señales de control no se utilizan como se describe a continuación). Muchos sistemas de FD-OCT también sufren de ruido de línea de patrón, una forma especialmente perniciosa de ruido de intensidad que resulta de múltiples reflexiones dentro de cavidades parasitarias dentro de la fuente láser o interferómetro. Incluso los reflejos de la cavidad parasitaria muy débiles dan lugar a líneas de patrones visibles en las imágenes de FD-OCT, que son difíciles de eliminar mediante el uso de técnicas convencionales de equilibrio pasivo. Por lo tanto, en una realización, los métodos, dispositivos y sistemas descritos aquí en uso, uno o más atenuadores tienen una entrada de señal de control para reducir uno o ambos de ruido de línea de patrón y ruido de intensidad de láser.

55 En contraste con un enfoque de equilibrio pasivo, el sistema 5 de la figura 2 puede incluir atenuadores 7 y 7' para permitir el equilibrio activo o automático. Como se muestra, mediante las flechas punteadas, estos elementos pueden estar en comunicación con la luz incidente o con los fotorreceptores. Específicamente, los atenuadores 7 y 7' pueden conectarse ópticamente a la luz desde la muestra y el campo de referencia, como en el caso en que estos elementos 7 y 7' incluyen atenuadores ópticos variables. Además, cuando los elementos 7 y 7' son de naturaleza eléctrica, pueden colocarse de manera que estén en comunicación eléctrica con los fotorreceptores que reciben y transforman la luz de la muestra o el campo de referencia en fotocorrientes o voltajes variables en el tiempo. Como ejemplo, los elementos 7 y 7' pueden incluir atenuadores individuales, circuitos de atenuación u otros elementos controlables tales como transistores, diodos y otros componentes o subsistemas como se describe a continuación. En un ejemplo preferido, los elementos 7 y 7' de equilibrio activos incluyen entradas de señal de control que permiten cambiar sus características ópticas o eléctricas.

65 El rendimiento de un fotorreceptor pasivamente equilibrado que se muestra en la figura 1 depende de la igualación

de las intensidades de incidentes (I^+ , I^-), las responsividades de los fotodiodos (R_A , R_B) y las transimpedancias del amplificador para entradas de corriente positivas y negativas (G^+ , G^-):

$$R_A I^+ G^+ = R_B I^- G^- \quad [\text{Ec. 1}]$$

5 Esta condición de coincidencia puede satisfacerse, en general, a solo una frecuencia de ruido debido al tiempo de tránsito de portadora finita y la reactancia parasitaria de los fotodetectores. Para un circuito dado, la ganancia del amplificador y la razón de rechazo en modo común también dependen de la frecuencia debido a los desequilibrios reactivos y de tránsito de portadora dentro de la electrónica del amplificador. Por lo tanto, para garantizar una supresión de ruido de alta intensidad, falla un enfoque pasivo. En cambio, las intensidades de incidentes se pueden
10 ajustar para compensar las diferencias estáticas y dinámicas en los fotodiodos y el amplificador que producen voltajes de ruido residual en la salida. Un enfoque activo o automático, tal enfoque basado en retroalimentación, permite una compensación estática y dinámica para tales diferencias a lo largo del tiempo.

15 Una realización preferida de la presente invención descrita a continuación emplea un par de atenuadores de fotocorriente de banda ancha controlados por una señal de retroalimentación filtrada. Esta realización mantiene el equilibrio electrónicamente durante todo el período del barrido de longitud de onda del láser sintonizable. Este enfoque permite una mejora impresionante del rendimiento en comparación con el de un sistema pasivo. La retroalimentación anula los voltajes de ruido muestreados dentro de una banda de frecuencia definida en la salida de un amplificador. Por lo tanto, en una realización, los voltajes de ruido se anulan continuamente dentro de la banda
20 de señal adyacente aplicando la atenuación de fotocorriente en la misma proporción en un amplio intervalo de frecuencias que incluye la banda de señal. Estos atenuadores de fotocorriente pueden implementarse utilizando diversos elementos tales como MOSFETS, transistores bipolares, diodos PIN, atenuadores ópticos y combinaciones de los mismos. En algunas realizaciones, estos atenuadores de fotocorriente están en comunicación eléctrica con los fotorreceptores de un sistema de tomografía de coherencia óptica. También se puede utilizar una red de retroalimentación para generar señales de control que regulan los atenuadores de fotocorriente en una realización preferida.

La figura 3 muestra el sistema 10 que incluye un fotorreceptor activamente equilibrado. Este fotorreceptor incluye fotodiodos primero P_1 y segundo P_2 y un fotoamplificador equilibrado configurado para la supresión activa de ruido
30 de intensidad de acuerdo con la presente invención. Las fotocorrientes son generadas por los fotodiodos P_1 , P_2 en respuesta a la radiación electromagnética de entrada I^- , I^+ que tiene una intensidad variable en el tiempo. Esta radiación puede ser ligera desde un sistema de tomografía de coherencia óptica. Por lo tanto, la luz desde una muestra y la luz desde una referencia (como un reflector, por ejemplo) pueden dirigirse a los fotodiodos P_1 , P_2 en una realización. Como los fotodiodos generan una corriente de salida en respuesta a los fotones incidentes, se
35 utiliza un amplificador 14 de transimpedancia con una resistencia R_f de retroalimentación conocida para generar un voltaje de salida. Conocer el valor de R_f permite calcular la fotocorriente. En una realización, una transimpedancia puede incluir un condensador opcional en paralelo con la resistencia R_f .

40 La supresión o reducción del ruido se produce a través de un proceso activo en el sistema 10. Como se muestra, la retroalimentación activa se utiliza en forma de voltajes c y d de control. Esto está en contraste con los sistemas pasivos de la figura 1. Además, la reducción o supresión del ruido activo es posible a través de un atenuador 12 tal como un atenuador de división de corriente u otro circuito o elemento de atenuación que responde a una o más señales de control tales como, por ejemplo, las señales c y d de control.

45 En una realización, ambos fotodiodos están en comunicación eléctrica con este atenuador 12 como se muestra en la figura 3. Las resistencias R_1 y R_2 y un par de transistores o conmutadores E_1 , E_2 se muestran en una configuración de puente con una conexión a tierra en el lado izquierdo y un nodo de salida conectado a un amplificador 14 de transimpedancia a la derecha. El valor de R_1 y R_2 son típicamente iguales en valor y en el intervalo de aproximadamente 20 a aproximadamente 1000 ohmios. Los valores en el extremo superior de este intervalo
50 permiten grandes desajustes en fotocorrientes nominales en condiciones desequilibradas, pero aumentan el ruido térmico a alta frecuencia. En dos realizaciones, R_1 y R_2 son iguales a 100 o 200 ohmios, lo que permite un funcionamiento de bajo ruido a 250 MHz y 100 MHz, respectivamente, con desequilibrios de fotocorriente de hasta el 25%.

55 Dependiendo de los valores de las voltajes c y d de control analógicas o digitales aplicadas a E_1 , E_2 (en una realización E_1 , E_2 corresponden a las puertas del par de transistores MOSFET), una fracción variable de la fotocorriente asociada con la intensidad I^- o la fotocorriente asociada con la intensidad I^+ se desvía de la entrada inversora del amplificador 14 de transimpedancia a tierra. En una realización, el amplificador 14 de transimpedancia incluye un amplificador de funcionamiento y una resistencia R_f de retroalimentación. Estos elementos de circuito E_1 ,
60 E_2 pueden ser transistores MOSFET, transistores de microondas u otros elementos de circuito de respuesta de señal de control en una realización.

Con respecto a la figura 3, los voltajes c y d de control se derivan de la red 20 de retroalimentación de autoequilibrio que amplifica pequeños voltajes de ruido de ida positiva o ida negativa a la salida del amplificador 14 de

transimpedancia. En una realización, los voltajes c y d de control se accionan rápidamente en la dirección que minimiza el voltaje de ruido muestreado. El amplificador 14 de transimpedancia está diseñado para proporcionar una ganancia aproximadamente constante sobre el intervalo de frecuencia CC-120MHz. Esto puede establecerse mediante la resistencia R_f de retroalimentación. Los MOSFET de baja capacitancia (capacitancia de fuente de drenaje típica $<0,6$ pf) que tienen conexiones de puerta aisladas son deseables para utilizar como elementos E_1 , E_2 en algunas realizaciones para lograr respuestas de frecuencia planas e iguales tanto para los componentes de señal como los de ruido de las fotocorrientes asociadas con intensidades I^- e I^+ .

