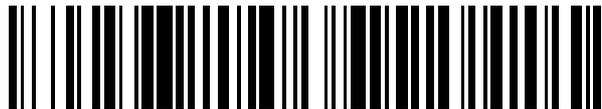


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 688 780**

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: **10.03.2008 PCT/GB2008/000830**

87 Fecha y número de publicación internacional: **18.09.2008 WO08110780**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **10.03.2008 E 08718676 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **27.06.2018 EP 2122305**

54 Título: **Detección basada en fase**

30 Prioridad:

14.03.2007 GB 0705240

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

06.11.2018

73 Titular/es:

**OPTASENSE HOLDINGS LIMITED (100.0%)
Cody Technology Park, Ively Road
Farnborough, Hampshire GU14 0LX, GB**

72 Inventor/es:

**CRICKMORE, ROGER, IAN y
DE FREITAS, JOLYON**

74 Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

ES 2 688 780 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 basada en fase

5 La presente invención se refiere a sensores que aprovechan un cambio en la fase de una señal de interrogación para determinar un parámetro detectado, y concretamente, pero no exclusivamente, a la detección interferométrica de fibra óptica. La presente invención encuentra una aplicación concreta en el campo de la prospección sísmica.

10 Los sensores de fibra óptica emplean una longitud de fibra óptica dispuesta de modo que un parámetro detectado hace que se imponga una tensión sobre la fibra. Normalmente, la fibra está dispuesta en una bobina, aunque son posibles otras disposiciones. Dicha tensión provoca un cambio en la fase de propagación de la señal óptica en esa fibra, cuyo cambio puede detectarse mediante técnicas interferométricas. Una variedad de diferentes disposiciones para este tipo de transductores se ha propuesto anteriormente, muchas de las cuales tienen la bobina de fibra óptica enrollada en un núcleo o mandril deformable, que sufre expansión o contracción radial en respuesta al parámetro detectado, como por ejemplo una vibración detectada.

15 Dichos sensores de fibra óptica pueden presentar sensibilidades extremadamente altas, y tienen la ventaja de ser completamente pasivos, no empleando ninguna energía en el transductor de detección. Dichos sensores también han demostrado ser populares en aplicaciones donde se requieren grandes matrices de sensores, debido a la relativa facilidad con la que se pueden multiplexar.

20 Un ejemplo de dicha aplicación es la prospección sísmica en la industria de exploración de petróleo y gas, donde pueden usarse matrices multiplexadas de gran tamaño que comprenden cientos o incluso miles de sensores de vibración y/o hidrófonos para detectar reflexiones de un pulso incidente de formaciones geológicas bajo el fondo marino. El muestreo de una matriz de este tipo en períodos regulares proporciona datos 3D de tiempo transcurrido sobre reservas potenciales nuevas o existentes. El documento US4770535 divulga una matriz de sensores distribuidos según el estado de la técnica. Un problema que se experimenta con este enfoque de detección es que, para una velocidad de muestreo determinada, las señales por encima de un cierto umbral de amplitud hacen que la información detectada basada en fase se distorsione, y puede causar el fallo del proceso de demodulación. Este efecto, comúnmente denominado como sobrecarga o sobredimensionamiento, depende de la frecuencia de la señal medida. En sistemas sísmicos, esto puede provocar un problema concreto con la llegada directa del pulso incidente, especialmente cuando ese pulso se ha generado cerca de los sensores (generalmente una pistola de aire comprimido remolcada desde una embarcación de superficie cuando pasa sobre la matriz). Es deseable poder registrar este pulso incidente sin la distorsión que puede producir el sobredimensionamiento.

30 Es por lo tanto un objeto de la presente invención proporcionar métodos y aparatos de detección mejorados.

35 Según un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método para interrogar a un transductor basado en fase, proporcionando dicho transductor un cambio en la fase de propagación de la señal en respuesta a un parámetro detectado, comprendiendo dicho método recibir una señal propagada a través de dicho transductor, comprendiendo la señal un tren de pulsos que comprende al menos un par de pulsos separados por un retardo, interfiriendo un pulso que representa el estado del transductor en un primer momento y un pulso que representa el estado del transductor en un segundo momento, habiendo experimentado los dos pulsos la misma trayectoria óptica en diferentes momentos, y determinando a partir de los pulsos interferidos una medida de la velocidad de cambio de fase con el tiempo de dicha señal.

40 La velocidad de cambio o derivada del cambio de fase normalmente tiene una amplitud mucho más pequeña que la señal en sí misma ya que la diferencia entre las dos veces en que se mide la señal será generalmente mucho menor que el período de la señal que se mide. Por tanto, incluso si el transductor experimenta un estímulo que hace que la señal normal se sobredimensione, es probable que la señal derivada no se vea afectada. La señal o medición derivada puede, por lo tanto, considerarse como una medición de baja sensibilidad que puede obtenerse por separado y de manera independiente, para usarse en lugar de, o en combinación con la medición de señal normal que tiene una sensibilidad más alta. Para una señal con la mayor parte de su energía centrada en aproximadamente 800Hz, por ejemplo, la derivada de esa señal normalmente se atenuará en 60dB con un período entre los dos momentos de medición de 200ns.

50 En un modo de realización, la comparación de la señal comprende combinar una versión retardada y una versión no retardada de la señal recibida, preferiblemente usando un interferómetro de salida. Como alternativa, la señal podría muestrearse en múltiples momentos diferentes y un enfoque algorítmico o de procesamiento de señal empleado para determinar la derivada del parámetro detectado.

55 El valor real del parámetro detectado puede reconstruirse integrando el valor derivado medido. Sin embargo, si el umbral mínimo de ruido está determinado por el ruido del sistema, entonces el umbral mínimo de ruido es esencialmente el mismo para la información de fase y su derivada, la señal derivada soporta una SNR más baja. Teniendo en cuenta que el sobredimensionamiento solo puede producirse de manera infrecuente en respuesta a ciertas entradas de gran amplitud, como la primera ruptura de una pistola de aire comprimido utilizada en prospecciones geofísicas, en ciertos modos de realización es beneficioso medir tanto la derivada como el valor real del parámetro detectado directamente. Ejemplos de dichos modos de realización se describen a continuación y cabe

señalar que podría emplearse un sistema adaptativo que mida la señal directamente en un estado predeterminado, y vuelva a una señal integrada a partir de una medición derivada al detectar una condición de sobredimensionamiento. Por ejemplo, sería posible usar un valor umbral para la amplitud de la señal derivada para identificar periodos en los que la señal normal estaba sobrecargada.

- 5 Sin embargo, se ha encontrado, al considerar detenidamente el sobredimensionamiento y su efecto sobre la información de fase producida por el transductor, que, durante el sobredimensionamiento, aunque puede distorsionarse una medición directa del valor de fase representativo del parámetro detectado, dicho valor de fase puede usarse junto con la señal derivada para producir un valor reconstruido. En ciertos modos de realización, por lo tanto, una medida de fase de dicha señal recibida es derivada además de la medida de la velocidad de cambio de fase. En modos de realización concretos, las dos medidas (fase y velocidad de cambio de fase) se obtienen de manera individual, ya que cada una se puede obtener sin recurrir a la otra, y se pueden obtener de manera esencialmente simultánea.

