

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 967 471**

51 Int. Cl.:

G01N 29/44 (2006.01)

G01N 29/04 (2006.01)

G01N 29/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.12.2021** **E 21212170 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.10.2023** **EP 4012402**

54 Título: **Obtención de imágenes de guías de ondas elásticas interconectadas por una unión**

30 Prioridad:

08.12.2020 FR 2012832

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

30.04.2024

73 Titular/es:

**COMMISSARIAT À L'ENERGIE ATOMIQUE ET
AUX ENERGIES ALTERNATIVES (50.0%)
Bâtiment "Le Ponant D" 25, rue Leblanc
75015 Paris, FR y
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DE
TECHNIQUES AVANCÉES (50.0%)**

72 Inventor/es:

**RECOQUILLAY, ARNAUD;
FRITSCH, JEAN-FRANÇOIS y
BOURGEOIS, LAURENT**

74 Agente/Representante:

VALLEJO LÓPEZ, Juan Pedro

ES 2 967 471 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

Obtención de imágenes de guías de ondas elásticas interconectadas por una unión

5 La invención se refiere al campo de los ensayos no destructivos de estructuras mecánicas o al seguimiento integrado de la salud y más precisamente a los métodos de obtención de imágenes de dichas estructuras con el objetivo de detectar la presencia de defectos y obtener imágenes de ellos.

10 La invención se refiere más precisamente a un método para obtener imágenes de guías de ondas elásticas interconectadas por una unión. La estructura está compuesta por una o más guías de sección constante, estando las guías interconectadas mediante una unión de cualquier forma.

15 Por ejemplo, la estructura que se va a representar se compone de varios carriles o de varios tubos o tuberías soldados entre sí. La invención también se aplica a la obtención de imágenes médicas con el objetivo de obtener imágenes de los huesos del cuerpo. La invención se aplica también a una estructura compuesta por una guía de ondas de sección constante conectada a una pieza terminal de cualquier forma.

20 El método de obtención de imágenes por muestreo lineal (LSM) permite obtener imágenes de ondas guiadas de alta frecuencia, a diferencia de los métodos de obtención de imágenes habituales que a menudo se limitan a frecuencias más bajas.

En efecto, el llamado método LSM modal explota todos los modos de propagación guiada, a diferencia de otros métodos de obtención de imágenes que se basan en la selección de un modo particular.

25 Un problema general a resolver consiste en adaptar este método de obtención de imágenes para visualizar estructuras tipo guías de ondas elásticas interconectadas por uniones de cualquier forma y sin tener acceso al interior de la estructura.

30 Las referencias [1] y [2] describen la aplicación del método de obtención de imágenes LSM modal en el caso de una estructura bidimensional como una placa o guía de sección constante. Sin embargo, el método descrito no tiene en cuenta el caso de varias guías conectadas por una unión de cualquier forma.

35 La referencia [3] desarrolla principios teóricos aplicables a uniones de guías de ondas pero solo para ondas acústicas y suponiendo que pueden emitir modos guiados y medir las correspondientes ondas difractadas en secciones de la guía, y por tanto para poder tener acceso a la sección de la guía, lo cual no siempre es posible.

La referencia [4] también describe un método para la propagación analítica de campos elásticos en guías de ondas que presentan una perturbación, aplicable a campos de referencia para uniones de guías de ondas.

40 La presente invención se refiere a un método de obtención de imágenes basado en el método de obtención de imágenes LSM modal aplicable a uniones de guías de ondas elásticas. El método tiene la ventaja de poder obtener imágenes de estructuras de formas complejas a alta frecuencia a partir de sensores colocados únicamente en la superficie de la estructura.

45 El objeto de la invención es un método de obtención de imágenes de una estructura compuesta por al menos una guía de ondas conectada a una unión, con la estructura que soporta modos de propagación guiada de ondas elásticas, estructura que contiene al menos un defecto, el método que comprende las siguientes etapas:

50 - Para al menos una frecuencia de funcionamiento, adquirir varias medidas de señales que se propagan en la estructura mediante una pluralidad de pares de sensores de ondas elásticas no colocalizadas, las mediciones se organizan en una matriz de medición $\mathcal{M}$ de dimensiones iguales al número de sensores del transmisor por el número de sensores del receptor,

55 - Determinar una pluralidad de modos de propagación guiados por la estructura,

- Corregir las mediciones a partir de señales ultrasónicas medidas o simuladas para la misma estructura en ausencia de defecto,

60 - Convertir matriz de medición $\mathcal{M}$ en una matriz de difracción de campo ondulatorio U ,

- Determinar en cada punto de una cuadrícula de muestreo un vector de prueba F característico de la estructura sin defecto, cuyos componentes son las proyecciones de un tensor de Green del dominio libre de defectos sobre las funciones transversales de los modos de propagación guiados,

65 - Aplicar un método de inversión digital para determinar un vector H de componentes modales tal que $U.H=F$ en

cada punto de una cuadrícula de muestreo,

- Determinar una imagen de la estructura a partir del vector H.

5 Según un aspecto particular de la invención, la matriz de difracción U se determina mediante la relación

$\mathcal{M} = -\mathcal{R}U\mathcal{E}$ con $\mathcal{R}$ una matriz cuyos coeficientes están determinados por la proyección de una función de recepción de un sensor sobre los modos de propagación guiados y $\mathcal{E}$ una matriz cuyos coeficientes están determinados por la proyección de una función de emisión de un sensor sobre los modos de propagación guiados.

10 Según un aspecto particular de la invención, el vector de prueba F se determina:

- Calculando los campos de ondas de referencia correspondientes a las sumas de los campos de ondas incidentes y los campos de ondas difractados por la unión en ausencia de un defecto en la estructura,

15 - Determinando el vector de prueba F a partir de los campos de ondas de referencia calculados.

Según un aspecto particular de la invención, los campos de ondas de referencia se calculan utilizando una resolución numérica de elementos finitos.

20 Según un aspecto particular de la invención, los campos de ondas de referencia se calculan utilizando una resolución numérica de elementos finitos en un área definida por la unión y a continuación se propagan analíticamente en cada guía de ondas.

Según un aspecto particular de la invención, los campos de ondas de referencia en cada guía de ondas se calculan a partir de los campos de ondas de referencia en la unión mediante las siguientes etapas:

- Determinar los campos de ondas difractados por la unión de los campos de ondas de referencia,
- Propagar los campos de ondas difractados por la unión en cada guía de ondas calculando la suma de los modos de propagación guiada ponderados por los coeficientes modales de los campos de ondas difractados,
- Determinar los campos de ondas de referencia en cada guía de ondas como la suma de los campos de ondas difractados propagados y los modos de propagación guiada.

35 Según un aspecto particular de la invención, la imagen de la estructura se determina a partir de la inversa de la norma del vector H en cualquier punto de la estructura de la que se va a representar la imagen.

Según un aspecto particular de la invención, las etapas del método se realizan para varias frecuencias operativas.