La salida del amplificador 14 de transimpedancia es una señal de voltaje variable en el tiempo con respecto a la cual se ha aplicado supresión o reducción del ruido. Esta señal es un voltaje que es proporcional a la fotocorriente de acuerdo con lo determinado por el valor de R_f . Esta señal amplificada se transmite luego a la entrada 18 de la red 20 de retroalimentación y a un filtro 25 de paso de banda. Esta señal amplificada contiene ruido de intensidad de láser. El filtro 25 está configurado para pasar una banda de señal de frecuencia particular. Detalles adicionales relacionados con una realización particular de una red 20 de retroalimentación se describen a continuación con respecto a la figura 7. Una vez que la señal ha sido procesada por el filtro 28, está lista para su posterior transmisión y procesamiento en una salida tal como una salida 30 de preamplificador. En un sistema de ejemplo de OCT de dominio de Fourier, la salida de señal en la salida del preamplificador se amplifica y se filtra típicamente para antisolapamiento en etapas de procesamiento adicionales antes de ser digitalizada y transformada por Fourier.

Todavía haciendo referencia a la realización general de la figura 3, con polarización externa, los transistores bipolares o los atenuadores RF basados en diodos Schottky pueden utilizarse como elementos E_1 , E_1 de circuito en lugar de transistores. Desafortunadamente, estos dispositivos generalmente exhiben mayores corrientes de compensación y baja linealidad, lo que puede degradar el intervalo dinámico y la supresión en modo común del amplificador.

Otra consideración de diseño es la reducción de las capacidades parásitas. Las capacidades parásitas asociadas con cada transistor u otro elemento E_1 , E_1 de circuito se pueden reducir aún más utilizando varios componentes y subsistemas. Por ejemplo, en una realización conectando dos transistores MOSFET en serie y controlando ambos con la misma señal de puerta aislada, se reducen las capacidades parásitas. Además, como consideración de diseño, la selección de un amplificador 14 de funcionamiento que exhibe un producto de ancho de banda de ganancia suficientemente ancho (> 3 GHz) facilita mantener una ganancia constante a altas frecuencias.

Si se desea la cancelación de ruido en CC, el desplazamiento del amplificador 14 puede configurarse lo suficientemente bajo como para evitar la introducción de un desplazamiento estático en las fotocorrientes, lo que puede reducir el grado de supresión del ruido. El efecto del desplazamiento del amplificador operacional 14 se puede reducir adicionalmente añadiendo una resistencia de cancelación de desplazamiento con una resistencia igual a la de la resistencia de retroalimentación en serie con la entrada no inversora del amplificador operacional 14. En una configuración de este tipo, las fuentes de los transistores deberían conectarse al terminal no inversor en lugar de a tierra.

Otro ejemplo de un sistema 50 de supresión o reducción de ruido de intensidad se representa en la figura 4. El principio básico de funcionamiento de este sistema basado en un elemento de circuito es similar al del sistema en la figura 3. A saber, las señales de control se utilizan para cambiar las propiedades de los elementos sensibles para reducir el ruido de intensidad en una fotocorriente dada. Una diferencia del sistema 10 de la figura 3 es que se utiliza un amplificador 55 de transimpedancia diferencial, que incluye un amplificador operacional 57 y resistencias R_f de referencia, en el sistema 50. En la figura 4, se pueden utilizar uno o dos pares de transistores, conmutadores o elementos eléctricos similares. Como se muestra, el sistema 50 incluye dos pares de transistores en una disposición diferencial para equilibrar las fotocorrientes de los fotodiodos P_1 , P_2 u otras fuentes de señal en la entrada de un amplificador 55 de transimpedancia con entradas y salidas diferenciales.

El sistema 50 de la figura 4 incluye un primer fotodiodo P_1 y un segundo fotodiodo P_2 que están en comunicación eléctrica con un primer elemento controlable E_1 y un segundo elemento controlable E_2 . Como fue el caso con la figura 3, E_1 , E_2 pueden ser transistores tales como MOSFET, otros elementos de circuito controlables adecuados, u otros atenuadores. Un tercer elemento o conmutador controlable S_1 y un cuarto elemento o conmutador controlable S_2 también están en comunicación eléctrica con el fotodiodo primer P_1 y el segundo fotodiodo P_2 . A su vez, cada uno de los cuatro elementos o atenuadores controlables E_1 , E_2 , S_1 y S_2 son comunicaciones eléctricas con un amplificador 55 de transimpedancia diferencial. El amplificador 55 está en comunicación eléctrica con un transformador T. A su vez, el transformador T está en comunicación eléctrica con una red 20 de retroalimentación. Una red 20 adecuada se describe en el presente documento tal como con respecto a las figuras 7 y 10.

En este sistema 50, en lugar de desviar el exceso de corriente de uno de los fotodiodos P_1 , P_2 a tierra, un transistor o conmutador MOSFET segundo S_1 , S_2 para cada uno de los fotodiodos P_1 , P_2 , con su puerta controlada por un voltaje complementaria, dirige la fotocorriente a la entrada opuesta de un amplificador diferencial de transimpedancia. Esta disposición mejora la eficiencia del detector equilibrado. Esta mejora se produce porque tanto la fase de la fotocorriente de ruido como su amplitud se alteran para lograr una condición equilibrada. Para formar una salida de un solo extremo, las salidas diferenciales del amplificador 55 de transimpedancia diferencial se

combinan mediante un transformador T tal como un transformador de RF de banda ancha. A su vez, el voltaje de salida del transformador T continúa como una señal que se transmite a lo largo de la entrada 18 a la red 20 de retroalimentación o se filtra utilizando el filtro de paso de banda antes de alcanzar una salida 30 para el procesamiento, amplificación o transmisión adicional.

5 La figura 5 ilustra otro ejemplo del sistema 75 que incluye un circuito electrónico para supresión o reducción del ruido de intensidad. Varios de los elementos representados en la figura 5 son similares a los descritos anteriormente y se representan en las figuras 2 y 3. Un primer fotodiodo P_1 y un segundo fotodiodo P_2 están cada uno en comunicación eléctrica con un amplificador 81, 83 de transimpedancia primero y segundo, respectivamente, como se muestra. A
10 su vez, cada uno de los dos amplificadores 81, 83 de transimpedancia está en comunicación eléctrica con los amplificadores 91, 93 de ganancia variable primero y segundo.

En este sistema 75, los amplificadores 91, 93 de ganancia variable electrónicos separados igualan las señales de intensidad de ruido antes de la resta en un transformador de radiofrecuencia de banda ancha. Opcionalmente, en una realización, se utiliza un desfasador 95, tal como un desfasador de banda ancha. Aunque este sistema 75
15 emplea un mayor número de componentes que el ejemplo de la figura 3, el uso de amplificadores 91, 93 de ganancia variable separados y electrónica 95 de control de fase (opcional) proporciona más flexibilidad para adaptar la coincidencia de frecuencia entre los dos canales ópticos (el canal de referencia y el canal de muestra) en todo el intervalo de control dinámico.

Las características restantes de la figura 5 son similares a las discutidas anteriormente. La señal de voltaje variable en el tiempo en la entrada 18, que está correlacionada con la fotocorriente, se transmite desde la transformada T. Después de la etapa del transformador, la señal continúa en una red 20 de retroalimentación. Además, la señal también se puede filtrar utilizando un filtro 25 de paso de banda antes de alcanzar una salida 30.
20

Todavía otro ejemplo de un sistema 100 de supresión de ruido de intensidad basada en elementos de circuito electrónico se representa en la figura 6. Esta realización emplea dos atenuadores ópticos variables (VOA) 102, 103 para igualar las amplitudes de las fotocorrientes generadas por las intensidades de luz I_A e I_B que inciden sobre los fotodiodos P_1 , P_2 . Los dos VOA están en comunicación óptica con los fotodiodos P_1 , P_2 . Además, una o más propiedades ópticas de los VOA responden a las señales c y d de control. Los fotodiodos están a su vez en comunicación eléctrica con un amplificador 105 de transimpedancia. Específicamente, los atenuadores ópticos variables 102, 103 igualan las señales de intensidad de ruido antes de la sustracción por un amplificador 105 de transimpedancia.
25

Este amplificador 105 está activamente equilibrado por las dos VOA antes de que se reciba una fotocorriente en la entrada del amplificador 105. Existen varios tipos de VOA monomodo, que incluyen atenuadores electroópticos, motorizados y basados en MEM, que permiten un control continuamente variable de la transmisión óptica con baja pérdida de inserción. Una ventaja de la atenuación óptica en lugar de la atenuación electrónica es que se eliminan las reactancias parasitarias introducidas por elementos de circuito adicionales. Como resultado, se reduce la dependencia de frecuencia de la ganancia y la relación de rechazo de modo común del amplificador 105. También se muestran una red 20 de retroalimentación, un filtro 25 de paso de banda y una salida 30 y son similares a las características descritas anteriormente.
30