- 10 Como se describirá a continuación con mayor detalle, la sobrecarga se produce cuando la frecuencia instantánea de la salida del transductor (que depende de la velocidad de cambio de fase) queda fuera del rango de frecuencia de Nyquist determinado por la velocidad a la que esta señal se muestrea. Cualquier frecuencia instantánea que se encuentre fuera del rango de Nyquist se doblará sobre los límites del rango de vuelta a este. Dependiendo de la amplitud y la frecuencia de la señal detectada, la información puede ser doblada o envuelta sobre los límites de frecuencia de Nyquist múltiples veces. Los inventores actuales han descubierto que la información derivada medida en modos de realización de la presente información se puede usar para determinar cuántas veces se ha envuelto la información, o el factor por el cual la información excede el límite de Nyquist. Esto permite entonces que el valor del parámetro medido directamente se corrija para proporcionar una señal que tenga una SNR mejorada a la proporcionada al integrar la señal derivada medida.

La invención se extiende a métodos, aparatos y/o uso esencialmente como se describe en el presente documento con referencia a los dibujos adjuntos.

- 25 Cualquier característica en un aspecto de la invención se puede aplicar a otros aspectos de la invención, en cualquier combinación apropiada. En concreto, los aspectos del método se pueden aplicar a aspectos del aparato, y viceversa.

Ahora se describirán las características preferidas de la presente invención, únicamente a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 30 La figura 1 muestra un tipo conocido de paquete de sensores de fibra óptica;
 La figura 2 es una forma de onda de interrogación adecuada para el paquete de la figura 1;
 La figura 3 ilustra una respuesta normal de un paquete del tipo mostrado en la figura 1;
 La figura 4 muestra un sistema para interrogar a un paquete de fibra óptica según un aspecto de la invención;
 La figura 5 ilustra una salida que se puede obtener del sistema de la figura 4;
 35 La figura 6 muestra una salida adicional que se puede obtener del sistema de la figura 4;
 La figura 7 ilustra una disposición en la que se usan dos interferómetros de salida;
 La figura 8 muestra la salida que se puede obtener del sistema en la figura 7;
 La figura 9 ilustra múltiples puntos de muestreo en un pulso del tipo mostrado en la figura 3;
 La figura 10 muestra separaciones de tiempo entre muestras en el mismo pulso y diferentes.

- 40 Haciendo referencia a la figura 1, se muestra esquemáticamente un tipo conocido de paquete de sensores de fibra óptica, indicado generalmente con 102, que comprende cuatro bobinas de detección de fibra óptica 104, 106, 108, 110 formadas a partir de una única longitud de fibra 13 óptica, y dispuestas en serie. Una porción de la fibra 112 óptica sirve como fibra de entrada/salida (i/o) del paquete. Los espejos acoplados a fibra 114, 116, 118, 120, 122 están acoplados a la fibra 13 óptica en posiciones respectivas a lo largo de ella de manera que cada una de las bobinas tiene un espejo acoplado a fibra acoplado en cada extremo de la misma. Se podrían usar otros medios para reflejar una porción de luz de antes y después de cada sensor, como en rejillas de fibra de Bragg, en lugar de los espejos acoplados a fibra. En la práctica, por ejemplo, tres de las bobinas podrían disponerse para formar tres acelerómetros de fibra óptica ortogonales, formando la cuarta bobina parte de un hidrófono para formar un paquete de cuatro componentes adecuado para aplicaciones de prospección sísmica. La disposición física de la bobina en cada transductor no es importante para la presente invención, y no se trata aquí, sin embargo, el lector experto conocerá una variedad de posibles disposiciones. Una matriz a gran escala de dichos paquetes puede acoplarse de manera conjunta, e interrogarse periódicamente usando multiplexación para, por ejemplo, proporcionar imágenes sísmicas de tiempo transcurrido.

Haciendo referencia a la figura 2, se puede llevar a cabo una interrogación del paquete 102 de la figura 1 introduciendo un par de pulsos ópticos 202, 204 de interrogación en la fibra 112 de i/o del paquete. Los pulsos 202, 204 tienen frecuencias respectivas ω_1 , ω_2 y el pulso 202 es retardado por $\tau=2L/c$ con respecto al pulso 20, siendo L la longitud de la bobina en el sensor y siendo c la velocidad de un pulso óptico en la fibra.

5 La figura 3 ilustra la respuesta de salida óptica del paquete considerando la salida formada por cada uno de los pares de pulsos de entrada. En la figura 3a, el primer pulso 202 que llega al paquete se refleja en cada uno de los 5 espejos acoplados a fibra para producir cinco pulsos 301, 302, 303, 304 y 305 de salida, medidos con relación a una referencia temporal arbitraria. De manera similar, observando la figura 3b, el pulso 204 produce pulsos 322, 323, 324, 325 y 326 de salida retardados cinco veces con relación a la misma referencia de tiempo arbitraria. Debido a que los pulsos de entrada se retrasan el doble de tiempo de vuelo a través de una sola bobina, y debido a que los pulsos se encuentran en la misma fibra, los dos conjuntos de salidas se superponen para producir seis pulsos 331, 332, 333, 334, 335 y 336 en la figura 3c. Los pulsos 331 y 336 representan solo una única reflexión de un único pulso, sin embargo, ha de entenderse que los pulsos 332 a 335 (que se muestran sombreados) corresponden cada uno a la combinación de dos pulsos reflejados por espejos acoplados a fibra adyacentes. Ha de entenderse que estos pulsos representan, por lo tanto, la combinación de un pulso que ha pasado (dos veces) a través de la bobina entre los dos espejos adyacentes y un pulso que no lo ha hecho. Por lo tanto, la detección de fase puede usarse para determinar el cambio de fase impuesto por esa bobina y, por tanto, como se conoce en la técnica se obtiene una medida del parámetro detectado.

Si $\varphi(t)$ es el parámetro detectado, entonces la señal obtenida de un fotodetector usado para medir una serie de pulsos que regresan de un sensor del tipo descrito anteriormente se puede escribir como $\cos(\omega_c t + \varphi(t))$ es decir, la información detectada se representa como un cambio de fase superpuesto a una señal portadora de frecuencia ω_c . Técnicas que son bien conocidas por los expertos en la técnica se pueden usar entonces para demodular la señal de fase del portador. La frecuencia portadora se elige normalmente para que sea la mitad de la frecuencia Nyquist, que a su vez es la mitad de la frecuencia de muestreo. Es habitual que se realice una muestra en cada pulso óptico de regreso y, por tanto, la frecuencia de muestreo es la velocidad a la que los pares de pulsos se transmiten al conjunto. A modo de ejemplo, la frecuencia de muestreo podría ser de aproximadamente 320kHz, dando una frecuencia de Nyquist de aproximadamente 160kHz y una frecuencia portadora de aproximadamente 80kHz. La frecuencia de muestreo normalmente tendrá un límite superior práctico que depende del tipo y disposición del sensor o sensores, entre otros factores.

30 Se produce una condición de sobredimensionamiento cuando la frecuencia instantánea de la portadora modulada de

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} \geq \omega_N - \omega_c$$

fase está fuera de la banda Nyquist, es decir, cuando

$$\frac{d\varphi(t)}{dt} \leq -\omega_c,$$

o cuando $\frac{d\varphi(t)}{dt} \leq -\omega_c$, donde ω_N y ω_c son las frecuencias Nyquist y portadora, respectivamente. En la práctica, esto da como resultado el solapamiento de la frecuencia instantánea en la banda de Nyquist doblando o envolviendo uno de sus límites en el espacio de frecuencia. Dependiendo de la magnitud y la frecuencia del parámetro detectado, la frecuencia instantánea puede envolverse varias veces. Si el parámetro detectado se modela aproximadamente como $\varphi(t) = \varphi_0 \cos \omega_m t$, entonces no se produce la condición de sobredimensionamiento, para la

35

$$\varphi_0 \leq \frac{\omega_c}{\omega_m}.$$

condición habitual de $\omega_N = 2\omega_c$ a veces se expresa como

Haciendo ahora referencia a la figura 4, se muestra un paquete 402 de sensores, esencialmente como se ilustra en la figura 1. El paquete es interrogado mediante un par de pulsos producidos por el modulador 404 acústico-óptico.

