

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 703 326**

51 Int. Cl.:

G01N 29/26 (2006.01)
G01N 29/44 (2006.01)
G01N 29/46 (2006.01)
G01N 29/06 (2006.01)
G01S 7/52 (2006.01)
G01S 15/00 (2006.01)
G01S 15/89 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.07.2013 PCT/FR2013/051677**
 87 Fecha y número de publicación internacional: **16.01.2014 WO14009671**
 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.07.2013 E 13747440 (9)**
 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **26.09.2018 EP 2872884**

54 Título: **Procedimiento de tratamiento de señales procedentes de una adquisición por sondeo ultrasónico, programa de ordenador y dispositivo de sondeo de ultrasonidos correspondientes**

30 Prioridad:

12.07.2012 FR 1256718

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.03.2019

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:

**BANNOUF, SOUAD;
 CASULA, OLIVIER;
 PRADA JULIA, CLAIRE y
 ROBERT, SÉBASTIEN**

74 Agente/Representante:

AZNÁREZ URBIETA, Pablo

ES 2 703 326 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

Procedimiento de tratamiento de señales procedentes de una adquisición por sondeo ultrasónico, programa de ordenador y dispositivo de sondeo de ultrasonidos correspondientes.

5 La presente invención se refiere a un procedimiento de tratamiento de señales procedentes de una adquisición mediante sondeo ultrasónico, en particular para realizar imágenes ultrasónicas. También se refiere a un programa de ordenador y a un dispositivo de sondeo ultrasónico correspondientes.

10 La invención se aplica en particular al campo del control no destructivo por ultrasonidos, donde la adquisición de señales ultrasónicas permite visualizar y detectar defectos en estructuras, aunque también puede aplicarse a cualquier tipo de imagen ecográfica ultrasónica, en particular en el campo médico, para la inspección de zonas de interés del cuerpo humano o animal.

15 Se enfoca más especialmente en un procedimiento de tratamiento donde las señales ultrasónicas se adquieren de la siguiente manera:

- control de una pluralidad de transductores de emisión para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas hacia una zona de interés,
- control de N transductores de recepción de manera que reciban simultáneamente y durante un período de tiempo predeterminado, para cada emisión sucesiva, N señales de medida, midiendo en particular los ecos de ruidos debidos a las reflexiones de la emisión considerada en la zona de interés,
- obtención de una matriz de señales temporales ultrasónicas de tamaño $L \times N$, representando cada coeficiente $K_{i,j}(t)$ de esta matriz la señal de medida recibida por el j-ésimo transductor de recepción de la emisión i-ésima.

25 Dicha adquisición se realiza generalmente utilizando un dispositivo de sondeo con captadores multi-elemento, siendo cada transductor a la vez emisor y receptor, pudiendo controlarse electrónicamente la conmutación entre estos dos modos. El captador puede estar en contacto con el objeto a sondear o estar a distancia, aunque en este último caso debe sumergirse para asegurar la transmisión de las ondas ultrasónicas en el objeto a sondear. Este captador puede ser lineal (1D) o matricial (2D), con elementos rígidos o flexibles.

30 La matriz de señales temporales obtenida con este tipo de adquisición puede entonces ser procesada, en particular para proporcionar una imagen de la zona de interés inspeccionada o para extraer parámetros significativos de defectos estructurales en la zona de interés inspeccionada. Dadas las actuales capacidades de cálculo de los procesadores, este procesamiento puede integrarse en instrumentos de control para su tratamiento en tiempo real.

En la práctica, la adquisición ultrasónica previamente definida, generalmente denominada adquisición FMC (del inglés "Full Matrix Capture"), consiste en emitir una onda ultrasónica excitando el primer transductor de emisión, recibir los ecos de esta emisión con el conjunto de los N transductores de recepción y conmutar electrónicamente a continuación sobre el conjunto de los transductores de emisión para excitarlos sucesivamente. Los transductores de emisión y recepción se pueden localizar en dos captadores distintos, pero cuando son los mismos transductores los que realizan las funciones de emisión y recepción se obtiene una matriz K(t) de señales temporales ultrasónicas de tamaño NxN.

En el artículo de C. Holmes y col. 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, los coeficientes de la matriz K(t) se utilizan para realizar una focalización sintética de tipo "focalización en todos los puntos" que permite obtener una imagen de alta resolución de la zona de interés.

Más precisamente, esta focalización sintética consiste en calcular, para cada punto de la zona de interés, los tiempos de vuelo $T_{i,j}$ que corresponden a los tiempos de recorrido entre cada transductor de emisión (índice i) y cada transductor de recepción (índice j) pasando por el punto considerado (LxN tiempo de vuelo para cada punto). La focalización sintética se lleva a cabo sumando, para cada punto de la zona de interés, las amplitudes extraídas de las señales $K_{i,j}(t)$ en los tiempos $t = T_{i,j}$. Por tanto, la amplitud A en un punto P de la imagen se puede escribir:

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

La reconstrucción por focalización en cualquier punto puede realizarse utilizando diferentes modos de inspección por ultrasonidos conocidos: el modo directo, donde los tiempos de vuelo asociados se describen arriba y otros modos más complejos, donde los tiempos de vuelo incluyen múltiples reflexiones en las fronteras de la estructura, así como conversiones de modos. Para una explicación detallada de estos otros modos más complejos, véase en particular el artículo de A. Fidahoussen y col. 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 a 854.

Sin embargo, cuando se aplica a la imagen de piezas con ruido, la reconstrucción con focalización en cualquier punto puede proporcionar imágenes de menor calidad en comparación con los métodos ecográficos convencionales. De hecho, en estos últimos, todos los transductores emiten de manera simultánea aplicando una ley de retardos predeterminada para poder focalizar en un punto dado. Sin embargo, de acuerdo con el procedimiento de

adquisición FMC generalmente utilizado, para llevar a cabo entonces la reconstrucción mediante focalización sintética, cada emisión es realizada por un único transductor, lo que limita la energía transmitida y la profundidad de penetración de las ondas en la pieza inspeccionada. Esto se traduce finalmente en una degradación de la relación Señal/Ruido (RSR), ya que la amplitud de las señales eco puede ser más débil que el ruido electrónico. Esta degradación de la RSR es más fuerte cuando el objeto presenta un fuerte ruido estructural, haciendo que se dificulte la detección y la caracterización de posibles defectos.

En el artículo de M. Karaman y col. titulado "Synthetic aperture imaging for small scale systems", publicado en IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 42, nº 3 (mayo 1995), páginas 429-442, se encuentra una solución parcial a este problema de degradación de la RSR.