La figura 7 muestra una realización de una red 130 de retroalimentación para utilizar con cualquiera de los sistemas o componentes en las figuras 3-6. Una señal de entrada variable en el tiempo se introduce en la red 20 después de la fotocorriente a la conversión o amplificación de voltaje por un amplificador como se muestra en las figuras 3-6 y discutido arriba. En una realización, la red 20 es una red analógica de retroalimentación de autoequilibrio. En otra realización, la red se implementa utilizando componentes digitales o responde a señales digitales. En una realización, esta red 20 incluye un primer amplificador 135 y un segundo amplificador 137. La red también incluye un integrador 140. Además, en una realización, la red incluye un filtro 142, tal como un filtro de paso bajo o un filtro de paso de banda general, como es apropiado para un intervalo dado de frecuencias de interés. En una realización, los amplificadores primero y segundo 135 y 137, respectivamente, son dos amplificadores rectificadores de alta ganancia.
35

En una realización, la banda de paso del filtro 142 se elige para transmitir ruido con frecuencias por debajo de la banda de señal de interferencia (hágase referencia a la figura 9). En algunos sistemas de tomografía de coherencia óptica, como los sistemas de dominio de la frecuencia, se utiliza una fuente de láser de barrido, como un láser bloqueado en modo de dominio de Fourier con una frecuencia o período de barrido particular. En una realización, la banda de paso de ruido generalmente incluye la frecuencia de repetición de barrido del láser. Por lo tanto, en una realización, el filtro 142 no transmite ningún dato de señal, sino que más bien transmite uno o más tipos de ruido para la conversión a señales de control tales como señales c y d. La red 20 está diseñada para responder lo suficientemente rápido como para anular o reducir substancialmente las variaciones de intra-barrido o inter-barrido en la intensidad de láser y otros efectos generadores de ruido sin degradar la integridad de las señales de interferencia en la banda de paso. Esta realización tiene las ventajas de bajo coste, simplicidad y velocidad; también
40
45
50
55
60
65 permite un control bidireccional estable en frecuencias cercanas a CC.

La figura 8 es una gráfica 145 de un espectro de frecuencia de ruido de intensidad medido a la salida de un fotorreceptor equilibrado con (1) detección de fotodiodo único, (2) detección equilibrada pasivamente y (3) detección equilibrada activamente de acuerdo con la realización preferida de la invención con retroalimentación analógica filtrada de paso bajo. El eje X es la frecuencia (unidades de Hz en la escala logarítmica) y el eje Y es la potencia de la señal (unidades de dB). Los espectros de amplitud de ruido en la figura 8 demuestran el grado de supresión de ruido que se puede lograr en la práctica mediante el uso de equilibrio activo, implementado de acuerdo con la realización preferida de la invención (figura 3) con la red analógica 20 de autoequilibrio de la figura 7. Específicamente, una revisión de las curvas mostradas en la figura 8 indica que el fotodiodo único tiene más ruido, seguido por el sistema pasivamente equilibrado, y finalmente que el sistema activamente equilibrado muestra la mayor reducción de ruido.

La figura 9 es un diagrama esquemático que muestra realizaciones alternativas para la(s) banda(s) de paso de un filtro en una red de retroalimentación tal como el filtro 142 de la red 20 o las discutidas a continuación tal como con respecto a la figura 10. La figura 9 muestra una gráfica 150 de la intensidad de la señal frente a la frecuencia para cinco bandas de frecuencia diferentes. Las regiones sombreadas indican las regiones de frecuencia fuera de las bandas de paso de la señal OCT que están disponibles para el funcionamiento del filtro de retroalimentación empleado en varias realizaciones del fotorreceptor de autoequilibrio o equilibrado activo. De izquierda a derecha, las bandas de paso de frecuencia relevantes son las siguientes: paso bajo, banda estrecha y paso alto. Téngase en cuenta que, aunque la banda de paso estrecha se muestra en la región de paso bajo, también puede estar en la región de paso alto. La banda de paso de la señal se refiere a la banda de frecuencias correspondiente a la señal de interés, tal como los datos OCT recopilados para una muestra de interés que pasa a través de un filtro dado. Las bandas de paso baja y alta se refieren a las bandas de frecuencia por debajo y por encima de la banda de paso de señal que contienen principalmente ruido de la fuente de luz. La banda de paso estrecha se refiere a una región dentro de la banda de paso alto o bajo en la que se encuentran las señales de retroalimentación.

En una realización, se utiliza un filtro de paso bajo, con una frecuencia de corte por debajo de la frecuencia más baja de la banda de paso de la señal, con realizaciones de la invención que emplean la red 20 de filtro analógico de la figura 7. Se puede utilizar un filtro de paso bajo, paso de banda estrecho o de paso alto con la red de retroalimentación del microcontrolador digital de la figura 10. El paso de banda estrecho se puede utilizar, por ejemplo, con implementaciones basadas en el funcionamiento síncrono. En una realización, se utiliza una entrada de seguimiento/retención opcional para el equilibrio síncrono de acuerdo con una realización de la invención como se discute a continuación.

Una realización alternativa de la red 20 de retroalimentación de autoequilibrio, que se muestra en la figura 10, emplea un microcontrolador para controlar de manera adaptativa los parámetros de retroalimentación para acomodar una variedad de bandas de paso de filtro y, en algunas realizaciones, el funcionamiento síncrono. La señal del amplificador posterior a la transimpedancia se recibe en la entrada 18 de esta red 160. En esta realización, se puede emplear un filtro de paso bajo, banda de paso de señal, o de paso alto como el filtro 162 de paso de banda para seleccionar la banda de frecuencia utilizada para cancelar el voltaje de ruido en la salida del amplificador de transimpedancia (consúltese la figura 9).

Como se muestra, un detector de valor cuadrático medio (RMS) produce un voltaje proporcional a la potencia de ruido, que luego es muestreado por un convertidor de analógico a digital cuya salida digital es leída por el microcontrolador. Para mantener un valor nulo en el nivel de voltaje de ruido RMS, el microcontrolador ajusta los voltajes c o d de control analógico mediante convertidores de digital a analógico. Estos voltajes de control se retroalimentan a su vez en uno de los ejemplos mostrados en las figuras 3-6 descritos anteriormente a un elemento o atenuador controlable tal como un transistor o un atenuador óptico. Una señal de control de pista y/o retención, que rastrea una señal proporcional al error de equilibrio del fotoamplificador durante el ciclo de no formación de imágenes y la mantiene durante el ciclo de formación de imágenes, también se puede utilizar opcionalmente como se muestra y se discute a continuación.

Además, se pueden emplear métodos de búsqueda adecuados, como las rutinas rápidas de búsqueda de gradientes, para encontrar y mantener el nivel de ruido nulo o reducido mediante el ajuste continuo del voltaje de control, como las señales c o d. Dado que esta realización de la red de retroalimentación se basa en la anulación RMS, la banda de paso del filtro no necesita incluir CC. Para la conveniencia de la implementación, se puede emplear un filtro de paso de banda con una banda de paso por encima o por debajo de la banda de frecuencia de las señales de interferencia. Para aplanar aún más la respuesta de frecuencia del supresor de ruido, la suma de las salidas de dos detectores RMS conectados a los filtros en ambos extremos del espectro de señal puede anularse en lugar de la salida de un único detector RMS.

Esta realización se presta al uso de la detección síncrona para mejorar la precisión de seguimiento de la retroalimentación y para permitir que las bandas de frecuencia de la supresión del ruido de intensidad y las bandas de señal se superpongan. Tales mejoras pueden lograrse utilizando una señal de seguimiento/retención (figura 10) sincronizada con el barrido láser que ordena al microcontrolador que mantenga los voltajes de control encontrados durante el ciclo de no formación de imágenes, el período durante el barrido del láser de retorno cuando la señal de interferencia se apaga y las señales OCT no se adquieren. Los voltajes de control retenidos pueden luego aplicarse

a las salidas c y d de los convertidores de digital a analógico durante el ciclo de formación de imágenes cuando se adquieren las señales OCT. De esta manera, la banda de paso del filtro 162 de retroalimentación se puede expandir para abarcar todo el intervalo de señal para una supresión de ruido óptima.

5 Este modo síncrono de funcionamiento puede implementarse utilizando el diagrama de temporización de la figura 11. Este modo de funcionamiento síncrono permite la supresión de ruido en las frecuencias dentro de la banda de paso de la señal. Se muestran a lo largo del tiempo seis señales de eje relevantes para diferentes fases de funcionamiento de las realizaciones descritas en el presente documento en la figura 11. Desde la parte superior, estas señales y su perfil a lo largo del tiempo incluyen (1) intensidad de láser, (2) ciclo de formación de
10 imágenes/brazo de muestra de señales de interferómetro, (3) ruido de intensidad, (4) error de salida/equilibrio del detector RMS, (5) control seguimiento y retención de señales, y (6) retroalimentación de ejemplo y señales de control tales como señales c y d. Como se muestra en la figura 11, los voltajes de control de retroalimentación generados durante el ciclo de no formación de imágenes (es decir, el intervalo de tiempo durante el cual se apaga la luz de la muestra) se mantienen y se aplican posteriormente durante el ciclo de formación de imágenes.

