



OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: 2 820 757

51 Int. Cl.:

G01N 29/04 (2006.01) G01S 15/89 (2006.01) G01N 29/06 (2006.01) G01S 7/52 (2006.01) G01N 29/07 (2006.01)

(12)

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: 15.12.2014 PCT/FR2014/053347

(87) Fecha y número de publicación internacional: 25.06.2015 WO15092250

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: 15.12.2014 E 14827843 (5)

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: 29.07.2020 EP 3084416

(54) Título: Método de procesamiento de señales resultantes de una adquisición mediante exploración ultrasónica, programa informático y dispositivo de exploración por ultrasonidos correspondiente

(30) Prioridad:

20.12.2013 FR 1363246

45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente: 22.04.2021

(73) Titular/es:

COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE ET AUX ÉNERGIES ALTERNATIVES (100.0%) 25, rue Leblanc, Bâtiment "Le Ponant D" 75015 Paris, FR

(72) Inventor/es:

ROBERT, SÉBASTIEN; LOPEZ VILLAVERDE, EDUARDO-RIGOBERTO; ALBERTINI, JULIEN y LEJEUNE, LÉONARD

(74) Agente/Representante:

SÁNCHEZ SILVA, Jesús Eladio

DESCRIPCIÓN

Método de procesamiento de señales resultantes de una adquisición mediante exploración ultrasónica, programa informático y dispositivo de exploración por ultrasonidos correspondiente

5

La presente invención se refiere a un método de procesamiento de señales de una adquisición mediante exploración ultrasónica para la obtención de imágenes ultrasónicas. Esta también se refiere a un programa informático y a un dispositivo de exploración por ultrasonidos correspondiente.

10 La invención se aplica en particular al campo de las inspecciones no destructivas por ultrasonidos, en donde la adquisición de señales ultrasónicas permite visualizar y detectar defectos en estructuras, pero también se puede aplicar a cualquier tipo de imagen ecográfica ultrasónica, en particular en el campo médico para la inspección de áreas

de interés en el cuerpo humano o animal. 15 Esta se refiere más particularmente a un método de procesamiento que adquiere las señales ultrasónicas de la manera siguiente:

control de M transductores emisores para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas a un área de interés,

control de N transductores receptores para recibir simultáneamente y durante un tiempo predeterminado, para cada transmisión, N señales de tiempo de medición, que miden en particular ecos de medición debidos a reflexiones de la emisión considerada en el área de interés.

representación de una imagen del área de interés calculando, en cada punto de una pluralidad de puntos predeterminados de esta área de interés, un valor resultante de un procesamiento de al menos parte de las LxN señales de tiempo de medición recibidas.

25

20

Una adquisición de este tipo se realiza generalmente utilizando un dispositivo de exploración con un sensor de múltiples elementos, en el que cada transductor es tanto transmisor como receptor, donde una conmutación entre estos dos modos puede ser controlada electrónicamente. El sensor puede colocarse en contacto con el objeto a explorar o a una distancia de este, pero en este último caso debe sumergirse para asegurar la transmisión de las ondas ultrasónicas en el objeto a explorar. Este sensor puede ser lineal (1D) o matricial (2D), para imágenes 2D o 3D, con elementos rígidos o flexibles.

30

Teniendo en cuenta las capacidades de cálculo actuales de los procesadores, la representación de la imagen del área de interés mediante el procesamiento de las señales de tiempo de medición recibidas se puede incorporar en instrumentos de control para su procesamiento en tiempo real.

35

40

En la práctica y según una primera familia de técnicas de adquisición, la adquisición ultrasónica previamente definida, entonces generalmente calificada como adquisición FMC (en inglés "Full Matrix Capture"), consiste en emitir una onda ultrasónica excitando el primer transductor emisor y recibir los ecos de esta emisión con todos los N transductores receptores, luego conmutar electrónicamente a todos los transductores emisores para excitarlos sucesivamente. Los transductores emisores y receptores se pueden ubicar en dos sensores separados, pero cuando son los mismos transductores los que realizan las funciones de transmisión y recepción, se obtienen NxN señales de tiempo de medición.

45

En el artículo de C. Holmes y otros, titulado "Post-processing of the full matrix of ultrasonic transmit-receive array data for non-destructive evaluation", publicado en NDT&E International 38 (disponible en línea el 15 de junio de 2005), páginas 701-711, las N×N señales de tiempo de medición obtenidas se utilizan para producir un enfoque sintético del tipo "enfoque en todos los puntos" que permite obtener una imagen de alta resolución del área de interés.

50 Más precisamente, este enfoque sintético consiste en calcular para cada punto del área de interés los tiempos de vuelo Ti,i correspondientes a los tiempos de recorrido entre cada transductor emisor (índice i) y cada transductor receptor (índice j) que pasa por el punto considerado (NxN tiempos de vuelo para cada punto). El enfoque sintético se realiza sumando, para cada punto del área de interés, las amplitudes extraídas de las señales de tiempo de medición recibidas, representadas como $K_{i,j}(t)$, en los tiempos $t = T_{i,j}$. La amplitud A en un punto P de la imagen, por tanto, se puede escribir: 55

$$A(P) = \left| \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} K_{i,j} [T_{i,j}(P)] \right|$$

60

65

La reconstrucción mediante el enfoque en todos los puntos se puede realizar de acuerdo con diferentes modos conocidos de inspección ultrasónica: el modo directo donde se describen anteriormente los tiempos de vuelo asociados, y otros modos más complejos donde los tiempos de vuelo incluyen múltiples reflexiones en los límites de la estructura, así como conversiones de modos entre las ondas de polarización longitudinal y las de polarización transversal. Para una explicación detallada de estos otros modos más complejos, se podrá consultar en particular el

artículo de A. Fidahoussen y otros, titulado "Imaging of defects in several complex configurations by simulation-helped processing of ultrasonic array data", publicado en Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, vol. 29 (2009), páginas 847-854.

- 5 Sin embargo, en presencia de ruido electrónico (debido al sistema de adquisición) o ruido estructural (debido a la naturaleza del material) en las señales de medición, la reconstrucción mediante el enfoque en todos los puntos puede proporcionar imágenes de menor calidad en comparación con los métodos clásicos de ultrasonido. La obtención de imágenes al enfocar en todos los puntos también se puede degradar significativamente cuando el material es muy atenuador, como es el caso, por ejemplo, al comprobar compuestos aeronáuticos, gomas o neumáticos, etc. Esta 10 atenuación disminuye la amplitud de las ondas ultrasónicas transmitidas en el material a medida que se propagan, de modo que la amplitud de los ecos recibidos puede ser menor que el ruido electrónico. La ventaja de los métodos ecográficos convencionales es que todos los transductores emiten simultáneamente aplicando una ley de retardo predeterminada para enfocar en un punto dado. Por el contrario, en el método de adquisición FMC generalmente implementado para luego realizar la reconstrucción por enfoque sintético, cada emisión es realizada por un solo 15 transductor que limita la energía transmitida y la profundidad de penetración de las ondas en la habitación inspeccionada. Esto da como resultado finalmente una disminución en la relación señal/ruido (SNR) en la imagen resultante, lo que puede dificultar la detección y caracterización de cualquier defecto. Esta reducción de la SNR es tanto mayor cuanto mayor es el ruido estructural o electrónico.
- Se proporciona una solución parcial a este problema de reducción de la SNR en el artículo de M. Karaman y otros, titulado "Synthetic aperture imaging for small scale systems", publicado en IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 42, n° 3 (mayo de 1995), páginas 429-442.
- Esta consiste en utilizar, para cada emisión, ya no un transductor sino varios transductores adyacentes. Se aplica una ley de retardo a los transductores emisores adyacentes utilizados para transmitir una onda ultrasónica esférica al medio, cercana a la que emitiría una fuente virtual puntual ubicada a cierta distancia del sensor. La onda ultrasónica así emitida por la fuente virtual es más intensa ya que su energía es proporcional a la raíz cuadrada del número de transductores emisores que forman esta fuente. La SNR se mejora en consecuencia, asumiendo que el ruido generado es principalmente ruido blanco electrónico. El principio también permite reducir el ruido estructural, pero en menor medida.
 - Sin embargo, en el caso de piezas inspeccionadas que generan un ruido estructural significativo en las señales, la mejora en la calidad de las imágenes finalmente obtenidas por el enfoque sintético en todos los puntos es más limitada, el aumento de SNR es menor y el impacto en la detección no es tan positivo como cabría esperar. Esta solución compensa en parte el problema mencionado anteriormente pero no lo elimina. Además, la transmisión mediante fuentes virtuales no permite superar el problema que pueden plantear los artefactos de reconstrucción debido principalmente a ecos parásitos como los ecos geométricos reflejados por las interfaces de la pieza (bordes, superficie o fondo) o ecos complejos que incluyen múltiples reflexiones sobre el objeto y las conversiones de modo entre las ondas longitudinales y las ondas transversales en cada interacción con el objeto o una interfaz de la habitación. Sin embargo, estos artefactos pueden enmascarar el eco real de una falla o constituir una falsa alarma. Además, esta solución complica el modo de adquisición y los algoritmos de reconstrucción.