40 Según un aspecto particular de la invención, la imagen de la estructura se determina a partir de una suma de las normas al cuadrado de los vectores H calculados para diferentes frecuencias de funcionamiento, en cualquier punto de la estructura de la que obtener una imagen.

Según un aspecto particular de la invención, los sensores de ondas elásticas están colocados en la superficie de la estructura o integrados en la estructura.

50 La invención también se refiere a un dispositivo de obtención de imágenes que comprende una red de sensores de ondas elásticas destinados a ser colocados en una estructura de la que se van a obtener imágenes y una unidad de procesamiento capaz de recibir las señales adquiridas por los sensores y configurada para ejecutar las etapas del método de obtención de imágenes de acuerdo con la invención.

Según un aspecto particular de la invención, los sensores de onda elástica se seleccionan entre transductores piezoeléctricos, transductores acústicos electromagnéticos o sensores de rejilla de Bragg sobre fibra óptica.

55 Según un aspecto particular de la invención, los sensores de ondas elásticas están colocados en la superficie de la estructura o integrados en la estructura.

Otras características y ventajas de la presente invención aparecerán mejor al leer la descripción que sigue y basándose en los dibujos adjuntos siguientes.

60 [Fig. 1] La Figura 1 representa una estructura compuesta por tres guías de ondas y una unión,

[Fig. 2] La Figura 2 representa un diagrama que ilustra los modos de propagación en una guía de ondas elástica,

[Fig. 3] La Figura 3 representa un diagrama de flujo que detalla las etapas para implementar una realización del método objeto de la invención,

5 [Fig. 4] La Figura 4 representa un ejemplo de imagen obtenida para una estructura compuesta por tres guías de ondas interconectadas por una unión,

[Fig. 5] La Figura 5 representa un diagrama que ilustra una realización particular de la invención.

10 La invención tiene como objetivo proporcionar un método de obtención de imágenes para estructuras compuestas por guías de ondas de secciones constantes conectadas entre sí mediante una unión de cualquier forma.

En la Figura 1 se muestra esquemáticamente un ejemplo de una estructura 100 de la que se va a obtener una imagen en vista superior. Esta estructura se compone de tres guías de ondas idénticas 101,102,103, cada una de las cuales tiene una sección constante. Los tres tubos están interconectados mediante una unión 104 de cualquier forma (esférica para el ejemplo de la Figura 1).

15 Sin desviarse del alcance de la invención, el número de guías de ondas puede ser arbitrario. La estructura también puede estar compuesta por una única guía de ondas conectada por un extremo a una punta de cualquier forma. Las secciones de las guías pueden ser de formas variables (circulares, rectangulares, cuadradas o de cualquier forma), y los materiales que los constituyen también pueden ser diferentes.

Primero recordemos algunas nociones relativas a las guías de ondas elásticas.

25 Generalmente se modela una guía de ondas, en forma matemática, por el producto de una sección acotada Σ y un eje que se supone infinito. En la práctica, la longitud de la guía no es infinita pero la modelización mediante ondas guiadas es válida siempre que la longitud de la guía a lo largo de su eje sea grande en comparación con el diámetro de la sección. Esta propiedad es particularmente cierta para estructuras de tipo carril o tubería.

30 Las ondas ultrasónicas elásticas que se propagan en estas estructuras se pueden descomponer en varios modos de propagación guiada.

Cada modo guiado puede modelarse mediante el producto de una función de la variable transversal definida en la sección (llamada función transversal) y una función de la variable axial que define la posición a lo largo del eje de la guía.

35 La Figura 2 es un esquema de varios ejemplos de modos guiados en una estructura que tiene forma de tubo para una onda armónica en el tiempo, de frecuencia angular ω . Los ejemplos dados se generalizan al régimen transitorio mediante una transformada de Fourier con respecto al tiempo.

40 Los ejemplos de la Figura 2 corresponden a modos guiados de tipo torsión (201), compresión (202) y flexión (203). Para cada modo, representamos la función según una sección de la guía 211,212,213 y el modo guiado 201,202,203 resultante del producto de la función transversal y la función axial.

45 La función axial de la guía es de la forma $e^{\pm i\beta_n z}$, con z la coordenada a lo largo del eje de la guía, β_n el número de onda del modo n y el signo $\pm$ que depende de la dirección de propagación del modo. Dependiendo de los valores de β_n , hay tres tipos de modos:

- modos propagativos, para los cuales β_n es un número real y por lo tanto el modo oscila puramente a lo largo del eje;
- 50 - los modos evanescentes para los cuales β_n es imaginario puro y por lo tanto el modo aumenta o disminuye exponencialmente a lo largo del eje dependiendo del signo de la parte imaginaria de β_n ;
- los modos no homogéneos para los cuales β_n es complejo. También aumentan o disminuyen exponencialmente según el signo de la parte imaginaria de β_n .

55 La teoría de las ondas elásticas guiadas muestra que existe un número finito de modos de propagación a una frecuencia ω dada.

60 Dado que tener en cuenta la física o, de manera equivalente, las condiciones de radiación, implica que los otros modos son exponencialmente decrecientes, el conocimiento de los componentes modales de un campo ondulatorio solo según los modos propagativos permite describir este campo en cualquier punto suficientemente alejado de la fuente del campo para guías de ondas sin atenuación.

65 En el caso en que la atenuación a lo largo de la guía no sea despreciable, tenemos en cuenta los modos no homogéneos para los cuales la parte imaginaria del número de onda es baja.

Para describir las funciones transversales y el método LSM elastodinámico, es necesario introducir variables mixtas X, Y como se define en el documento [4], combinando componentes del campo de desplazamiento y componentes del tensor de esfuerzo.

5

Para el campo de desplazamiento u , en la guía r sea t^r su tensión axial, a saber:

$$t^r = \sigma(u)e_3^r,$$

Donde e_3^r representa el vector unitario del eje guía r .

10

Luego introducimos las variables X^r e Y^r

$$X^r(u) = \begin{pmatrix} t_1^r \\ t_2^r \\ u_3^r \end{pmatrix}$$

$$Y^r(u) = \begin{pmatrix} u_1^r \\ u_2^r \\ -t_3^r \end{pmatrix}.$$

15

Definimos además X_n^l , respectivamente Y_n^l , la variable X , respectivamente la variable Y , de la función transversal asociada al modo n de la guía l . Esta notación es inequívoca dado que el modo n de la guía l solo está definido en la guía l .

20

Cuando buscamos obtener imágenes de una estructura para identificar defectos internos (dominio de las pruebas no destructivas), estamos interesados en los campos difractados por este defecto. El campo difractado es el campo obtenido tras restar el campo incidente, que es el campo que se propaga en ausencia de un defecto. La suma del campo difractado y el campo incidente se llama campo total.

25

El campo difractado por un defecto en una guía de ondas se puede expresar según los diferentes modos. Más precisamente, como todos los campos que se pueden expresar sobre una base modal (base definida por los modos), el defecto puede caracterizarse por la difracción de los diferentes modos, representada en una matriz de difracción.

