

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 767 578**

51 Int. Cl.:

G01N 22/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **15.10.2013 PCT/GB2013/052691**

87 Fecha y número de publicación internacional: **01.05.2014 WO14064425**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **15.10.2013 E 13780380 (5)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.12.2019 EP 2909609**

54 Título: **Investigación de las propiedades físicas de un objeto**

30 Prioridad:

22.10.2012 GB 201218931

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

18.06.2020

73 Titular/es:

**OXFORD UNIVERSITY INNOVATION LIMITED
(100.0%)
Buxton Court, 3 West Way, Botley
Oxford OX2 0JB, GB**

72 Inventor/es:

**EDWARDS, DAVID JOHN;
FAULKNER, GRAHAME EDWARD;
ZHANG, NING y
EDWARDS, ELEANOR GEORGINA**

74 Agente/Representante:

PONS ARIÑO, Ángel

ES 2 767 578 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

Investigación de las propiedades físicas de un objeto

5 La presente invención se refiere a la investigación de las propiedades físicas de un objeto. Tiene aplicación en el campo de la formación de imágenes aunque no exclusivamente.

Se conocen diversos métodos para investigar las propiedades físicas de un objeto. Por ejemplo, existe una amplia gama de técnicas de formación de imágenes que producen una imagen de un objeto que representa sus propiedades físicas. Por ejemplo, en el campo de la formación de imágenes médicas, los métodos de formación de imágenes establecidos y ampliamente usados incluyen radiografía de rayos X, tomografía computarizada (TC), formación de imágenes por ultrasonidos, formación de imágenes de resonancia magnética (IRM), tomografía por emisión de positrones (PET).

15 Los diferentes métodos de formación de imágenes se basan en diferentes fenómenos físicos. Por ejemplo, en la radiografía de rayos X y la tomografía computarizada (TC), los rayos X interactúan con el objeto, en la formación de imágenes por ultrasonidos, el ultrasonido interactúa con el objeto, y así sucesivamente. Como resultado, diferentes técnicas de formación de imágenes producen imágenes de diferentes características físicas del objeto del que se están formando imágenes y las diferentes técnicas de formación de imágenes tienen diferentes ventajas y limitaciones.

20 La elección de la modalidad depende de las propiedades del tejido que se está interrogando, por ejemplo, los rayos X pueden ser adecuados para tejidos altamente duros y calcificados, la MRI para tejidos blandos y el ultrasonido para cambios de formación de imágenes en propiedades mecánicas.

25 A modo de ejemplo, la comparación de los dos métodos comunes de formación de imágenes médicas de formación de imágenes por ultrasonidos y MRI proporciona imágenes de resolución relativamente alta, pero la formación de imágenes por ultrasonidos proporciona imágenes de propiedades acústicas o mecánicas, mientras que la MRI proporciona imágenes de propiedades electromagnéticas. Por lo tanto, la MRI proporciona un mecanismo de contraste útil que es específicamente útil en el campo de la formación de imágenes médicas debido a que muestra diferencias esencialmente dieléctricas presentes en muchos tipos de tejidos. Por el contrario, la IRM sufre los problemas de ser relativamente costosa y de requerir imanes potentes.

30 Además, hay una gama de técnicas espectroscópicas basadas en diferentes fenómenos físicos. Dichas técnicas espectroscópicas no producen necesariamente una imagen, sino que proporcionan datos con respecto a un intervalo de frecuencias o longitudes de onda, por ejemplo, de radiación electromagnética.

35 En el ámbito médico, existe un campo creciente de sistemas de formación de imágenes basados en el contraste dieléctrico que proporcionan información adicional para los médicos en la determinación de los tipos de tejidos, normalmente en combinación con ultrasonidos y rayos X. Un método propuesto es la formación de imágenes de microondas, que ha estado bajo investigación activa desde 1998.

40 Los sistemas de radar de banda ultra ancha también se han investigado para proporcionar un equilibrio entre la atenuación y la resolución. Este tipo de enfoque se ha cambiado para producir imágenes de buena calidad, pero solo recientemente se han desarrollado algoritmos de reconstrucción de imágenes que se aproximan a la resolución potencial de este enfoque.

45 Debido a los diferentes fenómenos físicos en los que se basan, tales diferentes técnicas de formación de imágenes y diferentes técnicas espectroscópicas tienen diferentes aplicaciones, dependiendo de la naturaleza de las características de interés en el objeto.

50 El documento WO-2010/043851 desvela un tipo adicional de formación de imágenes que puede denominarse como que es acústico-electromagnético, ya que implica aplicar vibración acústica a un objeto simultáneamente con iluminar el objeto con una onda electromagnética de iluminación.

55 La vibración del objeto dispersa y modula la onda electromagnética de iluminación, generando una onda electromagnética dispersa que incluye componentes Doppler desplazados de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por las frecuencias de la vibración del objeto bajo la vibración acústica y sus múltiplos. Se recibe la onda dispersa recibida y se obtienen los datos que representan características de los componentes Doppler, tales como la amplitud y la fase. Las características detectadas dependen de la respuesta mecánica del objeto y de las propiedades electromagnéticas del objeto, que provocan una interacción con la onda electromagnética de iluminación. Por lo tanto, las características detectadas proporcionan información sobre las propiedades electromagnéticas similares a la formación de imágenes MRI, pero sin necesidad de imanes.

60 Sin embargo, el método descrito en el documento WO 2010/043851 hace uso de la vibración acústica que se localiza en una región del objeto, por ejemplo, usando técnicas similares a la formación de imágenes por ultrasonidos conocidas. Esto significa que el método proporciona información solo de esa región, debido a que es donde se generan

los componentes Doppler dispersos. Como resultado, la resolución de la formación de imágenes es similar a la lograda por la formación de imágenes por ultrasonidos, estando limitada por la localización que puede lograrse sobre la base de la longitud de onda de la vibración acústica.

- 5 Esta combinación para proporcionar información sobre las propiedades electromagnéticas, con una resolución obtenida de la vibración acústica, ofrece ventajas que pueden proporcionar una formación de imágenes efectiva en una variedad de campos.

- 10 Un desafío con la formación de imágenes acústico-electromagnéticas es lograr simultáneamente una alta resolución y una alta relación señal-ruido. Existen muchos factores, a menudo conflictivos, que influyen en estas propiedades, lo que dificulta la optimización. Es posible, por ejemplo, variar la naturaleza de la vibración acústica y la configuración del aparato para producir la vibración acústica. La naturaleza de la onda electromagnética de iluminación y el aparato para generar y recibir la onda electromagnética también pueden variarse. La optimización se complica aún más por las restricciones impuestas por el contexto, por ejemplo, un contexto médico, dentro del que va a usarse el dispositivo.
- 15 Por ejemplo, en el caso de imágenes de objetos dentro de un cuerpo humano o animal, es importante proporcionar un dispositivo que sea conveniente para el uso de un médico y que pueda colocarse de manera adecuada en relación con el ser humano o animal que se está investigando.

- 20 El documento WO 2010/043851 A1 desvela un sistema de formación de imágenes para un objeto tal como tejido humano o animal que usa la dispersión de una onda electromagnética de iluminación mediante vibraciones acústicas para generar una onda electromagnética dispersa que incluye componentes Doppler desplazados de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por frecuencias de la vibración acústica y sus múltiplos.

- 25 GS ET AL: "Loop Antennas", 1 de enero de 1993 (1993-01-01), MANUAL DE INGENIERÍA DE ANTENA, XX, ESTADOS UNIDOS, PÁGINA(S) 5-1, XP002698451, desvela el uso de bucles de una o varias vueltas para usar como antenas para transmitir y recibir ondas electromagnéticas.

- 30 Es un objeto de la invención abordar uno o más de los problemas mencionados anteriormente en la técnica anterior. En particular, es un objeto de la invención proporcionar un sistema mejorado y un método correspondiente para investigar las propiedades físicas de un objeto en el que puede obtenerse una imagen acústico-electromagnética con mayor precisión, fiabilidad y/o conveniencia.

De acuerdo con un aspecto de la invención, se proporciona un sistema de acuerdo con la reivindicación 1.

- 35 Por lo tanto, se proporciona un sistema para investigar las propiedades físicas de un objeto que usa la formación de imágenes acústico-electromagnéticas en el que la onda electromagnética se genera o se recibe usando una bobina que rodea un eje a lo largo del que se emiten vibraciones acústicas a través de al menos 180 grados. En línea con el uso normal del término "eje", el eje a lo largo del que se emiten las vibraciones acústicas es una construcción matemática que consiste en una línea continua infinitamente larga que se extiende tanto por delante del transductor acústico como por detrás. Obviamente, la salida del aparato transductor acústico solo estará en la parte del eje que está delante del aparato transductor acústico. Sin embargo, la parte de la bobina circundante puede estar localizada en una posición axial que está detrás del aparato transductor acústico y, por lo tanto, "rodea" (al menos 180 grados) una parte del eje que está detrás del aparato transductor.
- 40

- 45 En una realización, la bobina circundante comprende un bucle cerrado y el eje a lo largo del que se emiten las vibraciones acústicas pasa a través del interior del bucle cerrado. En realizaciones alternativas, la bobina circundante comprende un bucle cerrado y el eje a lo largo del que se emiten las vibraciones acústicas pasa por el exterior del bucle cerrado (por ejemplo, el bucle cerrado se dobla alrededor del eje en la manera del contorno de una letra C o el contorno de una herradura).
- 50

- El requisito para que la bobina rodee el eje a través de al menos 180 grados es tal que un semiplano que comienza desde el eje puede hacerse rotar alrededor del eje a través de un intervalo de ángulos de al menos 180 grados mientras que se mantiene al menos una intersección con la bobina. Para un ángulo dado del semiplano, normalmente se realizará una sola intersección en el caso donde la bobina forme un bucle cerrado y el eje a lo largo del que se emiten las vibraciones acústicas pase a través del bucle cerrado, y normalmente se realizarán dos intersecciones en el caso donde la bobina forma un bucle cerrado y el eje a lo largo del que se emiten las vibraciones acústicas pasa por el exterior del bucle cerrado.
- 55

- Opcionalmente, la bobina rodea el eje a través de al menos 270 grados, opcionalmente al menos 350 grados, opcionalmente al menos 359 grados, opcionalmente de manera sustancial 360 grados.
- 60

- La abertura de la bobina sirve para interceptar y/o generar las líneas de campo magnético de las ondas electromagnéticas incidentes/transmitidas. En una realización, la presencia de la abertura se explota para localizar el aparato transductor acústico de una manera que mejore la compacidad y la eficiencia. Esto facilita la alineación de la "dirección de observación" del transmisor y/o receptor con la de, por ejemplo, el transductor acústico. En realizaciones donde el eje a lo largo del que se emiten las vibraciones acústicas pasa por el exterior del bucle cerrado de la bobina,
- 65

- envolver la bobina alrededor del eje de tal manera que rodee el eje a través de al menos 180 grados también aumenta la extensión a la que la dirección de observación del transmisor y/o del receptor se alinea con la del transductor acústico. Al alinear la dirección de observación del transmisor y/o del receptor con la dirección de observación del transductor acústico, se maximiza la señal de retorno Doppler recibida debido a que el movimiento inducido por la
- 5 vibración acústica es más paralelo a la onda electromagnética incidente. De este modo, la señal-ruido se mejora en relación con las disposiciones en las que la disposición transmisora y/o receptora está/no está alineada con el aparato transductor acústico de esta manera, por ejemplo, donde las disposiciones transmisora y/o receptora se proporcionan completamente a un lado del aparato transductor acústico.
- 10 En una realización, la bobina está provista de una sola vuelta. En otras realizaciones, la bobina tiene múltiples vueltas.
- En una realización, la bobina es común tanto a la disposición transmisora como a la disposición receptora. Esta configuración mejora aún más la compacidad.
- 15 En una realización, la bobina comprende al menos dos secciones de conducción conectadas entre sí por un condensador. En una realización, las secciones de conducción y los condensadores están dispuestos como alternativa alrededor de un bucle, por ejemplo circunferencialmente. El uso de secciones de conducción en serie con condensadores permite que el tamaño físico de la bobina se reduzca en gran medida mientras se mantiene la frecuencia de operación dentro de un intervalo de frecuencia deseado (por ejemplo, normalmente en decenas o cientos
- 20 de megahercios).
- En una realización, la bobina comprende una sección de conducción que tiene un espesor que es más pequeño en una dirección paralela a la dirección de emisión promedio de la vibración acústica que perpendicular a la dirección de emisión promedio de la vibración acústica. Por lo tanto, la sección transversal de la sección de conducción puede parecer relativamente plana, por ejemplo, a la manera de una cinta. Esta configuración proporciona una zona de
- 25 sección transversal relativamente alta y, por lo tanto, alta conductividad y, por lo tanto, eficacia, sin que el espesor de la bobina en la dirección de emisión de la vibración acústica sea demasiado grande. Dicha bobina también puede colocarse de manera más efectiva en la superficie del cuerpo que contiene el objeto del que se forman imágenes. La separación promedio entre la superficie del cuerpo y el material
- 30 de la bobina se reduce. En ciertas aplicaciones, puede preferirse fijar (por ejemplo, pegar) la bobina al cuerpo, lo que también se facilita al proporcionar una bobina que sea relativamente plana en la dirección perpendicular a la dirección de emisión de la vibración acústica.
- La bobina está conectada de manera fija al aparato transductor acústico. Esto facilita la fijación de la posición relativa de la bobina con respecto al aparato transductor acústico, lo que puede mejorar la fiabilidad, por ejemplo, minimizando el riesgo de desalineación entre la vibración acústica y la onda electromagnética. Además, la fijación facilita la incorporación a un dispositivo que sea fácil de manipular por un médico, tal como un dispositivo portátil.
- 35 La bobina puede ser plana o no plana. La bobina puede tener una de varias formas diferentes cuando se ve a lo largo de la dirección de emisión de la vibración acústica, por ejemplo, sustancialmente circular, sustancialmente ovalada, sustancialmente elipsoidal, sustancialmente poligonal. La bobina puede comprender un bucle cerrado continuo de conductor (al menos cuando se ve a lo largo del eje a lo largo del que se emite la vibración acústica). Como alternativa, la bobina puede comprender una pluralidad de secciones de conducción conectadas entre sí por condensadores u otros componentes eléctricos.
- 40
- 45 En una realización, la selección de la vibración acústica está optimizada. La selección debe tener en cuenta las siguientes características de la imagen. Un primer factor es que la elección de la frecuencia impacta en la resolución de la formación de imágenes que puede lograrse. Esto se debe a que el método implica la localización de la vibración acústica en una región del objeto a partir de la que se generan los componentes Doppler dispersos. El segundo factor es que la magnitud de la vibración acústica del objeto también depende de la frecuencia de la vibración acústica. Este efecto se obtiene simplemente de las propiedades mecánicas del objeto bajo investigación. Para algunos objetos, estos dos factores pueden competir, lo que requiere una elección cuidadosa de la frecuencia de la vibración acústica con el fin de equilibrar estos factores.
- 50
- 55 En una realización, se usa una forma específica de vibración acústica que comprende una onda portadora que está modulada por una forma de onda de AM. Esta vibración acústica está optimizada para proporcionar ventajas durante la formación de imágenes. En particular, la onda portadora se selecciona para proporcionar la localización de la vibración acústica, mientras que la forma de onda de AM se elige para incluir un componente de frecuencia que proporcione una vibración del objeto. La naturaleza de la modulación de amplitud es que la onda portadora tiene una frecuencia más alta que la forma de onda de AM. Por lo tanto, la forma de onda de AM puede seleccionarse para proporcionar una vibración del objeto de mayor magnitud que la onda portadora. Por lo tanto, la presente invención mejora la flexibilidad en la elección de la selección de la forma de onda acústica, específicamente para objetos donde la resolución deseada requiere el uso de una frecuencia que proporcione una respuesta mecánica baja. Para tales objetos, la onda portadora puede seleccionarse para optimizar la resolución y la forma de onda de AM puede elegirse
- 60
- 65 independientemente para proporcionar una respuesta mecánica significativa.