35

40

45

- Otro gran inconveniente de las técnicas de reconstrucción de imágenes desarrolladas en los artículos antes mencionados es el número de disparos ultrasónicos sucesivos necesarios y el número de señales ultrasónicas de medición que se van a procesar. Por lo tanto, este tipo de técnica finalmente se presta relativamente poco a aplicaciones en tiempo real de alta velocidad, en particular cuando el número de transductores de la sonda es grande.
- Según una segunda familia de técnicas de adquisición, una alternativa al principio de adquisición ultrasónica detallado anteriormente consiste en emitir sucesivamente ondas ultrasónicas planas que tienen diferentes ángulos de emisión mientras simultáneamente excitan todos los transductores emisores al mismo tiempo utilizando leyes de retardo adaptadas y recibiendo los ecos de estas transmisiones sucesivas con todos los N transductores receptores. Esta alternativa, generalmente calificada como "combinación de ondas planas", se describe, por ejemplo, en el artículo de G. Montaldo y otros, titulado "Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography", publicado en IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 56, n° 3, páginas 489-506, marzo de 2009, y en el artículo de K. Kotowick, titulado "Adaptive compounding of synthetic aperture and compounded plane-wave imaging for fast ultrasonography", PROCEEDINGS INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BIOMEDICAL IMAGING ISBI 2013 2013 IEEE 10TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BIOMEDICAL IMAGING: FROM NANO TO MACRO 2013 IEEE COMPUTER SOCIETY USA, 11 de abril de 2013 (2013-04-11), páginas 784-787.
 - La presente invención se refiere más precisamente a esta alternativa, es decir a un método de procesamiento que adquiere las señales ultrasónicas como sigue:
- control de una matriz de M transductores emisores para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas planas que
 tienen L ángulos de emisión sucesivos diferentes en L áreas de emisión,

- control de una matriz de N transductores receptores para recibir simultáneamente y durante un tiempo predeterminado, para cada transmisión, N señales de tiempo de medición, que miden en particular los ecos debidos a reflexiones de la transmisión en cuestión,
- representación de un área de la que se va a obtener la imagen mediante cálculo, en cada punto de una pluralidad de puntos predeterminados de esta área de la que se va a obtener la imagen, de un valor resultante de un procesamiento de al menos parte de las LxN señales de tiempo de medición recibidas.

5

40

45

50

55

Esta segunda familia de técnicas de adquisición está prevista fundamentalmente en el campo médico y se implementa en ciertos ecógrafos ultrarrápidos que permiten obtener imágenes de los mapas de elasticidad del cuerpo humano. La imagen resultante es de alta calidad y requiere solo unas pocas decenas de disparos ultrasónicos (generalmente L está entre 10 y 30) para un sensor de N = 128 transductores emisores/receptores, contra 128 disparos o casi, para las técnicas de la primera familia. Además, los algoritmos resultantes y las aplicaciones asociadas se prestan particularmente bien a la paralelización de cálculos en procesadores del tipo GPU (en inglés "Graphic Processing Unit") instalados en las tarjetas gráficas de los ordenadores. El rendimiento de un ecógrafo que implementa una técnica de "combinación de ondas planas" puede alcanzar en la práctica 10 000 imágenes/s. Otra ventaja de esta segunda familia de técnicas de adquisición radica en que cada disparo se realiza empleando todos los transductores emisores para que la energía emitida sea claramente superior, haciendo este método menos sensible a los fenómenos de atenuación, ruido electrónico o estructurales.

- De acuerdo con esta segunda familia de técnicas de adquisición y como se enseña en el artículo de G. Montaldo y otros citado anteriormente, el procesamiento de las LxN señales de tiempo de medición recibidas para constituir una imagen se lleva a cabo línea a línea (una línea se define como una línea recta que se extiende perpendicularmente a la matriz de transductores emisores) mediante la aplicación de leyes de retardo de recepción que se aplican en cada caso solo a una pequeña parte de los transductores receptores, de acuerdo con una técnica bien conocida por el nombre de "formación de haces" o de "Enfoque de Profundidad Dinámica" (conocido por el acrónimo DDF). Esto permite obtener una imagen únicamente en la abertura del sensor, esta abertura está definida por la distancia entre el primer y el último transductor. Por tanto, el sensor utilizado debe tener un gran número de transductores porque el tamaño de la imagen obtenida dependerá de estos.
- En general, las técnicas de "combinación de ondas planas" son adecuadas para el campo médico ya que, en la mayoría de los casos, las aplicaciones en cuestión consisten en producir una imagen centrada debajo del sensor, asumiendo que el medio es homogéneo. Hay poco o ningún fenómeno de refracción al pasar a través de la interfaz del medio de inspección, es decir, hay poco contraste acústico entre el tejido humano/animal y el gel de acoplamiento, o el agua si el cuerpo se coloca en inmersión local. También hay un solo tipo de ondas a tener en cuenta en la obtención de imágenes, ondas longitudinales o de compresión. Además, se supone que el medio que se va a explorar es semi-infinito en la mayoría de las aplicaciones médicas. Todo esto explica en gran medida las tasas de obtención de imágenes espectaculares de los ecógrafos porque los algoritmos están simplificados.
 - Por otro lado, en una inspección no destructiva, estas técnicas no dan resultados satisfactorios. De hecho, en este campo de aplicación, los ecos pueden provenir de ondas longitudinales (identificadas por la letra L) o transversales (identificadas por la letra T) que también pueden incluir conversiones L↔T entre estos dos tipos de ondas durante interacción con una falla o una interfaz de pieza. El medio de inspección puede ser heterogéneo o anisotrópico, por ejemplo en el caso de aceros de grano grueso, soldaduras o materiales compuestos. Además, las interfaces del medio de inspección (es decir, el fondo, la superficie y los bordes de las piezas que pueden constituir interfaces, por ejemplo, agua/acero que a menudo son complejas) deben poder tenerse en cuenta con los fenómenos de refracción y reflexión que surgen a su vez. Además, a menudo se busca obtener una imagen que no esté necesariamente centrada debajo del sensor, sino que se extienda lateralmente más allá de la abertura del sensor. Finalmente, el punto más diferenciador con el campo médico se refiere a las características de las entidades de las que se obtienen las imágenes. En inspecciones no destructivas, estas características son, por ejemplo, defectos de tipo fisura. Estos suelen ser objetos extendidos ubicados cerca de la interfaz de una pieza y orientados perpendicularmente a esa interfaz (generalmente la superficie o la parte inferior de una pieza). Para este tipo de defecto, el enfoque es muy diferente al del campo médico, ya que es ventajoso utilizar una reflexión en una interfaz de la pieza para optimizar la obtención de las imágenes. En el estado actual del conocimiento, las técnicas de "combinación de ondas planas" mencionadas anteriormente no son adecuadas para la obtención de imágenes de este tipo de defecto.

Por tanto, puede ser deseable proporcionar un método de procesamiento de señales ultrasónicas que permita superar al menos algunos de los problemas y limitaciones antes mencionados mientras se explota la adquisición ventajosa de las señales mediante emisiones sucesivas de ondas planas.

- Por lo tanto, se propone un método para procesar señales provenientes de una adquisición por exploración ultrasónica que comprende las siguientes etapas:
 - control de una matriz de M transductores emisores para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas planas que tienen L ángulos de emisión sucesivos diferentes en L áreas de emisión,
- 65 control de una matriz de N transductores receptores para recibir simultáneamente y durante un tiempo

predeterminado, para cada transmisión, N señales de tiempo de medición, que miden en particular los ecos debidos a reflexiones de la transmisión en cuestión.

- representación de un área de la que se va a obtener la imagen mediante cálculo, en cada punto de una pluralidad de puntos predeterminados de esta área de la que se va a obtener la imagen, de un valor resultante de un procesamiento de al menos parte de las LxN señales de tiempo de medición recibidas,
- en donde la representación del área de la que se va a obtener la imagen comprende las siguientes etapas,
 ejecutadas por un procesador para cada punto del área de la que se va a obtener la imagen:
- determinación de L' emisiones, L' ≤ L, entre las L emisiones sucesivas, cuyas áreas de emisión incluyen el punto considerado.
- cálculo de L'xN tiempos de vuelo, cada tiempo de vuelo t_{l,n} es el tiempo que tarda la l-ésima onda plana cuya área de emisión incluye el punto considerado, donde 1 ≤ l ≤ L', para ser recibida por el n-ésimo transductor receptor, donde 1 ≤ n ≤ N, pasando por el punto considerado de acuerdo con un modo de propagación predeterminado, y
 - suma coherente de L'xN valores instantáneos tomados respectivamente por las L'xN señales de tiempo de medición recibidas correspondientes a las L' emisiones determinadas, a los L'xN tiempos de vuelo calculados.

Así, procediendo de esta manera, el método propuesto lleva a cabo una adquisición del tipo "combinación de onda plana", sin "formación de haces" en la recepción. Eso se refiere al principio de enfoque sintético de adquisiciones FMC, pero sin aplicarlo tal como en la "composición de onda plana". Por el contrario, este principio está inteligentemente adaptado para aprovechar la simplicidad de la técnica de "combinación de ondas planas" con el fin de lograr una alta tasa de adquisición y calidad de la imagen, en términos de resolución espacial y de contraste, vinculada a un enfoque sintetizado en todos los puntos de la imagen deseada. Este también posibilita, gracias a este enfoque sintetizado en todos los puntos, obtener una imagen capaz de extenderse más allá de la apertura de un sensor que lo implemente. Finalmente, el uso de un enfoque sintetizado en todos los puntos hace que el método sea compatible con una obtención de imágenes de defectos de tipo fisura al explotar las reflexiones de las ondas en las interfaces de la parte controlada, como se enseña en el documento A. Fidahoussen y otros citado anteriormente.