30

Podemos definir por tanto la matriz de difracción S como la proyección de los campos difractados asociados a los diferentes modos incidentes sobre las funciones transversales asociadas a los diferentes modos, y todo ello siguiendo las direcciones de propagación en las guías. Por tanto, la matriz de difracción presenta cuatro bloques en una guía sencilla, correspondiente respectivamente a un campo incidente que se propaga en la dirección de coordenadas axiales crecientes, respectivamente decrecientes, para un campo difractado que se propaga en la dirección de coordenadas axiales crecientes, respectivamente decrecientes. Por tanto tenemos dos bloques en transmisión y dos bloques en reflexión.

35

La matriz de difracción S permite describir la difracción por el defecto de cualquier campo incidente.

40

El caso de dos guías se generaliza fácilmente a N guías con N estrictamente mayor que 2, definiendo los N^2 bloques de la matriz de difracción, estos bloques corresponden a los campos difractados que se propagan en las N guías para los diferentes campos incidentes que se propagan en estas N guías.

45

En el caso de una guía 101 conectada a una unión 104 (como se muestra en la Figura 1), la difracción de la unión y del defecto se tratan por separado. Consideramos por un lado el campo total asociado a la unión 104 en ausencia de defecto para un modo incidente. Este campo total se llama campo de referencia y se representa $u_n^{j,ref}$ para el n -ésimo modo incidente u_n^j de la guía j . Corresponde a la suma del campo incidente y el campo difractado en la unión 104.

50

Por otro lado, si consideramos la presencia de un defecto en la estructura 100, este defecto también genera un campo difractado. El campo difractado por el defecto corresponde a la difracción por el defecto del campo de referencia.

55

El documento [1] describe la aplicación de un método de resolución digital llamado LSM (Método de muestreo

lineal) a la obtención de imágenes de guías de ondas elásticas. Este método se basa en la matriz de difracción S que corresponde a la proyección, sobre las funciones transversales de los modos de las diferentes guías, de los diferentes campos difractados asociados a los campos de referencia, en otras palabras, los campos difractados asociados con el único defecto del que se va a obtener una imagen.

5

Tenga en cuenta que el método LSM es aplicable tanto cuando todos los bloques de la matriz son accesibles como cuando solo lo son ciertos bloques, es decir, cuando solo se han emitido determinados campos de referencia y se han medido determinados campos difractados.

10 La Figura 3 muestra, en un organigrama, las etapas para implementar un método de obtención de imágenes de una estructura del tipo descrito en la Figura 1.

La invención se implementa por medio de sensores elásticos de ondas ultrasónicas 110,111.

15 Los sensores se seleccionan entre transductores piezoeléctricos, transductores acústicos electromagnéticos (por ejemplo de tipo EMAT o parches magnetostrictivos) o sensores de rejilla de Bragg sobre fibra óptica.

Los sensores 110,111 pueden colocarse en la superficie de la estructura o integrarse en ella en ubicaciones seleccionadas suficientemente alejadas de los defectos y la unión.

20

Cada sensor 110,111 está conectado a una cadena de adquisición de señales y todos los sensores están conectados a una unidad de procesamiento 120 que está configurada para ejecutar el método de obtención de imágenes según una de las realizaciones de la invención.

25 La unidad de procesamiento 120 puede realizarse en forma de software y/o hardware a partir de un procesador y una memoria. El procesador puede ser un procesador genérico, un procesador específico, un circuito integrado específico para una aplicación (también conocido con el nombre en inglés de ASIC de "Application-Specific Integrated Circuit") o una matriz de puertas lógicas programable en campo (también conocida por su nombre en inglés FPGA de "Field-Programmable Gate Array").

30

Los resultados proporcionados por la unidad de procesamiento pueden visualizarse en una pantalla de ordenador o directamente en una interfaz que forma parte del dispositivo.

35 Para obtener imágenes de una zona de inspección de la estructura 100, los sensores pueden estar dispuestos a ambos lados o solo a un lado del área de la que se va a obtener la imagen. Sus posiciones pueden determinarse aleatoriamente o siguiendo un patrón regular.

Cada sensor puede combinar tanto la función de transmisor como de receptor o solo una de las dos funciones.

40 El método objeto de la invención comienza con una primera etapa 400 de adquisición de mediciones de señales ultrasónicas mediante los diferentes sensores que actúan como sensores receptores. Se pueden considerar diferentes métodos de adquisición, por ejemplo una adquisición secuencial durante la cual cada transmisor genera sucesivamente una onda elástica en la estructura y todos los receptores efectúan una medición de la señal propagada para cada onda elástica emitida.

45

En una segunda etapa 401, aplicamos a continuación una transformada temporal de Fourier a las mediciones, y determinamos los diferentes modos guiados a partir de la estructura de referencia mediante un método numérico, por ejemplo un método de tipo "SAFE".

50 El método objeto de la invención es aplicable a una o más frecuencias del ancho de banda. Por lo tanto seleccionamos en la etapa 401 una frecuencia de interés.

En una etapa siguiente 402, las señales de corrección se restan de las mediciones, correspondientes a las señales ultrasónicas adquiridas en la misma configuración en la estructura 100 pero en ausencia de defecto. Estas señales se pueden obtener, por ejemplo, mediante una medición en la estructura 100 sana, sin defecto, o por cálculo de elementos finitos o por simulación, en este último caso, los modos guiados determinados en la etapa 401 se utilizan para obtener estas señales.

60 Las medidas se agrupan en una matriz $\mathcal{M}$ cuyas filas corresponden a las emisiones y las columnas corresponden a los receptores. Cada medición consta de una secuencia de muestras obtenidas durante una duración de adquisición predeterminada. Dicho de otro modo, las mediciones se caracterizan por tres dimensiones: el índice del transmisor, el índice del receptor y el índice de la muestra temporal.

65 En una variante de realización, varios transmisores pueden transmitir señales simultáneamente. De forma general, la secuencia de mediciones se puede llevar a cabo de varias maneras variando la secuencia y el número de

emisiones, recepciones y también la duración de la adquisición. En particular, las emisiones pueden ser simultáneas o sucesivas por varios sensores.

5 Para aplicar el método de obtención de imágenes LSM modal, es necesario poder determinar la matriz de difracción correspondiente al defecto a identificar en la estructura. El método más natural para obtenerlo es entonces emitir sucesivamente cada modo guiado y medir los componentes modales de los correspondientes campos difractados.

10 Este método es difícil de aplicar en la práctica: los coeficientes modales son las proyecciones de los campos sobre las funciones transversales de los modos en la sección de la guía, y es necesario tener acceso a estos últimos para calcularlos.

Asimismo, para aplicaciones concretas, no es realista transmitir cada modo por separado.