Ésta consiste en utilizar para cada emisión no un transductor sino M transductores adyacentes. Se aplica una ley de retardos a los M transductores de emisión solicitados para que transmitan al medio una onda ultrasónica esférica cercana a la que emitiría una fuente virtual ubicada a cierta distancia del captador. 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 de emisión que forman esta fuente. En consecuencia, la RSR mejora, suponiendo que el ruido generado es principalmente ruido electrónico no correlacionado.

Sin embargo, en el caso de que las piezas inspeccionadas presenten un alto ruido estructural, la mejora de la calidad de las imágenes finalmente obtenidas por focalización sintética en todos los puntos es más limitada, el aumento de la RSR es menor y el impacto en la detección no es tan positivo como cabría esperar. Esta solución compensa en parte el problema antes mencionado, pero no lo elimina. Por otro lado, la emisión mediante fuentes virtuales no permite evitar el problema que pueden plantear los artefactos de reconstrucción esencialmente debidos a ecos parásitos, tales como los ecos de geometría o ecos complejos que incluyen reflexiones múltiples sobre las fronteras del objeto y conversiones de modos. Finalmente, se observa que para un captor con N transductores de emisión/recepción, la matriz $K(t)$ de señales temporales ultrasónicas obtenida es de tamaño reducido $L \times N$, donde $1 \leq L \leq N - M + 1$, siendo M el número de transductores solicitados simultáneamente para formar la fuente virtual ($1 \leq M \leq N$).

En el artículo de C. Prada y col. titulado "Eigenmodes of the time reversal operator: a solution to selective focusing in multiple-target media", publicado en Wave Motion 20 (1994), páginas 151-163, se utiliza la matriz $K(t)$ para realizar una descomposición del operador de inversión temporal definido como el producto conjugado (indicando T el complejo conjugado) $K(\omega) \cdot K^T(\omega)$, donde $K(\omega)$ corresponde a la transformada de Fourier de la matriz $K(t)$. El principio descrito en este artículo es el de determinar los invariantes de este operador de inversión temporal. Para hacerlo, se realiza una descomposición en valores singulares de la matriz de señales de frecuencia $K(\omega)$ obtenida por transformada de Fourier de la matriz de señales temporales $K(t)$

después de la adquisición FMC. En efecto, se observó que, en general, en la distribución de los valores singulares obtenidos, el número de valores singulares fuertes (es decir de amplitudes significativas) es igual al número de defectos de la parte inspeccionada, siempre que los defectos sean lo suficientemente pequeños y estén lo suficientemente distantes entre sí. Cada vector singular proporciona entonces la respuesta de un defecto (es decir, su función de Green), que se puede utilizar para focalizar este último sin necesidad de disponer de información precisa sobre las propiedades geométricas y acústicas del objeto. Se trata del principio de auto-focalización. El orden de los vectores singulares depende de la naturaleza de difusión más o menos importante del defecto. Así, el primer vector singular corresponde al difusor más fuerte, por ejemplo el defecto más cercano al captador, y así sucesivamente.

Sin embargo, este método de descomposición del operador de inversión temporal es principalmente un método de detección por extracción de parámetros significativos que muestra sus límites en presencia de un ruido estructural importante o cuando los defectos están cerca de la frontera del objeto inspeccionado, por ejemplo en el caso de un defecto cercano a un fondo de pieza. En efecto, en estos casos particulares, no se observa una separación real de un valor singular en relación con los otros. Por tanto, en realidad es difícil hacer coincidir un valor singular con un eventual defecto. Así, la detección es más difícil. Además, a diferencia de los procesos de focalización sintética mencionados anteriormente, este método no proporciona una imagen, sino sólo una indicación de si existe o no un defecto. La localización y caracterización de un defecto requieren la adición de un algoritmo de imagen. El documento US 2011/0125014 describe una adquisición ultrasónica de tipo FMC y en otra realización una transformada de Fourier discreta de los coeficientes de las matrices $K(T,t)$ para obtener, para cada valor T , una matriz $K(T,f)$. El criterio para distinguir entre los valores singulares relacionados con la señal y los valores singulares relacionados con el ruido se establece normalizando los valores singulares por su media cuadrática y luego comparando los valores singulares con un umbral predeterminado. Puede entonces ser conveniente prever un procedimiento de procesamiento de las señales ultrasónicas que permita evitar al menos parte de los problemas y las limitaciones antes mencionadas.

Por tanto, se propone un procedimiento de tratamiento de señales ultrasónicas a partir de una adquisición por sondeo ultrasónico según la reivindicación 1.

Así, la descomposición en valores singulares de la matriz de señal de frecuencia obtenida transformando la matriz de señales temporales adquirida se explota de manera ingeniosa para eliminar el ruido de esta última, ya que se ha comprobado que parte de estos valores singulares está de hecho directamente correlacionada con ruidos estructurales de la pieza que se está sondeando y/o con ecos parásitos (ecos de interfaz) de la adquisición ultrasónica mediante un captador multi-elemento. De esta manera, reconstituyendo una matriz desprovista de ruidos de señales temporales, es posible entonces seguir con el procesamiento convencional de esta última, por ejemplo para obtener una mejor imagen ultrasónica de la zona

de interés sondeada, en base a unos datos de mejor calidad. La etapa de eliminación de ruido se realiza mediante:

- la transformación de la matriz de señales temporales en una matriz de señales de frecuencia,
- 5 – la descomposición de la matriz de señales de frecuencia en valores singulares,
- la eliminación de una parte de los valores singulares y de los vectores singulares asociados según un criterio predeterminado de distinción entre los valores singulares relacionados con defectos y los valores singulares relacionados con ruido,
- la reconstrucción de una matriz sin ruido de señales de frecuencia a partir de los valores
10 singulares y vectores singulares no eliminados,
- la transformación inversa de esta matriz desprovista de ruidos de señales de frecuencia en una matriz desprovista de ruidos de señales temporales.

El criterio predeterminado para distinguir entre los valores singulares relacionados con los defectos y los valores singulares relacionados con ruido es un criterio relativo a las diferencias
15 de amplitud sucesivas entre los valores singulares en una serie decreciente de amplitudes de los valores singulares determinados a partir de la matriz de señales de frecuencia, por ejemplo un criterio de cambio de curvatura o de ruptura de pendiente en esta serie decreciente de las amplitudes de valores singulares.

Opcionalmente, la transformación y la transformación inversa son transformaciones de Fourier
20 discretas.

También opcionalmente, un procedimiento de tratamiento de señales ultrasónicas de acuerdo con la invención puede incluir, antes de la etapa de eliminación de ruido, una etapa de filtrado de la matriz de señales temporales mediante la supresión de toda información que se encuentre en los tiempos de vuelo excluidos de la zona de interés.