La forma de onda de AM puede tomar una variedad de formas. En su forma más simple, la forma de onda de AM puede ser un componente de frecuencia único, es decir, una forma de onda sinusoidal a una frecuencia dada. Sin embargo, también pueden usarse otras formas de onda que tienen un componente de frecuencia fundamental y unos componentes de frecuencia armónica, y en algunos casos pueden tener el beneficio de ser fáciles de generar. Por ejemplo, la forma de onda de AM puede ser una onda cuadrada, que es específicamente fácil de generar simplemente pulsando la onda portadora a encendido y apagado.

Cuando la forma de onda de AM tiene múltiples componentes de frecuencia, entonces, en principio, se detectan los componentes Doppler desplazados de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación, es decir, la frecuencia de cualquiera de los componentes de frecuencia de la forma de onda de AM. Sin embargo, deseablemente se usa el componente de frecuencia fundamental, la forma de onda de AM, debido a que en general proporcionará el componente de frecuencia de la mayor magnitud y proporcionará la respuesta máxima. Además, el componente de frecuencia fundamental se aísla más fácilmente debido a que tiene una separación relativamente grande de otros componentes Doppler.

El componente de frecuencia de la forma de onda de AM que se usa se selecciona teniendo en cuenta las propiedades mecánicas relevantes del objeto. Para optimizar la respuesta, este componente de frecuencia deseablemente tiene un período del mismo orden de magnitud que el tiempo de relajación acústica del objeto en las regiones bajo investigación.

La presente invención puede aplicarse para proporcionar la formación de imágenes del objeto. En este caso, la vibración acústica se aplica simultánea o secuencialmente de manera localizada en una pluralidad de regiones con modulación de amplitud diferente aplicada a la excitación de ultrasonido en cada región y la onda electromagnética dispersa generada en cada una de la pluralidad de regiones se recibe y se usa para obtener datos que representan la al menos una característica del componente Doppler detectado con respecto a cada región como datos de imagen. De esta manera, es posible generar datos de imagen para una pluralidad de regiones y construir de este modo una imagen que represente la información sobre las propiedades físicas del objeto. En el caso de que la vibración acústica se localice en dos dimensiones, entonces las regiones se extienden en la tercera dirección y, por lo tanto, la imagen es una imagen bidimensional (o imagen de sombra). En el caso de que la vibración acústica se localice en tres dimensiones, entonces las regiones se limitan en extensión en esa tercera dirección y se obtiene una imagen tridimensional.

La vibración acústica puede aplicarse localizada en la pluralidad de regiones secuencialmente. En este caso, la vibración acústica puede tener la misma frecuencia que simplifica la implementación del método pero no es esencial.

Como alternativa, la vibración acústica puede aplicarse localizada en la pluralidad de regiones simultáneamente pero usando diferentes componentes de frecuencia en cada región. En este caso, los componentes de frecuencia aplicados a cada región tienen diferentes frecuencias con el resultado de que las ondas electromagnéticas dispersas de cada región tienen diferentes frecuencias, lo que permite que los componentes Doppler generados simultáneamente con respecto a cada región se separen y se usen para obtener los datos de imagen que representan al menos una característica de los componentes Doppler con respecto a cada región.

En principio, la presente invención también puede usarse aplicando la vibración acústica a solo una única región sin proporcionar la formación de imágenes del objeto. En este caso, la información sobre las propiedades físicas del objeto obtenido es útil debido a que se basa en el fenómeno físico descrito anteriormente.

Estas propiedades significan que la formación de imágenes de la presente invención puede proporcionar ventajas sobre los métodos de formación de imágenes establecidos cuando se aplica a la formación de imágenes de tejido humano o animal, que incluye pero no se limita a la formación de imágenes médicas.

De acuerdo con un aspecto alternativo de la invención, se proporciona un método para investigar las propiedades físicas de un objeto, que comprende: aplicar al objeto una vibración acústica localizada en dos o tres dimensiones en una región del objeto; iluminar el objeto con una onda electromagnética de iluminación que tiene una frecuencia en un intervalo que se extiende hacia abajo desde 30 THz simultáneamente con la aplicación de una vibración acústica, teniendo la dirección de la vibración acústica un componente paralelo a la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación de tal manera que la vibración del objeto provocada por la vibración acústica en la región genera una onda electromagnética dispersa que incluye un conjunto de componentes Doppler desplazados de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por frecuencias de la vibración del objeto provocada por la vibración acústica y sus múltiplos; recibir la onda electromagnética dispersa generada en la región; obtener, a partir de la onda electromagnética dispersa recibida generada en la región, datos que representan al menos una característica de los componentes Doppler, en los que la iluminación comprende usar una bobina de antena que rodea, a través de al menos 180 grados, un eje a lo largo del se emite al menos una parte de la vibración acústica del aparato transductor acústico, y la bobina está conectada de manera fija al aparato transductor acústico e ilumina el objeto mientras la bobina y el aparato transductor acústico se localicen en el mismo lado del objeto.

Para permitir una mejor comprensión, las realizaciones de la presente invención se describirán ahora por medio de un

ejemplo no limitativo haciendo referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- la figura 1 es un diagrama de un sistema de formación imágenes;
- las figuras 2 y 3 son unas gráficas de dos formas de onda alternativas de la vibración acústica;
- 5 las figuras 4a a 4c son gráficas del espectro de frecuencia de la vibración acústica, la onda electromagnética de iluminación y la onda electromagnética dispersa;
- la figura 5 es un diagrama del aparato de procesamiento de señal del sistema de formación de imágenes;
- la figura 6 es una gráfica de SNR frente al índice de modulación para algunas construcciones específicas del aparato de procesamiento de señal;
- 10 la figura 7 es una vista en perspectiva de un aparato transductor acústico del sistema de formación de imágenes;
- la figura 8 es un diagrama de un circuito de accionamiento del aparato transductor acústico;
- la figura 9 es un diagrama de un circuito de formación de haz del circuito de accionamiento;
- la figura 10 es una vista en perspectiva de un transductor del aparato transductor acústico;
- la figura 11 es una vista en perspectiva de un aparato transductor acústico 4 colocado dentro de la abertura de una bobina de antena;
- 15 la figura 12 es una vista de extremo de la disposición de transductor/bobina de la figura 11;
- la figura 13 representa una bobina de antena que comprende una pluralidad de secciones de conducción circunferenciales separadas por condensadores;
- la figura 14 es una vista superior de un aparato transductor y una bobina no plana;
- 20 la figura 15 es una vista delantera del aparato transductor y la bobina no plana de la figura 14;
- la figura 16 representa la aplicación de un sistema que comprende unas disposiciones transmisora y receptora separadas a un cuerpo que comprende un objeto del que se forman imágenes.

25 En primer lugar se describirá un sistema 1 para investigar las propiedades físicas de un objeto 2, como se muestra en la figura 1. El objeto 2 puede ser un objeto biológico, por ejemplo, un tejido humano o animal, en cuyo caso el sistema 1 puede aplicarse en el campo de la formación de imágenes médicas. Sin embargo, la presente invención no está restringida a ese campo y puede aplicarse a una gama de objetos en otros campos técnicos.

30 El sistema 1 incluye una unidad de control 3 que controla los otros componentes del sistema 1. La unidad de control 3 puede implementarse mediante un aparato informático que ejecuta un programa apropiado.

El sistema 1 incluye un aparato transductor acústico 4 que opera bajo el control de la unidad de control 3. El aparato transductor acústico 4 en operación aplica una vibración acústica al objeto 2.

35 En una realización, la naturaleza de la vibración acústica es como sigue. La vibración acústica comprende una amplitud de onda portadora modulada por una forma de onda de AM que es periódica.

40 Dos ejemplos no limitativos de formas de onda acústicas adecuadas se muestran en las figuras 2 y 3, en los que la onda portadora tiene en ambos casos una frecuencia f_c . En la figura 2, la forma de onda de AM tiene su forma más simple que comprende un componente de frecuencia fundamental de la frecuencia f_a . En la figura 3, la forma de onda de AM es una onda cuadrada que tiene un período de $(1/f_a)$ y, por lo tanto, comprende un componente de frecuencia fundamental de la frecuencia f_a y unos componentes de frecuencia armónica que son múltiplos de la frecuencia f_a .

45 La onda portadora es más simple de generar si es una onda sinusoidal simple como se muestra en las figuras 2 y 3, aunque en general, la onda portadora podría tener cualquier otra forma de onda adecuada.

50 En general, la forma de onda de AM puede tener una amplia gama de formas, pero el uso de la onda cuadrada como en el ejemplo de la figura 3 es ventajoso en que se genera muy fácilmente pulsando la onda portadora a encendido y apagado. En el ejemplo de la figura 3, la forma de onda de AM es una onda cuadrada que tiene períodos iguales de encendido y apagado, pero esto no es esencial y podría ser una onda cuadrada que tenga períodos de encendido y apagado desiguales. La naturaleza de la modulación de amplitud es que la onda portadora tiene una frecuencia que es más pequeña que la frecuencia de al menos el componente de frecuencia fundamental de la forma de onda de AM, y normalmente de uno o más de los componentes de frecuencia armónica. En muchas realizaciones prácticas, la onda portadora tiene una frecuencia que es menor que la frecuencia del componente de frecuencia fundamental de la forma de onda de AM en al menos uno o dos órdenes de magnitud.

60 La vibración acústica se localiza en una región 5 en una localización dada dentro del objeto 2. La onda portadora se selecciona para proporcionar la localización deseada de la vibración acústica. El grado de localización depende de la longitud de onda, y por lo tanto la frecuencia f_c de la onda portadora se elige en consecuencia.

65 La vibración acústica provoca la vibración del objeto 2 en la región 5. La forma de onda de AM se selecciona para proporcionar una vibración del objeto 2 que es de mayor magnitud que la onda portadora a la frecuencia de al menos uno de los componentes de frecuencia de la forma de onda de AM que se usa, preferentemente el componente de frecuencia fundamental. Como la onda portadora se selecciona para proporcionar la localización de la vibración acústica para lograr la resolución deseada, dependiendo de la naturaleza del objeto 2, la respuesta mecánica del objeto 2 podría no ser óptima a la frecuencia de la onda portadora. Por lo tanto, la forma de onda de AM se usa para

proporcionar la vibración del objeto 2 a una frecuencia más baja que la onda portadora, a la que la magnitud de la vibración del objeto 2 es mayor.

5 En general, el método puede usar cualquiera de los componentes de frecuencia de la forma de onda de AM, pero ventajosamente se usa el componente de frecuencia fundamental debido a que este tiene en general una magnitud mayor que los componentes de frecuencia armónica, si los hay, y produce componentes Doppler de mayor magnitud que se separan más fácilmente de la onda electromagnética dispersa.

10 Para optimizar la respuesta mecánica del objeto, el componente de frecuencia de la forma de onda de AM que se usa, por ejemplo, *fa* en el caso de usar el componente de frecuencia fundamental, puede seleccionarse para tener una frecuencia que sea del mismo orden de magnitud que el tiempo de relajación acústica de la región 5 del objeto 2. Tal tiempo de relajación acústica puede medirse u obtenerse teóricamente para el tipo del objeto 2 bajo investigación. De manera similar, el componente de frecuencia que se usa puede seleccionarse para tener una frecuencia que proporcione una vibración resonante del objeto.

15 Para algunos tipos de objetos, la forma de onda de AM puede proporcionar una vibración del objeto 2, que es, a la frecuencia de los componentes de frecuencia de la forma de onda de AM usada, de una magnitud que es mayor que la onda portadora en uno o más órdenes de magnitud. En tales casos, la vibración del objeto 2 a la frecuencia de la onda portadora es, en comparación, insignificante y puede ignorarse.