15 Una solución propuesta en la referencia [2] consiste en establecer un vínculo entre las medidas adquiridas en la superficie de la guía de ondas y la matriz de difracción. El principio es el siguiente: considere un conjunto de fuentes y receptores colocados en la superficie de la guía de ondas. El número, posiciones y tipos (piezoelectricos, EMAT...) de sensores que actúan como fuentes pueden ser idénticos o diferentes a los que actúan como receptores. Se supone que las fuentes y los receptores están ubicados lejos del defecto a lo largo del eje. En estas condiciones, es posible descomponer los campos medidos por los receptores para cada fuente como combinaciones de los modos guiados, y retener en esta combinación solo las contribuciones de los modos propagativos, habiéndose atenuado, hipotéticamente, las demás contribuciones antes de llegar a los sensores.

20 De las enseñanzas del documento [1] mostramos que la matriz de difracción S , e incluso directamente la matriz del sistema LSM U , se puede obtener de la matriz de medición $\mathcal{M}$ gracias a la inversión de dos matrices de emisión ε y recepción $\mathcal{R}$ gracias a la siguiente relación:

$$\mathcal{M} = -\mathcal{R}U\varepsilon. \quad (1)$$

30 Las matrices de emisión ε y de recepción $\mathcal{R}$ dependen únicamente de los modos guiados, y de las fuentes y receptores. Tenga en cuenta que el número de fuentes y receptores puede ser mayor que el número de modos de propagación, las matrices R y ε en general son rectangulares, y entonces el sistema debe resolverse en el sentido de mínimos cuadrados.

35 En una etapa 403 del método, por tanto determinamos las matrices de emisión ε y de recepción $\mathcal{R}$ de la siguiente manera.

Más precisamente, considere el caso en el que todos los sensores están colocados en la superficie de la misma guía l , y representemos su superficie Γ_l . De esto se puede deducir directamente el caso en que las fuentes y los receptores estén distribuidos en diferentes guías o estén integrados en las guías.

40 Considere un número M_r de receptores y un número M_e de transmisores, con funciones respectivas de recepción y transmisión $f_n^r, n = 1, \dots, M_r$ y $f_n^e, n = 1, \dots, M_e$, estando definidos los soportes de estas funciones en la superficie de la guía Γ_l . Las funciones de recepción y transmisión están definidas por las características de los sensores (su tipo, la potencia de transmisión...).

45 Tenga en cuenta que estas funciones son vectoriales, para representar una sensibilidad diferente a diferentes componentes del campo de onda, en movimiento o bajo tensión, emitido o recibido por un sensor. Los coeficientes de las matrices. $\mathcal{R}$ y ε entonces tienen la expresión:

$$50 \quad R_{ij} = \int_{\Gamma_l} f_i^r(x) \cdot \begin{pmatrix} x_j^l \\ y_j^l \end{pmatrix} dx$$

$$E_{ij} = \int_{\Gamma_l} f_j^e(x) \cdot \begin{pmatrix} x_i^l \\ y_i^l \end{pmatrix} dx$$

55 Con $\begin{pmatrix} x_j^l \\ y_j^l \end{pmatrix}$ el j -ésimo modo de guía l , escrito en variables mixtas XY , lo cual depende de las características de la guía.

En el caso de que los sensores estén colocados en diferentes guías (por ejemplo, las guías 101,102,103 en el ejemplo de la Figura 1), las matrices $\mathcal{R}$ y ε están construidas en bloques, con los bloques extradiagonales que son cero. En efecto, vemos en las expresiones anteriores que, para la matriz $\mathcal{R}$, cada fila corresponde a un sensor mientras que cada columna corresponde a un modo guiado. Este sucede siempre en el caso de sensores colocados sobre varias guías, pero los modos guiados corresponden a las diferentes guías. De este modo, el coeficiente correspondiente a la integral para un sensor sobre una primera guía para un modo asociado a otra guía es cero. Este análisis también es válido para la matriz ε invirtiendo las filas y columnas.

De este modo, la matriz de emisión ε tiene por dimensiones el producto de la suma del número de transmisores en cada guía por la suma del número de modos guiados propagativos en cada guía. La matriz de recepción $\mathcal{R}$ tiene las dimensiones del producto de la suma del número de receptores en cada guía por la suma del número de modos guiados propagativos en cada guía.

En una etapa 404, a continuación resolvemos la ecuación (2), por ejemplo en el marco de mínimos cuadrados, para determinar la matriz U :

$$U = -(\mathcal{R}^* \mathcal{R})^{-1} \mathcal{R}^* \mathcal{M} \varepsilon^* (\varepsilon \varepsilon^*)^{-1},$$

Donde $*$ representa el operador conjugado complejo.

En la práctica, la matriz U depende directamente de la matriz de difracción S .

Por abuso del lenguaje, posteriormente consideramos que la matriz U corresponde a la matriz de difracción S , las dos matrices que se diferencian en la práctica de una multiplicación por una matriz diagonal que depende únicamente de los modos guiados.

El método de resolución numérica LSM es un método de inversión que consiste en invertir un sistema de la forma:

$$UH(x) = F(x) \quad (3)$$

U es la matriz de difracción determinada en la etapa 404 que solo contiene las contribuciones de los campos difractados por el defecto del que se va a obtener la imagen.

$H(x)$ es un vector de componentes modales que se determinarán en cualquier punto x de una cuadrícula de muestreo que defina el área de la que se va a obtener la imagen. En otras palabras, $H(x)$ está vinculado a la imagen obtenida mediante el método objeto de la invención. Este es un vector que buscamos determinar para obtener imágenes de la estructura.

$F(x)$ es un vector que depende de las características de la estructura sin defecto de la que se va a obtener una imagen, es decir, la estructura sana. Este vector se puede calcular simulando la propagación de los modos guiados en la estructura sin defecto. Dicho de otro modo, $F(x)$ corresponde a la respuesta teórica de la estructura sin defecto.

Los componentes de este vector son las proyecciones del tensor de Green del dominio (que corresponde a la estructura sin defecto), sobre las funciones transversales de los modos guiados.

De este modo, en el caso de una estructura compuesta por N guías elásticas interconectadas entre ellas mediante una unión y teniendo cada una P_n modos propagativos, $1 \leq n \leq N$, el vector F se escribe en la forma:

$$F(x) = \begin{pmatrix} -\left(G(\cdot, x)p, \begin{pmatrix} x_j^I \\ y_j^I \end{pmatrix}\right)_{\Sigma_I} \\ \vdots \\ -\left(G(\cdot, x)p, \begin{pmatrix} x_{P_N}^N \\ y_{P_N}^N \end{pmatrix}\right)_{\Sigma_N} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Donde G representa el tensor de Green generalizado en variables XY , como se define en [2], $\begin{pmatrix} x_m^r \\ y_m^r \end{pmatrix}$ representa la m -ésima función transversal de la guía r , y $(\cdot, \cdot)_{\Sigma_r}$ una forma bilineal, donde Σ_r designa la sección de observación en la guía r .

$$\left(\begin{pmatrix} x^r(u) \\ y^r(u) \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x^r(v) \\ y^r(v) \end{pmatrix} \right)_{\Sigma_r} = \int_{\Sigma_r} (X^r(u) \cdot Y^r(v) + X^r(v) \cdot Y^r(u)) dx,$$

- 5 p es un vector de polarización unitario. El tensor de Green generalizado es de tamaño 6x6, y este parámetro de polarización p permite definir seis funciones independientes F seleccionando un componente de p igual a 1 y los demás a 0, por ejemplo $p = (1, 0, 0, 0, 0, 0)$.