40 La serie de pulsos de salida se deriva en la unión 406, pasa a través de un aislador 408 y hacia el interferómetro de salida designado por 410. En el esquema de la figura 4, el retardo entre pulsos de entrada no necesita ser el doble del tiempo de vuelo de la luz a través de una bobina de detección del paquete 402, pero en cambio está dispuesto para ser el doble del tiempo de vuelo de la luz a través de la bobina 412 de retardo del interferómetro de salida. Aunque el modo de realización descrito emplea un interferómetro de Michelson, el lector experto reconocería que podría usarse igualmente un interferómetro de tipo Mach-Zehnder con una bobina de retardo en uno de los brazos. En este caso, disponer para que la separación entre los pulsos de entrada sea justo el tiempo de vuelo a través de la bobina de retardo en un brazo del interferómetro permitiría hacer mediciones equivalentes.

La figura 5 ilustra la salida de trenes de pulsos de componentes del interferómetro 410. El tren 502 de pulsos representa la salida del pulso de entrada principal (designado por el subíndice 1) desde los espejos B a E, que resulta del brazo de retardo del interferómetro (designado como Y). El tren 504 de pulsos representa la salida del pulso de entrada con retardo (designado por el subíndice 2) desde los espejos B a E, que resulta del brazo no retardado del interferómetro (designado como X). Se puede apreciar que, de este modo, el interferómetro 410 temporalmente alinea e interfiere pares de pulsos, que han pasado a través de la(s) misma(s) bobina(s) de detección del paquete 402, pero en momentos diferentes (como lo indican los diferentes subíndices de pulsos alineados

50

temporalmente). Dicho de otro modo, cada pulso reflejado de los espejos acoplados a fibra B a E (los pulsos reflejados del espejo A no han pasado a través de una bobina de detección) y la recopilación de información en la bobina de detección asociada se combina con un pulso que ha pasado por el mismo camino óptico, recopilando la misma información, pero en un momento posterior. La salida del interferómetro representa, por lo tanto, la derivada del valor de fase, en comparación con el valor real de fase que normalmente se mediría directamente en las disposiciones del estado de la técnica de las figuras 1 a 3. Por tanto, usando la terminología anterior, si la señal que

5 regresa del transductor es $\cos(\omega_c t + \varphi(t))$ con $\varphi(t)$ siendo una medida del parámetro detectado, el sistema representado en la figura 5 deriva un valor representativo de $\frac{d\varphi(t)}{dt}$, o la frecuencia instantánea de la señal que regresa.

10 Considerando el pulso de salida combinado centrado en $t=1$, ha de entenderse que esto representa la combinación de dos pulsos que se hayan reflejado desde el espejo B, es decir, que hayan pasado a través del circuito de detección AB, en dos momentos diferentes. La derivada del parámetro detectado por la bobina AB está, por lo tanto, contenida dentro de y puede determinarse a partir de este pulso. Del mismo modo, la salida de pulsos del interferómetro en $t=2$ será una combinación de pulsos, los cuales han hecho pases dobles de circuitos de detección

15 AB y BC. Una vez que el valor derivado se extrae de este pulso, al restar el valor derivado del circuito de detección AB (obtenido anteriormente) se obtiene el valor derivado del circuito de detección BC. De este modo, se pueden obtener los valores derivados para cada uno de los circuitos de detección en el paquete 402.

Cabe señalar que la reflexión del espejo A acoplado a fibra no se ve afectada por la derivada, o velocidad de cambio de fase de ninguno de los circuitos de detección de la disposición explicada anteriormente con respecto a las figuras 4 y 5. Sin embargo, los pulsos reflejados del espejo B ($t=1$) contienen de hecho una señal que es la combinación de la derivada de la modulación de fase en la bobina AB y cualquiera de las fibras de derivación de bajada (es decir, fibra entre el acoplador 406 y el AOM 404, entre el acoplador 406 y el reflector A, y entre el acoplador 406 y el fotodetector en la salida del interferómetro 410). En algunas aplicaciones, la fibra de derivación de bajada puede tener muchos kilómetros de largo y por tanto la señal que es captada debido al ruido ambiental puede ser

20 significativa. Si se mide la señal derivada del reflector A y entonces se resta de la señal del reflector B, eliminará cualquier señal de la derivación de bajada de la obtenida para la bobina AB.

Volviendo a la figura 6, hay trenes de pulsos de componentes ilustrados que representan los componentes de salida de una disposición de interrogación de sensor especialmente preferida. La disposición del sensor es esencialmente la misma que la de la figura 4, pero con cada bobina de sensor dispuesta para ser el doble de la longitud de la bobina de retardo del interferómetro. En un ejemplo, cada bobina de sensor tiene 40 m de longitud, la bobina de retardo del interferómetro tiene 20 m de longitud y el retardo entre el par de pulsos de entrada es de aproximadamente 200 ns.

30

Puede apreciarse que los trenes de pulsos 604 y 606 son esencialmente los mismos que los trenes 502 y 504 de la figura 5, es decir, representan la información derivada o de "baja sensibilidad" para cada bobina de sensor (de manera acumulativa). El pulso de salida en el punto de tiempo indicado por 610 es provocado por reflejos del espejo A y no lleva información de derivada detectada (excepto la captada por la derivación de bajada) y se omite en la figura 5 para mejorar la claridad. La salida equivalente a la indicada en 614 de la figura 6 es el primer pulso considerado de la figura 5. Sin embargo, se puede apreciar otro beneficio del espejo A considerando los trenes de pulsos 602 y 608 que resultan respectivamente de las reflexiones del primer pulso a través del espejo X en el interferómetro de salida (figura 4, 410) y reflexiones del segundo pulso del espejo Y en dicho interferómetro. Estos son básicamente de la misma forma que se muestra en la figura 3, y se combinan para formar pulsos de salida que llevan los valores de parámetros directos, cada par de pulsos representando una reflexión de los espejos adyacentes. Por ejemplo, el pulso de salida en el momento 612 será una combinación de la reflexión del pulso de entrada principal del espejo B y la reflexión del pulso de entrada con retardo del espejo A y, por lo tanto, contiene información directa o de "alta sensibilidad" detectada por la bobina AB que puede extraerse directamente de la manera conocida. El hecho de que los dos pulsos hayan pasado a través de diferentes brazos del interferómetro 410 no afecta de manera sustancial a la información contenida dentro del pulso.

35

40

45

Por lo tanto, en la disposición descrita, tanto los valores directamente detectados (alta sensibilidad) como los valores derivados (baja sensibilidad) pueden obtenerse independientemente de conjuntos intercalados de pulsos de salida, que resultan del mismo par de pulsos de entrada. Puede apreciarse que en el ejemplo de la figura 6, esto se consigue disponiendo la separación de pulsos de entrada para que sea aproximadamente la mitad de la que se usa para la interrogación de un paquete de sensores determinado del modo descrito con referencia a la figura 3.

50

La figura 7 ilustra una disposición alternativa para el interferómetro 410 de salida o de lectura de la figura 4. La respuesta 702 de un paquete de sensores generada por una señal de interrogación se divide y pasa a dos interferómetros 704 y 706. En uso, la señal de interrogación es similar en forma a la de la figura 2, pero aquí los dos pulsos tienen un retardo igual al tiempo total de vuelo a través del paquete de sensores, de modo que los trenes de pulsos de salida que resultan de cada uno de los pulsos de interrogación no están intercalados. Con cuatro bobinas de detección en un paquete, teniendo cada bobina una longitud de 40 m, se podría usar, por ejemplo, un retardo de $2\mu s$ entre pulsos de interrogación. El circuito 714 de retardo del interferómetro 704 tiene un valor igual al retardo de

55

los pulsos de interrogación, mientras que el circuito 716 de retardo en el interferómetro 706 tiene un valor menor que el retardo de 714, por un doble paso a través de un sensor.