Opcionalmente, los transductores emisores se controlan mediante una ley de retardo definida para cada una de las L emisiones de ondas ultrasónicas planas sucesivas, cada ley de retardo permite generar una onda ultrasónica plana en un ángulo de emisión deseado entre los L ángulos de emisión diferentes sucesivos.

También opcionalmente, M = N y los transductores son secuencialmente transmisores y receptores.

También opcionalmente, los L diferentes ángulos de emisión sucesivos se definen alrededor de una dirección media no perpendicular a la matriz de transductores emisores.

También opcionalmente, para cada emisión, es decir para cada ángulo de emisión, el modo de propagación predeterminado se elige de entre uno de los siguientes modos:

- un modo de propagación de trayectoria directa, con o sin conversión de modo Longitudinal ↔ Transversal, según
 el cual la onda plana emitida se recibe directamente en cada punto del área de la que se va a obtener la imagen y se devuelve directamente a los transductores receptores sin más reflexión,
 - un modo de propagación de eco de esquina, con o sin conversiones de modo Longitudinal ↔ Transversal, en el que la onda emitida experimenta una reflexión en una superficie predeterminada del área de la que se va a obtener la imagen, es decir, entre los transductores emisores y cada punto del área de la que se va a obtener la imagen, ya sea entre cada punto del área de la que se va a obtener la imagen y los transductores receptores, y
 - un modo de propagación de trayectoria indirecta, con o sin conversiones de modo Longitudinal ↔ Transversal, en el que la onda transmitida experimenta al menos dos reflexiones contra al menos una superficie predeterminada del área de la que se va a obtener la imagen, al menos una vez entre los transductores emisores y cada punto en el área de la que se va a obtener la imagen y nuevamente entre cada punto en el área de la que se va a obtener la imagen y los transductores receptores.

También opcionalmente, el área de la que se va a obtener la imagen se incluye en la unión de las L áreas de emisión, cuya representación comprende las siguientes etapas sucesivas:

- 55 inicialización de cada punto del área de la que se va a obtener la imagen a un valor cero,
 - para cualquier valor de un índice I que varíe de 1 a L y para cada punto ubicado en la intersección del área de la que se va a obtener la imagen y de la I-ésima área de emisión:
 - cálculo de N tiempos de vuelo t_{l,n},
 - suma coherente de los N valores instantáneos tomados respectivamente por las N señales de tiempo de medición recibidas en respuesta a la l-ésima transmisión, a los N tiempos de vuelo calculados, y
 - adición del resultado de esta suma coherente al valor del punto considerado,
 - cálculo del módulo del valor finalmente obtenido en cada punto del área de la que se va a obtener la imagen.

65

60

5

15

20

25

30

35

45

También opcionalmente, para cada emisión, se lleva a cabo una apodización de las M señales ultrasónicas emitidas por los M transductores emisores para formar una onda ultrasónica plana utilizando una ventana de apodización tal como una ley de amplitud trapezoidal, de Hamming o de Blackman-Harris.

5 También opcionalmente, el área de la que se va a obtener la imagen toma la forma de un área sectorial delimitada por los extremos de las áreas de emisión de ángulos máximo y mínimo.

También se proporciona un programa informático de acuerdo con la reivindicación 9.

10 También se propone un dispositivo de exploración por ultrasonidos que comprende:

15

25

30

40

- una sonda que comprende M transductores emisores por ultrasonidos y N transductores receptores por ultrasonidos,
- medios para controlar los M transductores emisores para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas planas que tienen L diferentes ángulos de emisión sucesivos en L áreas de emisión.
 - medios para controlar los N transductores receptores para recibir simultáneamente y durante un tiempo predeterminado, para cada transmisión, N señales de tiempo de medición, en particular ecos de medición debidos a las reflexiones de la transmisión en cuestión, y
- un procesador para representar un área de la que se va a obtener la imagen mediante el cálculo, en cada punto
 de una pluralidad de puntos predeterminados de esta área de la que se va a obtener la imagen, de un valor resultante de un procesamiento de al menos parte de las LxN señales de tiempo de medición recibidas,
 - en donde el procesador está configurado además para realizar el siguiente procesamiento para cada punto en el área de la que se va a obtener la imagen:
 - determinación de L' emisiones, L' ≤ L, entre las L emisiones sucesivas, cuyas áreas de emisión incluyen el punto considerado.
 - cálculo de L'xN tiempos de vuelo, cada tiempo de vuelo t_{l,n} es el tiempo que tarda la l-ésima onda plana cuya área de emisión incluye el punto considerado, donde 1 ≤ l ≤ L', para ser recibida por el n-ésimo transductor receptor, donde 1 ≤ n ≤ N, pasando por el punto considerado de acuerdo con un modo de propagación predeterminado, y
 - suma coherente de L'xN valores instantáneos tomados respectivamente por las L'xN señales de tiempo de medición recibidas correspondientes a las L' emisiones determinadas, a los L'xN tiempos de vuelo calculados.

La invención se comprenderá mejor con la ayuda de la descripción que sigue, dada únicamente a modo de ejemplo y realizada con referencia a los dibujos adjuntos en los que:

- 35 La figura 1 representa esquemáticamente la estructura general de un dispositivo de exploración ultrasónica de acuerdo con una realización de la invención.
 - La figura 2 ilustra un principio de emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas planas implementado por el dispositivo de la figura 1,
 - Las figuras 3, 4 y 5 ilustran geométricamente los cálculos de tiempo de vuelo realizados en la representación de un área de la que se va a obtener la imagen por el dispositivo de la figura 1 cuando implementa el principio de la figura 2,
- 45 La figura 6 ilustra las etapas sucesivas de un método de adquisición y procesamiento de señales ultrasónicas implementado por el dispositivo de la figura 1, de acuerdo con una realización de la invención,
 - la figura 7 ilustra una primera posible aplicación del método de la figura 6,
- 50 la figura 8 ilustra una segunda posible aplicación del método de la figura 6, y
 - las Figuras 9 y 10 representan diferentes resultados posibles de la aplicación de la figura 8.
- Con referencia a la figura 1, un dispositivo de exploración 100 de un objeto 102 de acuerdo con una realización de la invención comprende una sonda de ultrasonidos 104 que tiene un alojamiento 106, es decir un elemento de estructura no deformable que sirve como punto de referencia unido a la sonda 104, en el que se disponen, por ejemplo, de forma lineal o matricial, N transductores 108₁, ..., 108_N en red fijos o móviles.
- El objeto 102 es, por ejemplo, una pieza mecánica que se desea examinar mediante inspecciones no destructivas o, en un contexto médico, una parte del cuerpo humano o animal que se desea controlar de manera no invasiva. En la realización de la figura 1, el objeto 102 se sumerge en un líquido, tal como agua 110, y la sonda 104 se mantiene alejada del objeto 102 de modo que el agua 110 los separe. Pero en otra realización equivalente, la sonda 104 podría estar en contacto directo con el objeto 102.
- 65 Los transductores 108₁, ..., 108_N están diseñados para emitir ondas ultrasónicas individualmente en la dirección del

objeto 102 en respuesta a las señales de control identificadas bajo la referencia general C, de acuerdo con las direcciones principales paralelas entre sí, indicadas por flechas de puntos en la figura 1, y en un plano principal que es el de la figura.

Los transductores 108₁, ..., 108_N están diseñados además para detectar ecos de las ondas ultrasónicas que se reflejan en el objeto 102 y para proporcionar señales de medición identificadas bajo la referencia general S y correspondientes a estos ecos. Así, en el ejemplo no limitativo de la figura 1, los transductores 108₁, ..., 108_N cumplen tanto las funciones de transmisión como de recepción, pero también se podrían proporcionar receptores diferentes de los transmisores en alojamientos diferentes e independientes mientras se mantienen de acuerdo con los principios de la invención.

10

15

25

30

El dispositivo de exploración 100 comprende además un circuito electrónico 112 para controlar los transductores 108₁, ..., 108_N de la sonda 104 y para procesar las señales de medición S. Este circuito electrónico 112 está conectado a la sonda 104 para transmitirle las señales de control C y para recibir las señales de medición S. El circuito electrónico 112 es por ejemplo el de un ordenador. Este tiene una unidad de procesamiento central 114, tal como un microprocesador diseñado para enviar las señales de control C a la sonda 104 y recibir las señales de medición S de la sonda 104, y una memoria 116 en la que en particular se almacena un programa informático 118.

El programa informático 118 comprende en primer lugar las instrucciones 120 para generar las señales C para controlar los transductores 108₁, ..., 108_Ny recibir sus ecos. Estas instrucciones están programadas con mayor precisión para:

- activar los transductores 108₁, ..., 108_N como emisores de L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas planas que tienen L ángulos de emisión sucesivos diferentes en L áreas de emisión del objeto 102,
- activar los transductores 108₁, ..., 108_N como receptores para, después de cada emisión, recibir simultáneamente, por estos N receptores y durante una duración predeterminada de la profundidad de inspección deseada, N señales de tiempo de medición, que miden en particular los ecos debidos a las reflexiones de cada emisión considerada.

Las ondas ultrasónicas planas se obtienen en la emisión aplicando a los transductores 108₁, ..., 108_N leyes de retardo almacenadas en la memoria 116 en una base 122 de leyes de retardo. Cada ley de retardo define los retardos que se aplicarán a los transductores 108₁, ..., 108_N en emisión, para generar una onda ultrasónica plana a un ángulo de emisión deseado entre los L ángulos de emisión sucesivos diferentes. Por lo tanto, existen tantas leyes de retardo como emisiones sucesivas deseadas.