15 La efectividad de una red de retroalimentación controlada digitalmente se puede mejorar aún más mediante la aplicación de una modulación de amplitud a la fuente del láser para servir como una señal de retroalimentación síncrona para la red de retroalimentación del autoequilibrio. Esta configuración permite utilizar un demodulador síncrono en lugar del detector RMS para la anulación de fase y amplitud.

20 En muchas aplicaciones biológicas de la tomografía de coherencia óptica de dominio de la frecuencia, se desea la detección de diversidad de polarización para reducir los artefactos de imagen producidos por los tejidos birrefringentes. Los métodos, sistemas y dispositivos de supresión de ruido descritos en el presente documento son adecuados para su uso con interferómetros de diversidad de polarización. Por ejemplo, el interferómetro en la figura
25 12 permite la detección de diversidad de polarización utilizando dos canales de fotorreceptor, cada uno con un equilibrio activo independiente para la supresión del ruido de intensidad. El sistema 175 puede procesar diferentes estados de polarización tales como polarización H o polarización V como se muestra. Además, como se muestra en la figura 12, los dos fotocaptadores funcionan de forma independiente para suprimir el ruido de la intensidad de láser. Esta configuración del sistema de la figura 12 utiliza dos controladores de polarización para equilibrar los dos pares
30 de intensidades de salida.

Con respecto a la figura 12, una desventaja de este tipo de interferómetro es que, para evitar grandes pérdidas por la atenuación en exceso aplicada a uno o más de los canales de fotodiodos, los estados de polarización de los pares de intensidad (I_H^+ , I_H^-) y (I_V^+ , I_V^-) debe ser igualado en la entrada del divisor de polarización. En un ejemplo, esta
35 ecualización requiere un ajuste independiente de dos controladores de polarización.

El interferómetro 190 mostrado en la figura 13 emplea solo un controlador de polarización, que se ajusta para dividir la intensidad de láser de referencia por igual entre I_H^+ e I_V^+ . Esta configuración del sistema requiere solo un controlador de polarización para equilibrar los dos pares de intensidades de salida. Aquí, el interferómetro 190
40 funciona en el modo desequilibrado y está configurado con una relación de división asimétrica, m: (1-m), donde m típicamente es igual o superior a aproximadamente 0,9. Esta configuración alivia la dificultad de igualar los estados de polarización en dos pares de fotodiodos simultáneamente y se basa en cambio en los circuitos de autoequilibrio para ajustar electrónicamente las atenuaciones en cada canal para lograr la supresión o reducción del ruido.

45 En la descripción, la invención se discute en el contexto de la tomografía de coherencia óptica; sin embargo, estas realizaciones no pretenden ser limitativas y los expertos en la técnica apreciarán que la invención también puede utilizarse para otras modalidades de diagnóstico y diagnóstico por imagen o sistemas ópticos en general.

50 Los aspectos, las realizaciones, las características y los ejemplos de la invención deben considerarse ilustrativos en todos los aspectos y no están destinados a limitar la invención, cuyo alcance se define únicamente por las reivindicaciones. Otras realizaciones, modificaciones y usos serán evidentes para los expertos en la materia sin salir del espíritu y alcance de la invención reivindicada.

REIVINDICACIONES

- 1.- Un método para reducir o suprimir el ruido de intensidad de una fuente de láser en un sistema de tomografía de coherencia óptica que comprende un primer atenuador en comunicación eléctrica con una primera resistencia, un
 5 segundo atenuador en comunicación eléctrica con una segunda resistencia, y en el que el primer atenuador, el segundo atenuador, la primera resistencia y la segunda resistencia están dispuestos en una configuración de puente, comprendiendo el método:
- transmitir luz desde un láser a un interferómetro;
 10 generar una primera fotocorriente y una segunda fotocorriente durante una sesión de recopilación de datos de tomografía de coherencia óptica, cada una de las fotocorrientes proporcional a luz recibida del interferómetro;
- recibir la primera fotocorriente en el primer atenuador;
 15 recibir la segunda fotocorriente en el segundo atenuador;
- convertir la primera fotocorriente y la segunda fotocorriente en una señal amplificada que comprende un componente de ruido de intensidad de láser que utiliza un amplificador; y
 20 transmitir una señal de control para controlar o bien el primer atenuador o bien el segundo atenuador; en el que la señal de control atenúa automáticamente la mayor de la primera fotocorriente y la segunda fotocorriente.
- 2.- El método de la reivindicación 1, en el que la señal de control se genera utilizando el componente de ruido de intensidad de láser.
 25
- 3.- El método de la reivindicación 1, que comprende además el paso de generar la señal de control filtrando la señal amplificada, integrando la señal amplificada filtrada, y amplificando la señal amplificada filtrada integrada.
- 4.- El método de la reivindicación 1, en el que los atenuadores primero y segundo se seleccionan del grupo de un fotorreceptor, un transistor, un diodo, una resistencia, un amplificador de ganancia variable, un par de resistencias
 30 en comunicación eléctrica con un par de transistores, y combinaciones de estos.
- 5.- El método de la reivindicación 1, que comprende además el paso de equilibrar activamente un primer fotorreceptor y un segundo fotorreceptor, repitiendo el paso de transmitir la señal de control hasta que el componente de ruido de láser alcanza un mínimo.
 35
- 6.- Un sistema de tomografía de coherencia óptica, que comprende:
- una primera resistencia (R_1); un primer fotorreceptor (P_1) para recibir luz de un interferómetro en comunicación óptica con un láser que tiene ruido de intensidad de láser y en comunicación eléctrica con la primera resistencia;
 40 un primer atenuador (E_1) en comunicación con el primer fotorreceptor y en comunicación eléctrica con la primera resistencia, en el que el primer atenuador está configurado para cambiar una primera propiedad eléctrica del primer atenuador;
- una segunda resistencia (R_2); un segundo fotorreceptor (P_2) para recibir luz del interferómetro y en comunicación eléctrica con la segunda resistencia;
 45 un segundo atenuador (E_2) en comunicación con el segundo fotorreceptor y en comunicación eléctrica con la segunda resistencia, en el que el segundo atenuador está configurado para cambiar una segunda propiedad eléctrica del segundo atenuador, en el que los atenuadores primero y segundo están en comunicación eléctrica en un primer nodo;
- un amplificador (14) que tiene una primera entrada y una primera salida, la primera entrada en comunicación eléctrica con la primera resistencia y la segunda resistencia en un segundo nodo y el primer fotorreceptor, configurado el amplificador para transmitir, desde la primera salida, una señal amplificada que comprende un
 50 componente de ruido de intensidad de láser; y
- una red (20) de retroalimentación en comunicación eléctrica con el amplificador, configurada la red de retroalimentación para recibir la señal amplificada y generar una señal de control para cambiar o bien la primera propiedad eléctrica del primer atenuador o bien la segunda propiedad eléctrica del segundo atenuador en respuesta al componente de ruido de intensidad de láser, en el que la señal de control atenúa automáticamente la mayor de la primera propiedad eléctrica del primer atenuador y la segunda propiedad eléctrica del segundo atenuador;
 55
- y en el que el primer atenuador, el segundo atenuador, la primera resistencia y la segunda resistencia están
 60
 65

dispuestos en una configuración de puente.

7.- El sistema de la reivindicación 6, en el que los atenuadores primero y segundo se seleccionan del grupo que consiste en un transistor bipolar, un MOSFET, un diodo, un atenuador de división de corriente y una resistencia.

5 8.- El sistema de la reivindicación 6, en el que la red (20) de retroalimentación comprende (a) un filtro que transmite frecuencias por debajo de una banda de señal de interferencia, (b) un integrador en comunicación eléctrica con el filtro, y (c) un par de amplificadores rectificadores en comunicación eléctrica con el integrador.

10 9.- El sistema de la reivindicación 6, en el que la red (20) de retroalimentación comprende (a) un filtro de paso de banda que transmite frecuencias o bien por debajo o bien por encima de una banda de señal de interferencia, (b) un detector RMS en comunicación eléctrica con el filtro de paso de banda, (c) un convertidor de analógico a digital en comunicación eléctrica con el detector RMS, (d) un microprocesador en comunicación eléctrica con el convertidor de analógico a digital, y (e) un convertidor de digital a analógico en comunicación eléctrica con el microprocesador,
15 opcionalmente en el que la red (20) de retroalimentación se configura para transmitir la señal de control utilizando el convertidor de digital a analógico para mantener la nulidad en una señal de ruido RMS recibida en el detector RMS.