20 Como alternativas que se ilustran en la figura 1, la vibración acústica puede localizarse en dos dimensiones en una región 5b (mostrada en un contorno discontinuo) que tiene una extensión limitada perpendicular a la dirección de propagación de la vibración acústica pero se extiende a lo largo de la dirección de propagación, o puede localizarse en tres dimensiones en una región 5a (mostrada en un contorno de puntos) que también está limitada a lo largo de la dirección de propagación. La localización de la vibración acústica puede lograrse usando equipos convencionales como se describe con más detalle a continuación. Cuando se localiza en tres dimensiones, a lo largo de la dirección de propagación de la onda acústica, la vibración acústica puede localizarse solo instantáneamente a medida que se propaga la onda acústica. En muchos campos de aplicación, tal como la formación de imágenes médicas, la vibración acústica es ultrasónica.

30 En la realización más simple, la vibración acústica se localiza en una única localización en un momento dado, explorando esa localización sobre el objeto 2 de tal manera que la vibración acústica se aplica a las regiones 5 en una pluralidad de diferentes regiones 5 sucesivamente. Tal exploración puede realizarse usando un aparato transductor acústico 4 que tiene un foco o haz controlable, o como alternativa moviendo físicamente el aparato transductor acústico 4 con un foco o haz fijo, por ejemplo, usando un retransmisor mecánico. La exploración puede realizarse en una, dos o tres dimensiones.

40 En realizaciones más complicadas, la vibración acústica se localiza en regiones 5 en localizaciones plurales simultáneamente, pero en este caso la forma de onda de AM de la vibración acústica es diferente en las diferentes localizaciones, como se trata más adelante.

45 El sistema 1 también incluye una disposición transmisora que comprende una bobina de antena 6 conectada a través de un acoplador direccional 8, a una fuente de radiofrecuencia 7 controlada por la unidad de control 3 que suministra a la bobina de antena 6 una señal de accionamiento que emite una onda electromagnética correspondiente. Por lo tanto, la disposición transmisora en operación ilumina el objeto 2 con una onda electromagnética de iluminación, que tiene normalmente una frecuencia de radio y que tiene un haz lo suficientemente amplio como para cubrir todo el volumen del objeto 2 bajo investigación, idealmente de manera uniforme. La onda electromagnética de iluminación es deseablemente una onda continua en lugar de un pulso. En este caso, la onda electromagnética de iluminación tiene una amplitud y una frecuencia constantes, al menos durante el período durante el que se monitoriza la interacción con la onda acústica al recibir los componentes Doppler dispersos.

50 Para facilitar la detección, la onda electromagnética de iluminación es predominantemente de una sola frecuencia, pero en general la onda electromagnética de iluminación podría incluir una banda de frecuencias. La frecuencia de la onda electromagnética de iluminación es mayor que la frecuencia de la vibración acústica, preferentemente al menos en un orden de magnitud.

55 La onda electromagnética de iluminación se dispersa por el objeto 2. Dentro de la región 5, hay una interacción entre el objeto 2 que se hace vibrar por la vibración acústica y la onda electromagnética de iluminación, lo que hace que la vibración acústica del objeto 2 en la región 5 module la onda electromagnética dispersa. En particular, la onda electromagnética dispersa que se genera incluye componentes a la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación y componentes Doppler a frecuencias desplazadas de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por las frecuencias de la vibración del objeto y sus múltiplos. Esto incluye componentes Doppler en frecuencias desplazadas de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por frecuencias de los componentes de frecuencia de la forma de onda de AM y sus múltiplos. La modulación de amplitud se usa como se ha descrito anteriormente para proporcionar una mayor magnitud de vibración a una frecuencia de al menos un componente de frecuencia de la forma de onda de AM que a una frecuencia de la onda portadora, por lo que los

componentes Doppler que surgen de la onda portadora son de menor magnitud y en muchos casos insignificantes y pueden ignorarse.

5 Esto se ilustra gráficamente en las figuras 4a a 4c, que son gráficas del espectro de frecuencia de la vibración acústica, la onda electromagnética de iluminación y la onda electromagnética dispersa, respectivamente. En este ejemplo, la vibración acústica comprende la onda portadora a una frecuencia f_c y un componente de frecuencia fundamental de la frecuencia f_a , como se muestra en la figura 2. La onda electromagnética de iluminación tiene una frecuencia de EM única de f_e .

10 La onda electromagnética dispersa comprende un componente central de la frecuencia de EM f_e de la onda electromagnética de iluminación.

15 La onda electromagnética dispersa también comprende componentes Doppler (bandas laterales) a frecuencias $f_e n f_a$, donde n es un número entero, es decir, desplazado de la frecuencia de EM f_e de la onda electromagnética de iluminación por la frecuencia f_a del componente de frecuencia fundamental de la forma de onda de AM y sus múltiplos. Aunque la figura 4c ilustra un ejemplo con tres componentes Doppler en cada lado, en general, podría haber cualquier número de componentes Doppler dependiendo de la interacción física. Los componentes Doppler que surgen de la vibración a la frecuencia f_c de la portadora no se muestran en la figura 4c, siendo menos significativos.

20 Cuando la forma de onda de AM también comprende componentes de frecuencia armónica, habrá otros componentes Doppler desplazados de la frecuencia de EM f_e de la onda electromagnética de iluminación por la frecuencia de los componentes de frecuencia armónica de la forma de onda de AM y sus múltiplos. Sin embargo, estos componentes Doppler adicionales se superponen a los componentes Doppler mostrados en la figura 4c de orden dos o más, por lo que son difíciles de separar.

25 El fenómeno físico detrás de la generación de la onda electromagnética dispersa, incluidos los componentes Doppler, es que los límites entre las zonas del objeto 2 que tienen diferentes propiedades eléctricas, tales como la conductividad y la permisividad dieléctrica (o, más en general, las zonas donde cambian estas propiedades eléctricas) dispersan la onda magnética eléctrica de iluminación y esa vibración de estos límites modula la onda dispersa. Por lo tanto, puede considerarse que el componente central que tiene la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación corresponde a la dispersión del objeto 2 cuando está estacionario, mientras que los componentes Doppler se generan por la vibración del objeto 2.

30 De hecho, este fenómeno físico para el caso general de un objeto vibrante es en sí mismo conocido, por ejemplo, como se describe en el documento de Lawrence et al., "Electromagnetic Scattering from Vibrating Penetrable Objects Using a General Class of Time-Varying Sheet Boundary Conditions", Transacciones IEEE en Antenas y propagación, vol. 54, n.º 7, págs. 2054-2061, julio de 2006. Sin embargo, este documento simplemente considera la onda electromagnética dispersada por cuerpos metálicos y dieléctricos que vibran sin considerar cómo se genera la vibración. En contraste con la presente invención, las vibraciones acústicas se aplican localizadas en una región 5, lo que significa que se sabe que cualquier componente Doppler detectado en la onda electromagnética dispersa se ha generado en la región 5. Sobre esta base, el sistema 1 usa los componentes Doppler para proporcionar información sobre el objeto 2 en la localización de la región 5. En particular, los componentes Doppler detectados dependen de la respuesta mecánica (conformidad) del objeto 2 en la localización de la región 5 a la vibración acústica y también de las propiedades eléctricas del objeto 2 en la localización de la región 5. Al aplicar la vibración acústica a las regiones 45 5 en diferentes localizaciones, es posible construir una imagen del objeto 2.

El sistema 1 también incluye una disposición receptora, que en la realización mostrada también comprende la bobina de antena 6. La disposición receptora (bobina de antena 6) está conectada al aparato de procesamiento de señal 9, que está controlado por la unidad de control 3. En esta realización, la bobina de antena 6 actúa por lo tanto como una bobina de antena común tanto para la disposición transmisora como receptora. En otras realizaciones, se proporcionan bobinas separadas respectivamente para las disposiciones transmisora y receptora.

La bobina de antena de la disposición receptora (bobina de antena 6 cuando se proporciona una bobina común) se ajusta a la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación y se adapta al medio de medición, es decir, al objeto 2 y/o cualquier medio (por ejemplo, aire o un medio de adaptación acústica) proporcionado entre el objeto 2 y la antena. En operación, la antena receptora recibe la onda dispersa y la suministra al aparato de procesamiento de señal 9 que la analiza para detectar los componentes Doppler que surgen de los componentes de frecuencia de la forma de onda de AM que se usa, y para emitir una señal que representa la fase y la amplitud de los componentes Doppler, o en general cualquier característica de los componentes Doppler.

60 La magnitud de los componentes Doppler dispersos se maximiza por la dirección de vibración de la vibración acústica que es paralela a la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación. La dirección de vibración es paralela a la dirección de propagación de la vibración acústica, por lo que corresponde a la vibración acústica y a la onda electromagnética de iluminación que tiene direcciones paralelas o antiparalelas. Esto se debe a que el movimiento mecánico de la región 5 resuelto a lo largo de la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación es mayor en esta dirección, ignorando los movimientos secundarios que pueden inducirse en otras

direcciones debido a la distorsión mecánica del material a granel. Si hay un ángulo α entre la dirección de la vibración acústica y la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación, entonces la velocidad de la vibración acústica resuelta a lo largo de la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación se reduce, escalando con el $\cos(\alpha)$. Esto tiene el efecto de que la magnitud de los componentes Doppler dispersos se reduce de manera similar, escalando con el $\cos(\alpha)$. Efectivamente, esto significa que la dirección de vibración de la vibración acústica no debería ser perpendicular a la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación, y ser preferentemente paralela, aunque los componentes Doppler aún pueden observarse con ángulos α más altos.

5

10 En general, la antena receptora puede localizarse en cualquier ángulo con respecto a la dirección de propagación de la onda electromagnética y la dirección de vibración de la vibración acústica. Esto se debe a que los componentes Doppler dispersos pueden, en principio, dispersarse en cualquier dirección. La dirección de dispersión depende de las propiedades físicas del objeto 2 en la región 5.

15 Ventajosamente, la onda electromagnética dispersada se recibe a lo largo de una línea paralela o antiparalela a la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación debido a que la dispersión es normalmente fuerte en estas direcciones. La recepción a lo largo de una línea antiparalela a la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación puede lograrse mediante la antena transmisora y la antena receptora estando localizadas muy cerca (sujeta a las restricciones impuestas por su volumen físico) o reemplazándose por una antena común conectada a la circuitería apropiada (tal como un acoplador direccional 8) para aislar la fuente de frecuencia 7 de la circuitería que maneja los componentes Doppler detectados.

20

25 Sin embargo, la onda electromagnética dispersa puede recibirse en otras direcciones. Ventajosamente, la onda electromagnética dispersa se recibe en varias direcciones. Esto puede proporcionar información adicional sobre la naturaleza del objeto 2 en la región 5 debido a que la dirección de dispersión depende de las propiedades físicas del objeto 2 que provocan la dispersión.

A continuación, se tratará la selección de la vibración acústica y la onda electromagnética de iluminación.

30 Como los componentes Doppler se generan a partir de la interacción provocada por la vibración acústica de la región 5, la resolución de los datos de imagen 13 es igual al tamaño de esa región 5, según lo gobierna el grado de localización de la vibración acústica logrado por el aparato transductor acústico 5. Por lo tanto, la resolución depende de la frecuencia. f_c de la onda portadora de manera similar a la formación de imágenes por ultrasonidos. Por lo tanto, la presente técnica de formación de imágenes puede lograr una resolución similar a la lograda por la formación de imágenes por ultrasonidos. Por ejemplo, la resolución puede ser inferior a un milímetro a frecuencias acústicas de ultrasonido muy altas (en términos generales, la resolución de 1 mm corresponde a una frecuencia de 1 MHz, de 100 mm a 10 MHz y de 1 mm a 100 MHz).

35

40 La frecuencia de la onda acústica controla la resolución y, por lo tanto, se elige para que sea lo suficientemente alta como para lograr la resolución deseada teniendo en cuenta las características de interés en el objeto 2 del que se forman imágenes. La frecuencia de la onda acústica puede estar sujeta a restricciones prácticas similares a las de la formación de imágenes por ultrasonidos convencionales, tales como las frecuencias alcanzables por el aparato transductor acústico 4 y la penetración de las ondas acústicas en el objeto 2 del que se forman imágenes.

45 La frecuencia f_c de la onda portadora se selecciona teniendo en cuenta la resolución deseada y también teniendo en cuenta la profundidad de penetración que puede lograrse a diferentes frecuencias. En general, es necesario equilibrar estos dos factores, de nuevo de manera similar a la formación de imágenes por ultrasonidos. Normalmente, la frecuencia f_c de la onda portadora puede estar en un intervalo que se extiende desde 10 kHz a 1 GHz. En el caso de que el objeto sea biológico, tal como el tejido humano o animal, en general la frecuencia f_c de la onda portadora puede estar en un intervalo que se extiende desde 1 MHz, preferentemente desde 2 MHz, y/o que se extiende hasta 50 MHz, preferentemente hasta 10 MHz. Dichas frecuencias son ultrasónicas, aunque en general las frecuencias acústicas en el intervalo audible podrían en principio usarse en algunos campos de aplicación.

50

55 La forma de onda de AM de la vibración acústica se elige teniendo en cuenta las propiedades mecánicas del objeto 5 para proporcionar una vibración de la magnitud deseada, de la manera tratada en detalle anteriormente. Normalmente, el componente de frecuencia de la forma de onda de AM que se usa, en general la frecuencia fundamental de la forma de onda de AM, tiene una frecuencia en un intervalo que se extiende desde 1 Hz a 100 MHz. En el caso de que el objeto sea un objeto biológico, tal como un tejido humano o animal, entonces la frecuencia del componente de frecuencia que se usa está preferentemente en un intervalo que se extiende desde 10 kHz, preferentemente hasta 100 kHz, y/o se extiende hasta 1 kHz.