5 El funcionamiento de la disposición de la figura 7 se describirá ahora con referencia a la figura 8. La serie de pulsos que regresan del paquete como resultado del primer pulso de entrada se muestran en 802. Las series equivalentes resultantes del segundo pulso de entrada se muestran en 804. Debido al retardo de $2(N+1)L/c$ (donde N=número de sensores en un paquete, L=longitud de un único sensor, c=velocidad de vuelo a través del sensor) entre pulsos de entrada, las series 802 y 804 no están intercaladas, y se combinan en la fibra de i/o del paquete de sensores como se muestra en 806, y es esta señal la que se recibe en 702 de la figura 7. El primer interferómetro 704 de la figura 7 tiene un retardo igual al retardo de pulso de entrada, y por lo tanto la señal que regresa del brazo de retardo de ese interferómetro se muestra en 808. Ha de entenderse que la señal 708 de la figura 7 será una combinación de señales 806 y 808, estando cada pulso compuesto de dos pulsos que han sido reflejados en el mismo espejo en el paquete de sensores, pero en diferentes puntos en el tiempo indicados por los subíndices 1 y 2 en la figura 8, y que corresponden a los pulsos primero y segundo respectivamente. Por lo tanto, como se explicó anteriormente, una señal 708 de recepción del detector puede obtener medidas de frecuencia instantánea o de fase derivada.

15 El interferómetro 706 de la figura 7 tiene un retardo de $2NL/c$, y por lo tanto la señal que regresa del brazo de retardo de ese interferómetro se muestra en 810. La señal 710 de la figura 7 es por lo tanto una combinación de señales 806 y 810, estando cada pulso compuesto de dos pulsos que han sido reflejados en los espejos adyacentes del paquete de sensores. Por lo tanto, como se explicó anteriormente, una señal 710 de recepción del detector puede obtener mediciones directas de la fase impuesta por las bobinas del sensor.

20 Cabe señalar que los pulsos de componente que constituyen las señales 708 y 710 habrán pasado a través del paquete de sensores con una separación temporal mayor que en los modos de realización descritos previamente. Esto da como resultado que la señal derivada sea más sensible que para una separación de pulsos de entrada más corta. Para un retardo de pulso de entrada de $2\mu s$, se acumula aproximadamente 10 veces más fase durante el tiempo de muestreo derivado que si se hubiera empleado un retardo de 200ns. Considerando la medición "directa" de fase, debido a que las dos muestras que se combinan en el interferómetro 706 representan casos en los que el sensor tiene una separación temporal relativamente amplia, entonces la medida de la derivada de fase obtenida del interferómetro 704 puede usarse para proporcionar una corrección si es necesario.

25 En el modo de realización de la figura 4, debido a que solo se emplea una salida de interferómetro, tanto las señales "derivadas" como las de "fase directa" aparecen en el mismo tren de pulsos utilizando, por lo tanto, hasta el doble de intervalos de tiempo que las descritas en el estado de la técnica de las figuras 1-3. Al derivar los dos conjuntos de mediciones (fase y derivada) de manera independiente, utilizando dos interferómetros, se logra restablecer de manera sustancial la anchura de banda de dominio a tiempo completo.

30 Un método alternativo para lograr un aumento en la separación temporal entre los pulsos que generan la señal derivada es mantener la separación de pulsos en 200ns, pero luego mezclar las reflexiones que provengan de diferentes pares de pulsos transmitidos. En un modo de realización de este tipo, la separación temporal entre pares de pulsos respectivos está determinada por la longitud de fibra en los sensores en un segmento de la matriz, pero sería normal un valor de aproximadamente $5\mu s$. La figura 9 muestra el patrón de pulsos que se lograría usando la misma disposición que en la figura 4, pero con la bobina 412 causando un retraso de $5,2\mu s$. Las secuencias 902, 904 de pulsos resultan respectivamente de las reflexiones del primer y segundo pulsos transmitidos, mientras que las secuencias 906 y 908 son aquellas del primer y segundo pulsos, respectivamente, que han pasado a través de la bobina de retardo del interferómetro. Las reflexiones en las secuencias 906 y 908 se solapan con reflexiones en las secuencias 902 y 904 que provenían del par de pulsos posterior.

35 Debido a que el retardo impuesto por la bobina de retardo ($5,2\mu s$) es 200ns más largo que la separación temporal entre pares de pulsos, la combinación de pulsos toma la misma forma general que si el retardo impuesto por la bobina hubiera sido de 200ns (según la figura 6) y de este modo pueden obtenerse señales tanto normales como derivadas a partir de pulsos de salida intercalados. Sin embargo, en este caso, los pulsos que se combinan para formar las señales derivadas pasan a través de cada sensor separados en $5,2\mu s$ y por tanto la señal generada será 26 veces más larga que si se usara una bobina de retardo de 200ns.

40 Puede demostrarse que es posible (en el modo de realización descrito anteriormente) usar cualquier tiempo de retardo de la forma $[5N_R+2(N_B+1)0,2]\mu s$, donde $5\mu s$ es el tiempo entre pares de pulsos y N_R es un entero positivo. El número 0,2 corresponde al tiempo en μs entre pulsos en un par y está determinado por la longitud del sensor. N_B también es un entero positivo. La derivada de una señal variable en el tiempo tenderá a ser proporcional a la frecuencia de la señal. La respuesta real del interferómetro cumple esta relación a bajas frecuencias, pero se atenúa ligeramente a altas frecuencias. En el rango de baja frecuencia de aproximadamente 0-250Hz (útil en aplicaciones sísmicas), la amplitud de la señal derivada puede por lo tanto ser correspondientemente baja, y puede sufrir de una baja SNR. Sin embargo, el uso de un retardo más largo hace que la sensibilidad del interferómetro se incremente considerablemente y produzca el correspondiente aumento de las amplitudes de salida.

45 Aunque la disposición mostrada en la figura 9 da una señal normal, los grandes retardos de pulso pueden provocar un aumento en la diafonía entre diferentes sensores y pueden aumentar el nivel de ruido del sistema. Estos

problemas podrían superarse utilizando la disposición que se muestra en la figura 7 y haciendo que los dos interferómetros 704 y 706 provoquen retardos de 200ns y 5,2µs, respectivamente. De este modo, el interferómetro 704 podría usarse para producir las señales normales, y si se requieren señales derivadas de separación cortas, mientras que el interferómetro 706 podría usarse para producir las señales derivadas de separación mayor.

5 Haciendo referencia a la figura 10, se muestra con mayor detalle el perfil de un pulso del tipo mostrado en la figura 3c, que es un pulso que representa la interferencia de dos pulsos reflejados desde los espejos adyacentes de un paquete de sensores, y que contiene información de fase sobre el parámetro detectado por la bobina ubicada entre esos dos espejos (a diferencia de su derivada). Como se indicó anteriormente, esta información es susceptible de "perdersse" cuando se produce un sobredimensionamiento. Sin embargo, los inventores actuales han observado que, mientras que previamente se haya tomado una muestra de la señal óptica de dicho pulso una sola vez, es posible realizar dos o más de dichas mediciones dentro de cada pulso. Usando los valores muestreados, se puede emplear, por ejemplo, un algoritmo de fase de dos puntos para obtener una medida de la derivada de la información de fase.