20 10.- El sistema de la reivindicación 6, en el que la red (20) de retroalimentación está configurada para funcionar de manera síncrona con un periodo de barrido del láser; opcionalmente en el que la red (20) de retroalimentación calcula la señal de control durante un ciclo de no formación de imágenes del interferómetro y transmite la señal de control durante un ciclo de formación de imágenes para reducir o suprimir el componente de ruido de láser; opcionalmente en el que luz emitida por el láser es modulada en amplitud en una frecuencia fija para crear una primera señal en un brazo de referencia del interferómetro y en el que una segunda señal en una salida del sistema es demodulada para generar una señal de error sensible a las fases que se procesa por la red (20) de retroalimentación
25

30 11.- El sistema de la reivindicación 6, en el que el primer atenuador es un primer transistor y el segundo atenuador es un segundo transistor, en el que los transistores primero y segundo están configurados para derivar diferencialmente fotocorrientes en la primera entrada del amplificador en respuesta a la señal de control.

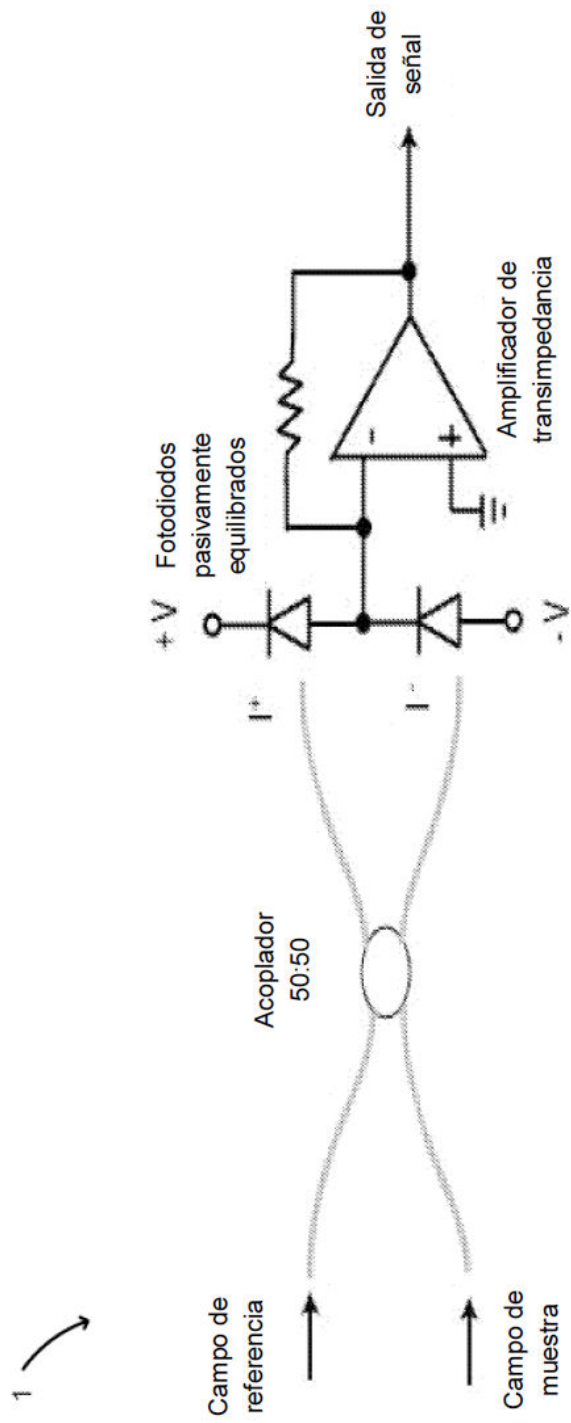
35 12.- El sistema de la reivindicación 6, en el que el primer atenuador es un primer amplificador de ganancia variable que tiene una entrada y una salida y en el que el segundo atenuador es un segundo amplificador de ganancia variable que tiene una entrada y una salida, y que comprende además opcionalmente un transformador, en el que las salidas de cada uno de los amplificadores de ganancia variable primero y segundo están en comunicación eléctrica con el transformador, y que comprende además opcionalmente un desfaseador, en el que una señal del primer amplificador de ganancia variable pasa a través del desfaseador antes de combinarse con otra señal del segundo amplificador de ganancia variable.

40 13.- El sistema de la reivindicación 6, en el que el primer atenuador comprende un atenuador variable que tiene una entrada de control electrónico configurada para recibir la señal de control, interpuesto el atenuador variable entre una salida del interferómetro y el primer fotorreceptor.

45 14.- El sistema de la reivindicación 6, en el que el primer fotorreceptor y el segundo fotorreceptor comprenden un primer receptor activamente equilibrado y que comprende además un divisor de polarización de dos canales configurado para dividir la luz del interferómetro en luz de una primera polarización y luz de una segunda polarización, un segundo receptor activamente equilibrado que comprende un tercer fotorreceptor y un cuarto fotorreceptor, en el que el primer receptor activamente equilibrado está colocado para recibir luz de una primera polarización y el segundo receptor activamente equilibrado está colocado para recibir luz de la segunda polarización.

50 15.- El sistema de la reivindicación 6, que comprende además un segundo amplificador que tiene una primera entrada en comunicación eléctrica con el segundo fotorreceptor y una primera salida, configurado el segundo amplificador para transmitir, desde la primera salida, una señal amplificada que comprende un componente de ruido de intensidad de láser y datos de medición del interferómetro, y opcionalmente en el que el amplificador es un amplificador de transimpedancia y en el que el segundo amplificador es un amplificador de transimpedancia.
55

16.- El sistema de la reivindicación 6, en el que el componente de ruido de intensidad de láser está dentro de un intervalo de frecuencia de aproximadamente CC a aproximadamente 250 MHz.