60

65 La frecuencia de EM de la onda electromagnética de iluminación se selecciona de la siguiente manera. El mecanismo de contraste de imagen es diferente de la formación de imágenes por ultrasonidos, ya que depende de la interacción física entre la vibración acústica y la vibración electromagnética de iluminación y proporciona información en la respuesta mecánica (cumplimiento) del objeto 2 a la vibración acústica y en las propiedades eléctricas del objeto 2, como se ha tratado anteriormente, por ejemplo, proporcionando información similar a la MRI sin la necesidad de

imanes. Por lo tanto, la presente técnica de formación de imágenes puede verse como una alternativa a otras modalidades de formación de imágenes. El grado de absorción de la onda electromagnética de iluminación en el objeto 2 aumenta con su frecuencia. Por lo tanto, la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación se elige para que sea lo suficientemente baja como para proporcionar absorción en el objeto 2, que es lo suficientemente baja como para permitir la formación de imágenes de todo el objeto 2.

Por lo tanto, la frecuencia de EM se elige teniendo en cuenta las propiedades electromagnéticas del objeto 2 con el fin de proporcionar información útil sobre el objeto 2. En general, la onda electromagnética de iluminación es una onda de radio que tiene una frecuencia de EM en un intervalo que se extiende hasta 30 THz, es decir, en la banda de Terahercios o por debajo; hasta 300 GHz, es decir, en la banda EHF (frecuencia extremadamente alta) o inferior, correspondiente a frecuencias de microondas o inferiores; o en algunos campos de aplicación hasta 100 GHz. En el caso de que el objeto 2 sea un objeto biológico, tal como tejido humano o animal, ventajosamente el intervalo se extiende hasta 100 GHz, preferentemente hasta 2 GHz. Esto significa que la interacción en el objeto 2 proporciona información sobre las propiedades electromagnéticas del objeto 2 similares a la formación de imágenes de MRI.

El límite inferior de la frecuencia de EM depende de la capacidad del aparato de procesamiento de señal 9 descrito a continuación para separar los componentes Doppler de la frecuencia de EM, observando que en la práctica existe un límite en cuanto al ancho de una envolvente de EM creada por la modulación de amplitud que puede detectarse, como se conoce en el campo de la modulación de frecuencia de banda ancha. Por lo tanto, normalmente la onda electromagnética de iluminación tiene una frecuencia de EM en un intervalo que se extiende desde un valor de dos veces dicho componente de frecuencia de la forma de onda de AM, preferentemente diez veces dicho componente de frecuencia de la forma de onda de AM.

El objeto 2 puede tener una respuesta que varía a diferentes frecuencias. Por lo tanto, la formación de imágenes puede realizarse con vibraciones acústicas de diferentes frecuencias y/o con una onda electromagnética de iluminación de diferentes frecuencias. Las diferentes frecuencias pueden aplicarse en diferentes momentos repitiendo la operación del sistema 1 pero ajustando la frecuencia acústica. Como alternativa, pueden aplicarse diferentes frecuencias simultáneamente a la misma o diferentes regiones 5. Las diferentes frecuencias de excitación también pueden lograrse usando secuencias de pulso pseudoaleatorias (tales como secuencias de longitud máxima) u otras técnicas de espectro extendido. De esta manera, puede obtenerse información con respecto a las diferentes frecuencias de las vibraciones acústicas y/o la onda electromagnética de iluminación, por lo que la técnica es una técnica espectroscópica. Esto permite una mejor caracterización de la naturaleza del objeto 2.

El aparato de procesamiento de señal 9 incluye un amplificador 10, un demodulador de modulación de frecuencia (FM) 11 y un procesador de señal digital 12.

El amplificador 10 recibe y amplifica la señal recibida por la antena receptora (a través del acoplador direccional 8 en la realización mostrada, debido a que la antena receptora está integrada con la antena transmisora en la antena común 6). Debido a la baja SNR, el amplificador 10 es deseablemente un amplificador de muy bajo ruido.

La señal amplificada emitida por el amplificador 10 se suministra a un demodulador de FM 11 que está dispuesto para detectar, a partir de la onda electromagnética dispersada recibida, un componente Doppler desplazado de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por la frecuencia del componente de frecuencia de la forma de onda de AM usado, normalmente el componente de frecuencia fundamental. El demodulador de FM 11 emite una señal que representa la fase y la amplitud del componente Doppler.

El demodulador de FM 11 puede tener una construcción detallada que se muestra en la figura 5 y que se describirá a continuación.

El demodulador de FM 11 comprende un bucle de fase bloqueada (PLL) 60 que se suministra con la onda de EM dispersa recibida por la antena receptora, a través del amplificador 10. El PLL 60 comprende un detector de fase 61, un filtro de paso bajo 62, una etapa de ganancia 63, así como un controlador de bucle 65 y un oscilador controlado por tensión (VCO) 66 conectado en un bucle de retroalimentación negativa. Como se describe a continuación, el PLL 60 está bloqueado a la frecuencia de EM, por lo que el VCO 66 emite una señal a esa frecuencia de EM. El detector de fase 61 se suministra con la onda electromagnética dispersa y con la emisión del VCO 66. El detector de fase 61 emite el error de fase entre sus dos señales de entrada que se suministra a través del filtro de paso bajo 62 y la etapa de ganancia 63 para formar la señal de salida. Por lo tanto, la señal de salida contiene la señal demodulada en frecuencia que comprende el conjunto de componentes Doppler demodulados en frecuencia a partir de la frecuencia de EM.

Esta señal demodulada en frecuencia también se devuelve como una señal de retroalimentación en el bucle de retroalimentación negativa al controlador de bucle 65. El controlador de bucle 65 invierte la señal de retroalimentación antes de suministrarla al VCO 66, por lo que tiene que controlar el VCO 66 para emitir una señal que tenga la misma frecuencia de EM que el componente principal de la onda electromagnética dispersa. Por lo tanto, el controlador de bucle 65 está dispuesto como un controlador de ganancia fija de Tipo I, ya que es probable que este diseño proporcione un ruido relativamente bajo. El controlador de bucle 65 también cambia el nivel de la señal de retroalimentación para

ajustar la frecuencia central de la salida del VCO 66.

Dos configuraciones específicas para el PLL 60 son las siguientes.

5 La primera configuración está destinada a usarse con una frecuencia de EM de 790 MHz. En esta primera configuración:

el detector de fase 61 es un Minicircuit ZX05-10L+, 10-1000 Mhz, 3 dBm, mezclador DBD Lo;

el filtro de paso bajo 62 es un Minicircuit SLP-2.5+, corte de 2,5 MHz, filtro de paso bajo; y

10 el VCO 60 es un Minicircuit ZX95-800C+, -97dbc/Hz de ruido a 1kHz, frecuencia central de 790 MHz.

Estos componentes se eligen por su bajo nivel de ruido. Por ejemplo, el detector de fase 61 es un mezclador de diodos que produce una cantidad insignificante de ruido, a pesar de tener una respuesta de fase no lineal.

15 En esta primera configuración, el controlador de bucle 65 es un amplificador operacional AD797 muy desacoplado en una configuración de retroalimentación negativa. La ganancia de bucle se elige para ser menos de 100 dB como un compromiso entre el ruido de salida y el intervalo de frecuencia bloqueado, ya que una ganancia más alta aumentará el ruido a dobles menos deseables.

20 El cambio de tensión se logra referenciando la entrada no inversora del controlador de bucle 65 a una fuente de tensión de ruido muy bajo 67, por ejemplo, proporcionada por un dispositivo analógico ADR445 que produce una tensión de 5 V que puede devaluarse por un divisor de potencial. Esta referencia se desacopla usando un condensador de desacoplamiento grande (no mostrado) para minimizar cualquier ruido potencial 1/f en su nivel de salida.

25 La salida del controlador de bucle 65 se suministra al VCO 66 a través de un filtro de paso bajo 68 que es un filtro de paso bajo de un único polo que consiste en un circuito de RC, para reducir la distorsión y aumentar la estabilidad.

Durante el arranque, la fuente de tensión 67 se ajusta para variar la tensión de salida del controlador de bucle 65. En particular, el nivel de tensión fluctúa a medida que el controlador de bucle 65 se estabiliza. Un método más conveniente es cambiar ligeramente la tensión de entrada (por ejemplo, del orden de 5 mV), lo que tiene el mismo efecto. Los puntos de CC operativos establecen la tensión del VCO 66, que debe corresponder a la frecuencia de EM de 790 MHz, dentro de 10 kHz.

30 La ganancia de retroalimentación se ha probado empíricamente para proporcionar un rendimiento de conocimiento aceptable. Otra mejora potencial es proporcionar dos etapas de amplificadores en el bucle de retroalimentación, con el amplificador adicional actuando como un desplazamiento de CC. Esto permitiría el desplazamiento de CC que debe corregirse en el inicio, aunque a costa de un pequeño aumento de los niveles de ruido.

Se pretende usar una segunda configuración con una frecuencia de EM de 434 MHz. En esta segunda configuración:

40

el detector de fase 61 es un Minicircuit ZX05-10L+, 10-1000 Mhz, 3 dBm, mezclador DBD Lo;

el filtro de paso bajo 65 es un Minicircuit LPF-BOR3+, filtro de paso bajo con corte de 0,3 MHz; y

el VCO 60 es un Crystek CVSS-940, -110 dbc/Hz de ruido a 1kHz, frecuencia central de 434 MHz.

45 En la segunda configuración, el PLL 60 permanece esencialmente igual que en la primera configuración, excepto que se usa un regulador de tensión para suministrar al VCO 66.

En esta segunda configuración, los componentes son fundamentales para reducir la captación de ruido.

50 El VCO 66 en esta configuración es un oscilador basado en cristales de alta estabilidad con un ruido de fase muy bajo, que se ha encontrado que es una fuente significativa de ruido.

El circuito se ha probado con y sin el filtro de paso bajo 68 en la entrada al VCO 66. Se ha encontrado que una gran capacitancia en el filtro de paso bajo 68 mejora la SNR en una cantidad pequeña pero significativa, al tiempo que reduce el intervalo de bloqueo. En esta segunda configuración, la constante de tiempo de 0,03 s se ha determinado empíricamente como óptima.

60 La salida del PLL 60 se suministra al amplificador sincrónico 72, a través de un filtro de paso alto 70 y una etapa de ganancia 71 que también actúa como un filtro de paso bajo, de tal manera que el filtro de paso alto 70 y la etapa de ganancia 71 actúan juntos como un filtro de paso de banda. El amplificador sincrónico 72 usa una señal de frecuencia de referencia que es una frecuencia de referencia igual a la frecuencia de los componentes de frecuencia usados de la forma de onda de AM, que es normalmente el componente de frecuencia fundamental de la forma de onda de AM. Por lo tanto, la frecuencia de referencia se selecciona para estar a una frecuencia de vibración del objeto 2 provocada por la vibración acústica. A modo de comparación, si la vibración acústica comprendiera un único componente de frecuencia, entonces la frecuencia de referencia sería la frecuencia de ese componente de frecuencia único.

65

Como se ha descrito anteriormente, el componente de frecuencia usado puede ser cualquiera de los componentes de frecuencia de la forma de onda de AM y sus múltiplos, pero en general es el componente de frecuencia fundamental f_a de la forma de onda de AM. La frecuencia de referencia para el PLL 60 y puede obtenerse a partir de una fuente de frecuencia que también se usa para obtener la forma de onda de AM (como se describe más adelante) y que emite una señal de frecuencia f_a . En consecuencia, el aparato transductor acústico 4 puede conectarse al demodulador de FM 11 como se muestra en la figura 1 para suministrar la forma de onda de AM o una señal de la frecuencia f_a desde la fuente de frecuencia hasta el amplificador sincrónico 72.

El amplificador sincrónico 72 está dispuesto para extraer de la señal demodulada en frecuencia suministrada al mismo una señal a la frecuencia de referencia. Por lo tanto, el amplificador sincrónico 72 extrae el componente Doppler deseado. El amplificador sincrónico 72 está configurado además para generar la amplitud y la fase de la señal extraída, aunque igualmente podría configurarse para generar otras características de la misma.

Se ha encontrado que esta configuración del demodulador de FM 11 que combina el PLL 60 y el amplificador sincrónico 72 proporciona una detección muy sensible del componente Doppler a pesar del nivel de señal relativamente bajo del mismo. En términos de modulación de frecuencia, se ha encontrado que las realizaciones del demodulador de FM 11 son capaces de detectar índices de modulación del orden de 10 partes en 1 millón. Esta alta sensibilidad se logra mediante la combinación del PLL 60, que extrae eficazmente el conjunto completo de componentes Doppler, y el amplificador sincrónico 72 que extrae posteriormente el deseado de los componentes Doppler, normalmente a la frecuencia f_a del componente de frecuencia fundamental. A modo de ejemplo, la figura 6 muestra el rendimiento de la primera configuración (frecuencia de EM de 790 MHz) y la segunda configuración (frecuencia de EM de 434 MHz) con y sin el uso del condensador en el filtro de paso bajo 68 (denominado como "C" en la figura 6) y con un condensador de desacoplamiento separado (denominado como "Decap" en la figura 6) con una constante de tiempo de bloqueo $I_s \tau$. Por ejemplo, esto muestra que la segunda configuración puede lograr un índice de sensibilidad k (SNR /MI) de alrededor de 17000.

Para facilitar la demodulación de FM, el demodulador de FM 11 está provisto de la señal de la onda electromagnética de iluminación procedente de la fuente de frecuencia 7 y con la señal del componente de frecuencia usado de la forma de onda de AM de la onda acústica procedente del aparato transductor acústico 4.

El amplificador 10 y el demodulador de FM 11 pueden estar formados por circuitos analógicos, pero podrían usarse circuitos digitales como alternativa para cualquier parte del amplificador 10 y del demodulador de FM 11. Por ejemplo, una implementación digital del amplificador sincrónico 72 es específicamente ventajosa cuando se forman imágenes plurales de varias regiones 5 como se trata a continuación.