10 El pulso de la figura 10, como se representa mediante el perfil de onda cuadrada idealizado que se muestra en línea discontinua, es nominalmente de 100ns de duración. Sin embargo, como se muestra por la línea continua, la forma real del pulso incluye tiempos de subida y bajada distintos de cero, y normalmente podría dar como resultado una meseta del 90% del valor de intensidad máxima teniendo una duración de 60ns a partir de la cual pueden tomarse muestras. Entonces, para tomar dos muestras, en un espaciamiento temporal de, por ejemplo, 50ns, se requiere una velocidad de muestreo de 20MHz. De manera más realista, para ser capaz de tomar muestras múltiples de un pulso de este tipo, como las indicadas en 1006, 1008 y 1010, por ejemplo, es deseable usar velocidades de muestreo superiores o iguales a 50MHz, 80MHz o incluso 100MHz. Dichas velocidades son actualmente alcanzables usando tecnología comercialmente disponible.

15 Considerando la figura 10; la separación temporal entre cada pulso es t_p y el espaciado de muestreo dentro del pulso es τ_s . Considerando que la frecuencia portadora sea ω_c , entonces la señal de muestreo única S_1 obtenida en una posición 1006 a una velocidad $F_p (=1/t_p)$ se puede determinar por

25
$$S_1 = A \cos(\omega_c n t_p + \varphi_1)$$

donde A es la amplitud de la señal en el sistema de demodulación, n es la enésima muestra después de un inicio arbitrario y φ_1 es la fase asociada con la muestra en la primera posición de muestreo S_1 . La segunda muestra S_2 simplemente se determina por

$$S_2 = A \cos(\omega_c (n t_p + \tau_s) + \varphi_2)$$

30 donde φ_2 es la fase asociada con la señal en la segunda posición de muestreo.

Es posible emplear un algoritmo usando las dos muestras S_1 y S_2 , para obtener el cambio instantáneo de fase $\Delta\varphi=(\varphi_2-\varphi_1)$ que puede tomar la forma:

$$\Delta\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{S_2 \sqrt{A^2 - S_1^2} - S_1 \sqrt{A^2 - S_2^2}}{S_1 S_2 + \sqrt{A^2 - S_1^2} \sqrt{A^2 - S_2^2}} \right]$$

35 Esta es la fase diferencial adquirida durante el período de muestreo τ_s , dentro de un pulso. Suponiendo que τ_s es significativamente más pequeño que el período portador t_p , el cambio en la fase $\Delta\varphi$ es pequeño, pero esto puede corresponder a una frecuencia instantánea muy grande durante dicho tiempo de muestreo.

40 El algoritmo anterior que funciona en dos posiciones de muestreo en el pulso puede proporcionar una solución adecuada en ciertas aplicaciones, pero se ha comprobado que sufre un cierto grado de pérdida de datos bajo ciertas condiciones. Si bien una cantidad limitada de pérdida de datos puede ser aceptable, es posible utilizar una tercera muestra S_3 (etiquetada como 1010) del pulso para mejorar la estimación de $\Delta\varphi$.

45 Tomando una tercera muestra, se obtiene un segundo valor de cambio de fase $A\varphi_2$ (correspondiente al cambio de fase durante el tiempo τ_s entre S_2 y S_3). La diferencia entre los dos cambios de fase $\Delta\varphi_1$ y $\Delta\varphi_2$ se supone que es pequeña en comparación con cualquiera de los dos valores, y tomando el máximo del valor absoluto entre las dos mediciones de fase, es decir, $\max(|\Delta\varphi_1|, |\Delta\varphi_2|)$ se puede eliminar de manera sustancial la pérdida de datos hasta una relación máxima de $F_s/F_p (F_s=1/\tau_s)$ permitiendo una reconstrucción precisa de una señal de frecuencia instantánea envuelta. El proceso de reconstrucción generalmente se lleva a cabo a la velocidad de muestreo F_p , pero puede ser reducida a otras velocidades después de la reconstrucción.

50 Utilizando esta técnica, las señales que tienen valores de frecuencia instantánea hasta 500 veces mayores que el límite de sobredimensionamiento "normal" pueden reconstruirse sobre un amplio rango de frecuencias, para frecuencias normales de muestreo de 160kHz.

Cuando el cambio en la fase $\Delta\phi_1$ está envuelto en sí mismo, esto sucederá entre $F_p/2$ y dc, teniendo en cuenta que el centro del cambio de frecuencia instantáneo está en la frecuencia portadora.

5 Un algoritmo de desenvolvimiento de frecuencia para desdoblar la frecuencia instantánea funciona encontrando las posiciones temporales donde la frecuencia instantánea alcanza cero y cambiando el signo de la señal entre cada uno de los otros pares de cruces de cero. La frecuencia instantánea finalmente se integra o se usa para reconstruir la información de fase perdida en la señal sensible normal.

Ha de entenderse que la presente invención se ha descrito anteriormente únicamente a modo de ejemplo, y se puede hacer una modificación de los detalles dentro del alcance de la invención.

10 Aunque se ha descrito un paquete de sensores de fibra óptica adecuado para la prospección sísmica, la persona experta reconocerá que la invención es igualmente aplicable a otros tipos de transductores basados en fase empleados en aplicaciones alternativas. Ejemplos incluyen usos de hidrófonos de fibra óptica en sistemas de sonar activo y mediciones de la vibración superficial usando un interferómetro óptico de espacio libre.

REIVINDICACIONES

1. Un método para interrogar a un transductor basado en fase, dicho transductor que proporciona un cambio en la fase de propagación de la señal en respuesta a un parámetro detectado, comprendiendo dicho método:
- 5 recibir una señal propagada a través de dicho transductor, comprendiendo la señal un tren de pulsos que comprende al menos un par de pulsos separados por un retardo,
- interferir un pulso que representa el estado del transductor en un primer momento y un pulso que representa el estado del transductor en un segundo momento, los dos pulsos habiendo experimentado la misma trayectoria óptica en diferentes momentos, y
- 10 determinar a partir de los pulsos interferidos una medida de la velocidad de cambio de fase con el tiempo de dicha señal.
2. Un método según la reivindicación 1, en donde la comparación de la señal comprende combinar una versión retardada y una versión no retardada de la señal recibida.
3. Un método según la reivindicación 2, en donde el método comprende pasar la señal a través de un interferómetro de salida.
- 15 4. Un método según la reivindicación 1, en donde la comparación de la señal comprende muestrear la señal en una pluralidad de momentos diferentes, y comparar dichos valores muestreados.
5. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además obtener un valor de fase en base a dicha velocidad medida de cambio de fase.
- 20 6. Un método según la reivindicación 5, en donde la obtención de un valor de fase comprende integrar dicha velocidad medida de cambio de fase.
7. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, que comprende además determinar una medida de fase a partir de dicha señal recibida.
8. Un método según la reivindicación 7, en donde dicha medida de fase y dicha medida de velocidad de cambio de fase se determinan de manera esencialmente simultánea.
- 25 9. Un método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la señal propagada a través del transductor es una señal pulsada.
10. Un sistema para interrogar a un transductor basado en fase, dicho transductor que proporciona un cambio en fase de la propagación de la señal en respuesta a un parámetro detectado, dicho sistema que comprende:
- 30 un receptor para recibir la señal de salida desde dicho transductor en respuesta a una señal de entrada, la señal que comprende un tren de pulsos que comprende al menos un par de pulsos separados por un retardo,
- un detector de fase que incluye un retardo para producir una versión retardada de dicha señal de salida y
- un interferómetro adaptado para interferir dicha señal de salida con dicha señal de salida retardada para determinar una medida de la velocidad de cambio de fase de dicha señal de salida, habiendo experimentado la señal de salida y la señal de salida retardada la misma trayectoria óptica en diferentes momentos.
- 35 11. Un sistema según la reivindicación 10 que comprende además una fuente de señal para proporcionar una señal de entrada a dicho transductor.
12. Un sistema según la reivindicación 11, en donde dicha señal de entrada comprende al menos dos pulsos.
13. Un sistema según la reivindicación 12, en donde el retardo entre dichos dos pulsos de entrada es igual al retardo del detector de fase.
- 40 14. Un método para interrogar a un transductor basado en fase según la reivindicación 1, dicho método que comprende:
- muestrear dicha señal recibida en una pluralidad de momentos diferentes y utilizar dichas muestras para determinar una medida de la velocidad de cambio de fase.
- 45 15. Un método según la reivindicación 14, en donde dicha señal recibida es una señal pulsada, y en donde se toman una pluralidad de muestras de cada pulso.
16. Un método según la reivindicación 15, en donde la duración de un pulso muestreado es menor que o igual a 200ns.