25 También opcionalmente, un procedimiento de tratamiento de señales ultrasónicas según la invención puede incluir una etapa de reorganización de los componentes de frecuencia de los valores singulares y de los vectores singulares de la matriz de señales de frecuencia basada en una optimización de correlaciones entre las ocurrencias de frecuencia de los vectores singulares, con el fin de optimizar una correspondencia entre valores singulares y defectos en
30 la zona de interés, y así optimizar el filtrado del ruido.

También opcionalmente, en cada emisión sucesiva se solicitan M transductores de emisión adyacentes y se aplica una ley de retardo a estos M transductores de emisión de manera que se emite una onda esférica procedente de una fuente virtual ubicada a una distancia predeterminada de dicha pluralidad de transductores de emisión.

También opcionalmente, cada recepción se realiza por L' transductores de recepción virtuales, estando formado cada transductor de recepción virtual por M' transductores de recepción adyacentes a los que se aplica una ley de retardo.

5 También opcionalmente, un procedimiento de tratamiento de señales ultrasónicas de acuerdo con la invención puede incluir una etapa adicional de reconstrucción de una imagen digital de la zona de interés a partir de la matriz sin ruidos de señales temporales, especialmente mediante un procesamiento de tipo focalización sintética en todos los puntos.

10 También se propone un programa de ordenador que puede ser descargado desde una red de comunicación y/o grabado en un soporte legible por ordenador y/o ejecutable por un procesador, incluyendo instrucciones para ejecutar las etapas de un procedimiento de tratamiento de señales ultrasónicas de acuerdo con la invención cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador.

También se propone un dispositivo de sondeo de ultrasonidos que incluye:

- 15 – una sonda que comprende una pluralidad de transductores de emisión de ultrasonidos y una pluralidad de transductores de recepción de ultrasonidos, y
- medios de control de los transductores y de procesamiento diseñados para implementar un procedimiento de tratamiento de señales ultrasónicas según la invención.

La invención se entenderá mejor con ayuda de la siguiente descripción, dada únicamente a título ilustrativo y en referencia a las figuras adjuntas, en las cuales:

- 20 – la figura 1 representa esquemáticamente la estructura general de un dispositivo de sondeo de ultrasonidos según un modo de realización de la invención,
- la figura 2 ilustra las etapas sucesivas de un procedimiento de adquisición y procesamiento de señales ultrasónicas implementado por el dispositivo de la figura 1 según un modo de realización de la invención,
- 25 – las figuras 3 y 4 ilustran un principio de emisiones/recepciones de ondas ultrasónicas implementado por el dispositivo de la figura 1,
- las figuras 5 y 6 ilustran mediante diagramas las distribuciones de valores singulares procedentes de las etapas intermedias del procedimiento de la figura 2,
- las figuras 7 y 8 ilustran de manera comparativa imágenes ultrasónicas obtenidas sin y
- 30 con la aplicación completa del procedimiento de la figura 2.

Con referencia a la figura 1, un dispositivo de sondeo 100 de un objeto 102 de acuerdo con un modo de realización de la invención comprende una sonda de ultrasonidos 104 presentando una caja 106, esto es un elemento de estructura indeformable que sirve como referencia, unida a la sonda 104, donde están dispuestos, por ejemplo, lineal o matricialmente, N transductores

35 $108_1, \dots, 108_N$ fijos o móviles.

El objeto 102 es, por ejemplo, una pieza mecánica que se quiere examinar mediante control no destructivo o bien, en un contexto médico, una parte del cuerpo humano que se quiere controlar de manera no invasiva. En el modo de realización de la figura 1, el objeto 102 se sumerge en un líquido, tal como agua 110, y la sonda 104 se mantiene distanciada del objeto
 5 102 para que el agua 110 los separe. Sin embargo, en otro modo equivalente de realización, la sonda 104 podría estar en contacto directo con el objeto 102.

Los transductores $108_1, \dots, 108_N$ están diseñados para emitir ondas ultrasónicas hacia el objeto 102 en respuesta a señales de control identificadas bajo la referencia general C, según direcciones principales paralelas entre sí, indicadas por flechas con línea de puntos en la figura
 10 1, y en un plano principal que es el de la figura.

Los transductores $108_1, \dots, 108_N$ también están diseñados para detectar los ecos de las ondas ultrasónicas que se reflejan sobre y 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 $108_1, \dots, 108_N$ desempeñan a la vez las funciones
 15 de emisión y recepción, pero también podrían estar previstos en cajas diferentes e independientes receptores diferentes de los emisores, siempre que cumplan los principios de la invención.

El dispositivo de sondeo 100 incluye además un circuito electrónico 112 de control de los transductores $108_1, \dots, 108_N$ de la sonda 104 y de procesamiento de las señales de medición S.
 20 Este circuito electrónico 112 está conectado a la sonda 104 para transmitir las señales de control C y para recibir las señales de medición S. El circuito electrónico 112 es, por ejemplo, el de un ordenador. Éste dispone de una unidad central de procesamiento 114, tal como un microprocesador, diseñada para emitir hacia la sonda 104 las señales de control C y para recibir de la sonda 104 las señales de medición S, así como de una memoria 116 donde se
 25 almacena un programa de ordenador 118.

El programa de ordenador 118 contiene en primer lugar instrucciones 120 para generar las señales C de control de los transductores $108_1, \dots, 108_N$, de manera que:

- se activan los transductores $108_1, \dots, 108_N$ como emisores para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas hacia una zona de interés del objeto 102,
- 30 – se activan los transductores $108_1, \dots, 108_N$ como receptores para recibir simultáneamente, después de cada emisión sucesiva, por parte de estos N receptores y durante un período de tiempo predeterminado, la profundidad de inspección deseada, N señales de medición que miden, en particular, ecos con ruido debidos a las reflexiones de cada emisión en la zona de interés.

35 El conjunto S de las $L \times N$ señales de medición así transmitidas por los transductores $108_1, \dots, 108_N$ es reenviado por la sonda 104 a la unidad central de procesamiento 114.

El programa de ordenador 118 también incluye instrucciones 122 para construir una matriz $K(t)$ de señales temporales ultrasónicas de tamaño $L \times N$, representando cada coeficiente $K_{ij}(t)$ de esta matriz la señal de medición recibida por el transductor 108_j en respuesta a la i -ésima emisión.

- 5 De manera opcional, el programa de ordenador 118 contiene además instrucciones 124 para realizar un filtrado temporal de la matriz $K(t)$, teniendo por objeto dicho filtrado eliminar cualquier información que se encuentre en tiempos de vuelo excluidos de la zona de interés en el objeto 102.