En el caso de las ondas elásticas, los campos de ondas son vectoriales y la función de Green corresponde a un tensor de orden 2.

- 10 El tensor de Green se escribe en función de los campos de referencia.

Definimos la noción de campo de referencia $u_n^{j,ref}$ correspondiente a la respuesta de la estructura en ausencia de defecto, en modo guiado incidente n de la guía j . El campo de referencia corresponde al campo total difractado por la estructura sin defecto como se explica en el preámbulo.

- 15 Los campos de referencia se determinan como la solución del siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \sigma(u_m^{r,ref}) + \rho \omega^2 u_m^{r,ref} &= 0 \text{ dans } W \\ \sigma(u_m^{r,ref}) \nu &= 0 \text{ sur } \partial W \\ u_m^{r,ref} - u_m^r &\text{ est sortant,} \end{aligned} \quad (5)$$

- 20 Con div como el operador de divergencia, σ el tensor de esfuerzo definido por la ley de Hooke,

$$\sigma(u) = \frac{C}{2} (\nabla u + \nabla u^T)$$

- 25 , donde C es el tensor de Hooke, ρ la densidad, ω la frecuencia angular, W designa la estructura sin defecto, ν la normal saliente a W y u el campo de desplazamiento.

La condición "es saliente" es necesaria porque,

$$u_m^{r,ref} - u_m^r$$

- 30 sin ella, las dos primeras ecuaciones admiten dos soluciones libres, correspondientes respectivamente a una onda que se propaga desde el infinito hacia la unión y a una onda que se propaga desde la unión hacia el infinito. La física del problema dicta que solo conservamos la solución desde la unión hasta el infinito, correspondiente a una onda difractada por la unión y por tanto "saliente".

- 35 Por otro lado, los modos guiados en cada guía r (excluyendo la unión) se definen como el producto de una función de la variable transversal local x_s^r y una función oscilante y/o exponencialmente decreciente de la variable axial local x_3^r .

- 40 El sistema de ecuaciones (5) se puede resolver mediante un método de elementos finitos, utilizando condiciones de contorno artificiales equivalentes a la condición de radiación. Estas condiciones de contorno involucran operadores que actúan sobre las variables mixtas XY tal como se define en el documento [4]. Obtenemos así por resolución numérica los campos de referencia $u_m^{r,ref}$.

- 45 A continuación determinamos el vector $F(x)$ a partir de los campos de referencia usando el siguiente desarrollo.

La condición " $u_m^{r,ref} - u_m^r$ es saliente" se convierte en

$$X^l(u_m^{r,ref} - u_m^r) = T^l(Y^l(u_m^{r,ref} - u_m^r))$$

- 50 Sobre Σ_l , $l = 1, \dots, N$.

El operador T^l se define entonces como

$$T^l(y^l) = \sum_{n \in \mathbb{N}} (x_n^l, y^l)_{\Sigma_l} x_n^l. \quad (6)$$

- 5 Entonces podemos mostrar, gracias a la simetría del tensor de Green, que el vector $F(x)$ se expresa a partir de los campos de referencia según la siguiente expresión:

$$F(x) = \begin{pmatrix} (x^l(u_1^{l,ref}(x)), y^l(u_1^{l,ref}(x))) \cdot p \frac{e^{i\beta_1^l R^1}}{2} \\ \vdots \\ (x^N(u_1^{N,ref}(x)), y^N(u_1^{N,ref}(x))) \cdot p \frac{e^{i\beta_N^N R^N}}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

- 10 En la práctica, la elección de la polarización tiene solo una pequeña influencia en el resultado de la imagen en el caso de defectos interiores no vacíos. β_m^r es el número de onda en modo m de la guía r , R^r es la coordenada a lo largo del eje de la guía r de la sección Σ_r y $u_m^{r,ref}$ el campo de referencia asociado con el modo m de la guía r .

- 15 En resumen, el vector $F(x)$ se puede determinar mediante la relación (7) habiéndose calculado previamente los campos de referencia (campos difractados por la estructura en ausencia de defectos) resolviendo el sistema (5).

Después de determinar el vector $F(x)$ en la etapa 405, finalmente calculamos el vector final $H(x)$ (en la etapa 406) invirtiendo la ecuación (3).

- 20 El vector final H se calcula para cada posición x de la cuadrícula de muestreo, para una frecuencia angular ω y para una polarización p .

En una etapa final 407, se determina una función que indica un defecto, por ejemplo en la forma:

$$\varphi(x) = \log \left(\frac{1}{\|H(x)\|} \right).$$

- 25 En una variante de realización, si el método se aplica para varias frecuencias angulares, la función indicadora se puede expresar mediante la siguiente relación:

$$\varphi(x; p) = -\frac{1}{2} \log \left(\sum_{\omega} \frac{\|H(x; \omega, p)\|^2}{\max_{\tilde{x}} \|H(\tilde{x}; \omega, p)\|^2} \right).$$

- 30 La Figura 4 ilustra un resultado de imagen obtenida mediante el método objeto de la invención para una estructura del tipo de la Figura 1 que presenta un defecto D.

- 35 Ahora describimos una realización alternativa del cálculo de los campos de referencia $u_m^{r,ref}$ que luego permiten optimizar el tiempo de cálculo del vector $F(x)$.

- 40 Una dificultad inherente al método LSM modal generalizado a las uniones de guías es la necesidad de calcular numéricamente los campos de referencia de cada punto del área del que se va a obtener una imagen para calcular el vector $F(x)$. En efecto, como se ha expuesto anteriormente, este cálculo requiere resolver numéricamente el sistema de ecuaciones (5) en cada guía r vinculada a la unión.

- 45 En el caso de guías de ondas acústicas bidimensionales, el costo computacional adicional no es necesariamente problemático. Para casos elásticos o tridimensionales, este costo puede llegar a ser prohibitivo si el área de la que se van a obtener imágenes es grande.

- 50 Para paliar este inconveniente, una solución es acoplar la resolución del problema numérico a una propagación analítica de los campos de referencia. En efecto, al calcular los campos de referencia utilizando las ecuaciones (5), el dominio de cálculo coincide con el área de muestreo para el método LSM, delimitado por las secciones Σ_i .

La solución propuesta en este caso consiste en definir las secciones Σ_i cerca de la unión para el cálculo de elementos finitos, y a continuación propagar analíticamente el campo de referencia obtenido para las guías de sección constante.