TÉCNICA ANTERIOR

FIG. 1

5

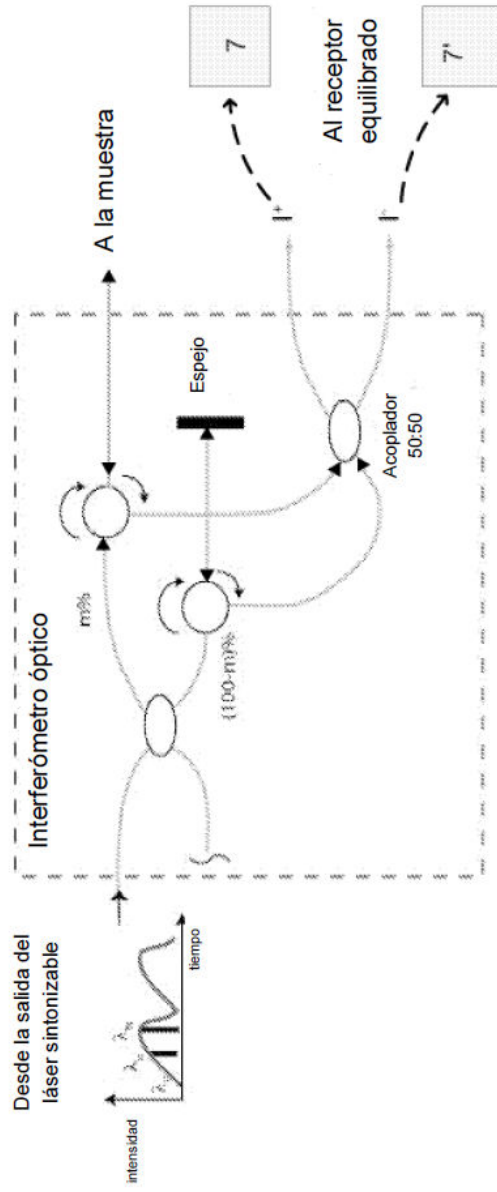


FIG. 2

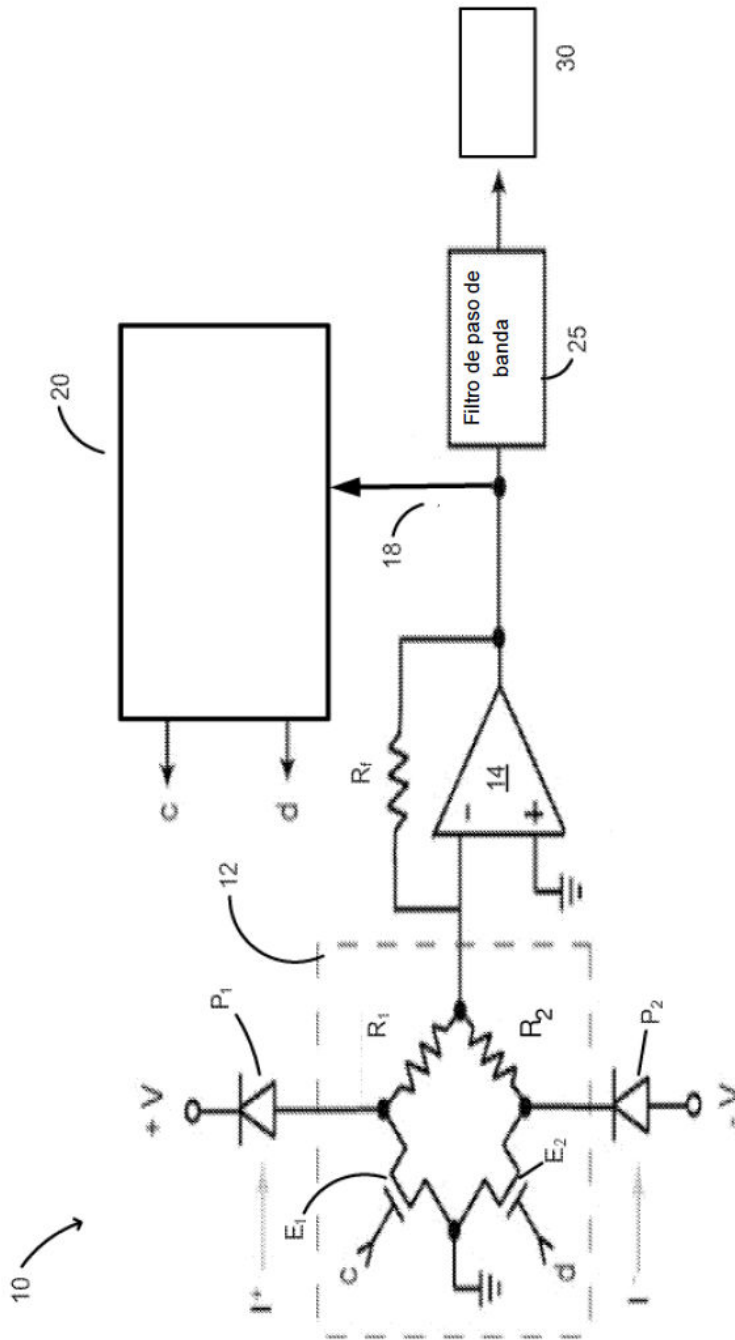


FIG. 3

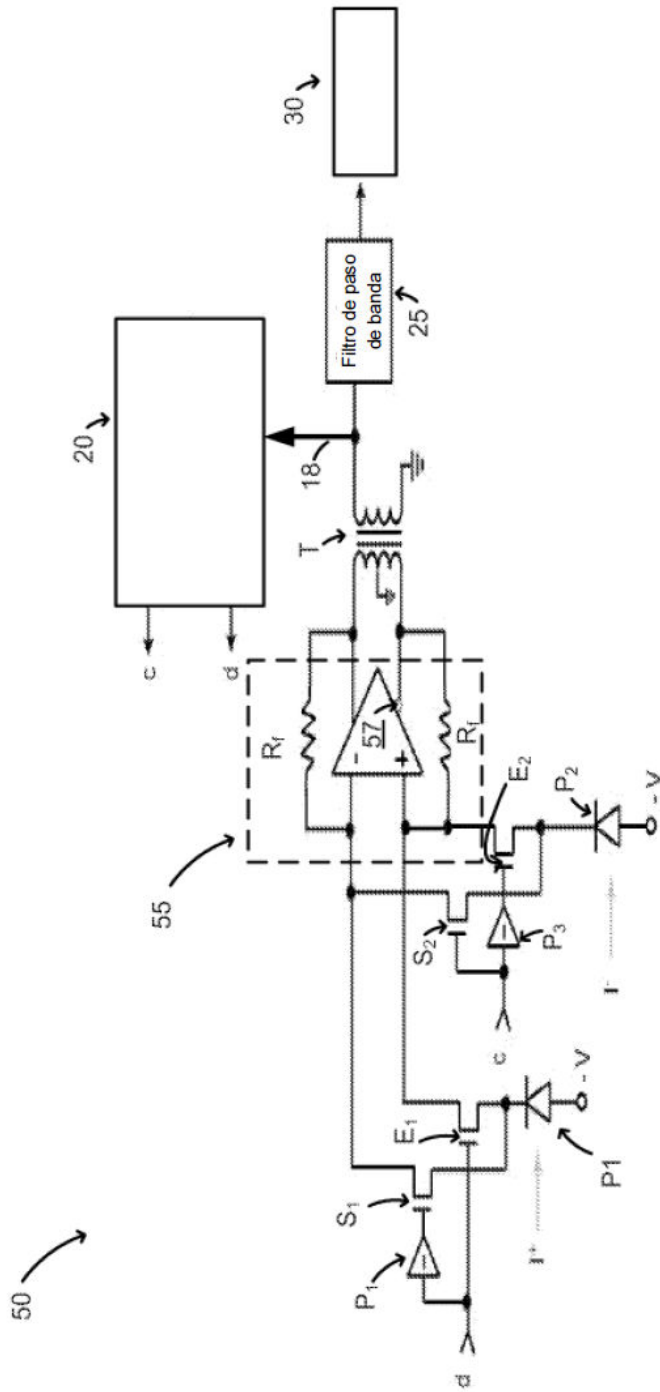


FIG. 4

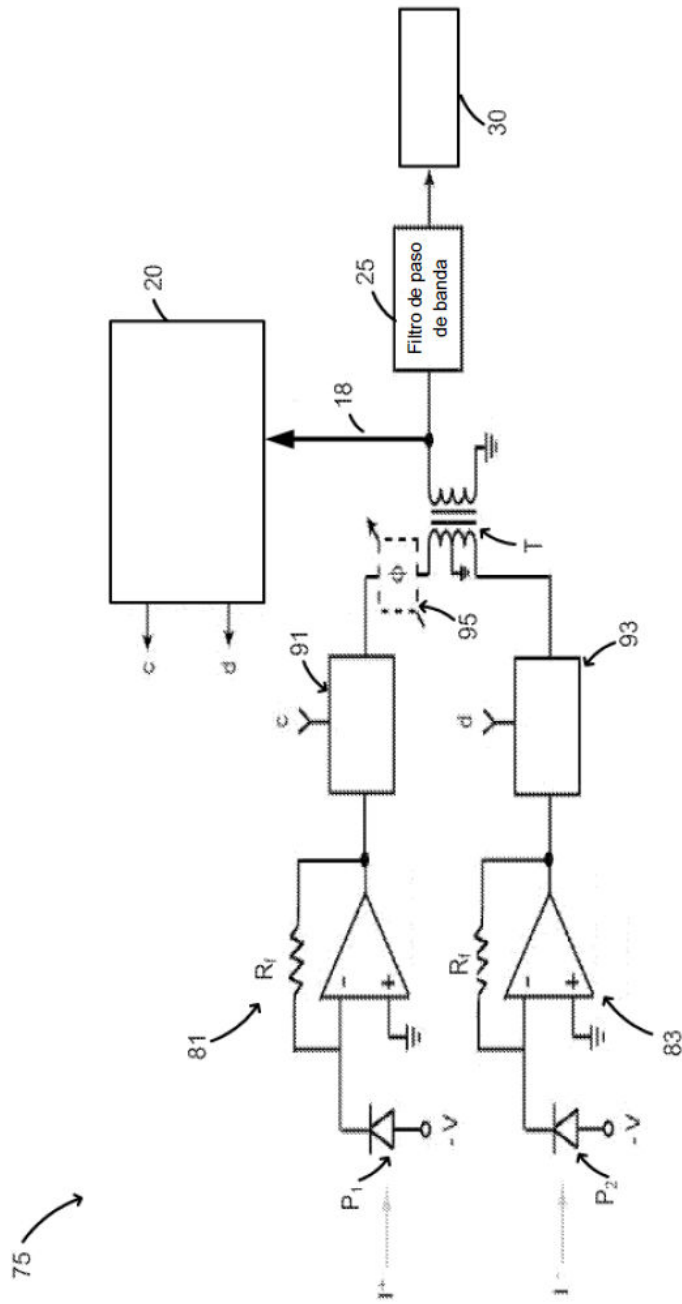