10 El programa de ordenador 118 comprende además instrucciones 126 para transformar la matriz $K(t)$ en una matriz $K(\omega)$ de señales de frecuencia por transformada de Fourier, ventajosamente por transformada de Fourier discreta, tras un muestreo temporal de los coeficientes de la matriz $K(t)$, o, aún más ventajosamente, por cálculo de FFT (del inglés "Fast Fourier Transform") si el número de muestras de cada coeficiente de la matriz $K(t)$ lo permite.

15 El programa de ordenador 118 comprende además instrucciones 128 para descomponer la matriz $K(\omega)$ de señales de frecuencia en valores singulares sobre una banda de frecuencias de manera que se diagonaliza. Esta operación conocida permite estimar las matrices U , S y V tales que:

$$K(\omega) = U.S.V^T = \sum_{i=1}^L \lambda_i(\omega) u_i(\omega) v_i^T(\omega),$$

20 donde $U = [u_1(\omega), \dots, u_L(\omega)]$ y $V = [v_1(\omega), \dots, v_N(\omega)]$ son matrices ortogonales de tamaños $L \times L$ y $N \times N$ respectivamente que contienen los vectores singulares de recepción y emisión, es decir, las invariantes de recepción y emisión del operador de retorno temporal y donde S es una matriz diagonal de tamaño $L \times N$ que contiene los L valores singulares $\lambda_i(\omega)$ de la matriz $K(\omega)$ ordenados en orden decreciente a una frecuencia de referencia determinada $\lambda_1(\omega) \geq \dots \geq \lambda_L(\omega) \geq 0$.

25 De manera opcional, el programa de ordenador 118 también contiene instrucciones 130 para reorganizar, dependiendo de la frecuencia, la matriz $K(\omega)$ en una matriz $\underline{K}(\omega)$ mediante la reorganización de los componentes de frecuencia de sus valores singulares y vectores singulares. En efecto, si el eco de un defecto se encuentra en un tiempo de vuelo cercano al de una interfaz del objeto 102 (por ejemplo, un defecto cercano al fondo de habitación), o si este eco tiene una amplitud cercana al ruido de la estructura, un mismo valor singular de la matriz S puede corresponder tanto al defecto como a la interfaz y al ruido estructural según las
30 frecuencias consideradas en el ancho de banda espectral de la sonda. Ventajosamente esto puede merecer una reorganización de las componentes de frecuencia de los valores singulares y de las correspondientes ocurrencias de frecuencia de los vectores singulares asociados de
35 manera que se optimiza la correspondencia entre los valores singulares y los defectos. Los valores propios reorganizados se denominan $\underline{\lambda}_1(\omega) \geq \dots \geq \underline{\lambda}_L(\omega) \geq 0$.

El programa de ordenador 118 comprende además instrucciones 132 para reducir el rango de la matriz $\underline{K}(\omega)$ (o el de la matriz $K(\omega)$ si no se ejecutan las instrucciones opcionales 130), eventualmente reorganizada, eliminando parte de los valores singulares $\underline{\lambda}_j$. Esta eliminación se realiza según un criterio de distinción entre valores singulares relacionados con los defectos y valores singulares relacionados con el ruido, siendo los primeros de amplitudes superiores a los segundos. Considerando que $\underline{\lambda}_1 \geq \dots \geq \underline{\lambda}_L \geq 0$, se trata de encontrar el valor P comprendido entre 1 y L tal que $\underline{\lambda}_1, \dots, \underline{\lambda}_P$, pueden considerarse relacionados con defectos que deben detectarse en el objeto 102 y $\underline{\lambda}_{P+1}, \dots, \underline{\lambda}_L$ pueden eliminarse por considerarse relacionados con ruido. En la práctica, la determinación de P se realiza mediante el estudio de la curva de disminución de las amplitudes de los valores singulares y, más precisamente, estudiando sus sucesivas diferencias de amplitud (por ejemplo $\underline{\lambda}_2 - \underline{\lambda}_1, \dots, \underline{\lambda}_N - \underline{\lambda}_{N-1}$) a una frecuencia de referencia, por ejemplo la frecuencia central del espectro de las frecuencias de la matriz $\underline{K}(\omega)$. A título de ejemplo no limitativo, P puede ser igual al índice asociado al valor singular para el cual la curva de disminución de los valores singulares presenta un cambio de curvatura, más precisamente una ruptura de la pendiente, lo que indica que hay una variación importante en las sucesivas diferencias de amplitudes entre valores singulares. Tal determinación de P puede hacerse forma conocida *per se* mediante regresión lineal sobre la hipótesis de una disminución lineal en dos regiones. En el caso de defectos pequeños idealmente separados entre sí, P es igual al número de defectos presentes en la zona de interés inspeccionada. Reducir el rango de la matriz $\underline{K}(\omega)$ equivale así sólo a conservar $Kf(\omega)$ en la siguiente ecuación:

$$\underline{K}(\omega) = Kf(\omega) + Kb(\omega)$$

donde

$$Kf(\omega) = \sum_{i=1}^P \underline{\lambda}_i(\omega) \underline{u}_i(\omega) \underline{v}_i^T(\omega) \quad \text{y} \quad Kb(\omega) = \sum_{i=P+1}^L \underline{\lambda}_i(\omega) \underline{u}_i(\omega) \underline{v}_i^T(\omega)$$

La matriz $Kf(\omega)$ así reconstituida es una matriz desprovista de ruidos de señales de frecuencia, habiendo sido eliminado el sub-espacio de ruido representado por la matriz $Kb(\omega)$.

El programa de ordenador 118 incluye además instrucciones 134 para transformar la matriz $Kf(\omega)$ en una matriz desprovista de ruido $Kf(t)$ de señales temporales por transformada de Fourier inversa, ventajosamente por transformada de Fourier discreta inversa, o, aún más ventajosamente, mediante el cálculo IFFT (del inglés "Inverse Fast Fourier Transform") si el número de muestras de cada coeficiente en la matriz $Kf(\omega)$ lo permite.

Finalmente, el programa de ordenador 118 contiene instrucciones 136 para realizar una focalización sintética en cualquier punto, tal como la definida en el artículo anteriormente mencionado de C. Holmes y col., sobre la matriz desprovista de ruido $Kf(t)$. Se reconstituye así una imagen digital de la zona de interés cuya calidad es mejor que si la focalización sintética se hubiera realizado sobre la matriz $K(t)$ no desprovista de ruido. En particular, se mejora la RSR.

En referencia a la figura 2, a continuación se describe un procedimiento 200 de adquisición y procesamiento de señales ultrasónicas implementado por el dispositivo 100 de la figura 1.

5 Durante la etapa 202, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 120 controla las secuencias de emisiones y recepciones de los transductores $108_1, \dots, 108_N$ para la adquisición de la matriz $K(t)$.