17. Un sistema o método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde la señal recibida desde el transductor tiene una frecuencia portadora, y en donde la magnitud de la frecuencia instantánea máxima de dicha señal es mayor o igual que la magnitud de la frecuencia portadora.
- 5 18. Un sistema o método según cualquiera de las reivindicaciones precedentes, en donde el transductor basado en fase es uno de un hidrófono, un geófono o un acelerómetro.
19. Un método para recuperar una señal sobredimensionada devuelta desde un sensor basado en fase de fibra óptica, la señal que comprende un tren de pulsos que comprende al menos un par de pulsos separados por un retardo, el método que comprende:
- 10 medir la velocidad de cambio de fase de dicha señal sobredimensionada interfiriendo dos pulsos de la señal, habiendo experimentado los dos pulsos la misma trayectoria óptica en diferentes momentos, y utilizar dicha medida para reconstruir la señal sobredimensionada.
20. Un método según la reivindicación 19, que comprende además medir la fase de dicha señal sobredimensionada.
21. Un método según la reivindicación 20, en donde dicha medición de la fase y dicha medición de la velocidad de cambio de fase se realizan de manera esencialmente simultánea.
- 15 22. Un método según la reivindicación 20 o la reivindicación 21, en donde la reconstrucción de la señal sobredimensionada comprende combinar dicha medida de fase y dicha medida de velocidad de cambio de fase.

Fig.1.

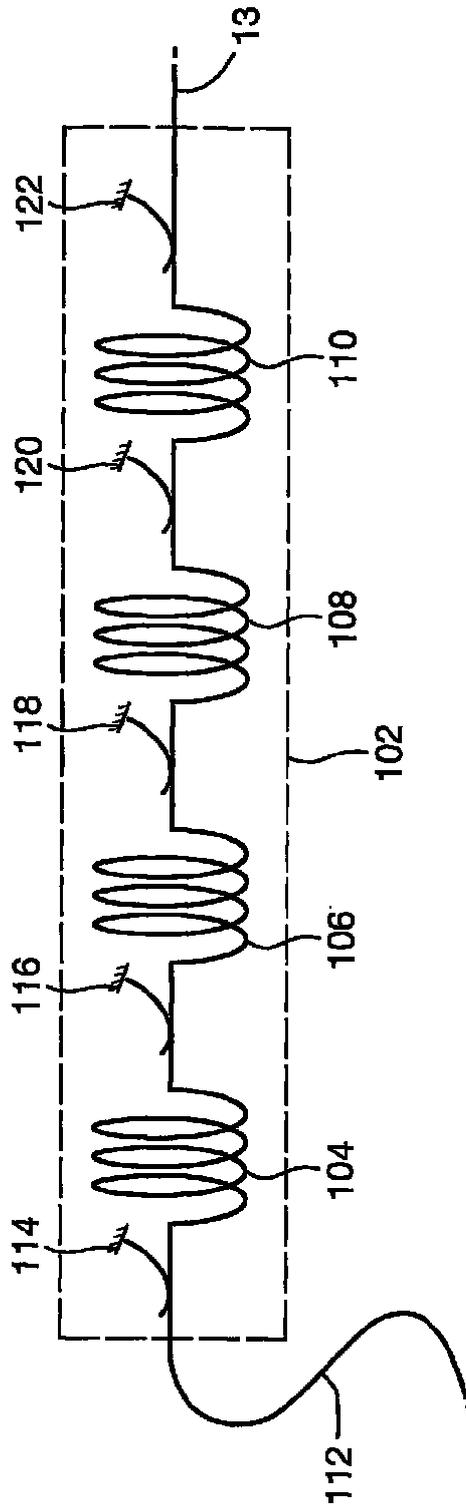


Fig.2.

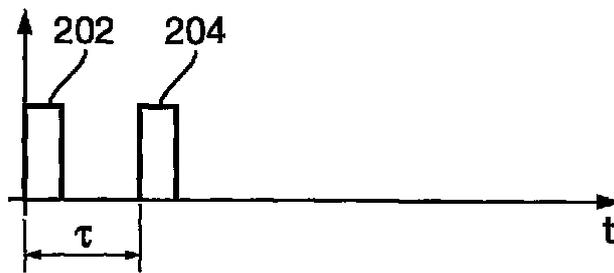


Fig.3a.

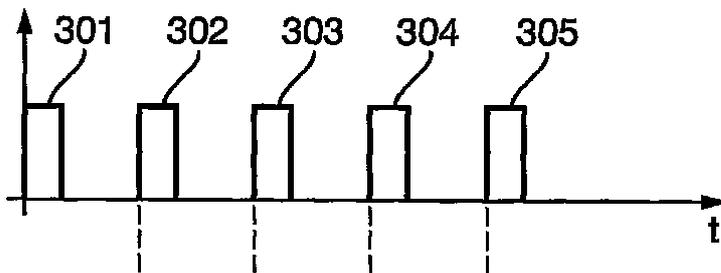


Fig.3b.

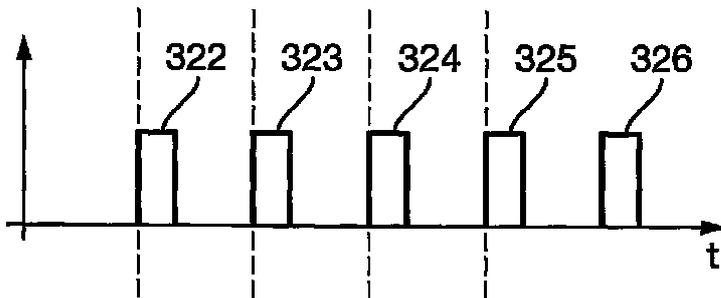


Fig.3c.

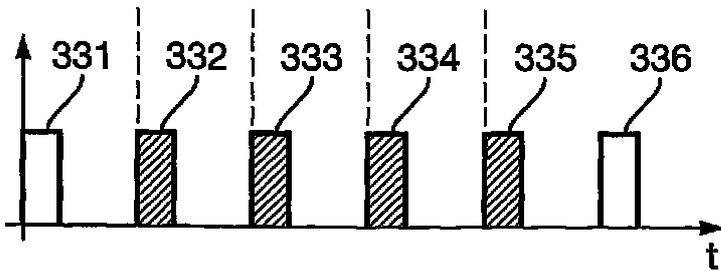


Fig.4.