La señal que representa la fase y la amplitud del componente Doppler obtenida por el demodulador de FM 11, en particular la salida del amplificador sincrónico 72, se suministra al procesador de señal digital 12 que procesa esas características de los componentes Doppler. Como el demodulador de FM 11 detecta las características de los componentes Doppler a frecuencias desplazadas de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por las frecuencias de los componentes de frecuencia de la forma de onda de AM y sus múltiplos, se sabe que esas características se han obtenido a partir de la región 5 del objeto 2 en la localización actual de la vibración acústica. El procesador de señal digital 12 recibe información de la unidad de control 3 que identifica la localización actual de la vibración acústica. El procesador de señal digital 12 almacena datos de imagen 13 que representan esas características detectadas con respecto a cada localización a medida que se explora la localización sobre el objeto 2. Los datos de imagen 13 pueden almacenarse, visualizarse y/o emitirse desde el aparato de procesamiento de señal 9.

El procesador de señal digital 12 puede almacenar solo los valores realmente obtenidos de la fase y la amplitud u otras características. Estos varían en función de las propiedades del objeto 2 en diferentes localizaciones como se ha tratado anteriormente y, por lo tanto, proporcionan una imagen útil incluso sin un procesamiento adicional.

Opcionalmente, el procesador de señal digital 12 puede procesar adicionalmente los valores realmente obtenidos de la fase y la amplitud u otras características, sobre la base de un modelo de interacción entre la vibración acústica y la onda electromagnética de iluminación, para obtener características que representan propiedades físicas particulares del objeto 2 que también se almacenan como datos de imagen 13. Tal procesamiento puede proporcionar información sobre las propiedades del objeto 2 que son más útiles que las propias fase y amplitud. Por ejemplo, en el caso de la formación de imágenes médicas, dicho procesamiento puede usarse para caracterizar especies de metabolitos que tienen respuestas electromagnéticas conocidas.

El procesador de señal digital 12 puede implementarse mediante un aparato informático que ejecuta un programa apropiado, siendo opcionalmente el mismo aparato informático que el usado para implementar la unidad de control 3.

La conexión desde la fuente de radiofrecuencia 7 al demodulador de FM 11 mostrada en la figura 1 puede omitirse en el caso de que el demodulador de FM 11 tenga la construcción mostrada en la figura 5. Sin embargo, en una construcción alternativa del demodulador de FM 11 en la que el PLL 60 se reemplaza por un detector de coherencia, esta conexión se usa para suministrar al detector de coherencia la señal de accionamiento emitida por la fuente de

radiofrecuencia 7 que tiene la frecuencia de EM de la onda electromagnética de iluminación. En esta alternativa, el detector de coherencia usa esa señal para detectar señales en la frecuencia de EM y, por lo tanto, produce una señal de salida de una forma similar al PLL 60. A continuación, se describirán el aparato transductor acústico 4 y sus diversas variaciones.

5 Como se ha mencionado anteriormente, el aparato transductor acústico 4 proporciona una vibración acústica que se localiza en una región 5 en un momento dado, que se localiza en dos dimensiones en una región 5b que se extiende en la dirección de propagación o se localiza en tres dimensiones en una región 5a que está limitada en la dirección de propagación. Esto puede lograrse usando un aparato convencional que puede proporcionar un enfoque controlable o un enfoque fijo.

15 La figura 7 muestra una posible disposición en la que el aparato transductor acústico 4 comprende una matriz de transductores 20 que proporcionan un enfoque controlable electrónicamente en una región 5. En este caso, la onda acústica emitida por la matriz de transductores 20 puede ser un haz de propagación. Como se conoce en el campo de la formación de imágenes por ultrasonidos, tal formación de haz permite que se forme un enfoque de alta energía en la localización deseada. En el presente método esto significa que la mayoría de la onda electromagnética dispersa contiene información perteneciente a la región 5 del enfoque.

20 Para proporcionar la localización en dos dimensiones, la matriz de transductores 20 puede aplicar la vibración acústica como un haz continuo, de tal manera que la vibración acústica se localice en el espacio dentro del haz de propagación en las dos dimensiones perpendiculares a la dirección de propagación. Para proporcionar la localización en tres dimensiones, la matriz de transductores 20 aún puede aplicar la vibración acústica como un haz, pero como un haz que no es continuo, de tal manera que a lo largo de la tercera dimensión en la dirección de propagación, la vibración acústica se localiza instantáneamente como la onda acústica propagada. El haz de propagación puede ser un pulso que se localiza en una única región 5 en un momento dado, región 5 que se propaga a través del objeto 2 a lo largo del tiempo. Como alternativa, el haz de propagación puede tener una forma de onda de AM de frecuencia variable, de manera que se localicen diferentes frecuencias en diferentes regiones 5 simultáneamente. En consecuencia, la información suministrada por la unidad de control 3 al procesador de señal digital 12 indica la temporización del haz de propagación, identificando de este modo la localización actual de la vibración acústica.

30 En el caso de que el haz de propagación tenga una forma de onda de AM de frecuencia variable, una opción es que el aparato de procesamiento de señal 9 esté dispuesto para realizar una transformada de Fourier, u otra transformación, de la señal recibida dispersa en el dominio de tiempo. Debido a que las diferentes frecuencias de vibración acústica se localizan en diferentes regiones 5 simultáneamente, dicha transformación genera las características con respecto a cada una de las diferentes regiones 5. De esta manera, puede construirse una "película" y las imágenes en función del tiempo pueden mostrarse con una resolución temporal/espacial extremadamente alta.

40 Para formar el haz de propagación, el aparato transductor acústico 4 comprende un circuito de accionamiento 21 que proporciona una señal de accionamiento separada a cada transductor 20 cuyas señales de accionamiento varían en amplitud y/o fase y/o retraso para formar el enfoque en la región deseada 5. Tal formación de un haz a partir de una matriz de transductores se conoce en sí misma, por ejemplo, en el campo de la formación de imágenes por ultrasonidos.

45 Como se muestra en la figura 8, el circuito de accionamiento 21 incluye un generador de forma de onda 22 que genera una señal oscilante que tiene una forma de onda correspondiente a la forma de onda deseada de la vibración acústica y la suministra a un circuito de formación de haz 23. El circuito de formación de haz 23 puede implementarse en medios analógicos o digitales. El generador de forma de onda 22 comprende una fuente de frecuencia portadora 90 que emite una señal que tiene la frecuencia f_c de la onda portadora, y una fuente de forma de onda de AM 91 que emite la forma de onda de AM, que en el caso más simple puede comprender un componente de frecuencia fundamental de la frecuencia f_a . El generador de forma de onda 22 también comprende un mezclador 92 que mezcla las dos señales emitidas por la fuente de frecuencia portadora 90 y la fuente de forma de onda de AM 91 para obtener la señal oscilante.

55 El circuito de formación de haz 23 obtiene una señal para cada transductor 20 a partir de la señal oscilante modificando la amplitud y/o la fase y/o el retraso en cantidades respectivas que conforman la salida de vibración acústica global del aparato transductor acústico 4 en un haz. El circuito de formación de haz 23 opera bajo el control de la unidad de control 3 para proporcionar un enfoque en una región deseada 5. El circuito de accionamiento 21 también incluye unos amplificadores 24 para amplificar la señal para cada transductor 20 emitida por el circuito de formación de haz 23 para formar la señal de accionamiento que a continuación se suministra a los respectivos transductores 20.

60 El circuito de formación de haz 23 puede incluir amplificadores programables (o atenuadores) y/o desplazadores de fase y/o retrasos para modificar la señal oscilante. Por ejemplo, el circuito de formación de haz 23 puede emplear una disposición en cuadratura como se muestra en la figura 9 con respecto a cada uno de los transductores. Esta disposición en cuadratura comprende un canal-I 25 y un canal-Q 26, cada uno suministrado con la señal oscilante del generador de forma de onda 22. El canal-I incluye un retardo de fase 27 de $\pi/2$ para retrasar la fase oscilante de la señal oscilante de tal manera que las señales en el canal-I 25 y el canal-Q 26 estén en cuadratura. El canal-I 25 y el

canal-Q 26 incluyen cada uno de los mismos unos atenuadores respectivos 27 y 28, cuyas salidas se suministran a un sumador 30 para sumar las señales de cuadratura atenuadas. Los respectivos grados de atenuación proporcionados por cada uno de los atenuadores 27 y 28 pueden controlarse para variar de este modo la amplitud y la fase de la señal de salida por el sumador 30. Esta señal emitida por el sumador 30 se proporciona opcionalmente a un circuito de retardo variable 31 que puede variarse para controlar el retardo de la señal de accionamiento.

El circuito de accionamiento 21 puede estar formado por circuitos analógicos, pero los circuitos digitales podrían usarse como alternativa para cualquier parte del mismo.

Cada transductor 20 puede estar formado como se muestra en la figura 10 por una pieza 43 de material piezoeléctrico (u otro material electroactivo). La señal de accionamiento procedente del circuito de accionamiento 21 se aplica a través de la pieza 43 de material piezoeléctrico que vibra en respuesta a la misma generando de este modo una onda acústica. La pieza 43 de material piezoeléctrico se muestra como que es cilíndrica, pero puede estar conformada para dirigir la onda acústica generada.

En la figura 7, la matriz de transductores 20 se ilustra como una matriz plana 2D, pero en general puede usarse como alternativa cualquier forma arbitraria de matriz, por ejemplo, una matriz lineal 1D o conformada, una matriz 2D curva o conformada, una matriz 3D, o matrices plurales en diferentes lados del objeto 2.

Como una alternativa a la formación de un haz, el presente aparato transductor acústico 4 que comprende la matriz de transductores 20 puede aplicar la vibración acústica como un punto que se localiza continuamente en el espacio en tres dimensiones.

Usando este aparato transductor acústico 4 que comprende una matriz de transductores 20, la localización de la región 5 en la que se localiza la vibración acústica puede explorarse sobre el objeto 2 bajo control electrónico para obtener información en las diferentes regiones 5 y construir de este modo una imagen del objeto 2.

En el caso de que la vibración acústica se localice en dos dimensiones, entonces la imagen es una imagen bidimensional (o imagen sombreada) cuyos píxeles contienen información de la totalidad de la región 5b que se extiende a través del objeto 2 a lo largo de la dirección de propagación de la vibración acústica. En este caso, puede construirse una imagen tridimensional moviendo el aparato transductor acústico 4 y la antena transmisora 6 alrededor del objeto 2 bajo examen y tomando una serie de imágenes con diferentes ángulos de incidencia. A continuación, la serie de imágenes puede transformarse en una imagen tridimensional usando transformaciones similares a las convencionales para otros tipos de formación de imágenes, tal como la exploración de tomografía informatizada (TC).

En el caso de que la vibración acústica se localice en tres dimensiones, puede obtenerse una imagen tridimensional explorando la región 5a en tres dimensiones.

Tal exploración también podría lograrse usando un aparato transductor acústico 4 que tenga un enfoque fijo, moviendo físicamente el aparato transductor acústico 4.

Como se ha mencionado anteriormente, en la realización más simple, la vibración acústica se localiza en una única región 5 en un momento dado, aplicándose la vibración acústica a las regiones 5 en una pluralidad de localizaciones diferentes sucesivamente.

En realizaciones más complicadas, la vibración acústica se localiza en regiones plurales 5 en diferentes localizaciones simultáneamente. En este caso, la vibración acústica tiene una forma de onda de AM que incluye componentes de frecuencia usados, normalmente los componentes de frecuencia fundamentales, que tienen diferentes frecuencias en diferentes regiones 5.

Una opción es usar el aparato transductor acústico 4 que comprende una matriz de transductores 20 como se ha descrito anteriormente pero modificado para producir simultáneamente haces de propagación plurales con formas de onda de AM de diferentes frecuencias. Esto puede lograrse replicando la circuitería del circuito de accionamiento 21, como se ha descrito anteriormente y se muestra en la figura 8, con respecto a cada una de las diferentes frecuencias usadas. Las señales de accionamiento con respecto a cada frecuencia pueden sumarse y aplicarse a los respectivos transductores 20. Si bien podría replicarse, más convenientemente, toda la circuitería del circuito de accionamiento 21 descrito anteriormente, simplemente se replica el generador de forma de onda 22, como se muestra en el contorno punteado en la figura 8. Las mismas o diferentes frecuencias portadoras f_c pueden usarse para proporcionar la localización en cada región 5 pero en el caso de usar las mismas frecuencias portadoras f_c entonces puede proporcionarse una fuente de frecuencia portadora común 90. En el caso de que se replique el generador de forma de onda 22, el circuito de formación de haz 23 realiza dos funciones. En primer lugar, con respecto a cada generador de forma de onda 22, el circuito de formación de haz 23 obtiene una señal para cada transductor 20 a partir de la señal oscilante modificando la amplitud y/o la fase y/o el retraso adecuados para producir un haz dirigido a la región respectiva. En segundo lugar, el circuito de formación de haz 23 suma las señales obtenidas con respecto a cada transductor 20 para obtener una señal sumada que se suministra a los respectivos amplificadores 24. Como la vibración acústica tiene diferentes frecuencias en diferentes regiones 5, la onda electromagnética dispersa tiene