En recepción, el conjunto S de las LxN señales de tiempo de medición recibidas por los transductores 108₁, ..., 108_N es reenviado por la sonda 104 a la unidad central de procesamiento 114.

El programa informático 118 incluye además instrucciones 124 para registrar estas señales, $K_{l,n}(t)$ que representan la señal de medición de tiempo recibida por el transductor 108_n en respuesta a la l-ésima emisión de ondas ultrasónicas planas.

40

45

50

El programa informático 118 comprende además instrucciones 126 para reconstituir un área de la que se va a obtener la imagen mediante cálculo, en cada punto de una pluralidad de puntos predeterminados de esta área de la que se va a obtener la imagen, por un valor resultante de un procesamiento de al menos una parte de las LxN señales de tiempo de medición recibidas. Más precisamente, en el área de la que se va a obtener la imagen definida, por ejemplo, como una imagen digital compuesta por píxeles, las instrucciones 126 se definen para, en cada píxel de esta imagen:

- determinar L' emisiones, L' ≤ L, entre las L emisiones sucesivas, cuyas áreas de emisión incluyen el píxel considerado,
- calcular L'xN tiempos de vuelo, cada tiempo de vuelo t_{I,n} es el tiempo que tarda la l-ésima onda plana cuya área de emisión incluye el píxel considerado, donde 1 ≤ I ≤ L', para ser recibido por el n-ésimo transductor receptor, donde 1 ≤ n ≤ N, pasando a través del píxel considerado de acuerdo con un modo de propagación predeterminado,
- sumar coherentemente los L'xN valores instantáneos de tomados respectivamente por las L'xN señales de tiempo de medición recibidas correspondientes a las L' emisiones determinadas, a los L'xN tiempos de vuelo calculados, v
- 55 calcular el módulo del valor obtenido posiblemente ponderado por el valor L'.

Finalmente, el programa informático 118 incluye instrucciones 128 para visualizar la imagen digital obtenida en un dispositivo de visualización, no mostrado.

Como se ilustra en la figura 2 en un caso donde el número L de transmisiones sucesivas es impar y donde los ángulos de las emisiones se suceden con un paso constante en un sector angular simétrico con respecto a la dirección z ortogonal a la matriz de transductores 108₁, ..., 108_N, la primera emisión de onda plana está asociada con una ley de retardo T₁ relativo a los pulsos emitidos por los transductores 108₁, ..., 108_N, permitiendo la emisión de una onda plana de ángulo de emisión θ₁con respecto a la dirección z en una primera área de emisión ZE₁ ubicado parcialmente fuera de la abertura de la sonda 104. La (L+1)/2-ésima emisión de onda plana está asociada con una ley de retardo T_{(L+1)/2}

uniforme para la emisión de una onda plana de ángulo de emisión cero con respecto a la dirección z en una (L+1)/2-ésima área de emisión ZE_{(L+1)/2} cubriendo la abertura de la sonda 104. Finalmente, la última emisión de onda plana está asociada con una ley de retardo T_L permitiendo la emisión de una onda plana de ángulo de emisión $\theta_L = -\theta_1$ con respecto a la dirección z en una última área de emisión ZE_L ubicada parcialmente fuera de la abertura de la sonda 104. En general, la l-ésima emisión de onda plana está asociada con una ley de retardo T_L que permite la emisión de una onda plana de ángulo de emisión $\theta_L = \theta_1 + (I - 1)$. ($\theta_L - \theta_1$)/(L - 1) con respecto a la dirección z.

Para mejorar la calidad de las señales de medición utilizadas para reconstituir el área de la que se va a obtener la imagen, también es posible aplicar una apodización de las señales ultrasónicas emitidas por los transductores 108₁, ..., 108_N para formar una onda ultrasónica plana de mejor calidad, sin distorsión experimentada debido a los efectos de borde. Tal apodización se lleva a cabo en cada emisión espacialmente en el conjunto de transductores utilizando una ventana de apodización tal como una ley de amplitud trapezoidal, de Hamming o de Blackman-Harris. Su resultado es proporcionar una mejor definición de las áreas de emisión sucesivas.

- Teniendo en cuenta la técnica de adquisición empleada, el área de la que se va a obtener la imagen debe estar contenida en la unión de las L áreas de emisión sucesivas. Como resultado, esta área puede extenderse más allá de la abertura de la sonda 104, como puede verse en la figura 2. En particular, el área de la que se va a obtener la imagen puede tomar la forma de un área sectorial delimitada por los extremos de las áreas de emisión de ángulos máximo y mínimo. Por tanto, es posible obtener una imagen del tipo S-scan.
 - Con referencia a la figura 3 que ilustra una aplicación 2D de la invención, para la l-ésima emisión de una onda ultrasónica plana con un ángulo de emisión θ_l , el tiempo de vuelo en trayectoria directa $t_{l,n}(P)$ relativo a un punto P de coordenadas (x, z) en el punto de referencia (O, x, z) vinculado al plano del área de la que se va a obtener la imagen donde el eje (O, x) es el eje de la matriz de transductores $108_1, ..., 108_N$, y relacionado con el transductor 108_n cuyas coordenadas son $(x_n, 0)$ en el mismo punto de referencia (O, x, z), se descompone de la siguiente manera:

$$t_{l,n}(P) = t_l^{tr}(P) + t_n^{re}(P)$$

- donde $t_l^{tr}(P)$ es el tiempo de vuelo de emisión entre el plano (O, x') de emisión de la onda plana y el punto P y $t_n^{re}(P)$ el tiempo de vuelo de recepción entre el punto P y el transductor 108_n.
 - Por cálculo geométrico, el tiempo de vuelo de las emisiones se expresa de la siguiente manera:

$$t_l^{tr}(P) = \frac{x.\operatorname{sen}(\theta_l) + z.\operatorname{cos}(\theta_l)}{c}$$

- donde c es la velocidad de propagación de la onda plana en el medio considerado (asumiendo que no hay cambio de 40 medio, lo cual se verifica en los casos de inspección no destructiva al contacto). Tenga en cuenta que este tiempo de vuelo de la transmisión para el punto P no depende de los transductores 108₁, ..., 108Ŋ, pero solo el ángulo de emisión θı.
 - También mediante el cálculo geométrico, el tiempo de vuelo de recepción se expresa de la siguiente manera:

$$t_n^{re}(P) = \frac{\sqrt{(x_n - x)^2 + z^2}}{2}$$

- donde se nota que este tiempo de vuelo de recepción para el punto P depende solo de los transductores 108_1 , ..., 108_N , pero no el ángulo de emisión θ_I .
 - Por tanto, el tiempo de vuelo total se expresa de la siguiente manera:

5

10

20

25

35

45

60

55
$$t_{l,n}(P) = \frac{x.\sin(\theta_l) + z.\cos(\theta_l)}{c} + \frac{\sqrt{(x_n - x)^2 + z^2}}{c}$$

Para sumar consistentemente los L'xN valores instantáneos tomados respectivamente, por las L'xN señales de tiempo de medición recibidas correspondientes a las L' emisiones determinadas que contribuyen al área de la que se va a obtener la imagen en el punto P, a los L'xN tiempos de vuelo calculados previamente, también es adecuado en la práctica para las preocupaciones de ajuste de tiempo aplicar una constante τ_l^{tr} específica para cada emisión, cuyo valor se expresa de la siguiente manera:

$$\tau_{l}^{tr} = \frac{\max_{n} (z'_{l,n})}{2.c}$$

donde $z'_{l,n}$ representa la distancia entre el transductor 108_n y el eje de la matriz de transductores (O, x') prácticamente desviado angularmente del eje (O, x) en un ángulo igual a θ_l . Esta distancia se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$z'_{l,n} = x_n \cdot \operatorname{sen}(\theta_l) - \min_n \left[x_n \cdot \operatorname{sen}(\theta_l) \right]$$

El cálculo anterior, y en particular el valor mín $_n[x_n.sen(\theta_i)]$, asegura que los retardos aplicados en las leyes de retardo permanezcan siempre positivos, incluso cuando el ángulo θ_l es negativo. Además, en el caso de una pieza inspeccionada con una superficie plana, la constante τ_l^{tr} específica para cada transmisión corresponde al retardo medio de la ley de retardo aplicada a la l-ésima transmisión o, de forma equivalente, a la mitad del retardo máximo.

De ello se deduce que el módulo de la suma coherente definida anteriormente, que involucra las L'xN señales de tiempo de medición que contribuyen al área de la que se va a obtener la imagen en el punto P, se puede expresar de la siguiente manera:

$$A(P) = \left| \sum_{l=1}^{L'} \sum_{n=1}^{N} K_{l,n} [t_{l,n}(P) + \tau_{l}^{tr}] \right|$$

20 En la práctica, para obtener la envolvente de la imagen, se suman más bien las señales analíticas, utilizando en particular las transformadas de Hilbert H_{I,n}(t) de las señales K_{I,n}(t). Entonces, el cálculo anterior se vuelve más preciso:

$$A_{env}(P) = \left| \sum\nolimits_{l=1}^{L'} \sum\nolimits_{n=1}^{N} (K_{l,n}[t_{l,n}(P) + \tau_{l}^{tr}] + H_{l,n}[t_{l,n}(P) + \tau_{l}^{tr}]) \right|$$

Se observa que de conformidad con este cálculo, que es similar al enfoque en todos los puntos, no se aplica ninguna ley de retardo en recepción.