10 El número de estas secuencias es L , un número entero comprendido entre 1 y $N-M+1$, siendo M un número entero comprendido entre 1 y N el número de transductores adyacentes que forman la sub-apertura emisora que se desplaza a lo largo de la caja 106 de la sonda 104 en pasos de al menos un transductor. La elección del número M depende de la calidad deseada de la onda esférica emitida por la sub-apertura. Después de cada disparo, las señales se reciben en el conjunto de los N transductores, se digitalizan y transmiten al circuito electrónico 112. La figura 3 ilustra estas secuencias de emisiones y recepciones, referenciadas sucesivamente como $E1$ y $R1$, $E2$ y $R2$, $E3$ y $R3$, ..., EL y RL , donde los transductores activados se representan en gris.

15 En el caso en que $M \geq 2$, se aplican leyes de retardo predeterminadas a los transductores que constituyen la sub-apertura de M transductores. Éstas permiten la focalización de las ondas emitidas en un punto O situado a una profundidad de F mm bajo la sonda 104. El frente de onda emitido no se detiene en el punto O . Una onda se desvía de este punto y se propaga en el medio. Para un observador situado a una profundidad mayor que F , todo sucede como si la
20 onda divergente procediera de una fuente virtual situada en O . La fuente virtual creada no tiene una directividad perfectamente omnidireccional como la de una fuente puntual, sino que tiene una directividad angular de ángulo θ bastante amplia. Esta directividad se puede ajustar modificando los retardos aplicados a los transductores de la sub-apertura de manera que la onda emitida por la fuente virtual se dirija en una dirección privilegiada del objeto 102. Esto
25 mejora así la detección de los defectos en esta zona. La figura 4 ilustra el principio de las fuentes virtuales según dos leyes de retardo proporcionadas a modo de ejemplo.

30 Durante una etapa 204, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 122 construye la matriz $K(t)$, representando cada coeficiente $K_{ij}(t)$ de esta matriz la señal de medición recibida por el transductor 108_j en respuesta a la emisión i -ésima, digitalizándose esta señal para facilitar su procesamiento posterior.

35 Durante una etapa 206 opcional, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 124 realiza un filtrado temporal de la matriz $K(t)$, este filtrado diseñado para eliminar cualquier información que se encuentre en tiempos de vuelo excluidos de la zona de interés. Esta etapa 206 tiene por objeto facilitar a continuación la separación de dos sub-espacios representados por las matrices $K_f(\omega)$ y $K_b(\omega)$, en particular cuando los defectos a visualizar están cerca de una interfaz altamente ecogénica, tal como un fondo de pieza. Permite limitar la zona a visualizar a una cercanía próxima a los defectos, excluyendo en particular las interfaces

ecogénicas perturbadoras. Su principal interés reside en la imagen de grietas que se forman desde el fondo del objeto.

5 Durante una etapa 208, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 126 realiza una transformada de Fourier discreta de la matriz $K(t)$ para obtener la matriz $K(\omega)$ de señales de frecuencia.

Durante una etapa 210, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 128 diagonaliza la matriz $K(\omega)$ descomponiéndola en valores Durante

10 Durante una etapa opcional 212, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 130 reorganiza la matriz $K(\omega)$ en una matriz $\underline{K}(\omega)$ mediante la reorganización de los componentes de frecuencia de los valores y vectores singulares de las matrices de descomposición $S(\omega)$, $U(\omega)$ y $V(\omega)$ en nuevas matrices de descomposición $\underline{S}(\omega)$, $\underline{U}(\omega)$ y $\underline{V}(\omega)$.

De acuerdo con una primera variante de reorganización de los componentes de frecuencia de los valores y vectores singulares, para cada valor singular $\lambda_i(\omega)$, $1 \leq i \leq L$:

- 15 – se selecciona una ocurrencia de frecuencia de referencia de un vector singular asociado a $\lambda_i(\omega)$, por ejemplo el vector singular de la matriz U $u_i(\omega)$, anotándose esta ocurrencia de frecuencia de referencia como $u_i^{ref} = u_i[\omega_{ref}]$ (se trata generalmente de la frecuencia central del espectro de frecuencias de $K(\omega)$ para la que se observa una diferencia con el valor singular más alto),
- 20 – se calcula la fase de esta ocurrencia de frecuencia de referencia u_i^{ref} , esta fase se normaliza en el intervalo $[0, 1]$, y a continuación
- para cada frecuencia ω del espectro de frecuencias de $K(\omega)$:
 - se calculan las fases de las ocurrencias de frecuencia $u_k[\omega]$ de los otros vectores singulares de la matriz U y estas fases se normalizan en el intervalo $[0, 1]$,
 - se calcula la correlación entre la fase normalizada de u_i^{ref} y la fase normalizada de cada $u_k[\omega]$,
 - 25 • se determina el valor j de k para el cual la correlación es más fuerte, y
 - se asigna a $\lambda_i[\omega]$ el valor $\lambda_j[\omega]$, a $u_i[\omega]$ el valor $u_j[\omega]$ y a $v_i[\omega]$ el valor $v_j[\omega]$.

Se obtienen así nuevas matrices reorganizadas $\underline{S}(\omega)$, $\underline{U}(\omega)$ y $\underline{V}(\omega)$ y, por tanto, una nueva matriz reorganizada $\underline{K}(\omega) = \underline{U} \cdot \underline{S} \cdot \underline{V}^T$.

30 De acuerdo con una segunda variante de reorganización de los componentes de frecuencias de valores y vectores singulares, para cada valor singular $\lambda_i(\omega)$, $1 \leq i \leq L$:

- se selecciona una ocurrencia de frecuencia de referencia de un vector singular asociado a $\lambda_i(\omega)$, por ejemplo el vector singular de la matriz U $u_i(\omega)$, denominándose esta ocurrencia de frecuencia de referencia $u_i^{ref} = u_i[\omega_{ref}]$ y correspondiendo a una ocurrencia

de frecuencia máxima del valor singular $\lambda_i(\omega)$ (se trata generalmente también de la frecuencia central del espectro de frecuencias de $K(\omega)$),

- se calcula la fase de esta ocurrencia de frecuencia de referencia u_i^{ref} y a continuación,
- definiendo un incremento elemental $\Delta\omega$ que permite barrer iterativamente el espectro de frecuencias de $K(\omega)$:

- 5
- se calculan las fases de las ocurrencias de frecuencia $U_k[\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega]$ de los otros vectores singulares de la matriz U , se calcula la correlación entre la fase de u_i^{ref} y la fase de cada $u_k[\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega]$, se determina el valor j de k para el cual la correlación es más fuerte y se asigna a $\lambda_j[\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega]$ el valor $\lambda_i[\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega]$, a $u_j[\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega]$ el valor $u_i[\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega]$ y a $v_j[\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega]$ el valor $v_i[\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega]$,
 - 10
 - se considera que la nueva ocurrencia de frecuencia de referencia es la del vector singular que maximiza la correlación en la etapa anterior con la frecuencia $\omega_{\text{ref}} \pm \Delta\omega$ y se retoman los cálculos de correlación de la etapa anterior en $\omega_{\text{ref}} \pm 2\Delta\omega$
 - 15
 - se continua así de cercano en cercano la exploración de $K(\omega)$ en el ancho de banda espectral de la sonda hasta sus límites.

