

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 992 669**

51 Int. Cl.:

**G01N 29/06** (2006.01)

**G01N 29/44** (2006.01)

**G01N 29/07** (2006.01)

**A61B 8/13** (2006.01)

**G01S 7/52** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.08.2021** **E 21190936 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **19.06.2024** **EP 3967239**

54 Título: **Procedimiento y sistema de caracterización ultrasónica de un medio**

30 Prioridad:

**15.09.2020 FR 2009312**

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

**16.12.2024**

73 Titular/es:

**SUPERSONIC IMAGINE (33.3%)**  
**ZAC de l'Enfant, 135 rue Emilien Gautier**  
**13290 Aix-en-Provence, FR;**  
**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE -CNRS- (33.3%) y**  
**ECOLE SUPÉRIEURE DE PHYSIQUE ET DE**  
**CHIMIE INDUSTRIELLES DE LA VILLE DE PARIS**  
**(33.3%)**

72 Inventor/es:

**LAMBERT, WILLIAM;**  
**AUBRY, ALEXANDRE;**  
**FINK, MATHIAS y**  
**FRAPPART, THOMAS**

74 Agente/Representante:

**VEIGA SERRANO, Mikel**

ES 2 992 669 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 y sistema de caracterización ultrasónica de un medio

## 5 SECTOR DE LA TÉCNICA

La presente descripción se refiere a procedimientos y sistemas de caracterización ultrasónica de un medio, y se aplica en concreto a la obtención de imágenes médicas o pruebas no destructivas y, de manera más general, a todos los campos en los que se puede utilizar la obtención de imágenes ultrasónicas.

## 10 ESTADO DE LA TÉCNICA

En el campo de la obtención de imágenes acústicas, se busca caracterizar un medio total o parcialmente desconocido sondeándolo activamente por medio de ondas ultrasónicas. Este es, concretamente, el principio del ecógrafo utilizado en la obtención de imágenes médicas.

La resolución de un sistema de obtención de imágenes acústicas se puede definir como la capacidad de discernir pequeños detalles de un objeto. En principio, un sistema de imágenes acústicas está limitado por la difracción y la resolución teórica viene dada por  $\lambda / 2$  (donde  $\lambda$  es la longitud de onda del sonido en el medio) o por la apertura angular finita del detector. En la práctica, sin embargo, la resolución suele verse deteriorada por variaciones de velocidad del sonido cuando el medio de propagación es heterogéneo.

De hecho, la mayoría de las veces en la obtención de imágenes acústicas, se considera que el medio es homogéneo, con una velocidad del sonido  $c_0$  constante. Ahora bien, no siempre se respeta la hipótesis de un medio homogéneo. Por ejemplo, en el caso de la ecografía hepática, la sonda se coloca entre las costillas del paciente. Las ondas acústicas atraviesan una sucesión de capas de grasa y músculo antes de llegar al órgano objetivo. Cada tejido blando tiene propiedades mecánicas diferentes. Por tanto, la velocidad del sonido dista mucho de ser homogénea y puede variar, por ejemplo, entre 1450 m/s para los tejidos adiposos y 1600 m/s para el hígado. Las variaciones de velocidad del sonido hacen que las ondas tengan diferentes desfases según los lugares a través de los cuales se propagan. Esto da como resultado una aberración del frente de onda acústica que conduce a una distorsión de la imagen ecográfica resultante y, por tanto, a una degradación de su resolución y contraste. Estas aberraciones pueden ser tales que no permitan reconstruir una imagen fiable, comprometiendo los resultados, por ejemplo, durante un examen médico.

Como se ilustra en las **figuras 1A a 1C**, los métodos de ecografía convencional utilizan una red 10 de transductores piezoeléctricos 11 que pueden emitir y/o recibir pulsos ultrasónicos de manera independiente. Se referencia la posición de cada uno de los transductores mediante el vector  $\mathbf{u}$ . Cuando una red de este tipo se coloca enfrente de un medio 20 que se quiere estudiar, este se puede insonificar y se pueden obtener imágenes de diferentes maneras.