- componentes Doppler de diferentes frecuencias generadas en las diferentes regiones 5, teniendo cada una unas frecuencias desplazadas de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por las diferentes frecuencias del componente de frecuencia de la forma de onda de AM de la vibración acústica (y sus múltiplos). Por lo tanto, el aparato de procesamiento de señal 9 está dispuesto para detectar y obtener características de los diferentes componentes Doppler que se sabe que se han generado en las diferentes localizaciones de las regiones 5. Esto puede lograrse por el aparato de procesamiento de señal 9 que está dispuesto como se ha descrito anteriormente, pero dentro del demodulador de FM 11 replicando el amplificador sincrónico 72 con respecto a cada una de las frecuencias acústicas usadas. Esto se trata con más detalle a continuación.
- De esta manera, las características de los componentes Doppler y, por lo tanto, los datos de imagen 13 pueden obtenerse simultáneamente con respecto a regiones plurales 5. Muchas regiones 5 pueden formar imágenes simultáneamente de esta manera. Este enfoque está limitado por la capacidad del aparato de procesamiento de señal 9 para discriminar entre componentes Doppler de diferentes frecuencias.
- En algunas disposiciones, las regiones plurales 5 forman imágenes simultáneamente permitiendo que se obtenga una imagen sin explorar las regiones 5. En otras disposiciones, las regiones plurales 5 forman imágenes simultáneamente, pero a continuación las regiones 5 se exploran para formar imágenes de otras zonas del objeto 2. Por ejemplo, una realización específica puede emplear una pluralidad de haces de propagación dispuestos en una matriz 1D (o 2D) para formar imágenes simultáneamente de un corte 1D (o 2D) que se propaga a través del objeto 2 permitiendo la formación de imágenes de cortes sucesivos, construyendo de este modo una imagen 2D (o 3D) de una manera similar a la formación convencional de imágenes de ultrasonido médicas como la empleada, por ejemplo, en la ecografía obstétrica. Por lo tanto, el uso de regiones plurales 5 permite explorar una imagen más rápidamente que si se usa una única región 5, mejorando de este modo el período de adquisición de imágenes. Esta es una ventaja específica en el caso de la formación de imágenes de un objeto vivo, ya que reduce el período de tiempo durante el que el objeto necesita estar estacionario.
- Como alternativa, el sistema 1 puede implementarse para investigar las propiedades del objeto 2 en una única región 5 sin proporcionar formación de imágenes a través del objeto 2. En este caso, la vibración acústica se aplica a una única región 5. Esto puede lograrse con el sistema 1 como se ha descrito anteriormente pero modificando el control implementado por la unidad de control 3. Como alternativa, el sistema 1 puede simplificarse, por ejemplo, usando un aparato transductor acústico 4 que tenga un enfoque fijo debido a que no se requiere exploración.
- Cuando se investigan las propiedades del objeto 2 en una única región 5, es específicamente ventajoso usar vibraciones acústicas de diferentes frecuencias y/o con una onda electromagnética de iluminación de diferentes frecuencias, como se ha descrito anteriormente. Las diferentes frecuencias pueden aplicarse en diferentes momentos o simultáneamente. En el último caso, es posible ajustar el sistema 1 para investigar simultáneamente un amplio intervalo de frecuencias sin necesidad de usar las diferentes frecuencias para obtener información sobre las regiones 5 en diferentes localizaciones, como es necesario con algunas implementaciones de formación de imágenes.
- El tamaño y la construcción detallada del sistema 1 dependerán del campo de aplicación. Por ejemplo, para su uso en formación de imágenes médicas, el sistema 1 podría realizarse como un dispositivo dedicado en el que el aparato transductor acústico 4 es similar a un cabezal de ultrasonido en un aparato de formación de imágenes por ultrasonidos convencional. En este caso, la antena transmisora y la antena receptora podrían integrarse en el mismo cabezal de ultrasonido.
- Opcionalmente, el sistema 1 podría incorporar adicionalmente un sistema acústico 14 conectado al aparato transductor acústico y dispuesto para recibir una onda acústica reflejada de cada una de las regiones 5 y obtener de este modo los datos de imagen acústica 15 con la obtención de los datos de imagen 13 por el aparato de procesamiento de señal 9. El sistema acústico 14 puede estar dispuesto como un aparato de formación de imágenes por ultrasonidos convencional, permitiendo de este modo que el presente método se integre con la formación de imágenes por ultrasonidos convencional. Los datos de imagen acústica 15 y los datos de imagen 13 pueden registrarse entre sí en el espacio y en el tiempo, por ejemplo, usando técnicas de registro de imágenes convencionales, permitiendo que el sistema 1 produzca simultáneamente dos tipos diferentes de imagen. Esto es ventajoso en muchos campos, por ejemplo, como un sistema en tiempo real para diagnósticos dinámicos y monitorización.
- De manera similar, el sistema 1 podría integrarse con un sistema de tratamiento con ultrasonido, permitiendo la monitorización del estado del objeto 2 durante el tratamiento.
- Las figuras 11 y 12 representan una disposición que comprende un aparato transductor acústico 4 y una bobina de antena 6. En una realización, la bobina 6 es una bobina común para usar tanto como una disposición transmisora como una disposición receptora. En otras realizaciones, la bobina 6 se usa solo como disposición transmisora o solo como disposición receptora. La figura 11 es una vista en perspectiva de la disposición. La figura 12 es una vista delantera.
- En la realización mostrada, la bobina 6 rodea un eje 102 a lo largo del que se emite al menos una parte de la vibración acústica del aparato transductor acústico 4. La bobina 6 comprende una sola vuelta o múltiples vueltas. En una

realización, la única vuelta o una o más de las múltiples vueltas rodean el eje 102.

En la realización mostrada, la bobina 6 rodea el eje a través de sustancialmente 360 grados. Sin embargo, esto no es esencial. En otras realizaciones, la bobina 6 puede rodear el eje solo parcialmente, por ejemplo, a través de 180 grados o más, opcionalmente 270 grados o más, opcionalmente 350 grados o más, opcionalmente 359 grados o más.

En una realización, la bobina 6 está configurada de tal manera que una dirección de transmisión y/o recepción principal (por ejemplo, la dirección a lo largo de la que es más fuerte la transmisión o la detección de ondas electromagnéticas) es paralela a o coaxial con la salida de al menos una parte del aparato transductor acústico.

En el ejemplo mostrado, una cara delantera 105 del aparato transductor acústico 4 es sustancialmente coplanaria con una cara delantera 107 de la bobina 6. Esto puede ser deseable cuando la bobina 6 debe ponerse en contacto con la superficie del cuerpo que contiene el objeto a investigar al mismo tiempo que el aparato transductor acústico 4. En una realización de este tipo, la parte del aparato transductor acústico 4 inmediatamente adyacente a la cara delantera 105 también está rodeada circunferencialmente por la bobina 6. Sin embargo, esto no es esencial. En otras realizaciones, la cara delantera 105 del aparato transductor acústico 4 sobresale hacia delante de la cara delantera 107 de la bobina 6 o está rebajada hacia atrás de la cara delantera 107. El aparato transductor acústico 4 puede incluso colocarse completamente fuera de la bobina 6 (es decir, de tal manera que la cara delantera 105 del aparato transductor acústico 4 esté axialmente detrás de la cara trasera 109 de la bobina 6 o un borde trasero 111 del aparato transductor acústico 4 esté completamente delante de la cara delantera 107 de la bobina 6).

Normalmente, la bobina 6 se ajustará para operar más eficazmente en una o más frecuencias o intervalos de frecuencia. La abertura central de la bobina 6 está diseñada respectivamente para interceptar y generar las líneas de campo magnético de las ondas incidente y transmitida. De acuerdo con la presente invención, el espacio proporcionado por la abertura se explota para localizar el aparato transductor acústico 4 de una manera compacta y eficaz. En particular, esta disposición permite que la "dirección de observación" de la bobina 6 (el eje 102 en el ejemplo mostrado) sea sustancialmente paralela, o incluso coaxial, con la dirección de emisión de parte o la totalidad de la vibración acústica emitida desde el aparato transductor acústico 4. Por lo tanto, se maximiza la señal de retorno Doppler ya que el movimiento inducido en el objeto del que se está formando las imágenes será sustancialmente paralelo a la dirección de propagación de la onda electromagnética.

Específicamente, de acuerdo con una realización, la bobina 6 está configurada para tener al menos una vuelta que rodea un eje a lo largo del que se emite al menos una parte de la vibración acústica del aparato transductor acústico 4 (por ejemplo, el eje a lo largo del que se emiten las vibraciones acústicas de uno de una pluralidad de transductores 20 en el caso donde el aparato transductor acústico 4 comprende una matriz de transductores 20).

La construcción detallada de la bobina 6 puede variarse de acuerdo con las circunstancias específicas en las que se va a aplicar la formación de imágenes. Sin embargo, es beneficioso en una amplia gama de situaciones construir la bobina 6 de tal manera que una o más de las vueltas de la bobina comprendan al menos dos secciones de conducción que estén conectadas entre sí en serie por un condensador.

La figura 13 es una vista en sección esquemática que mira a lo largo del eje de la bobina 6. La bobina mostrada comprende una vuelta que tiene seis secciones de conducción 108 conectadas entre sí en serie por seis condensadores 110. En la realización mostrada, las secciones de conducción 108 y los condensadores 110 son todos idénticos, pero esto no es esencial. Además, pueden proporcionarse menos de seis o más de seis secciones de conducción y/o condensadores. En una realización, uno o más de los condensadores puede ajustarse para permitir que la respuesta de frecuencia de la bobina 6 se ajuste con precisión.

El efecto de construir la bobina 6 a partir de secciones de conducción 108 conectadas en serie con condensadores 110 es permitir que se reduzca el tamaño físico de la bobina 6 mientras se mantiene la frecuencia de operación dentro de un intervalo útil de frecuencias (normalmente dentro de las decenas o cientos de megahercios).

El perfil de la sección transversal de las partes de conducción de la bobina 6, por ejemplo, el perfil de sección transversal de las secciones de conducción 108 en una realización del tipo mostrado en la figura 13, puede tomar en general una variedad de formas. Sin embargo, en general puede desearse que la eficacia logre una conductividad eléctrica relativamente alta. Puede lograrse una alta conductividad eléctrica proporcionando una zona transversal grande. Sin embargo, las consideraciones de espacio pueden limitar la elección de la sección transversal. Por ejemplo, el alambre de sección transversal circular tenderá a ser inaceptablemente voluminoso cuando el diámetro se fabrique lo suficientemente grande como para lograr la eficacia deseada. De acuerdo con una realización, la sección transversal de la conducción de la bobina 6 se fabrica relativamente ancha y delgada, a modo de cinta. De esta manera, puede lograrse una zona de sección transversal relativamente grande sin la penalización de altura asociada. Dichas cintas pueden orientarse perpendicularmente o en paralelo al plano de propagación de la vibración acústica. Sin embargo, es ventajoso en muchos contextos que la cinta sea perpendicular ya que la estructura puede quedar entonces plana en la superficie del cuerpo (por ejemplo, el cuerpo humano o animal) que contiene el objeto del que se van a formar imágenes.

Específicamente, de acuerdo con una realización, como se ilustra en la figura 11, la bobina 6 puede configurarse para tener al menos una sección de conducción con un espesor 106 en una dirección paralela a una dirección de emisión 102 de la vibración acústica que es menor que el espesor 104 perpendicular a la dirección de emisión 102 de la vibración acústica.

5 En una realización, la bobina 6 está fijada (por ejemplo, pegada) al cuerpo que contiene el objeto del que se van a formar imágenes.

10 En la realización tratada haciendo referencia a las figuras 11 a 13, la bobina 6 tiene una forma sustancialmente circular (cuando se ve a lo largo del eje de la bobina 6). En otras realizaciones, puede usarse una forma diferente, por ejemplo, sustancialmente oval, sustancialmente elipsoidal, sustancialmente poligonal o una forma irregular. En una realización, la forma de la bobina está adaptada a los requisitos del aparato transductor acústico 4. Por ejemplo, si el aparato transductor acústico 4 se proporciona preferentemente en forma rectangular, la bobina 6 también puede proporcionarse en una forma rectangular correspondiente.

15 En las realizaciones tratadas anteriormente haciendo referencia a las figuras 11 a 13, la bobina 6 es sustancialmente plana. Sin embargo, esto no es esencial. En otras realizaciones, la bobina 6 no es plana. Por ejemplo, cuando se ve en al menos una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la vibración acústica, la bobina 6 puede comprender al menos una parte que está en un ángulo oblicuo y/o partes que están en ángulos diferentes a la dirección de la propagación de vibración acústica (en lugar de que todas las partes de la bobina estén en el mismo ángulo con, por ejemplo 90 grados a, la dirección de propagación).

20 En una realización, la bobina 6 comprende una parte curva cuando se ve en al menos una dirección perpendicular a la dirección de propagación de la vibración acústica. En una realización, la bobina 6 se curva con el fin de conformarse sustancialmente con la forma de una parte del cuerpo en el que, o muy cerca directamente adyacente al que, la bobina 6 se colocará para realizar la formación de imágenes, o al menos para conformarse en mayor medida de lo que sería posible con una bobina plana 6.

25 Las figuras 14 y 15 representan una realización que comprende una bobina 6 de "conformación" no plana. La figura 14 es una vista superior, que mira a lo largo de una dirección perpendicular a la dirección 102 de la emisión de propagación de vibración acústica desde el aparato transductor acústico 4. La figura 15 es una vista delantera a lo largo de la dirección de propagación de vibración acústica. Como puede verse en la figura 14, la bobina 6 comprende partes que están en un ángulo oblicuo a la dirección 102. Las barras superior e inferior 128 de la bobina 6 son curvas, de tal manera que en la figura 15 la región central 120 está más atrás en la página que las regiones oblicuas en ángulo 124 a cada lado. En la realización mostrada, las barras laterales 122 son sustancialmente rectas y se encuentran en el mismo plano. Sin embargo, esto no es esencial y las barras laterales también podrían ser curvas.

30 La bobina 6 puede verse como "que es conforme" a la forma del cuerpo 2 debido a que tiene una forma que permite que la distancia promedio de la bobina 6 desde la superficie del cuerpo 2 sea menor de lo que sería el caso si la bobina 6 fuese plana. En otras palabras, la forma de la bobina de conformación 6 es más similar a la forma de la superficie del cuerpo en el que se va a llevar que si la bobina 6 fuese plana. En una realización, la bobina 6 está conformada de tal manera que cuando se coloca en el cuerpo, la mayoría de la bobina es sustancialmente paralela a la superficie del cuerpo.