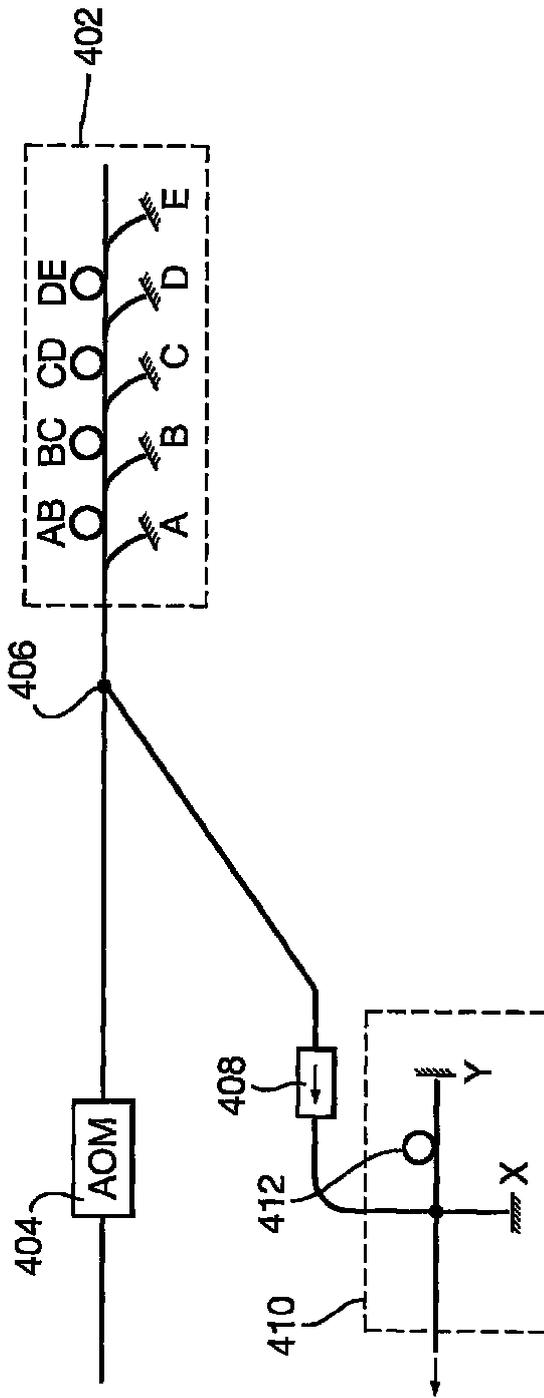


Fig.5.

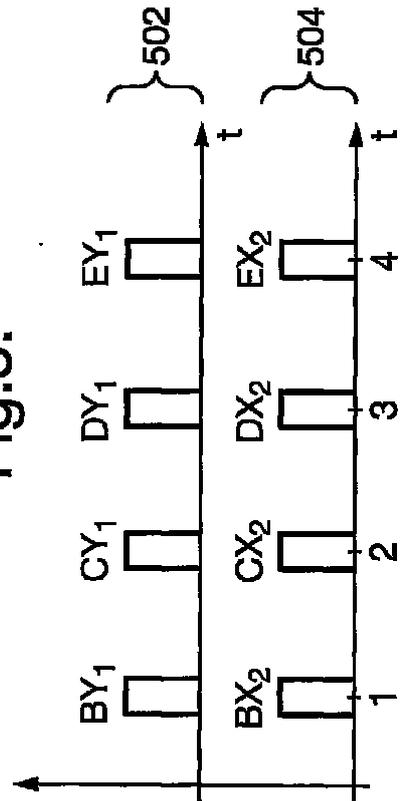


Fig.6.

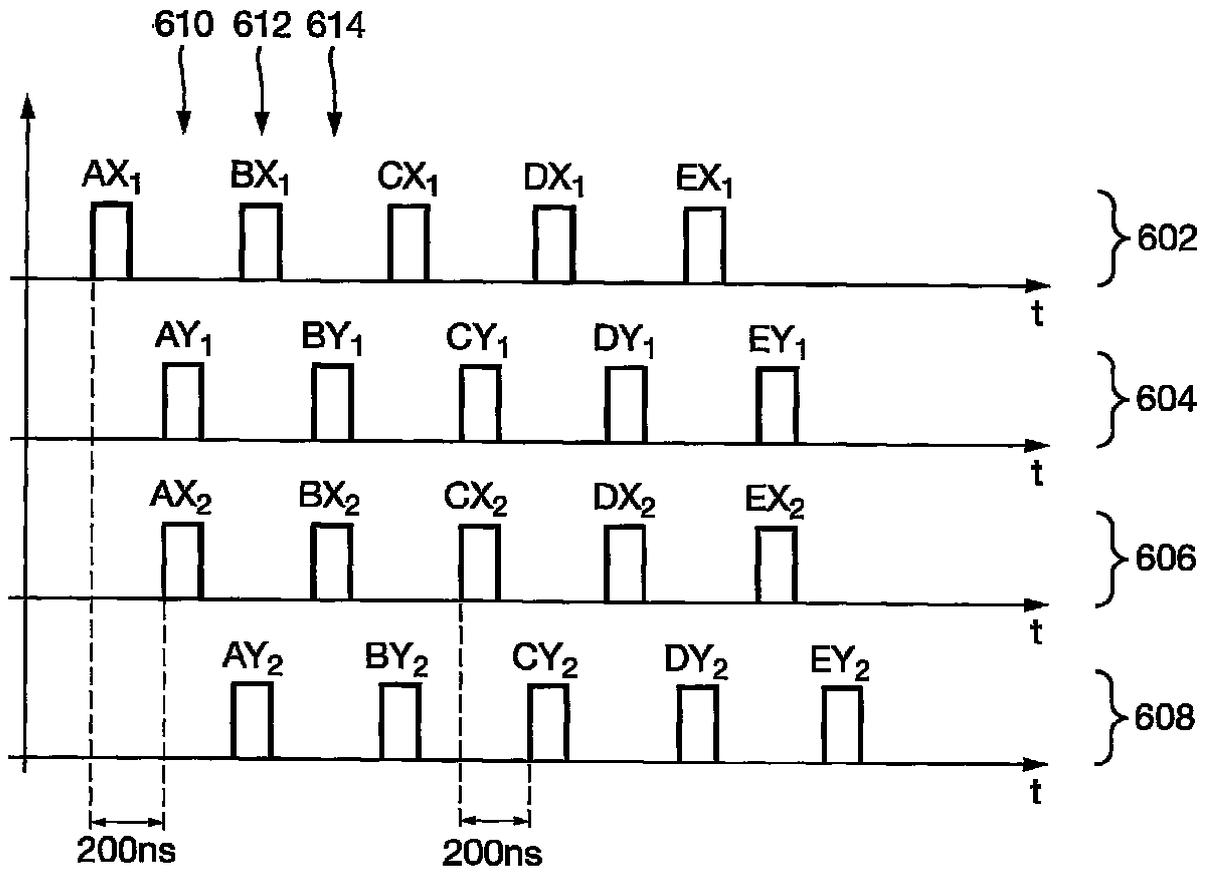


Fig.7.