Una primera manera para generar una imagen ecográfica del medio a estudiar es emitir un pulso ultrasónico desde uno de los transductores de la red cuya posición está identificada por el vector  $\mathbf{u}_{in}$  (**figura 1A, diagrama izquierdo**). Esto da lugar a una onda incidente cilíndrica (o esférica) divergente para una red 1D (o 2D) de transductores. Esta onda es reflejada por los difusores 21 del medio 20 y el campo retrodifundido es registrado por cada uno de los transductores 11 en función del tiempo. (**figura 1A, diagrama derecho**). Repitiendo esta operación con cada transductor utilizado sucesivamente como fuente, se mide el conjunto de respuestas a los pulsos  $R(\mathbf{u}_{out}, \mathbf{u}_{in}, t)$  entre cada transductor, donde el vector  $\mathbf{u}_{out}$  designa la posición del detector. Estas respuestas forman la matriz de reflexión.  $\mathbf{R}_{uu}(t)$  expresada en la base de los transductores. El interés de tal medición radica en el hecho de que esta matriz contiene toda la información sobre el medio estudiado, pudiéndose aplicar a continuación en la misma un conjunto de operaciones matriciales para obtener imágenes del medio, por ejemplo. En cambio, tal adquisición supone que el medio permanece fijo durante toda la duración de las mediciones, lo que puede resultar muy difícil en el caso de utilización in vivo. Adicionalmente, la energía emitida por un solo elemento piezoeléctrico es débil, lo que puede inducir una mala relación de señal sobre ruido.

Se conocen otros métodos para generar una imagen del medio a estudiar en la que se realizan emisiones focalizadas mediante una técnica de formación de haces (o "beamforming" en inglés). Como se muestra en la **figura 1B, diagrama izquierdo**, estos métodos consisten en aplicar a los transductores 11 un juego de retardos adecuados, basados en un modelo de velocidad homogéneo, para corregir los tiempos de recorrido de las ondas para que todos los pulsos lleguen juntos al punto focal objetivo, de posición  $\mathbf{r}_{in}$ . La hipótesis de velocidad del sonido retenida se denotará  $c_0$ . Debido a los límites físicos de la difracción, los ultrasonidos emitidos se concentran en una zona delimitada por la abertura de la sonda ecográfica. Con el fin de construir una imagen ecográfica, también se lleva a cabo una etapa de focalización de recepción. El conjunto de ecos captados por los elementos 11 de la red 10 es procesado luego para simular el efecto de una lente de recepción, como se describe en la **figura 1B, diagrama derecho**. Las señales recibidas por los transductores se vuelven a poner en fase desplazándolas temporalmente. Estos retrasos son idénticos a los aplicados en la emisión. En la fase de emisión, todas las señales interfieren en el punto de posición  $\mathbf{r}_{in}$ . En recepción, las señales procedentes de este mismo punto  $\mathbf{r}_{out} = \mathbf{r}_{in}$  interfieren electrónicamente sumando las señales al tiempo balístico  $t = (||\mathbf{u}_{out} - \mathbf{r}_{in}|| + ||\mathbf{u}_{in} - \mathbf{r}_{in}||) / c_0$ . Esta suma da el resultado final de la focalización de recepción. El

método ilustrado en la **figura 1B**, denominado método confocal de doble focalización en la emisión y la recepción permite obtener imágenes directamente de la reflectividad del medio con una resolución lateral limitada por la difracción, una excelente resolución axial limitada solamente por la duración del pulso inicial y un excelente contraste. No obstante, este método requiere mucho tiempo porque requiere focalizar físicamente en la emisión en cada uno de los puntos del medio o al menos a una profundidad determinada, en cada una de las líneas de la imagen.

El artículo de W. LAMBERT Y COL.: "Reflection matrix approach for quantitative imaging of scattering media", ARXIV.ORG, BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE CORNELL, 201 BIBLIOTECA OLIN UNIVERSIDAD DE CORNELL ITHACA, NY 14853, 4 de junio de 2020, describe que la formación de haces focalizados permite la síntesis, en emisión y en recepción, de una red de transductores virtuales que cartografían el conjunto del medio del que se van a obtener imágenes. Las respuestas entre elementos de esta red virtual forman una matriz de reflexión focalizada a partir de la cual es posible obtener mapas espaciales de las diferentes características de la onda que se propaga.