35 La configuración de la bobina de antena para que se ajuste a la forma del cuerpo es una manera en la que puede enfocarse la respuesta de la bobina preferentemente sobre un volumen dado dentro del cuerpo. Enfocar la respuesta eficazmente reduce el volumen iluminado en el cuerpo. La reducción del volumen iluminado permite reducir la potencia total en el cuerpo. Además, el nivel de retorno de la señal electromagnética no modulada puede mantenerse bajo. La sensibilidad del sistema se controla en parte por la relación del retorno modulado con respecto al retorno no modulado. Por lo tanto, cuanto menor sea el nivel del retorno no modulado, mejor será la sensibilidad de la bobina y la disposición receptora asociada. Además, las fuentes térmicas y otras fuentes de ruido se filtran espacialmente donde se originan en regiones que están fuera del volumen de interés.

40 Es importante que la bobina 6 se adapte bien con el cuerpo que se está investigando. Una bobina conformada facilita este proceso debido a que puede ajustarse más eficazmente en el cuerpo. El ajuste permite que más parte de la bobina 6 se acerque mucho y/o entre en contacto con la superficie del cuerpo. Alternativa o adicionalmente, la fijación permite que la bobina 6 se lleve a la superficie del cuerpo más repetidamente. De este modo, la bobina 6 puede colocarse en una buena posición más fácilmente y tenderá a ser más estable en esa posición, mejorando de este modo la fiabilidad y la repetibilidad.

45 En una realización, la bobina 6 está conformada de tal manera que la mayoría de una cara delantera de la bobina 6 puede ponerse en contacto con la superficie del cuerpo a investigar al mismo tiempo que una cara delantera del aparato transductor acústico está en contacto con la superficie. Opcionalmente, esto se logra con un dispositivo portátil.

50 En las realizaciones descritas haciendo referencia a las figuras 11 a 15, una única bobina de antena actúa como transmisor y receptor. En una realización de este tipo, se proporciona un acoplador direccional 8 para separar las

señales transmitidas y recibidas. Sin embargo, también es posible que puedan usarse dos bobinas separadas como transmisores y receptores separados. La figura 16 ilustra una realización esquemática de este tipo. En este caso, una bobina transmisora 114 se proporciona por separado de una bobina receptora 112. Las bobinas transmisora y receptora 114, 112 se colocan una opuesta a la otra a cada lado de un cuerpo 2 que contiene el objeto del que se van a formar imágenes. El aparato transductor acústico se proporciona dentro de la bobina transmisora 114 en la realización mostrada. La bobina receptora 112 se coloca opuesta a la bobina transmisora 114 y rodea el eje del aparato transductor acústico 4. En la realización mostrada, cualquiera o ambas de las bobinas transmisora 114 y receptora 112 pueden rodear el eje 102 a lo largo del que se emite al menos una parte de la vibración acústica del aparato transductor acústico 4. En una realización alternativa, la bobina 114 está configurada para recibir radiación electromagnética y la bobina 112 está configurada para transmitir la radiación electromagnética.

Cualquiera de las bobinas mencionadas anteriormente podría ser bobinas de vuelta única o bobinas de vuelta múltiple.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema para investigar las propiedades físicas de un objeto, comprendiendo el sistema:

5 un aparato transductor acústico (4) dispuesto para aplicar al objeto (2) una vibración acústica localizada en dos o tres dimensiones en una región en el objeto (2);
 una disposición transmisora dispuesta para iluminar el objeto (2) con una onda electromagnética de iluminación que tiene una frecuencia en un intervalo que se extiende hacia abajo desde 30 THz simultáneamente con la aplicación de la vibración acústica, teniendo la dirección de vibración de la vibración acústica un componente paralelo a la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación de tal manera que la vibración del objeto (2) provocada por la vibración acústica en la región genera una onda electromagnética dispersa que incluye un conjunto de componentes Doppler desplazados de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por las frecuencias de la vibración del objeto (2) provocada por la vibración acústica y sus múltiplos; una disposición receptora dispuesta para recibir la onda electromagnética dispersa generada en la región; y un aparato de procesamiento de señal dispuesto para obtener, a partir de la onda electromagnética dispersa recibida generada en la región, unos datos que representan al menos una característica de los componentes Doppler, **caracterizado por que:**

20 la disposición transmisora comprende una bobina de antena (6) que rodea, a través de al menos 180 grados, un eje (102) a lo largo del que se emite al menos una parte de la vibración acústica del aparato transductor acústico, y la bobina (6) está conectada de manera fija al aparato transductor acústico (4) y configurada para iluminar el objeto (2) con la bobina (6) y el aparato transductor acústico (4) localizados en el mismo lado del objeto (2).

25 2. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 1, en el que la bobina (6) es común tanto a la disposición transmisora como a la disposición receptora.

3. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en el que:
 una dirección principal de transmisión o recepción de la bobina (6) es paralela o coaxial con la salida de al menos una parte del aparato transductor acústico.

4. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la bobina (6) comprende al menos dos secciones de conducción conectadas entre sí por un condensador.

35 5. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la bobina (6) comprende una sección de conducción que tiene un espesor que es más pequeño en una dirección paralela a la dirección de emisión promedio de la vibración acústica que en una dirección perpendicular a la dirección de emisión promedio de la vibración acústica.

40 6. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la bobina (6) comprende una pluralidad de vueltas.

7. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el objeto (2) es tejido humano o animal.

45 8. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la vibración acústica comprende una onda portadora que está modulada en amplitud por una forma de onda de AM.

9. Un sistema de acuerdo con la reivindicación 8, en el que el aparato de procesamiento de señal está configurado para detectar, a partir de la onda electromagnética dispersada recibida, un componente Doppler desplazado de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por la frecuencia de un componente de frecuencia de la forma de onda de AM, y para emitir una señal que represente al menos una característica del componente Doppler detectado.

50 10. Un sistema de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la bobina (6) rodea el eje (102) a través de al menos 350 grados.

55 11. Un método para investigar las propiedades físicas de un objeto (2), que comprende:
 usar un aparato transductor acústico (4) para aplicar al objeto (2) una vibración acústica localizada en dos o tres dimensiones en una región en el objeto (2);
 iluminar el objeto (2) con una onda electromagnética de iluminación que tiene una frecuencia en un intervalo que se extiende hacia abajo desde 30 THz simultáneamente con la aplicación de una vibración acústica, teniendo la dirección de vibración de la vibración acústica un componente paralelo a la dirección de propagación de la onda electromagnética de iluminación de tal manera que la vibración del objeto (2) provocada por la vibración acústica en la región genera una onda electromagnética dispersa que incluye un conjunto de componentes Doppler desplazados de la frecuencia de la onda electromagnética de iluminación por las frecuencias de la vibración del

objeto (2) provocada por la vibración acústica y sus múltiplos;
recibir la onda electromagnética dispersa generada en la región; y
obtener, a partir de la onda electromagnética dispersa recibida generada en la región, unos datos que representan
al menos una característica de los componentes Doppler, **caracterizado por que:**

5 la iluminación comprende usar una bobina de antena (6) que rodea, a través de al menos 180 grados, un eje
(102) a lo largo del que se emite al menos una parte de la vibración acústica, y
10 la bobina (6) está conectada de manera fija al aparato transductor acústico (4) e ilumina el objeto (2) mientras
que la bobina (6) y el aparato transductor acústico (4) están localizados en el mismo lado del objeto (2).

12. Un método de acuerdo con la reivindicación 11, en el que la bobina (16) se coloca en la piel de un ser humano o
animal con el fin de investigar las propiedades físicas de un objeto (2) que comprende el tejido del ser humano o
animal.

15 13. Un método de acuerdo con la reivindicación 12, en el que la bobina (6) se forma con el fin de conformarse con la
parte del ser humano o animal en la que se coloca la bobina (6).

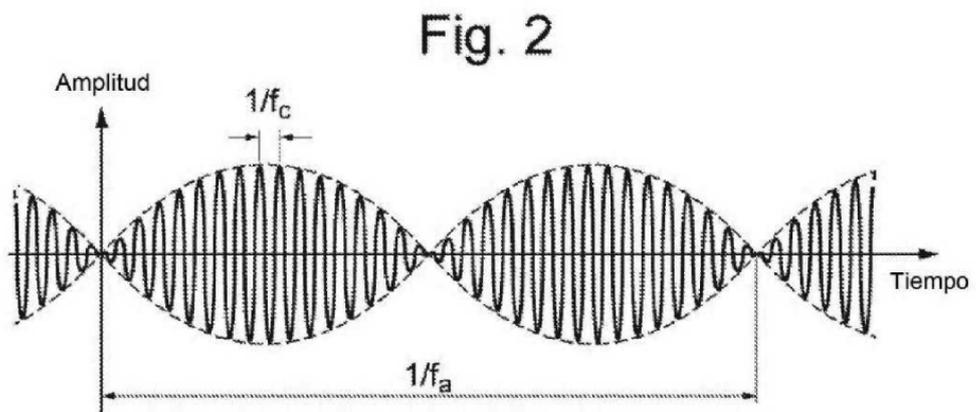
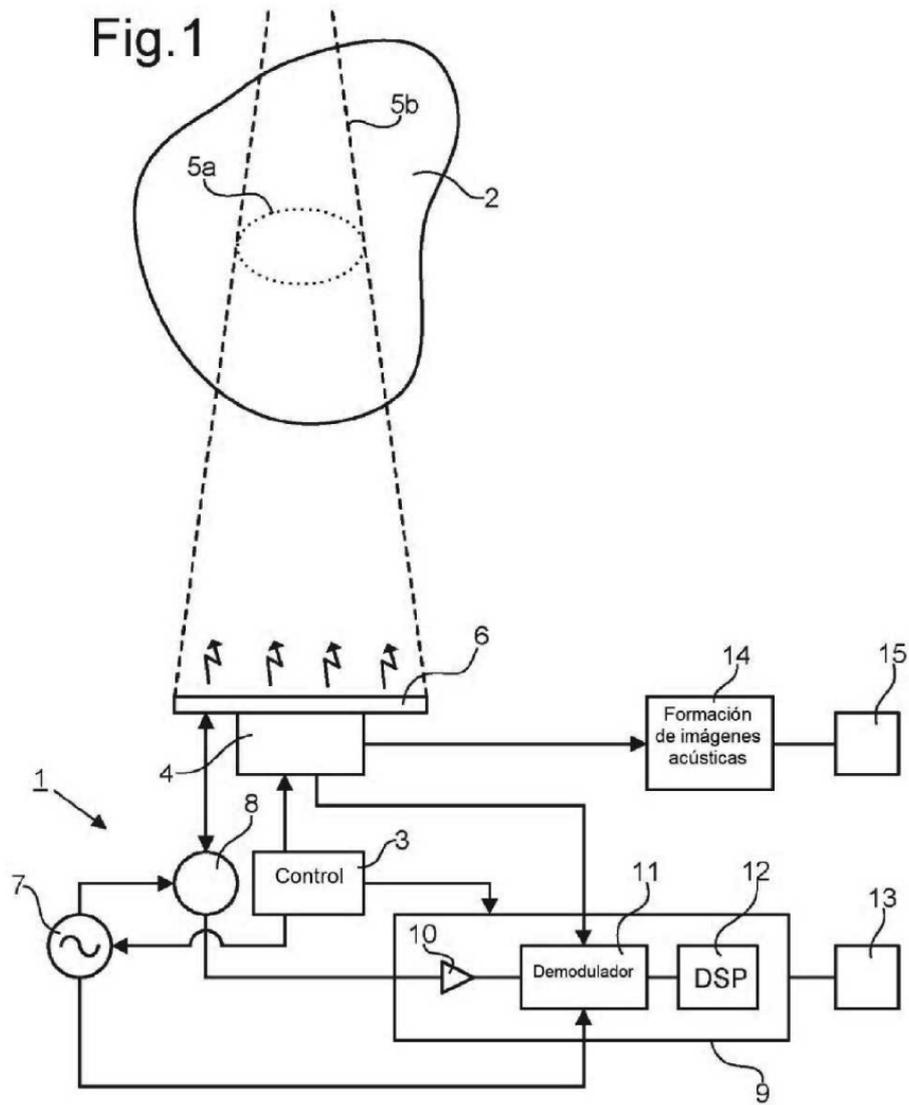