FIG. 5

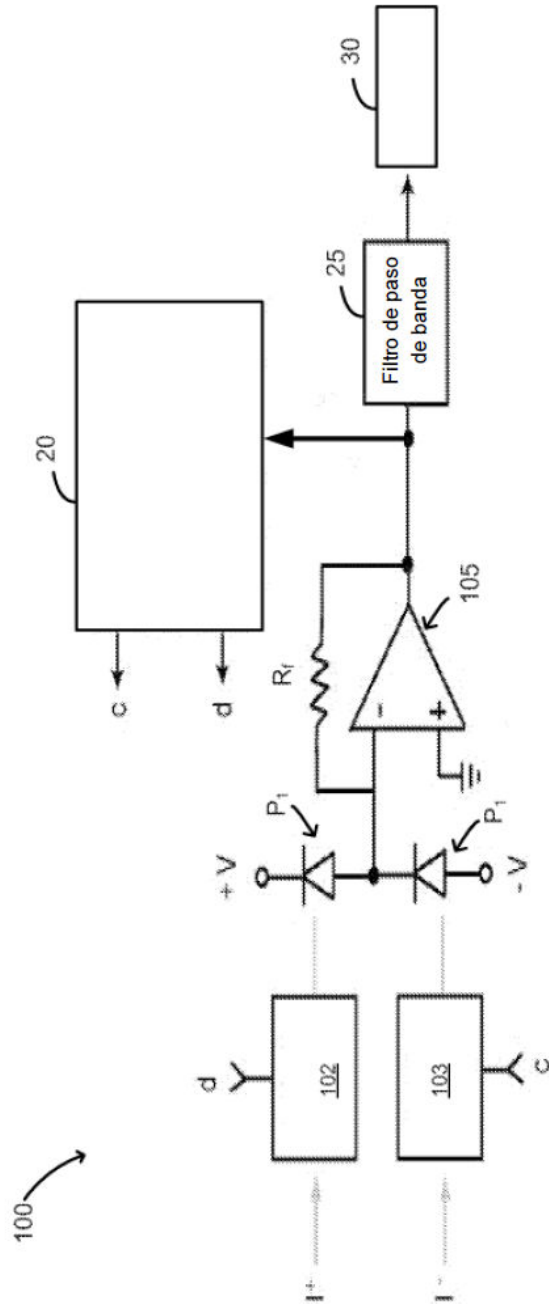


FIG. 6

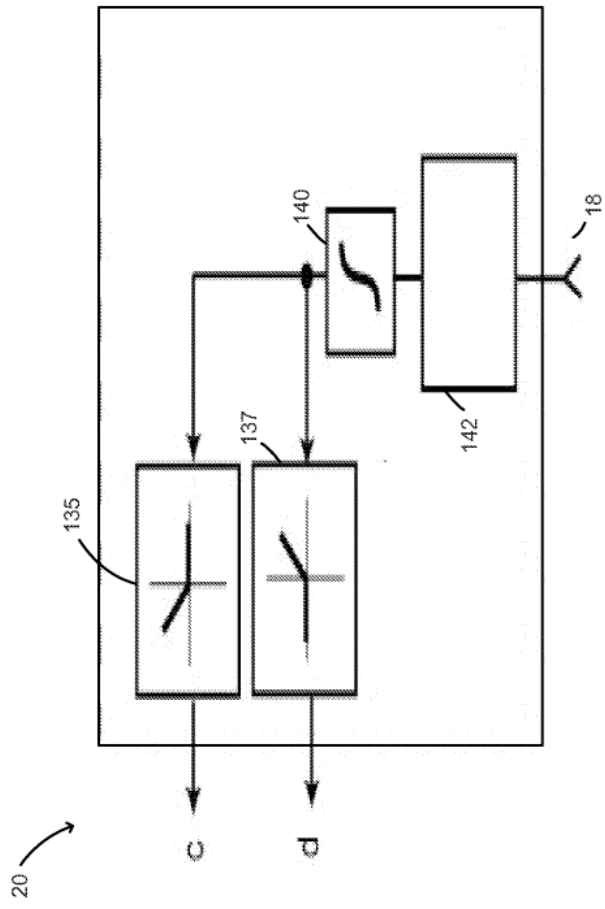


FIG. 7

145

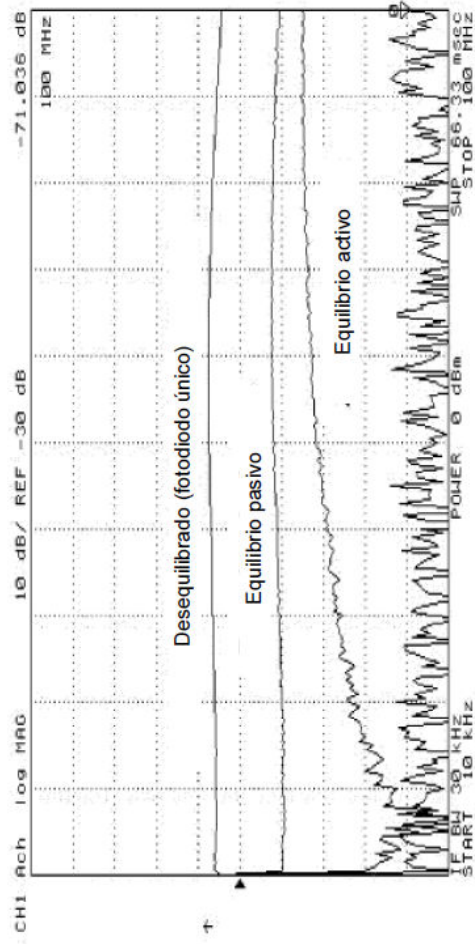


FIG. 8

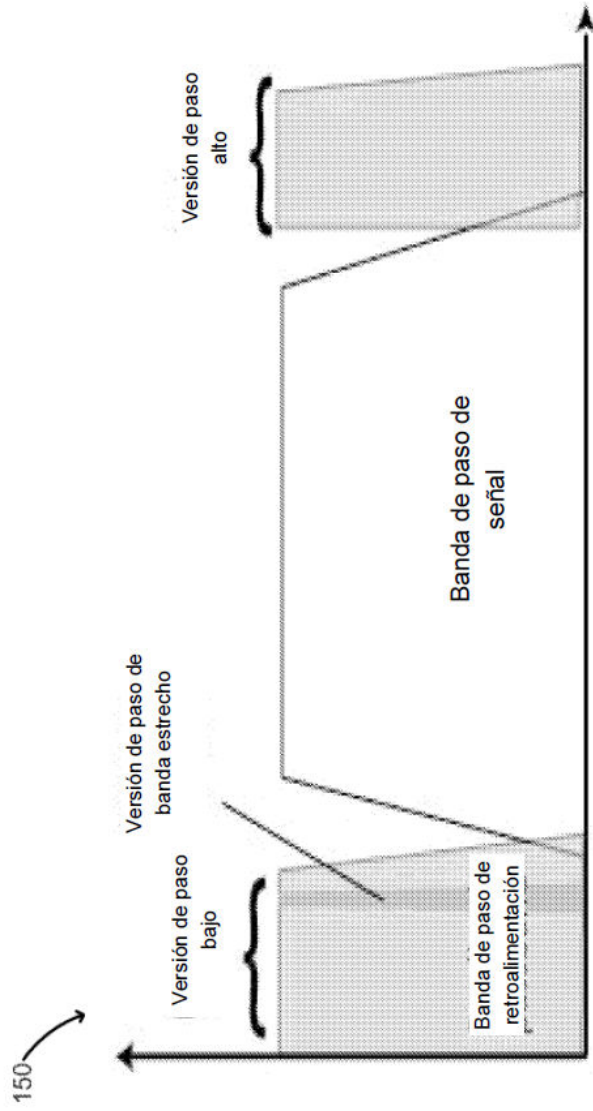