Sea un campo de referencia $u_m^{r,ref}$ (asociado con la estructura sin defecto para el modo incidente m en la guía r) y sea u^{scat} el campo difractado por la unión sin defectos. $u^{scat} = u_m^{r,ref} - u_m^r$ en la guía r definida por la estructura como se muestra en la Figura 6. $u^{scat} = u_m^{r,ref} - u^{scat}$ en el resto de la guía (excluyendo la unión).

- 5 Donde $u_m^{r,ref}$ es la solución a (5). El campo de referencia $u_m^{r,ref}$ se calculó en el dominio de elementos finitos. Definimos los coeficientes modales del campo difractado:

$$A_n^l = \left(x_n^l, y^l(u^{scat}) \right)_{\Sigma_l}.$$

- 10 Tenga en cuenta que el cálculo de elementos finitos realizado casi directamente proporciona la variable $y^l(u^{scat})$: en efecto, el cálculo de elementos finitos proporciona $y^l(u_m^{r,ref})$ mediante el uso de los operadores T^l , y en el cálculo de los modos se obtiene la variable y_m^r por resolución numérica, por ejemplo mediante un método SAFE.

- 15 Para un punto X perteneciente a la guía j, ubicado al otro lado de la sección Σ_j con respecto a la unión, de coordenadas x_j en la referencia local de la guía j como se ilustra en la Figura 5, tenemos

$$u^{scat}(x) = \sum_n A_n^j u_n^j(x_j).$$

- 20 Por tanto, es posible propagar analíticamente los campos difractados fuera del área de elementos finitos, es decir, fuera del área cubierta por la unión. Para volver a los campos de referencia, basta con añadir el modo incidente en las guías correspondientes (la guía r para el campo $u_m^{r,ref}$), que se conoce porque no depende de la unión.

- 25 Una vez que los modos se han calculado mediante un método como SAFE y se ha resuelto el problema de elementos finitos en un área limitada alrededor de la unión, los valores de los campos de referencia en los demás puntos de la cuadrícula de muestreo pueden deducirse mediante un cálculo analítico de la propagación del campo incidente y del campo difractado por la perturbación, que no es muy costoso en términos de tiempo de cálculo y memoria.

- 30 A partir de cálculos aproximados de los campos de referencia, calculamos entonces el vector F(x) y aplicamos las etapas 405,406,407 del método descrito anteriormente.

Referencias

- 35 [1] Vahan Baroniano, Laurent burgués, Bastien Chapuis, Arnaud Recoquillay, Linear Sampling Method applied to Non Destructive Testing of an elastic waveguide: theory, numerics and experiments, Inverse Problems, 2018)
- [2] Méthodes d'échantillonnage appliquées à l'imagerie de défauts dans un guide d'ondes élastiques (Arnaud Recoquillay, tesis doctoral de la Universidad de París-Saclay, 2018)
- 40 [3] Laurent Bourgeois, Jean-François Fritsch, Arnaud Recoquillay, Imaging junctions of waveguides, Inverse Problems and Imaging, 2020
- [4] Vahan Baroniano, Anne-Sophie Bonnet-Ben Dhia, Éric Lunéville, Transparent boundary conditions for the harmonie diffraction problem in an elastic waveguide, Journal of Computational and Applied Mathematics, 2010
- 45

REIVINDICACIONES

1. Método para obtener imágenes de una estructura (100) compuesta por al menos una guía de ondas (101,102,103) conectada a una unión (104), con la estructura que soporta modos de propagación guiada de ondas elásticas, estructura (100) que contiene al menos un defecto, el método que comprende las siguientes etapas:
 - Para al menos una frecuencia de funcionamiento, adquirir (400) varias medidas de señales que se propagan en la estructura (100) mediante una pluralidad de pares de sensores (110,111) de ondas elásticas no colocadas, las mediciones se organizan en una matriz de medición $\mathcal{M}$ de dimensiones iguales al número de sensores del transmisor por el número de sensores del receptor,
 - Determinar (401) una pluralidad de modos de propagación guiados por la estructura,
 - Corregir (402) las mediciones a partir de señales ultrasónicas medidas o simuladas para la misma estructura (100) en ausencia de defecto,
 - Convertir (403,404) la matriz de medición $\mathcal{M}$ en una matriz de difracción de campo ondulatorio U,
 - Determinar en cada punto de una cuadrícula de muestreo (405) un vector de prueba F característico de la estructura (100) sin defecto, cuyos componentes son las proyecciones de un tensor de Green del dominio libre de defectos sobre las funciones transversales de los modos de propagación guiados,
 - Aplicar (406) un método de inversión digital para determinar un vector H de componentes modales tal que $U \cdot H = F$ en cada punto de una cuadrícula de muestreo,
 - Determinar (407) una imagen de la estructura a partir del vector H.
2. Método de obtención de imágenes según la reivindicación 1, en el que la matriz de difracción U se determina mediante la relación $\mathcal{M} = -\mathcal{R}U\mathcal{E}$ con $\mathcal{R}$ una matriz cuyos coeficientes están determinados por la proyección de una función de recepción de un sensor sobre los modos de propagación guiados y $\mathcal{E}$ una matriz cuyos coeficientes están determinados por la proyección de una función de emisión de un sensor sobre los modos de propagación guiados.
3. Método de obtención de imágenes según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que el vector de prueba F se determina (405):
 - Calculando los campos de ondas de referencia correspondientes a las sumas de los campos de ondas incidentes y los campos de ondas difractados por la unión (104) en ausencia de un defecto en la estructura (100),
 - Determinando el vector de prueba F a partir de los campos de ondas de referencia calculados.
4. Método de obtención de imágenes según la reivindicación 3, en el que los campos de ondas de referencia se calculan mediante resolución digital de elementos finitos.
5. Método de obtención de imágenes según la reivindicación 4, en el que los campos de ondas de referencia se calculan mediante resolución digital de elementos finitos en un área definida por la unión (104) y a continuación se propagan analíticamente en cada guía de ondas (101,102,103).
6. Método de obtención de imágenes según la reivindicación 5, en el que los campos de ondas de referencia en cada guía de ondas se calculan a partir de los campos de ondas de referencia en la unión mediante las siguientes etapas:
 - Determinar los campos de ondas difractados por la unión de los campos de ondas de referencia,
 - Propagar los campos de ondas difractados por la unión en cada guía de ondas calculando la suma de los modos de propagación guiada ponderados por los coeficientes modales de los campos de ondas difractados,
 - Determinar los campos de ondas de referencia en cada guía de ondas como la suma de los campos de ondas difractados propagados y los modos de propagación guiada.
7. Método de obtención de imágenes según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la imagen de la estructura se determina a partir de la inversa de la norma del vector H en cualquier punto de la estructura de la que se va a representar la imagen.
8. Método de obtención de imágenes según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, en el que las etapas del método se realizan para varias frecuencias de funcionamiento.
9. Método de obtención de imágenes según la reivindicación 8, en el que la obtención de imágenes de la estructura se determina a partir de una suma de las normas al cuadrado de los vectores H calculados para diferentes frecuencias de funcionamiento, en cualquier punto de la estructura de la que obtener una imagen.