Fig. 3

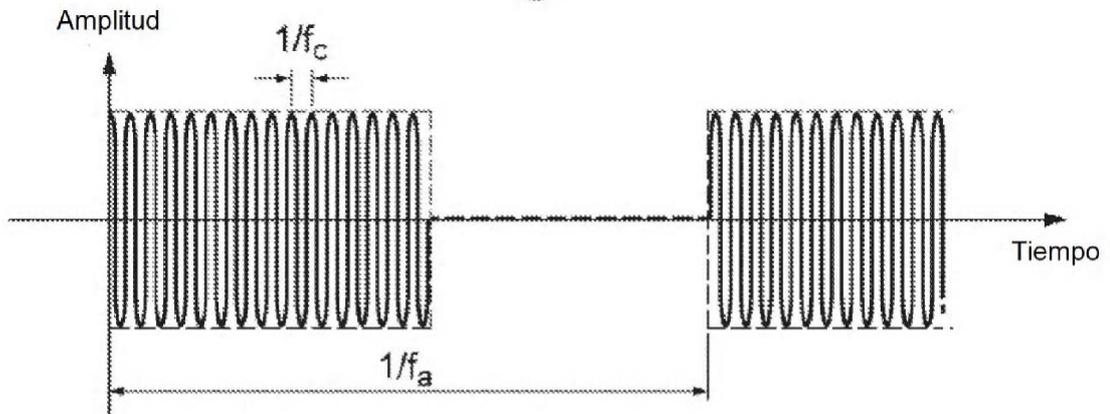


Fig. 4a

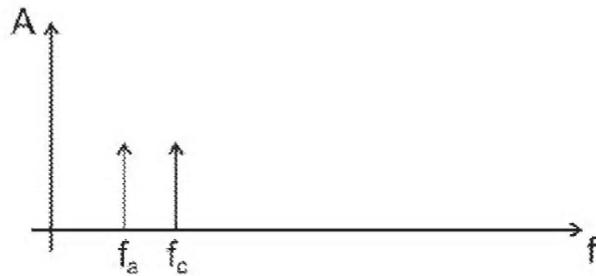


Fig. 4b



Fig. 4c

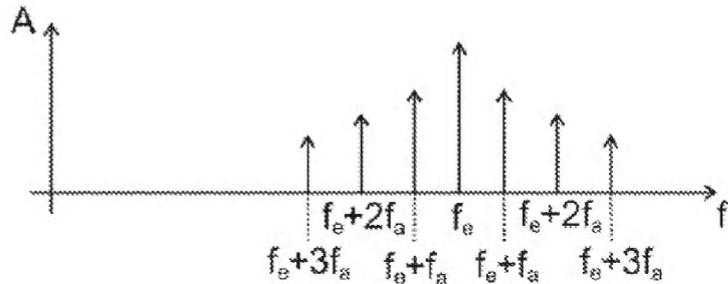


Fig. 5

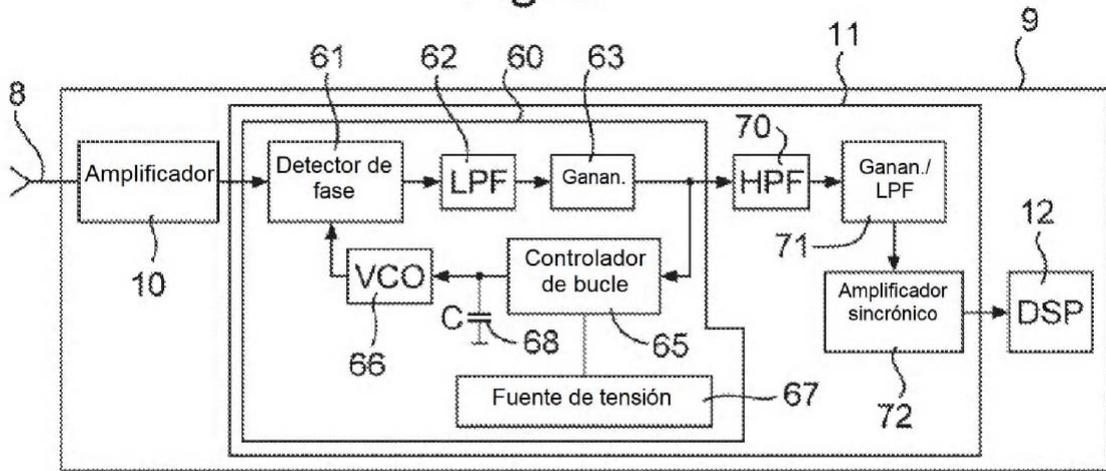


Fig. 6

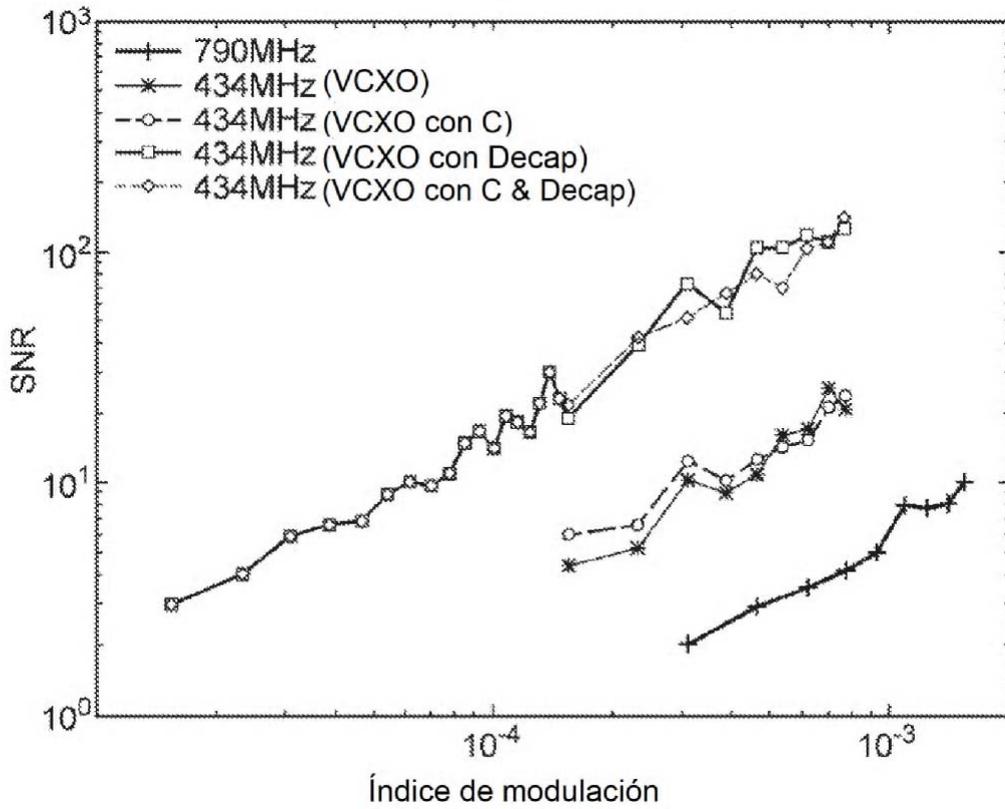


Fig. 7

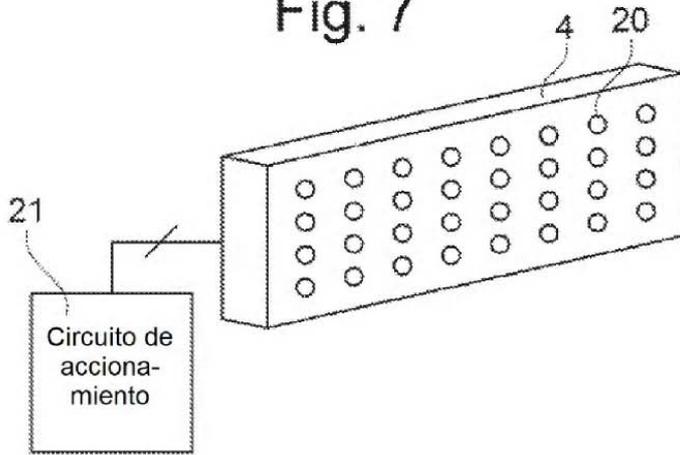


Fig. 8

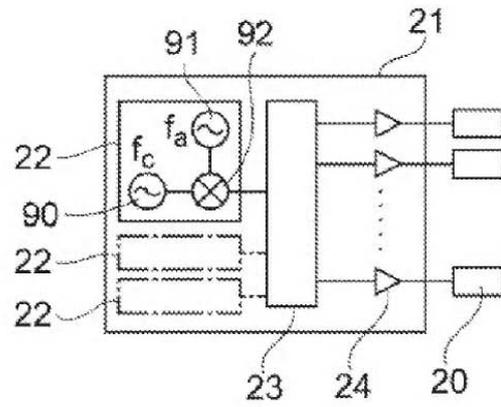


Fig. 9

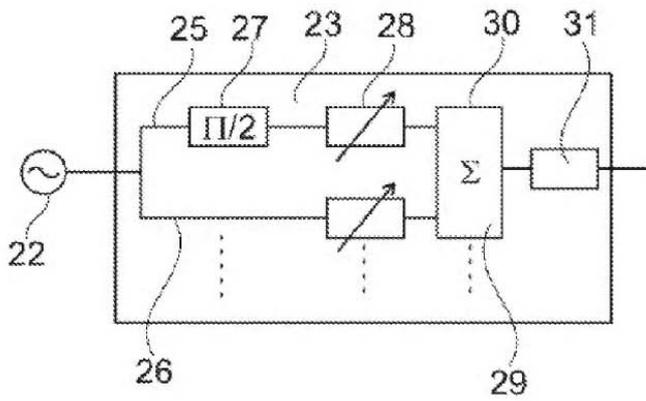


Fig. 10

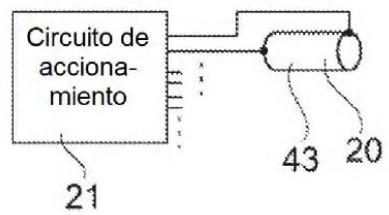


Fig.11

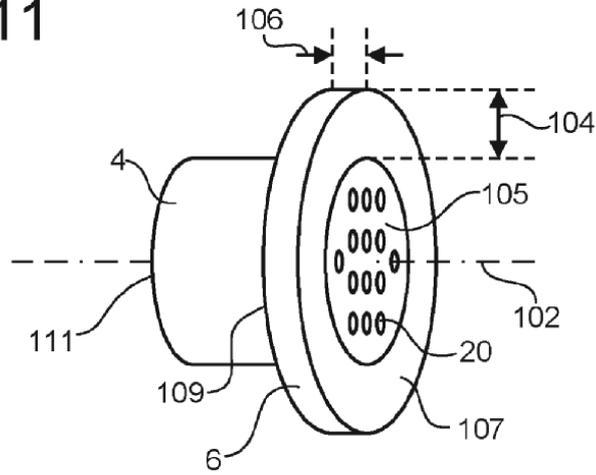


Fig.12

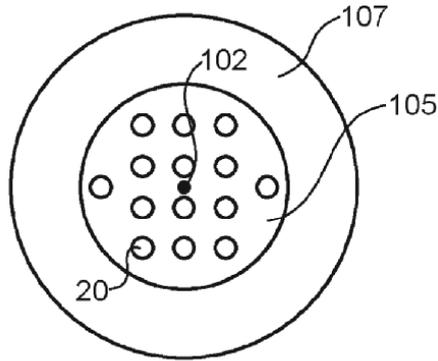


Fig.13

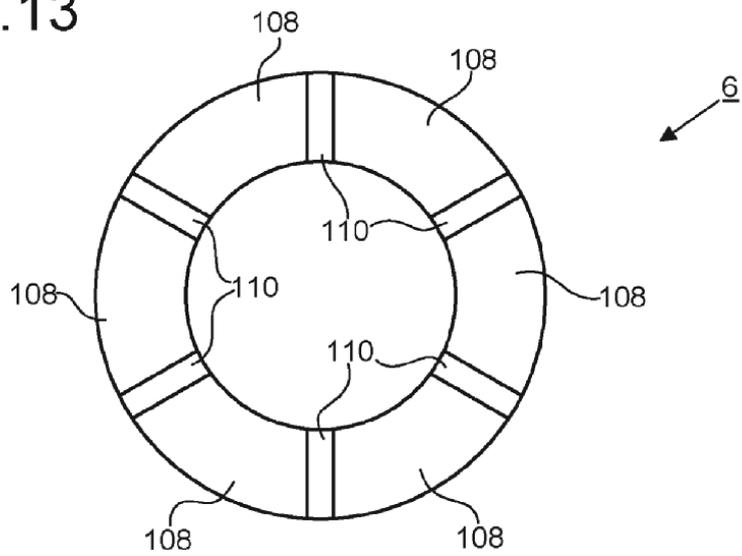


Fig.14

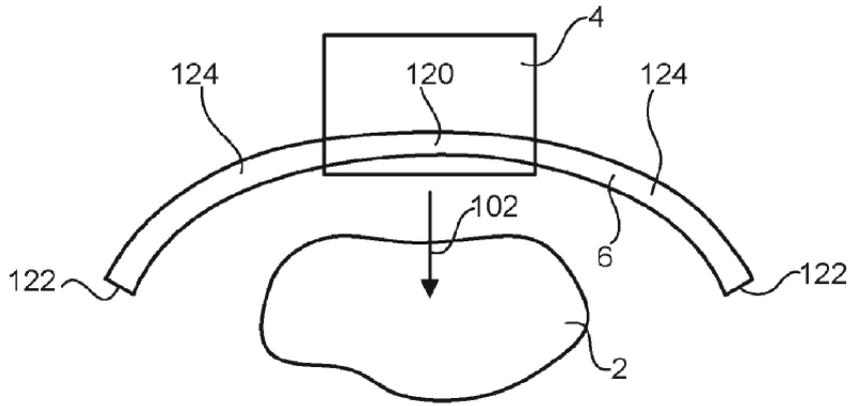


Fig.15

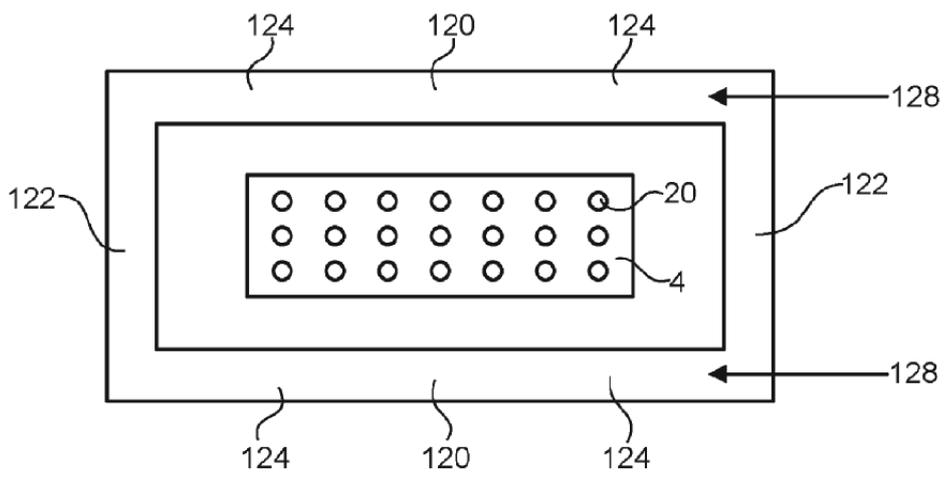


Fig.16