La ventaja de reconstituir el área de la que se va a obtener la imagen por tal técnica basándose en cálculos de tiempo de vuelo en cada punto es que es posible tener en cuenta diferentes configuraciones y modos de propagación de las ondas ultrasónicas. Así por ejemplo, en los cálculos anteriores, se consideró por simplicidad que el modo de propagación de las ondas ultrasónicas era directo, sin cambio de medio de propagación (exploración por contacto con el objeto a inspeccionar) y sin conversión de polarización de las ondas transmitidas, es decir que cada onda plana transmitida es recibida directamente por cada punto del área de la que se va a obtener la imagen y devuelta directamente a los transductores 108₁, ..., 108_N sin más reflexión.

Pero se podrían hacer otras suposiciones y entonces sería suficiente adaptar el cálculo de los tiempos de vuelo:

- el control del objeto considerado podría realizarse en inmersión sin contacto, con una superficie de objeto más o menos compleja,
 - el modo de propagación de las ondas ultrasónicas puede ser un eco de esquina, en particular en las proximidades de una falla del tipo de fisura y según una cierta incidencia de la onda plana: en este caso, la onda plana emitida experimenta una reflexión contra una superficie predeterminada del área de la que se va a obtener la imagen, por ejemplo, el fondo del objeto, o entre los transductores 108₁, ..., 108_Ny cada punto del área de la que se va a obtener la imagen, es decir, entre cada punto del área de la que se va a obtener la imagen y los transductores 108₁, ..., 108_N
 - el modo de propagación de las ondas ultrasónicas puede ser en una trayectoria indirecta, en particular también en las proximidades de una falla del tipo de fisura y de acuerdo con una cierta incidencia de la onda plana: en este caso, la onda plana emitida experimenta al menos dos reflexiones contra al menos una superficie predeterminada del área de la que se va a obtener la imagen, por ejemplo, la parte inferior del objeto, al menos una vez entre los transductores 108₁, ..., 108_N y cada punto del área de la que se va a obtener la imagen y los transductores 108₁, ..., 108_N,
 - cualquiera que sea el modo de propagación, la polarización longitudinal o transversal de las ondas ultrasónicas puede variar con motivo de una reflexión: una onda transversal puede convertirse en longitudinal y viceversa, esta conversión tiene un impacto en la velocidad de propagación.

Las hipótesis antes mencionadas también se pueden combinar.

A modo de ejemplo, la figura 4 ilustra un control de inmersión sin contacto según el cual la propagación tiene lugar, en modo directo, en un primer medio a la velocidad c₁, por ejemplo, el agua, luego en un segundo medio a la velocidad c₂, por ejemplo, el material (acero, ...) del objeto inspeccionado. Los dos medios están en este caso particular delimitados por la superficie plana del objeto ubicado a una distancia H del eje (O, x) de la matriz de transductores 108₁, ..., 108_N.

65

5

10

15

25

45

50

Retomando las notaciones de la figura 3 y adicionando las de la figura 4, es recomendable tener en cuenta el cálculo de los puntos de impacto $x_l^{tr}(P)$ y $x_n^{re}(P)$ en la superficie plana del objeto para calcular el tiempo total de vuelo $t_{ln}(P)$.

5 Emitiendo una onda plana en el primer medio, por encima de la superficie plana del objeto, con un ángulo de incidencia α_l , se puede deducir el ángulo de incidencia θ_l de la onda plana en el segundo medio bajo la superficie del objeto por la ley de Snell-Descartes que se escribe:

$$\theta_l = \operatorname{seni}^{-1} \left(\frac{c_2}{c_1} \operatorname{sen}(\alpha_l) \right)$$

Luego, conociendo las coordenadas x y z del punto focal P en el objeto inspeccionado, se deduce la abscisa $x_l^{tr}(P)$ del punto de impacto en la superficie asociado a la trayectoria de emisión:

$$x_l^{tr}(P) = x - (z - H). \tan(\theta_l)$$

En consecuencia, el tiempo de vuelo de la transmisión al punto P se escribe:

$$t_{l}^{tr}(P) = \frac{\sqrt{H^{2} + [x_{l}^{tr}(P)]^{2}}}{c_{1}} + \frac{\left(x - x_{l}^{tr}(P)\right) \operatorname{sen}\theta_{l} + (z - H) \cos\theta_{l}}{c_{2}}$$

Como anteriormente, se observa que este tiempo de vuelo de la transmisión para el punto P no depende de los transductores 108_1 , ..., 108_N , sino solo del ángulo de emisión θ_I .

En recepción, análogamente:

25

30

35

45

50

60

$$t_n^{re}(P) = \frac{\sqrt{H^2 + [x_n^{re}(P)]^2}}{c_1} + \frac{\sqrt{(x_n^{re}(P) - x)^2 + (z - H)^2}}{c_2}$$

donde la abscisa $x_n^{re}(P)$ del punto de impacto en la recepción se determina sobre la base del principio de Fermat según el cual la trayectoria de retorno entre el punto P y el receptor 108_n debe corresponder a la trayectoria más corta. En el caso de una parte plana, el principio resulta en encontrar los ceros de una función. Los métodos generalmente utilizados para resolver esta búsqueda de ceros son diversos: método de Newton-Raphson, método de Ferrari, método de Laguerre, método de descenso de gradiente, etc. Los métodos de descenso de gradiente y de Newton-Raphson son los más interesantes porque siguen siendo válidos para las geometrías complejas de la superficie. En particular, existen muchos documentos en el estado de la técnica sobre la búsqueda de las trayectorias más cortas y sobre el cálculo de los puntos de impacto. Por tanto, estos métodos no se recordarán.

40 Como anteriormente, se muestra que el tiempo de vuelo de recepción para el punto P depende solo de los transductores 108_1 , ..., 108_N , pero no del ángulo de incidencia θ_l .

A modo de ejemplo adicional, la figura 5 ilustra un control de inmersión sin contacto según el cual se produce la propagación, en modo eco de esquina, en un primer medio a la velocidad c₁, por ejemplo, el agua, luego en un segundo medio, por ejemplo el material (acero, ...) del objeto inspeccionado. En el segundo medio, la propagación tiene lugar a la velocidad c₂para las ondas longitudinales y a la velocidad c₃ para las ondas transversales. Los dos medios están en este caso particular delimitados por la superficie plana del objeto ubicado a una distancia H_i del eje (O, x) de la matriz de transductores 108₁, ..., 108_N. El objeto también tiene un fondo de parte plana, a una distancia H_rdel eje (O, x), contra el cual rebota una onda plana incidente según el principio de propagación del eco de esquina. Sólo se ilustra la trayectoria incidente en el punto P, la trayectoria de retorno es similar a la del ejemplo anterior.

La trayectoria incidente de la l-ésima emisión de la onda plana se divide así en tres partes:

- una primera parte T_a entre su punto teórico de emisión E de coordenadas (x₁, z₁) en el eje (O, x) y un punto de impacto Ip de coordenadas (x_i, z_i= H_i) en la interfaz de los dos medios, orientada según un ángulo α_i con respecto a la dirección (O, z),
 - una segunda parte T_b entre el punto de impacto Ip y un punto de reflexión R con coordenadas (x_r, z_r= H_r) en la parte inferior del objeto, orientada según el ángulo θ_l con respecto a la dirección (O, z), y
 - una tercera parte T_c entre el punto de reflexión R y el punto P con coordenadas representadas como (x₂, z₂), orientada en un ángulo γ_icon respecto a la dirección (O, z).

También se supone que la onda es longitudinal en las trayectorias T_ay T_b , luego transversal en la trayectoria T_c , una conversión de polarización que tiene lugar con motivo del rebote contra la parte inferior del objeto.

De conformidad con la ley de Snell-Descartes, el principio de refracción debe verificarse en el punto lp y el principio

de reflexión en el punto R. Esto proporciona el siguiente sistema de ecuaciones:

5

15

25

40

65

$$\begin{cases} \frac{\operatorname{sen}(\alpha_l)}{c_1} = \frac{\operatorname{sen}(\theta_l)}{c_2} \\ \frac{\operatorname{sen}(\theta_l)}{c_2} = \frac{\operatorname{sen}(\gamma_l)}{c_2} \end{cases}$$

Para plantear el problema en coordenadas cartesianas, se expresan los senos en función de las coordenadas de los puntos E, Ip, R y P:

$$sen(\alpha_l) = \frac{(x_i - x_1)}{\sqrt{(x_i - x_1)^2 + (H_i - Z_1)^2}}$$

$$\mathrm{sen}(\theta_l) = \frac{(x_r - x_l)}{\sqrt{(x_r - x_l)^2 + (H_r - H_l)^2}}$$

$$sen(\gamma_1) = \frac{(x_2 - x_r)}{\sqrt{(x_2 - x_r)^2 + (z_2 - H_r)^2}}$$

El sistema de ecuaciones anterior se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{cases} f_1: c_2(x_i-x_1)\sqrt{(x_r-x_i)^2+(H_r-H_i)^2}-c_1(x_r-x_i)\sqrt{(x_i-x_1)^2+(H_i-z_1)^2}=0\\ f_2: c_3(x_r-x_i)\sqrt{(x_2-x_r)^2+(z_2-H_r)^2}-c_2(x_2-x_r)\sqrt{(x_r-x_i)^2+(H_r-H_i)^2}=0 \end{cases}$$