10. Método de obtención de imágenes según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los sensores de ondas elásticas están colocados en la superficie de la estructura o integrados en la estructura.

5 11. Dispositivo de obtención de imágenes que comprende una red de sensores de ondas elásticas destinados a ser colocados en una estructura de la que se van a obtener imágenes y una unidad de procesamiento capaz de recibir las señales adquiridas por los sensores y configurada para ejecutar las etapas del método de obtención de imágenes según cualquiera de las reivindicaciones anteriores.

10 12. Dispositivo de formación de imágenes según la reivindicación 11, en el que los sensores de ondas elásticas se seleccionan entre transductores piezoeléctricos, transductores acústicos electromagnéticos o sensores de rejilla de Bragg sobre fibra óptica.

15 13. Dispositivo de formación de imágenes según cualquiera de las reivindicaciones 11 o 12, en el que los sensores de ondas elásticas están colocados en la superficie de la estructura o integrados en la estructura.

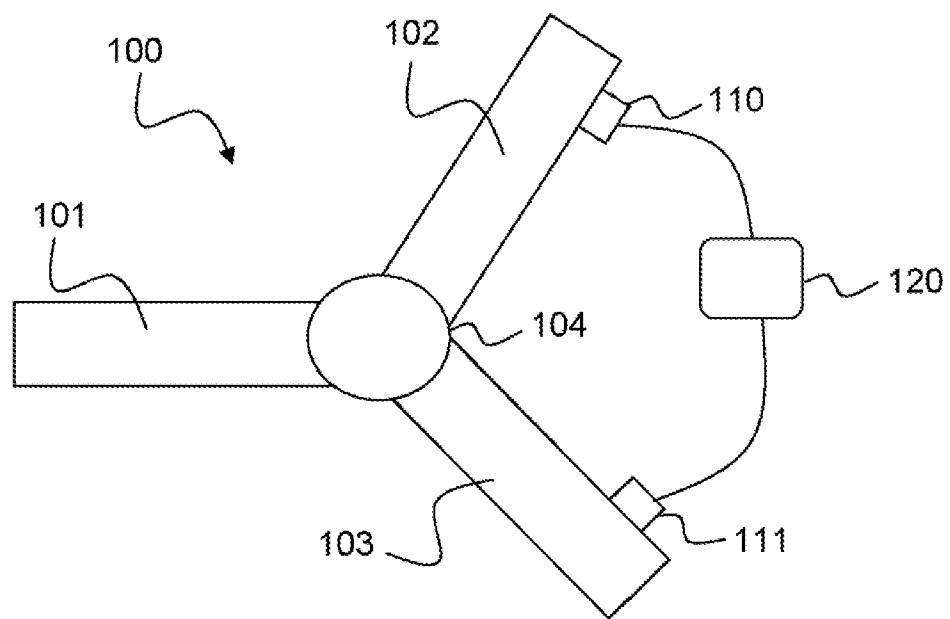


FIG.1

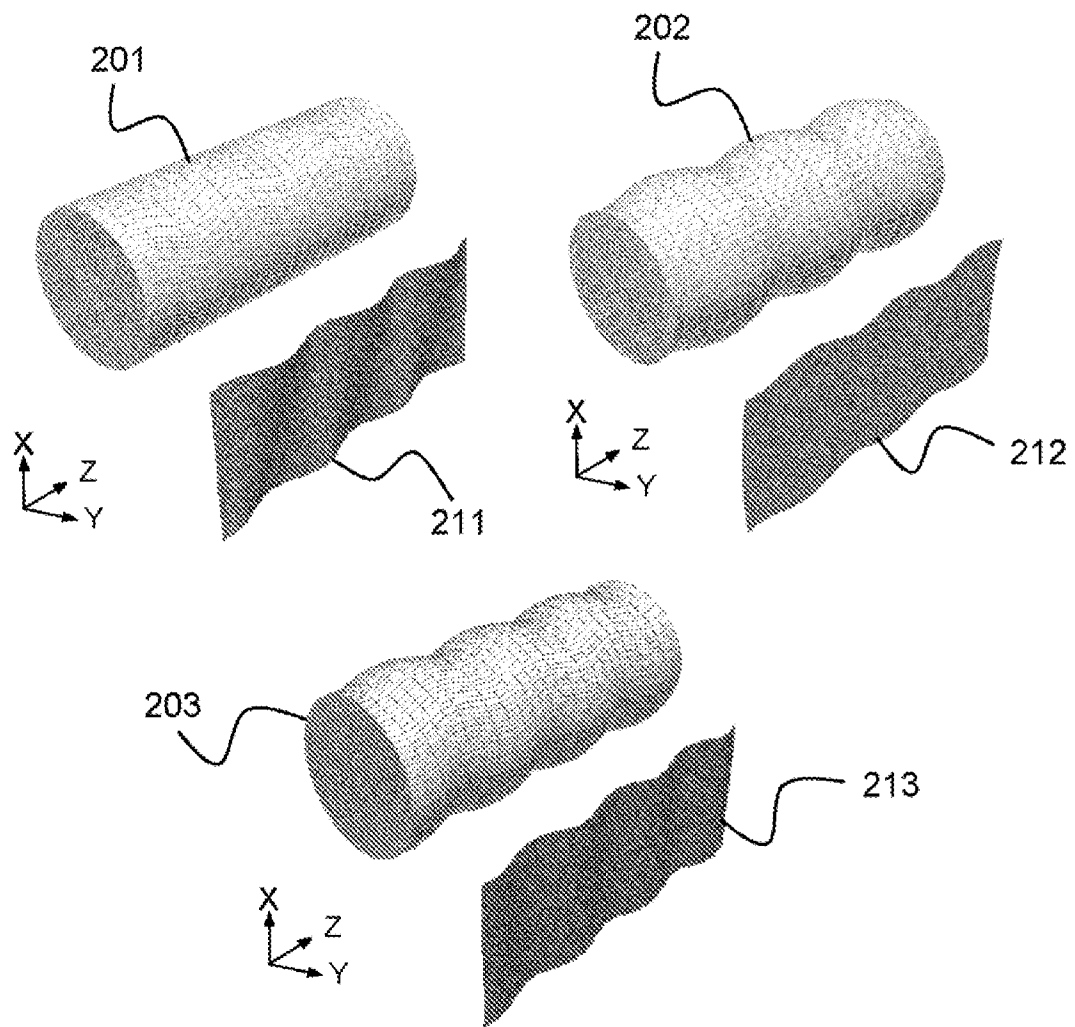


FIG.2

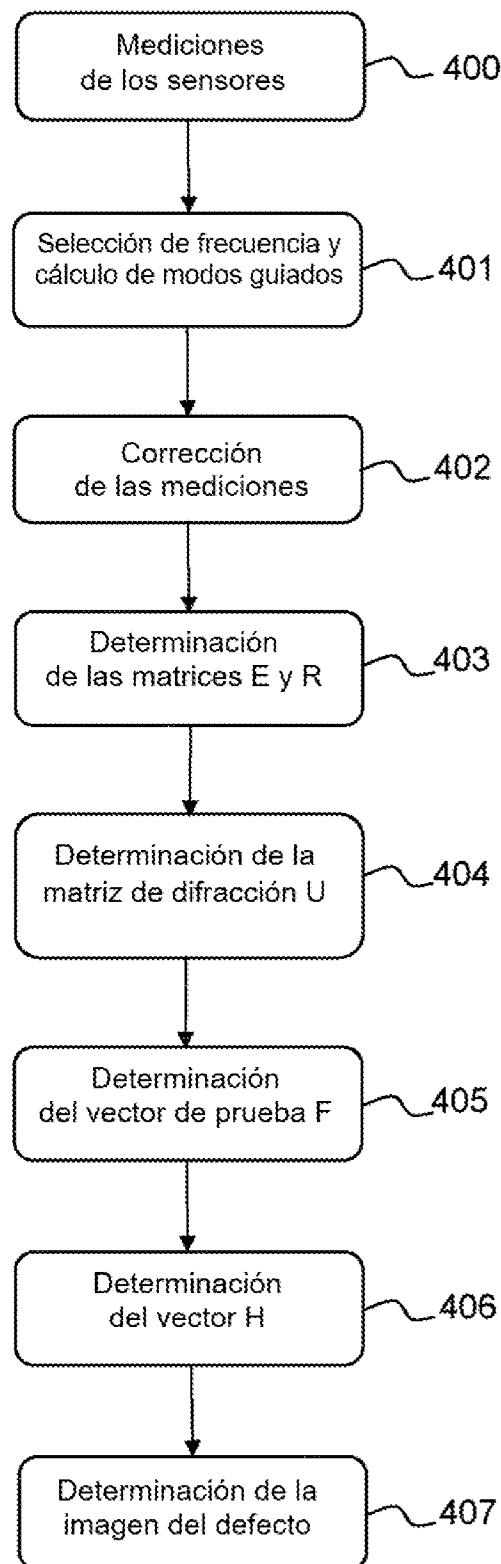


FIG.3

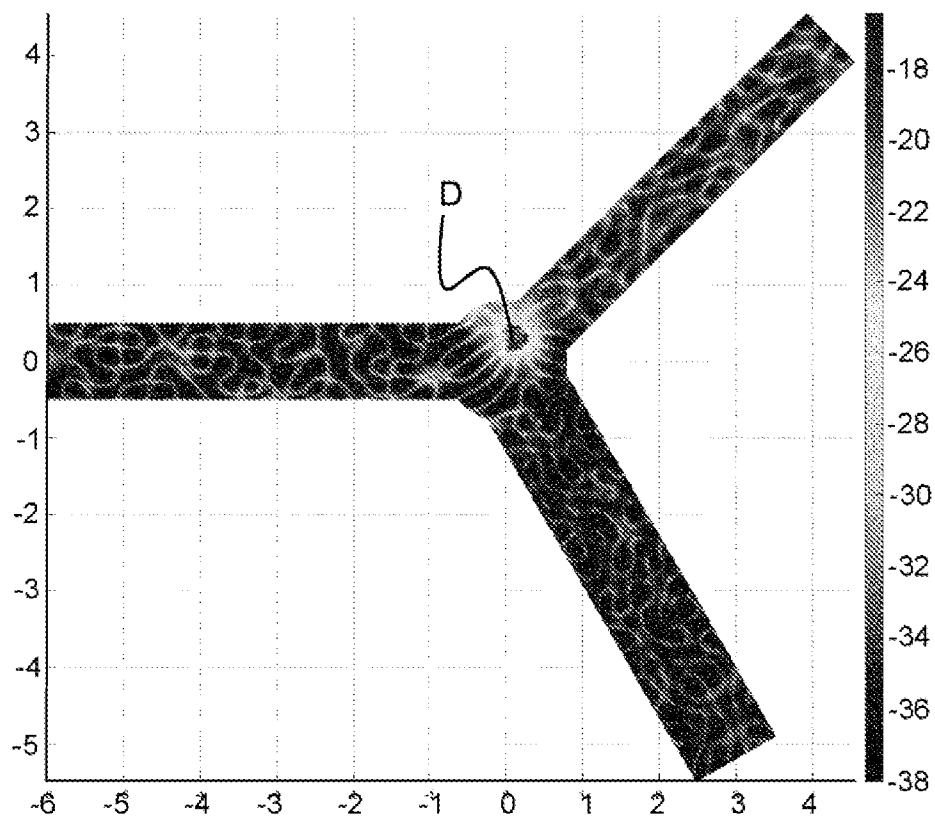


FIG.4

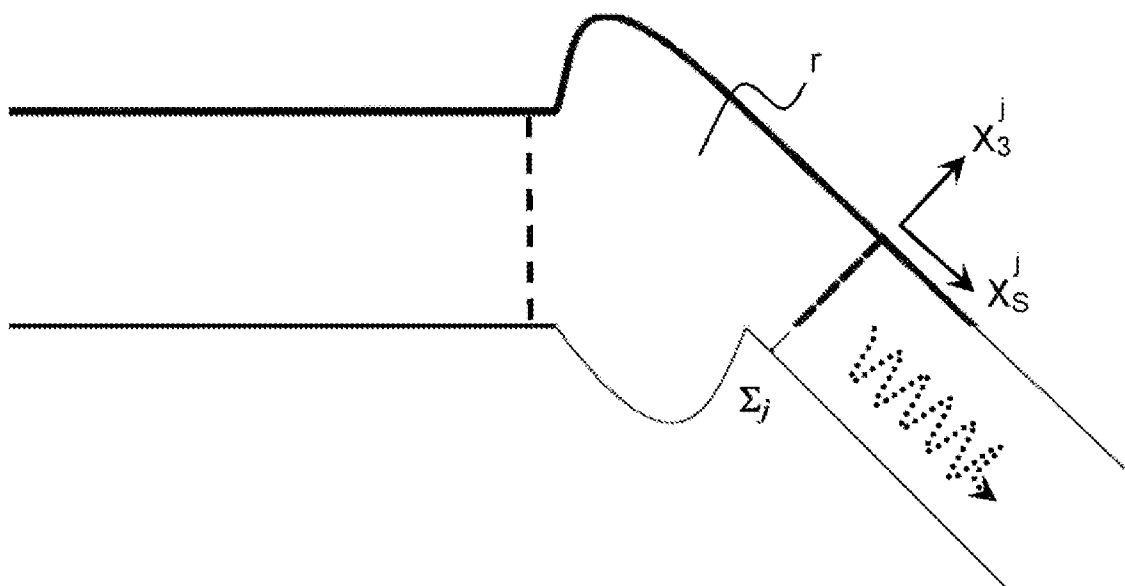


FIG.5