Se obtienen así también nuevas matrices $\underline{S}(\omega)$, $\underline{U}(\omega)$ y $\underline{V}(\omega)$ reorganizadas y, por tanto, una nueva matriz reorganizada $\underline{K}(\omega) = \underline{U} \cdot \underline{S} \cdot \underline{V}^T$.

La matriz reorganizada $\underline{K}(\omega)$ se descompone ahora en los valores singulares, en cada caso con los vectores singulares, optimizando sus correlaciones en todas las frecuencias, ya sea mediante una frecuencia de referencia constante elegida (primera variante) ya sea de cercano en cercano (segunda variante). Así, tras la reorganización de la matriz $\underline{K}(\omega)$, se asocia un defecto al mismo valor singular para todas las frecuencias de la banda espectral de la sonda. En la figura 5 se muestra un ejemplo de distribuciones de frecuencia de amplitud (A) de L valores propios. La disminución de la amplitud normalizada de estos valores propios, ya sea en promedio en el espectro de las frecuencias de la matriz $\underline{K}(\omega)$ o en una frecuencia central seleccionada, se ilustra por ejemplo en la figura 6: en este ejemplo, observamos una diferencia de amplitud significativa entre el primer y el segundo valor singular.

20

25

Durante la etapa 214, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 132 reduce el rango de la matriz $\underline{K}(\omega)$ (o el de la matriz $K(\omega)$ si la etapa opcional anterior no se ha ejecutado) conservando sólo

30

$$Kf(\omega) = \sum_{i=1}^P \lambda_i(\omega) \underline{u}_i(\omega) \underline{v}_i^T(\omega).$$

Durante la etapa 216, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 134 realiza la transformada de Fourier inversa discreta de la matriz $Kf(\omega)$ para obtener la matriz desprovista de ruido $Kf(t)$ de señales temporales.

35

Finalmente, durante una última etapa 218, la unidad de procesamiento 114 que ejecuta las instrucciones 136 reconstituye una imagen digital de la zona efectiva de interés mediante focalización sintética a partir de la matriz desprovista de ruido $K_f(t)$. A título comparativo, las figuras 7 y 8 ilustran ejemplos de imágenes digitales reconstituidas ya sea directamente
5 después de la etapa 204 de construcción de la matriz $K(t)$ para la figura 7, ya sea después de la ejecución del conjunto de las etapas 202 a 216 en la figura 8.

Cabe señalar que, en términos concretos, los ejemplos mostrados en las figuras 5 a 8 se obtuvieron mediante experimentación en una pieza con ruido de acero austenoferrítico de 70 mm de espesor en la que se mecanizó un defecto artificial del tipo Agujero Generatriz (AG) de
10 2 mm de diámetro, a una profundidad de 40 mm. Se trató de visualizar el defecto utilizando un captador de frecuencia central de 1,1 MHz y compuesto por 64 transductores emisores /receptores. Teniendo en cuenta el paso entre elementos (es decir, el ancho de un transductor añadido al espacio entre dos transductores vecinos), el captador (1,4 mm) y la profundidad del defecto, sólo se activaron los 32 elementos centrales. A título de ejemplo de aplicación, este
15 captador se colocó sobre el objeto 102 a 45° del defecto AG. Para mejorar la adquisición respecto a una adquisición FMC convencional, las emisiones se realizaron utilizando una sub-apertura constituida por $M = 7$ transductores (se activaron entonces 38 elementos centrales para 32 emisiones sucesivas) y la ley de retardo aplicada se definió para 7 transductores y de manera que las ondas emitidas se orientaran principalmente a 45°.

20 Se observa claramente que un procedimiento y un dispositivo como los detallados anteriormente permiten eliminar eficazmente el ruido de las señales ultrasónicas adquiridas en forma de una matriz $K(t)$ tal como la definida anteriormente.

Por otra parte, hay que mencionar que la invención no está limitada al modo de realización descrito anteriormente. De hecho, el experto en la materia entenderá que se pueden realizar
25 diversas modificaciones al modo de realización descrito anteriormente a la luz de las enseñanzas que aquí se describen.

En particular, las instrucciones de programa de ordenador podrían ser sustituidas por circuitos electrónicos dedicados a las funciones realizadas para ejecutar estas instrucciones.

De manera general, en las siguientes reivindicaciones, los términos utilizados no se deben de
30 interpretar en el sentido de limitar las reivindicaciones al modo de realización expuesto en esta descripción, sino que se deben de interpretar en el sentido de incluir todos los equivalentes que las reivindicaciones pretenden cubrir en virtud de su formulación y cuya previsión está al alcance del experto en la materia aplicando sus conocimientos generales a la puesta en funcionamiento de las enseñanzas aquí reveladas.

35

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento (200) para el tratamiento de señales ultrasónicas (S) resultantes de una adquisición mediante sondeo ultrasónico que comprende las etapas siguientes:
- 5 – control (202) de una pluralidad de transductores de emisión ($108_1, \dots, 108_N$) para L emisiones sucesivas de ondas ultrasónicas hacia un zona de interés (102),
- control (202) de N transductores de recepción ($108_1, \dots, 108_N$) de manera que reciben simultáneamente y durante un período de tiempo predeterminado, para cada emisión sucesiva, N señales de medición, midiendo en particular ecos con
- 10 ruidos debidos a reflexiones de la emisión considerada en la zona de interés,
- obtención (204) de una matriz (K(t)) de señales temporales ultrasónicas de tamaño $L \times N$, representando cada coeficiente $K_{ij}(t)$ de esta matriz la señal de medición recibida por el j-ésimo transductor de recepción debido a la i-ésima emisión,
- transformación (208) de la matriz (K(t)) de señales temporales en una matriz (K(ω))
- 15 de señales de frecuencia,
- descomposición en valores singulares (210) de la matriz (K(ω)) de señales de frecuencia,
- caracterizado porque incluye una etapa de eliminación de ruidos (208, 210, 212, 214, 216) de la matriz (K(t)) de las señales temporales ultrasónicas por:
- 20 – eliminación (214) de una parte de los valores y vectores singulares asociados resultantes de dicha descomposición en valores singulares (210) según un criterio predeterminado de distinción entre los valores singulares relacionados con los defectos y los valores singulares relacionados con ruido, refiriéndose dicho criterio a las diferencias de amplitud sucesivas entre los valores singulares en una serie
- 25 decreciente de amplitudes de los valores singulares determinadas a partir de la matriz (K(ω)) de las señales de frecuencia,
- reconstrucción (214) de una matriz (Kf(ω)) desprovista de ruidos de señales de frecuencia a partir de los valores y vectores singulares no eliminados, y
- transformación inversa (216) de esta matriz desprovista de ruido (Kf(ω)) de señales
- 30 de frecuencia en una matriz desprovista de ruido (Kf(t)) de señales temporales.
2. Procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas según la reivindicación 1, donde el criterio predeterminado de distinción entre valores singulares relacionados con defectos y valores singulares relacionados con ruido es un criterio de cambio de curvatura en esta serie decreciente de amplitudes de valores singulares.
- 35 3. Procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas según la reivindicación 1, donde el criterio predeterminado de distinción entre valores singulares relacionados con defectos y valores singulares relacionados con ruido es un criterio de ruptura de