FIG. 9

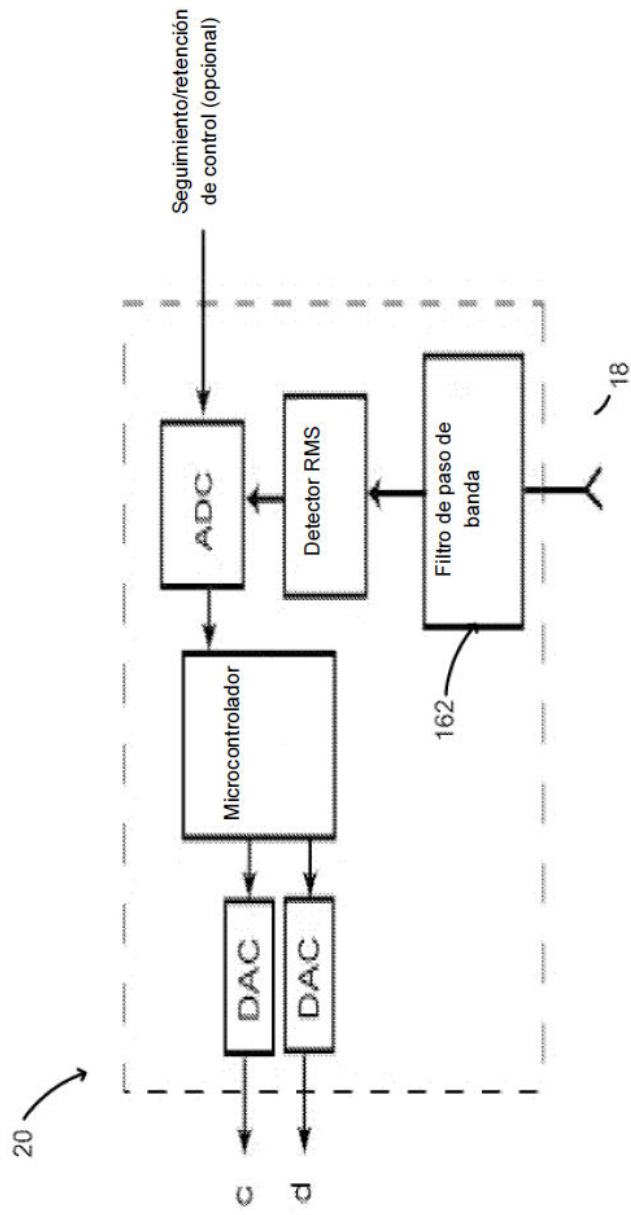


FIG. 10

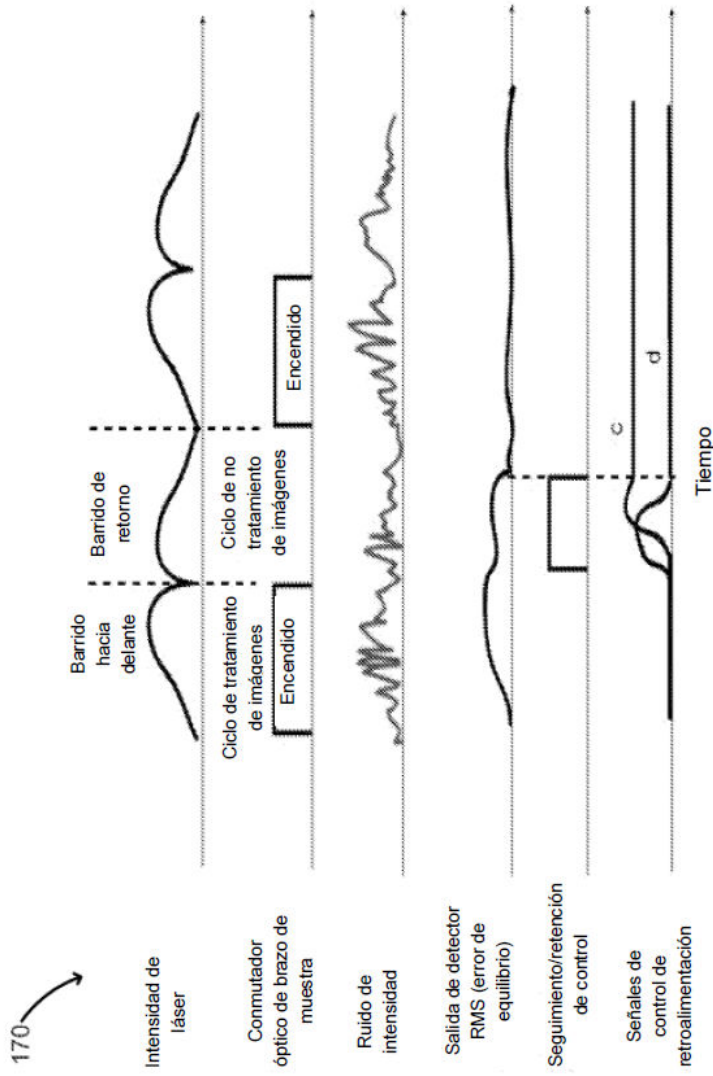


FIG. 11

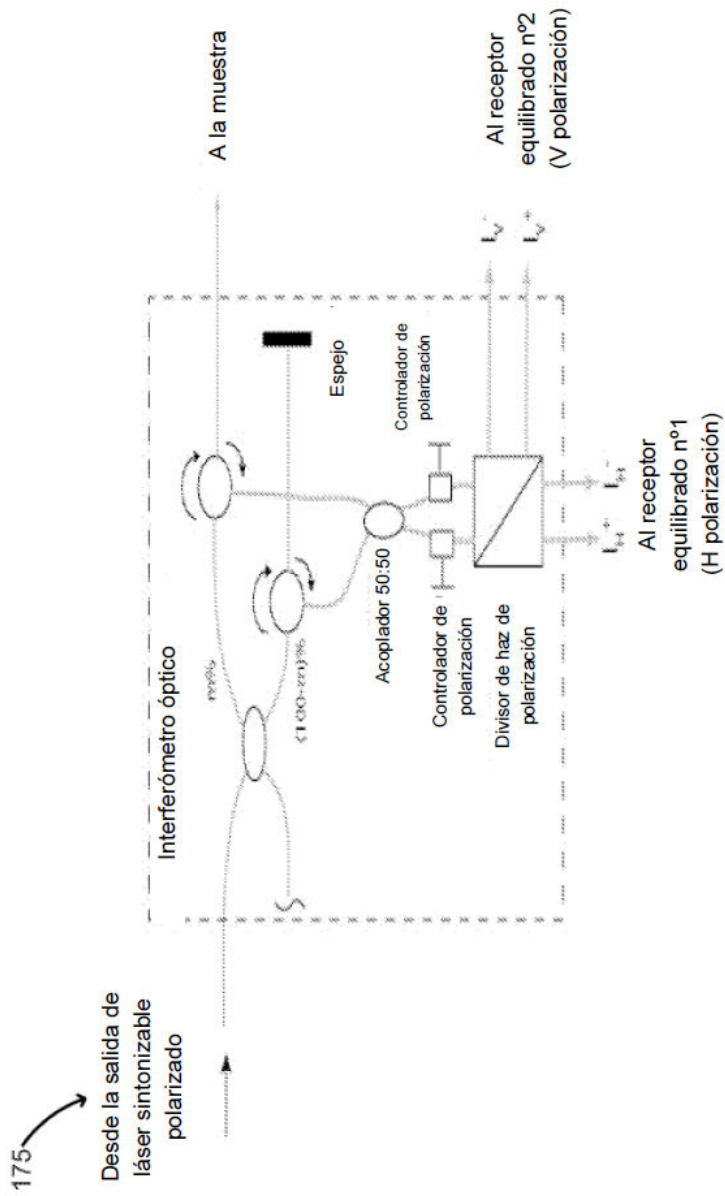


FIG. 12

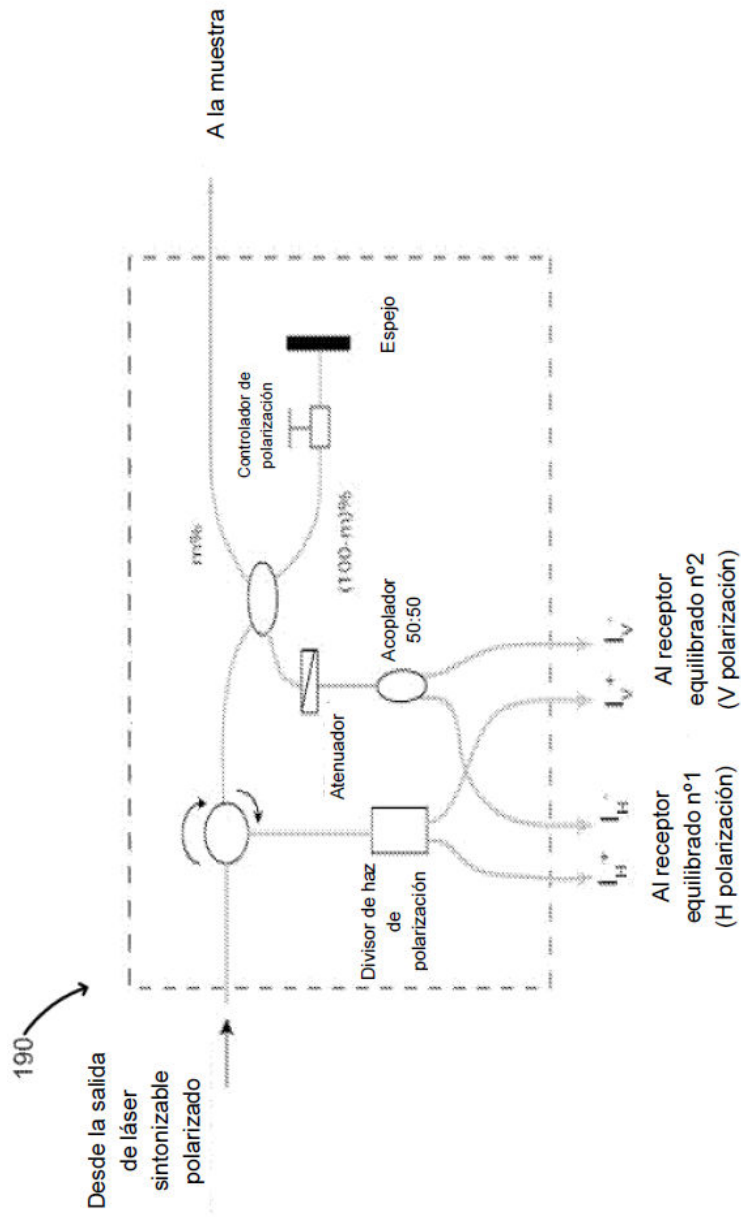


FIG. 13