- 30 Este sistema de dos ecuaciones no lineales con dos incógnitas, $x_i y x_r$, se resuelve de manera clásica mediante el método de Newton-Raphson. Este permite determinar los puntos lp y R y luego deducir de estos el tiempo de vuelo en emisión $t_l^{tr}(P)$.
- Con referencia a la figura 6, se describirá ahora un ejemplo de un método 600 de adquisición y procesamiento de señales ultrasónicas que el dispositivo 100 de la figura 1 puede implementar de acuerdo con una realización preferida de la invención.
 - Durante una etapa 602, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 120 controla las secuencias de transmisiones y recepciones de los transductores 108_1 , ..., 108_N para la adquisición de señales de medición $K_{l,n}(t)$.
 - Estas secuencias son en número de L, un número entero que puede ser mucho menor que el número N de transductores 108_1 , ..., 108_N . Después de cada disparo, las señales se reciben en todos los N transductores, se digitalizan y se transmiten al circuito electrónico 112.
- Durante una etapa 604, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 124 registra las señales de medición K_{I,n}(t), estas señales se digitalizan para facilitar su posterior procesamiento. Las etapas 602 y 604 se pueden llevar a cabo simultáneamente, es decir, no es necesario esperar a que se lleven a cabo todos los disparos para comenzar a registrar las señales de medición y reconstruir una imagen.
- Durante una etapa siguiente 606, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 126 inicializa cada píxel del área de la que se va a obtener la imagen, elegida de la unión de las L áreas de transmisión, a un valor cero. Además, un índice I destinado a variar de 1 a L se inicializa a 1. Esta etapa se puede ejecutar independientemente de las etapas 602 y 604, antes, durante o después.
- Durante una etapa siguiente 608, para cada píxel del área de la que se va a obtener la imagen ubicada en la l-ésima área de transmisión, los N tiempos de vuelo t_{i.n}, 1≤n≤N, se calculan de acuerdo con un modo de propagación elegido específicamente para el ángulo de emisión θ_i, de conformidad, por ejemplo, uno de los cálculos presentados anteriormente. Por tanto, parece que se pueden elegir varios modos de propagación con o sin conversiones de polarización, respectivamente, para las L emisiones sucesivas. Por lo tanto, la invención hace posible fusionar varios modos de reconstrucción ultrasónica dentro de la misma área de la que se va a obtener la imagen.

Durante una etapa 610, para cada píxel del área de la que se va a obtener la imagen ubicada en la l-ésima área de transmisión, los N valores instantáneos tomados respectivamente por las N señales de tiempo de medición recibidas en respuesta a la l-ésima transmisión, en los N tiempos de vuelo calculados anteriormente, se suman de conformidad con la siguiente operación de suma coherente:

$$A_{l}(P) = \sum\nolimits_{n=1}^{N} (K_{l,n}[t_{l,n}(P) + \tau_{l}^{tr}] + H_{l,n}[t_{l,n}(P) + \tau_{l}^{tr}])$$

5 donde A_l(P) es la amplitud del píxel P para la l-ésima emisión.

10

15

20

30

35

40

45

50

65

Durante una etapa 612, para cada píxel del área de la que se va a obtener la imagen ubicada en la l-ésima área de transmisión, el resultado de la suma coherente se suma al valor actual del píxel considerado y el índice I se incrementa en una unidad

Luego, durante una etapa de prueba 614, si I es estrictamente menor que L, el método vuelve a la etapa 608. De lo contrario, este pasa a la etapa final 616.

Durante la última etapa 616, se calcula el módulo del valor finalmente obtenido en cada punto del área de la que se va a obtener la imagen, de modo que se obtiene, en cada píxel P, el valor $A_{env}(P)$ definido anteriormente:

$$A_{env}(P) = \left| \sum_{l=1}^{L} A_l(P) \right|$$

Posiblemente se puede proceder a una ponderación de los valores de los píxeles por el número de disparos que contribuyeron al valor de cada uno de estos, sabiendo que los píxeles cercanos al ángulo medio de las emisiones reciben más ondas ultrasónicas que los que están más lejos.

Cada bucle de las etapas 608, 610 y 612 de las iteraciones del índice 1 se puede ejecutar en paralelo a las etapas 602 y 604 ya que el procesamiento realizado en cada uno de estos bucles depende únicamente de los resultados de un único disparo ultrasónico. En particular, no es necesario esperar a que se lleven a cabo todos los disparos para iniciar los cálculos del proceso iterativo 608-610-612-614. Las etapas 608, 610, 612, 614 y 616 son además, como la etapa 606, ejecutadas por la unidad de procesamiento 114 usando las instrucciones 126.

También durante la última etapa 616, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 128 visualiza la imagen resultante.

Gracias a la implementación de esta realización preferida, el área de la que se va a obtener la imagen se puede reconstruir gradualmente, ángulo por ángulo, actualizando para cada ángulo de disparo solo los valores de los píxeles ubicados en el área de disparo, los contornos de esta área quedan mejor definidos cuando se ha realizado una apodización eficaz en la emisión de la onda ultrasónica plana. Por tanto, no es necesario realizar cálculos para todos los píxeles de la imagen final en cada disparo. Este principio es particularmente ventajoso cuando la imagen final se extiende mucho más allá de las dimensiones del sensor.

Como se ilustra en la figura 7, una de las ventajas de la invención es también que los L diferentes ángulos de emisión sucesivos θ_1 a θ_L se pueden definir alrededor de una dirección media $\theta_{(L+1)/2}$ no perpendicular a la matriz de transductores 108_1 , ..., 108_N . En particular, cuando se trata de detectar defectos tales como una grieta F colocada en la parte inferior de un objeto a inspeccionar mediante inspecciones no destructivas, siendo esta grieta F también perpendicular a la matriz de transductores, es preferible cambiar lateralmente el área a inspeccionar con respecto a la sonda 104 y emitir alrededor de un promedio de 45° por ejemplo. Así, la grieta se vuelve más visible. Esta también se detecta ventajosamente en toda su longitud eligiendo un modo de propagación de eco de esquina en su proximidad con una posible conversión de polarización, que también es posible en la implementación de la invención como se ha visto anteriormente. El área a inspeccionar puede incluso desplazarse hasta el punto de salir por completo de la abertura de la sonda 104, lo que no es posible en los métodos convencionales de "formación de haces".

Otro ejemplo de aplicación concreta del método descrito anteriormente se ilustra en la figura 8. Esta aplicación ha sido objeto de pruebas reales, cuyos diversos resultados se comentarán con referencia a las figuras 9 y 10.

La pieza inspeccionada 800 está fabricada de acero inoxidable y tiene tres defectos artificiales de tipo muesca. Dos muescas, h₁y h₃, están orientadas perpendicularmente hacia la matriz de transductores 108₁, ..., 108_n y están ubicadas en la parte inferior de la pieza inspeccionada 800 fuera de la abertura del sensor formado por el conjunto de transductores 108₁, ..., 108_n. Una tercera muesca, h₂, tiene una orientación paralela a la matriz de transductores 108₁, ..., 108_n y está ubicada en las proximidades de la normal al sensor que estas forman. La profundidad de la pieza es H = 70 mm, el número N de transductores es igual a 64 (paso entre transductores de 0,6 mm, frecuencia central de las ondas ultrasónicas emitidas de 5 MHz), la pieza inspeccionada está en contacto con los transductores centrados en la muesca h₂. Las tres muescas miden 10 mm de largo.

Hay 31 emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas planas con ángulos de emisión que varían de -60° a + 60° (con respecto a la normal del sensor) en pasos de 4°. Entre estas 31 emisiones sucesivas, se distingue: un primer grupo de emisiones orientado alrededor de -45°, más precisamente entre -60° y -30°, este primer grupo dirigido a un sector

angular en el que se encuentra la muesca h_1 ; un segundo grupo de emisiones orientadas alrededor de la normal (0°), más generalmente entre -30° y + 30°, este segundo grupo se dirige a un sector angular en el que se encuentra la muesca h_2 ; y un tercer grupo de emisiones orientadas alrededor de + 45°, más precisamente entre + 30° y + 60°, este tercer grupo se dirige a un sector angular en el que se encuentra la muesca h_3 . El área de la que se va a obtener la imagen se incluye en la unión de las áreas de emisión y se identifica con la referencia Z.

De acuerdo con una primera representación posible del área de la que se va a obtener la imagen Z, se aplica el mismo modo de propagación en trayectoria directa y en ondas longitudinales al procesamiento de las señales de medición de todos los disparos ultrasónicos. Este modo está simbolizado por la notación L^dL, donde "L" indica una trayectoria secundaria rectilínea en polarización longitudinal y "d" una interacción de onda plana con una falla. De manera más general, el modo de propagación en la trayectoria directa está simbolizado por la notación X^dX, donde "X" puede tomar el valor "L" o "T" (para una trayectoria secundaria rectilínea en polarización transversal) en cada trayectoria secundaria. La representación con el modo único L^dL proporciona el resultado de la figura 9(a). La muesca h₂ se muestra en su totalidad, mientras que cada una de las otras dos muescas h₁y h₃ se caracteriza por un eco de difracción único, ubicado en la parte inferior de cada defecto. El eco de difracción de la parte superior de las muescas es apenas visible en ambos casos.

De acuerdo con una segunda representación posible del área de la que se va a obtener la imagen Z, se aplica el mismo modo de propagación en eco de esquina y en ondas longitudinales al procesamiento de las señales de medición de todos los disparos ultrasónicos. Este modo está simbolizado por la notación L^dL'L, donde "r" indica una interacción de onda plana con la parte inferior de la pieza inspeccionada. De manera más general, el modo de propagación en eco de esquina está simbolizado por la notación X^dX'X, donde "X" puede tomar el valor "L" o "T" en cada trayectoria secundaria. La representación con el modo único L^dL'L proporciona el resultado de la figura 9(b). Las muescas h₁ y h₃ son esta vez claramente visibles en toda su longitud, pero la muesca h₂ está completamente enmascarada por un artefacto de reconstrucción. Este artefacto puede explicarse por la presencia del eco de fondo, que es un eco directo. Más precisamente, el artefacto ubicado en la apertura del sensor corresponde al reposicionamiento del eco directo proveniente del fondo de la pieza inspeccionada en los tiempos de vuelo correspondientes a trayectorias en ecos de esquina. Existe una contradicción entre la naturaleza del eco y el modo de reconstrucción.