pendiente determinada por regresión lineal en la hipótesis de una disminución lineal en dos regiones de esta serie decreciente de las amplitudes de valores singulares.

4. Procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, donde la transformación (208) y la transformación inversa (216) son transformaciones de Fourier discretas.
5. Procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, que comprende, antes de la etapa de eliminación de ruido (208, 210, 212, 214, 216), una etapa (206) de filtrado de la matriz $(K(t))$ de las señales temporales mediante supresión de cualquier información que se encuentre a tiempos de vuelo excluidos de la zona de interés (102).
6. Procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, que comprende una etapa (212) de reorganización de los componentes de frecuencias de los valores y vectores singulares de la matriz $(K(\omega))$ de la señales de frecuencia en base a una optimización de las correlaciones entre ocurrencias de frecuencia de los vectores singulares, de manera que se optimiza una correspondencia entre valores singulares y defectos en la zona de interés (102) y, por tanto, se optimiza el filtrado del ruido.
7. Procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, donde, en cada emisión sucesiva, se solicitan M transductores de emisión adyacentes y se aplica una ley de retardo a estos M transductores de emisión de manera que se emite una onda esférica proveniente de una fuente virtual (O) situada a una distancia predeterminada (F) de dicha pluralidad de transductores de emisión $(108_1, \dots, 108_N)$.
8. Procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 7, donde cada recepción es realizada por L' transductores de recepción virtuales, estando formado cada transductor de recepción virtual por M' transductores de recepción adyacentes a los cuales se aplica una ley de retardo.
9. Procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 8, que comprende una etapa adicional (218) de reconstitución de una imagen digital de la zona de interés (102) a partir de la matriz desprovista de ruido $(K_f(t))$ de señales temporales, en particular mediante un tratamiento de tipo de focalización sintética en cualquier punto.
10. Programa de ordenador (118) descargable desde una red de comunicaciones y/o grabado en un soporte legible y/o ejecutable por un procesador (114), caracterizado porque comprende instrucciones para llevar a cabo las etapas de un procedimiento

(200) de tratamiento de señales ultrasónicas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9 cuando dicho programa se ejecuta en un ordenador (112).

11. Dispositivo de sondeo de ultrasonidos (100) que comprende:

- una sonda (104) que comprende una pluralidad de transductores ($108_1, \dots, 108_N$) de emisión de ultrasonidos y una pluralidad de transductores ($108_1, \dots, 108_N$) de recepción de ultrasonidos, y
- medios (112) de control de los transductores y de procesamiento diseñados para poner en funcionamiento un procedimiento (200) de tratamiento de señales ultrasónicas según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9.