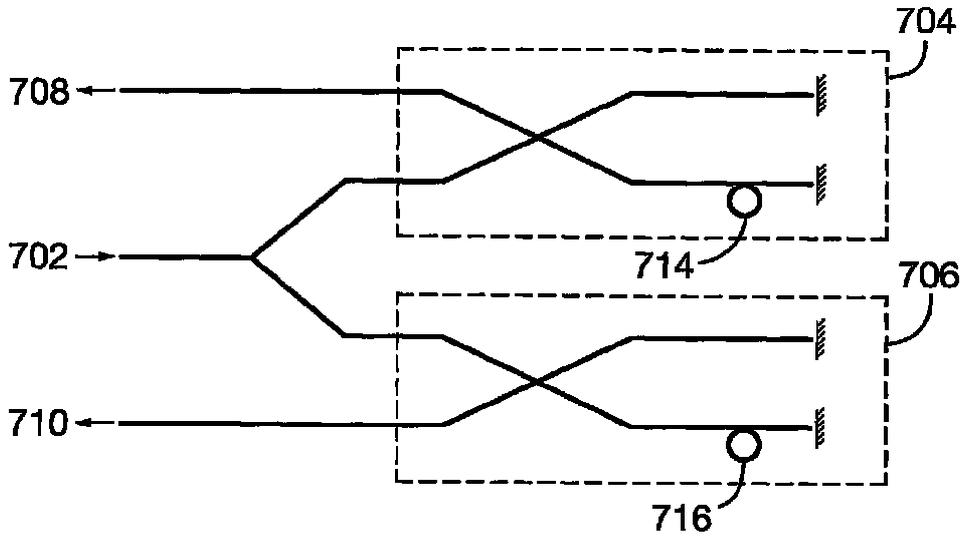


Fig.8.

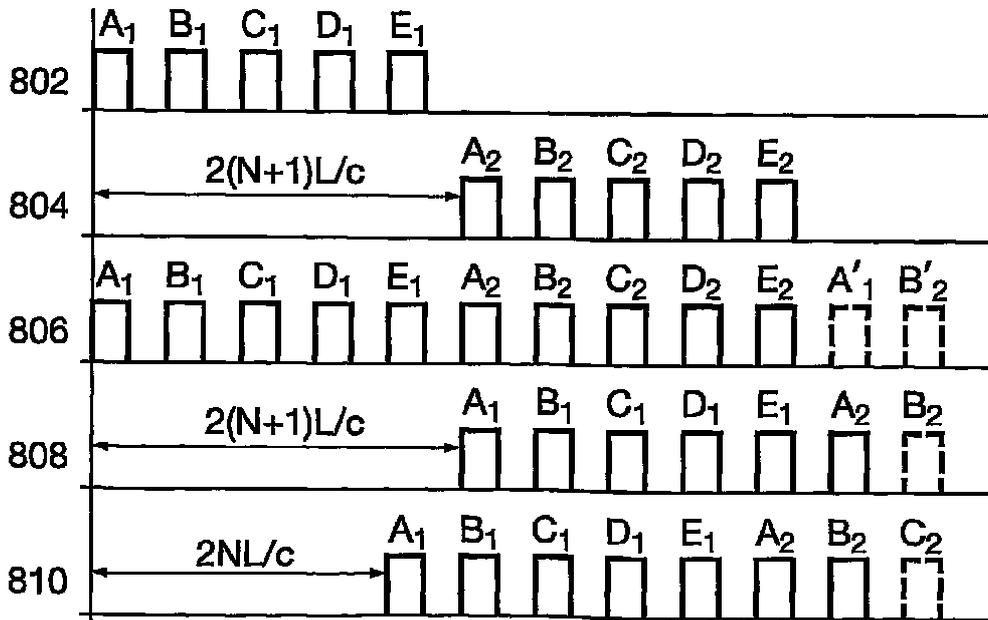


Fig.9.

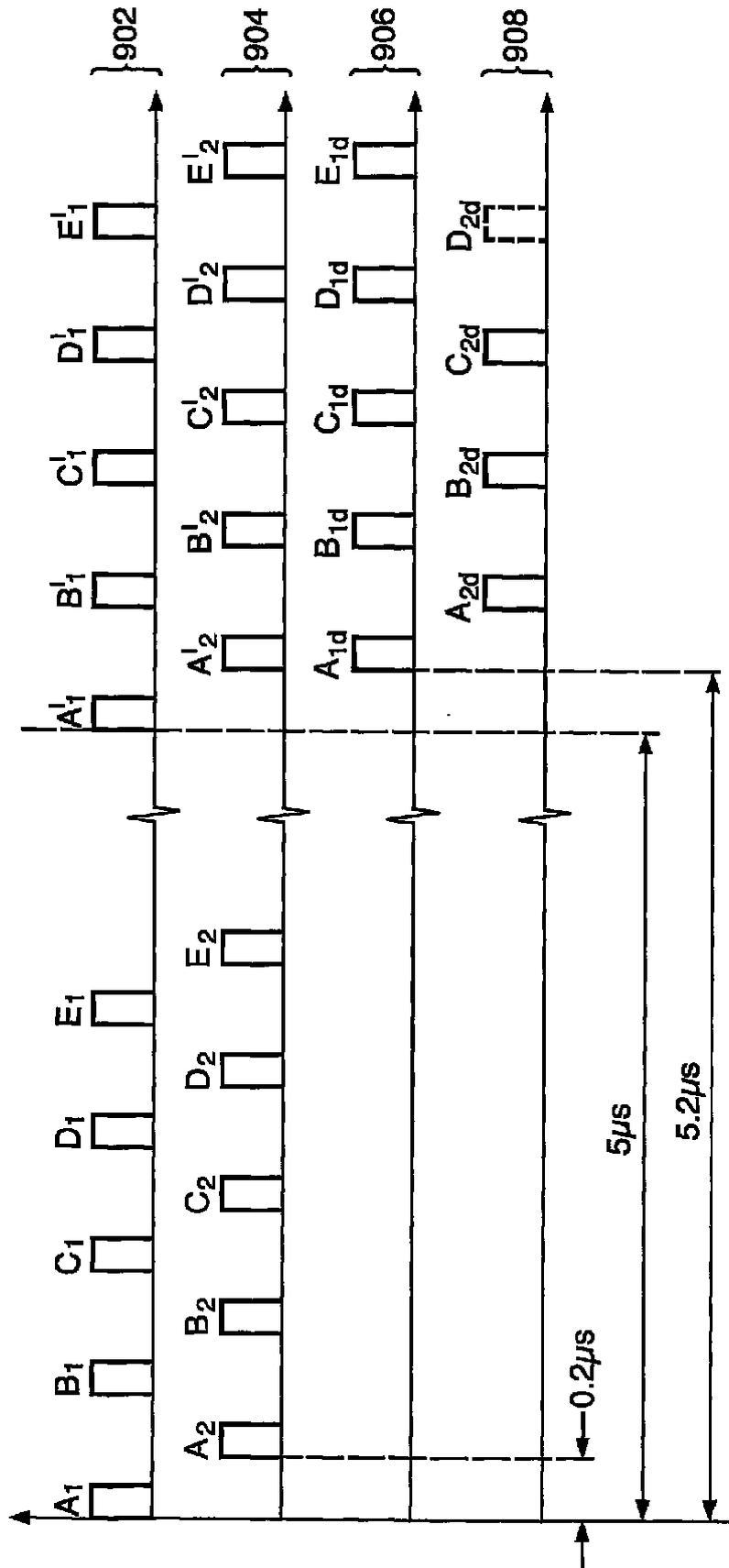


Fig.10.

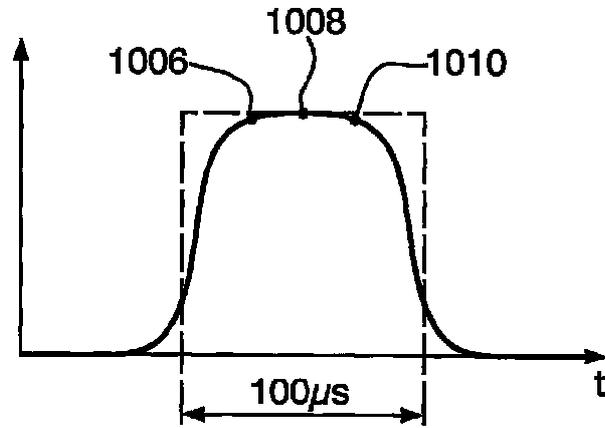


Fig.11.