- 30 De acuerdo con una tercera representación posible del área de la que se va a obtener la imagen Z, aprovechando las ventajas de las dos representaciones imperfectas anteriores:
 - un primer modo de propagación L^dL^rL se aplica al procesamiento de las señales de medición originadas en el primer grupo de emisiones comprendido entre -60° y -30°, este modo de propagación se adapta a la configuración de la muesca h₁.
 - un segundo modo de propagación L^dL se aplica al procesamiento de las señales de medición provenientes del segundo grupo de emisiones comprendido entre -30° y + 30°, este modo de propagación se adapta a la configuración de la muesca h₂y
 - un tercer modo de propagación L^dL^rL se aplica al procesamiento de las señales de medición provenientes del tercer grupo de emisiones entre +30° y +60°, este modo de propagación se adapta a la configuración de la muesca h₃.

Esta tercera representación proporciona los resultados progresivos de la figura 10. La figura 10(a) ilustra el resultado intermedio al final del disparo ultrasónico n° 1 (-60°), mientras que el modo de propagación elegido es L^dL'L. La figura 10(b) ilustra el resultado intermedio al final del disparo ultrasónico n° 2 (-56°), mientras que el modo de propagación elegido es siempre L^dL'L. La figura 10(c) ilustra el resultado intermedio al final del disparo ultrasónico n° 9 (-28°), mientras que el modo de propagación elegido es L^dL. La figura 10(d) ilustra el resultado intermedio al final del disparo ultrasónico n° 10 (-24°), mientras que el modo de propagación elegido es siempre L^dL. La figura 10(e) ilustra el resultado intermedio al final del disparo ultrasónico n° 11 (-20°), mientras que el modo de propagación elegido es siempre L^dL. La figura 10(f) ilustra el resultado intermedio al final del disparo ultrasónico n° 24 (+32°), mientras que el modo de propagación elegido es nuevamente L^dL'L. La figura 10(i) ilustra el resultado intermedio al final del disparo ultrasónico n° 26 (+40°), mientras que el modo de propagación elegido es siempre L^dL'L. Finalmente, la figura 10(j) ilustra el resultado final al final del disparo ultrasónico n° 31 (+60°), mientras que el modo de propagación elegido es siempre L^dL'L.

- La imagen 10(j) debe compararse con las imágenes 9(a) y 9(b). La visibilidad de las tres muescas es claramente mayor allí, gracias a la posibilidad que ofrece un método de acuerdo con la invención de adaptar el modo de propagación elegido durante la representación en función del ángulo de emisión de los sucesivos disparos ultrasónicos.
- Es evidente que un método y un dispositivo como los detallados anteriormente permiten llevar a cabo un número de disparos inferior al necesario en los métodos de enfoque en todos los puntos para una calidad equivalente de la imagen finalmente obtenida o de lograr un mejor rendimiento en términos de calidad de imagen para un número equivalente de disparos. La razón principal de esta mejora, es decir, una tasa más alta o una mejor calidad de la imagen, es que para cada disparo, se utilizan todos los transductores emisores.

65

5

10

15

35

40

45

Además, el método propuesto sigue siendo compatible con las geometrías o materiales complejos y permite fusionar varios modos de propagación dentro de la misma imagen, en función del ángulo de disparo. También se pueden obtener imágenes que se extienden más allá de la apertura del sensor.

- 5 En el caso de una representación gradual de la imagen, ángulo por ángulo, como es posible a partir de la invención, finalmente se mejora la reproducción.
- Finalmente, las pruebas experimentales muestran que la amplitud de detección es marcadamente mayor con un método de acuerdo con la invención que con un método de enfoque convencional en todos los puntos. Durante los estudios comparativos, fue posible mostrar un factor 10 en este punto entre los dos métodos. La razón de esta diferencia es nuevamente la solicitación de todos los transductores emisores con cada disparo.
- También se observará que la invención no se limita a la realización descrita anteriormente. De hecho, a los expertos en la técnica les parecerá que se pueden realizar diversas modificaciones en la realización descrita anteriormente, a la luz de la enseñanza que se les acaba de divulgar.
 - En particular, las instrucciones de programa informático podrían sustituirse por circuitos electrónicos dedicados a las funciones realizadas durante la ejecución de estas instrucciones.
- 20 En general, en las reivindicaciones que siguen, los términos usados no deben interpretarse como limitantes de las reivindicaciones en la realización expuesta en la presente descripción, sino que deben interpretarse como que incluyen todos los equivalentes que las reivindicaciones que pretenden cubrir por su formulación y cuya previsión está al alcance de los expertos en la materia aplicando sus conocimientos generales a la implementación de la enseñanza que les acaba de ser divulgada.

REIVINDICACIONES

1. Método de procesamiento de señales (S) (600) resultantes de una adquisición por exploración ultrasónica que comprende las siguientes etapas:

5

10

15

20

25

35

50

55

60

- control (602) de una matriz de M transductores emisores (108_1 , ..., 108_N) para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas planas que presentan L ángulos de emisión sucesivos diferentes (θ_1 , ..., θ_L) en L áreas de emisión (ZE_1 , ..., ZE_L),
- control (602) de una matriz de N transductores receptores (108₁, ..., 108_N) para recibir (604) simultáneamente y durante un tiempo predeterminado, para cada emisión, N señales de tiempo de medición, que miden en particular los ecos debidos a las reflexiones de la emisión considerada,
- representación (606, 608, 610, 612, 614, 616) de un área de la que se va a obtener la imagen por cálculo, en cada punto (P) de una pluralidad de puntos predeterminados de esta área de la que se va a obtener la imagen, de un valor resultante de un procesamiento de al menos una parte de las LxN señales de tiempo de medición recibidas,

caracterizado porque la representación del área de la que se va a obtener la imagen comprende las siguientes etapas, ejecutadas por un procesador (114) para cada punto (P) del área de la que se va a obtener la imagen:

- determinación (608) de las L' emisiones, L' ≤ L, entre las L emisiones sucesivas, cuyas áreas de emisión (ZE₁, ..., ZE_L) incluyen el punto considerado (P),
- cálculo (608) de L'xN tiempos de vuelo, cada tiempo de vuelo t_{I,n} es el tiempo que tarda la l-ésima onda plana cuya área de emisión incluye el punto considerado, donde 1 ≤ I ≤ L', para ser recibido por el n-ésimo transductor receptor, donde 1 ≤ n ≤ N, que pasa por el punto considerado (P) de acuerdo con un modo de propagación predeterminado, y
- suma coherente (610, 612) de los L'xN valores instantáneos tomados respectivamente, por las L'xN señales de tiempo de medición recibidas correspondientes a las L' emisiones determinadas, a los L'xN tiempos de vuelo calculados.
- 30 2. El método de procesamiento de señales ultrasónicas (600) de acuerdo con la reivindicación 1, en donde los transductores emisores (108₁, ..., 108_N) son controlados mediante una ley de retardo (T₁, ..., T_L) definida para cada una de las L emisiones de ondas ultrasónicas planas sucesivas, cada ley de retardo permite generar una onda ultrasónica plana a un ángulo de emisión deseado entre los L ángulos de emisión sucesivos diferentes (θ₁, ..., θ_L).
 - 3. El método de procesamiento de señales ultrasónicas (600) de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, en donde M = N y los transductores (108₁, ..., 108_N) son secuencialmente transmisores y receptores.
- El método de procesamiento de señales ultrasónicas (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones
 1 a 3, en donde los L ángulos de emisión sucesivos diferentes (θ₁, ..., θ_L) se definen alrededor de una dirección media (θ_{(L+1)/2}) no perpendicular a la matriz de transductores emisores (108₁, ..., 108_N).
- 5. El método de procesamiento de señales ultrasónicas (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, en donde, para cada emisión, es decir, para cada ángulo de emisión, el modo de propagación 45 predeterminado se elige de entre uno de los siguientes modos:
 - un modo de propagación de trayectoria directa, con o sin conversión de modo Longitudinal ↔ Transversal, según el cual la onda plana emitida es recibida directamente por cada punto (P) del área de la que se va a obtener la imagen y devuelta directamente a los transductores receptores (108₁, ..., 108Ŋ) sin más reflexión.
 - un modo de propagación de eco de esquina, con o sin conversiones de modo Longitudinal ↔ Transversal, según el cual la onda emitida experimenta una reflexión (R) en una superficie predeterminada del área de la que se va a obtener la imagen, es decir, entre los transductores emisores (108₁, ..., 108Ŋ) y cada punto (P) del área de la que se va a obtener la imagen, es decir, entre cada punto (P) del área de la que se va a obtener la imagen y los transductores receptores (108₁, ..., 108Ŋ), y
 - un modo de propagación de trayectoria indirecta, con o sin conversiones de modo Longitudinal ↔ Transversal, según el cual la onda emitida experimenta al menos dos reflexiones (R) contra al menos una superficie predeterminada del área de la que se va a obtener la imagen, al menos una vez entre los transductores emisores (108₁, ..., 108Ŋ) y cada punto (P) del área de la que se va a obtener la imagen y nuevamente entre cada punto (P) del área de la que se va a obtener la imagen y los transductores receptores (108₁, ..., 108Ŋ).
- 6. El método de procesamiento de señales ultrasónicas (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, en donde el área de la que se va a obtener la imagen se incluye en la unión de las L áreas de emisión (ZE₁, ..., ZE_L), su representación comprende las siguientes etapas sucesivas:

- inicialización (606) de cada punto del área de la que se va a obtener la imagen a un valor cero,
- para cualquier valor de un índice I que varía de 1 a L y para cada punto (P) situado en la intersección del área de la que se va a obtener la imagen y de la I-ésima área de emisión:
 - cálculo (608) de los N tiempos de vuelo t_{l,n},
 - suma coherente (610) de los N valores instantáneos tomados, respectivamente, por las N señales de tiempo de medición recibidas en respuesta a la I-ésima transmisión, a los N tiempos de vuelo calculados, y
 - adición (612) del resultado de esta suma coherente al valor del punto considerado.

 cálculo (616) del módulo del valor finalmente obtenido en cada punto del área de la que se va a obtener la imagen.