5

10

Figura 1

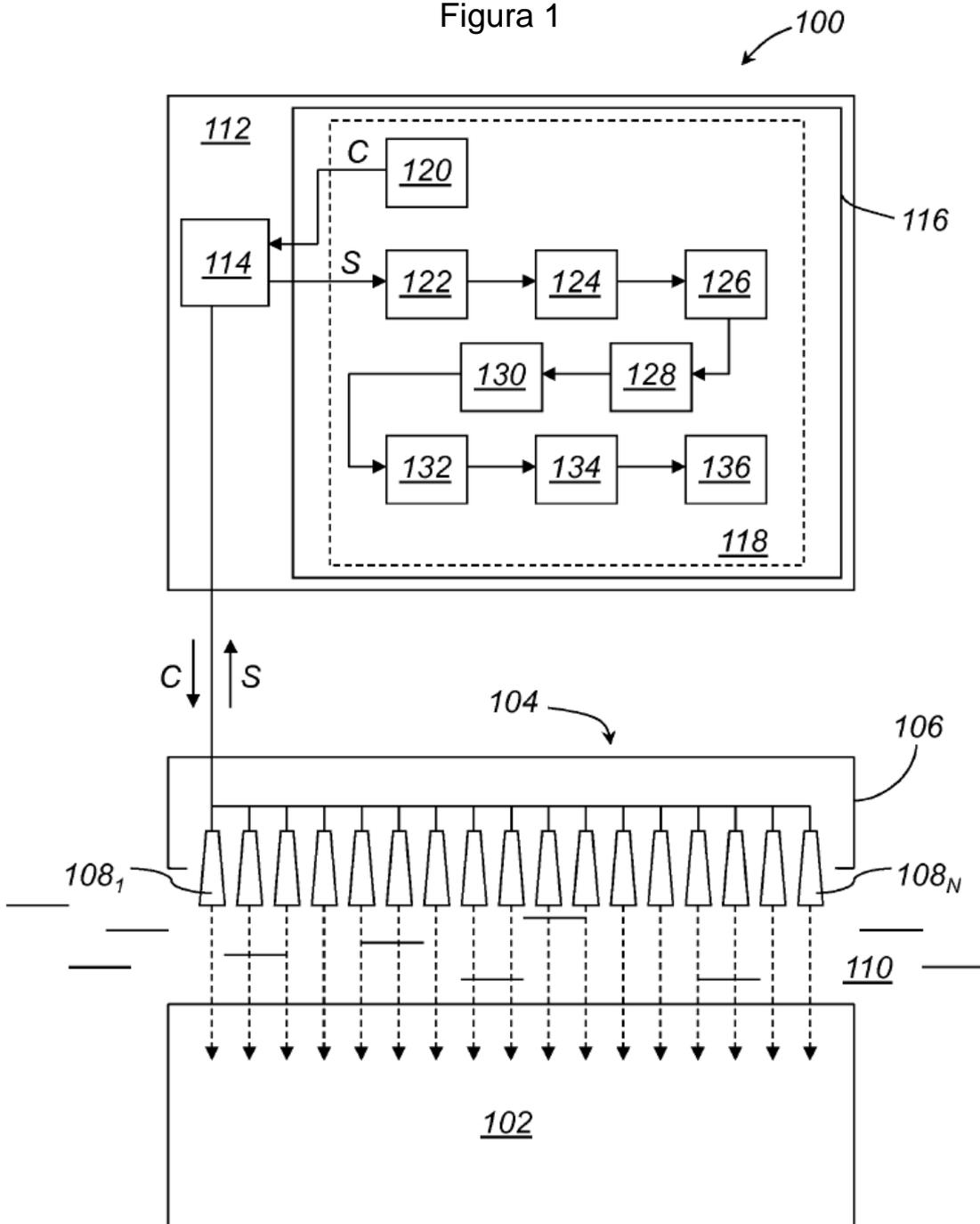


Figura 2

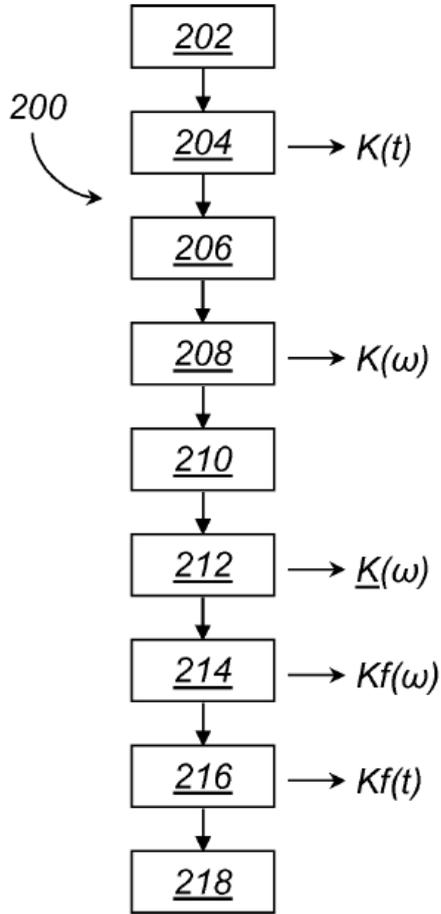


Figura 3

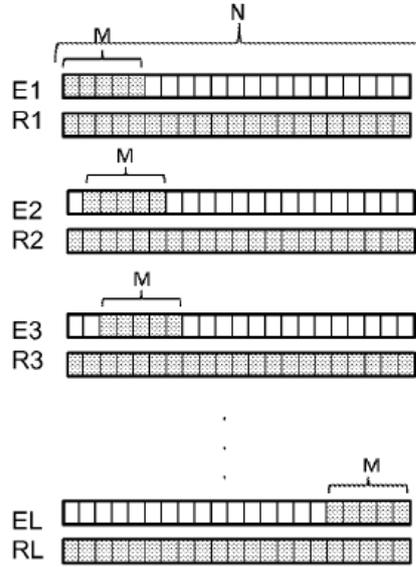


Figura 4

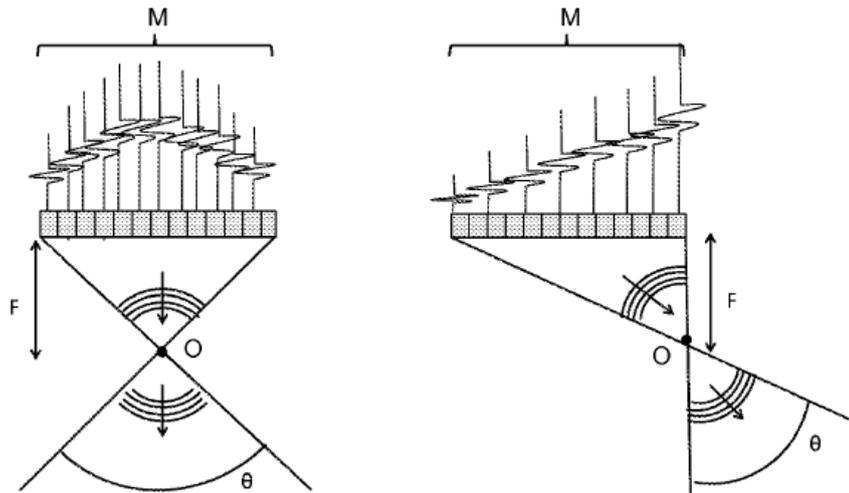


Figura 5

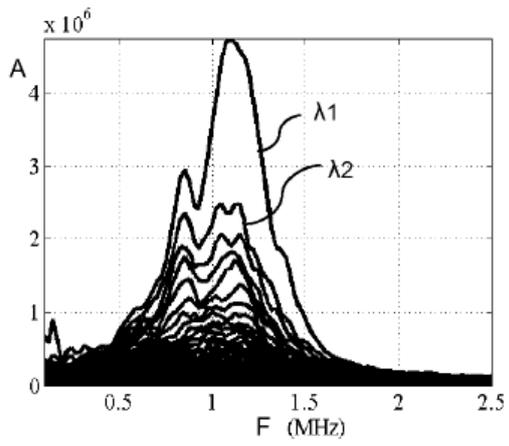


Figura 6

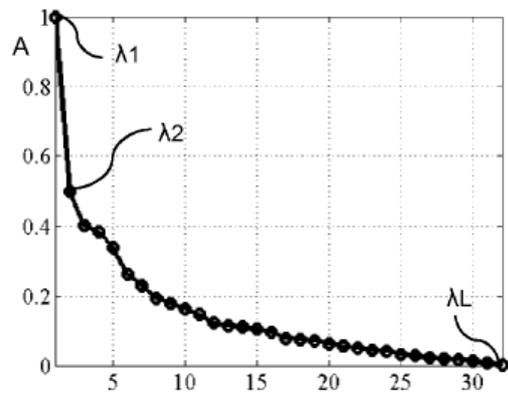


Figura 7

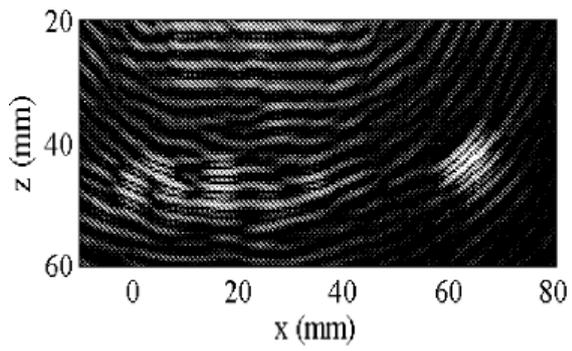


Figura 8