- 7. El método de procesamiento de señales ultrasónicas (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 15 1 a 6, en donde, para cada emisión, una apodización de las M señales ultrasónicas emitidas por los M transductores emisores (108₁, ..., 108_N) para formar una onda ultrasónica plana se lleva a cabo utilizando una ventana de apodización tal como una ley de amplitud trapezoidal, de Hamming o de Blackman-Harris.
- 8. El método de procesamiento de señales ultrasónicas (600) de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 20 1 a 7, en donde el área de la que se va a obtener la imagen toma la forma de un área sectorial delimitada por los extremos de las áreas de emisión (ZE₁, ZE_L) de ángulos máximo y mínimo.
- 9. Programa informático (118) que puede descargarse de una red de comunicación y/o almacenarse en un medio legible por ordenador y/o ejecutable por un procesador (114), caracterizado porque comprende instrucciones (120, 124, 126, 128) que hacen que el dispositivo de acuerdo con la reivindicación 10 ejecute las etapas del método de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8.
 - 10. Dispositivo de exploración por ultrasonidos (100) que comprende:
- una sonda (104) que comprende M transductores emisores por ultrasonidos (108₁, ..., 108_N) y N transductores receptores por ultrasonidos (108₁, ..., 108_N),
 - medios (112) para controlar los M transductores emisores para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas planas que tienen L ángulos de emisión sucesivos diferentes $(\theta_1, ..., \theta_L)$ en L áreas de emisión $(ZE_1, ..., ZE_L)$,
 - medios (112) de control de los N transductores receptores para recibir simultáneamente y durante un tiempo predeterminado, para cada transmisión, N señales de tiempo de medición, que miden en particular los ecos debidos a las reflexiones de la transmisión en cuestión, y
 - un procesador (114) para representar un área de la que se va a obtener la imagen mediante el cálculo, en cada punto (P) de una pluralidad de puntos predeterminados de esta área de la que se va a obtener la imagen, de un valor resultante de un procesamiento de al menos parte de las LxN señales de tiempo de medición recibidas,

caracterizado porque el procesador (114) está configurado además para llevar a cabo el procesamiento posterior para cada punto (P) del área de la que se va a obtener la imagen:

- determinación de las L' emisiones, L' ≤ L, entre las L emisiones sucesivas, cuyas áreas de emisión (ZE₁, ..., ZE_L) incluyen el punto considerado (P),
- cálculo de L'xN tiempos de vuelo, cada tiempo de vuelo $t_{l,n}$ es el tiempo que tarda la l-ésima onda plana cuya área de emisión incluye el punto considerado, donde $1 \le l \le L'$, para ser recibida por el n-ésimo transductor receptor, donde $1 \le n \le N$, que pasa por el punto considerado (P) de acuerdo con un modo de propagación predeterminado, y
- suma coherente de los L'xN valores instantáneos tomados respectivamente por las L'xN señales de tiempo de medición recibidas correspondientes a las L' emisiones determinadas, a los L'xN tiempos de vuelo de calculados.

55

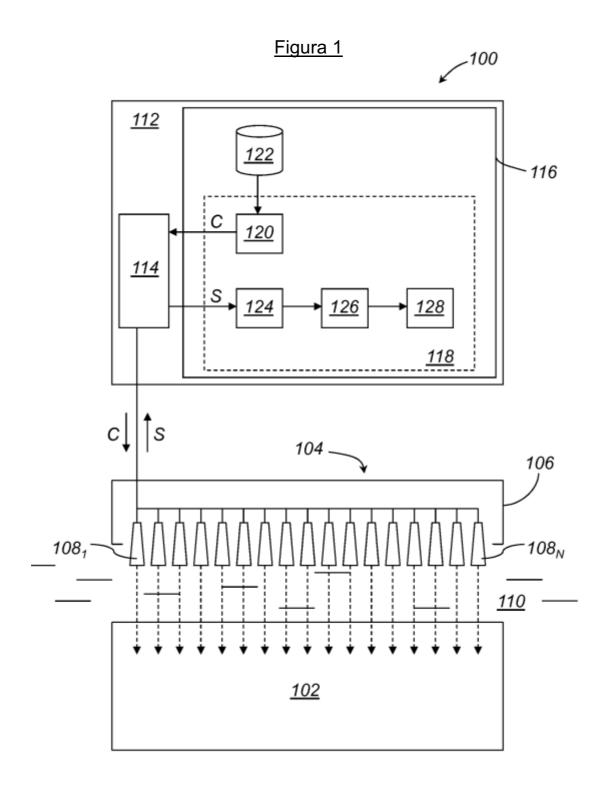
50

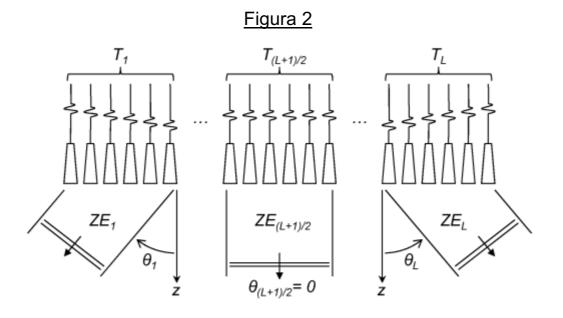
35

40

45

5





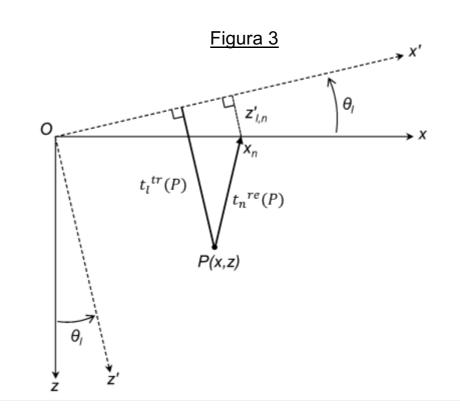


Figura 4

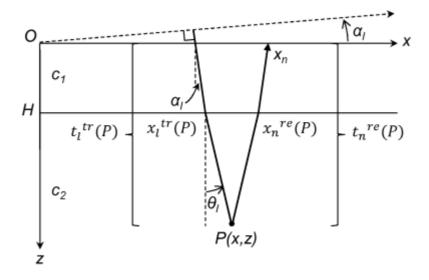


Figura 5

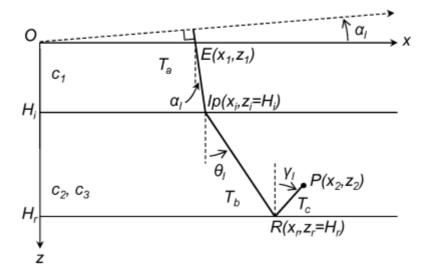


Figura 6

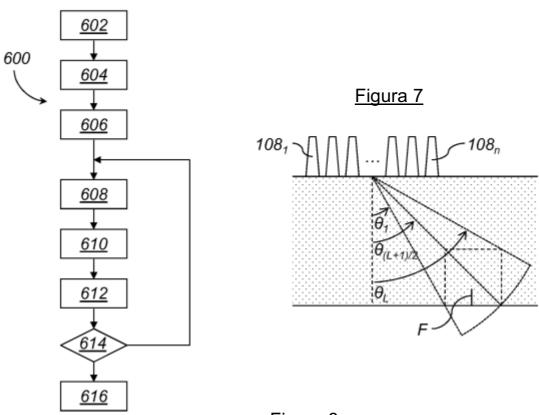


Figura 8

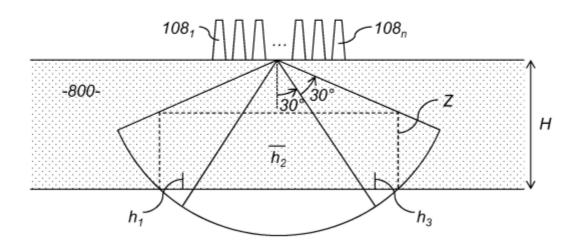


Figura 9

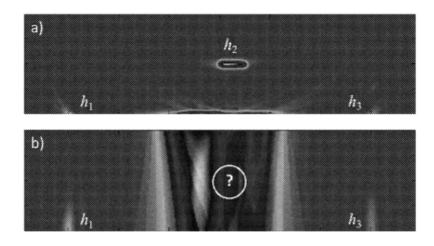


Figura 10