Otra técnica de obtención de imágenes, desarrollada más recientemente, consiste en generar una imagen del medio insonificando el medio con una serie de ondas planas. La **figura 1C** ilustra el principio de esta ecografía denominada de ondas planas, descrita, por ejemplo, en el artículo de G. Montaldo y col. "*Coherent plane-wave compounding for very high frame rate ultrasonography and transient elastography*" (IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect. Freq. Control 56 489-506, 2009). En la emisión, se aplican retrasos a cada señal (**figura 1C, diagrama izquierdo**) para la formación de un frente de onda inclinado por un ángulo  $\theta_m$  con respecto a la red de transductores 10. En la recepción (**figura 1C, diagrama derecho**), el campo retrodifundido por el medio,  $R(u_{out}, \theta_{in}, t)$  es medido por todos los sensores de posición  $u_{out}$  para una serie de ondas planas incidentes cuyo ángulo de incidencia se hace variar  $\theta_{in}$ . El conjunto de estas respuestas forma una matriz de reflexión.  $R_{ue}(t)$  definida entre la base de Fourier espacial (o base de ondas planas) de entrada y la base de los transductores de salida. Una vez registrada esta matriz, las señales se desplazan temporalmente antes de sumarse de manera coherente para focalizar digitalmente los datos en la emisión y recepción para cada punto de posición  $r_{in}$ . De este modo, el número de adquisiciones necesarias para formar una imagen ecográfica se reduce ventajosamente con respecto a la ecografía estándar (emisiones focalizadas) y esto, para un mismo nivel de contraste y resolución de la imagen ecográfica.

La **figura 2** ilustra la influencia de las aberraciones del medio en los métodos convencionales de obtención de imágenes ecográficas (**figuras 1A a 1C**). Estas aberraciones aparecen cuando la velocidad del sonido del medio  $c(r)$  no corresponde a la hipótesis de un medio homogéneo con una velocidad del sonido  $c_0$  constante. Los retardos inicialmente determinados a partir de esta hipótesis y a aplicar a cada uno de los transductores de la red en la emisión y recepción no son entonces óptimos para la evaluación de una imagen del medio. En la figura 2, una capa de aberración 22 induce una distorsión del frente de onda incidente. En la emisión o excitación, etapa 25, las leyes de retardo utilizadas no permiten concentrar la energía acústica en una zona delimitada por los límites de la difracción, zonas generalmente denominadas de mancha focal. En la recepción, en la etapa 26, las leyes de retardo utilizadas no permiten seleccionar correctamente las señales ultrasónicas procedentes del punto focal del medio y mezclan las señales procedentes de una mancha focal igualmente aberrada. Esto resulta en una doble aberración en el proceso de construcción de la imagen, lo que degrada enormemente su resolución. Luego se pueden volver a calcular nuevas leyes de retardo para compensar el efecto de la capa de aberración añadiendo, por ejemplo, una ley de retardo adicional a los retrasos generalmente utilizados en la formación de haces.

Sin embargo, estas correcciones de aberraciones no corrigen completamente ni estas aberraciones ni la degradación de la resolución. Es necesario estimar mejor la calidad de la focalización en el medio.

El documento "*The van Cittert-Zernike theorem in pulse echo measurements*", (Raoul Mallart y Mathias Fink, J. Acoust. Soc. Am. 90(5), noviembre de 1991) estudia las propiedades estadísticas del campo reflejado por un medio aleatorio en régimen de difusión simple. Se muestra concretamente que, para una onda incidente focalizada, la covarianza espacial del campo reflejado es proporcional, desde el campo lejano, a la transformada de Fourier de la función de apertura en transmisión. Dicho de otro modo, este teorema explica que el estudio de las propiedades estadísticas del campo reflejado en el campo lejano permite determinar la calidad de focalización de la onda incidente en el medio.

Sin embargo, este planteamiento solo proporciona una estimación global y media de la resolución de una imagen ecográfica, ya que requiere promediar estadísticamente las correlaciones del campo reflejado sobre un gran número de realizaciones del desorden, es decir, sobre un gran número de puntos de focalización de la onda incidente. No permite obtener una evaluación precisa y local de la calidad de focalización en cada punto de la imagen. Por otro lado, este planteamiento solo es válido en el régimen de difusión simple.

Por tanto, es necesario proponer un método que supere cada uno de los inconvenientes mencionados anteriormente.

## OBJETO DE LA INVENCION

La presente descripción tiene por objeto, según un primer aspecto, un procedimiento de caracterización ultrasónica de un medio, para determinar un valor de velocidad del sonido integrada en el medio, comprendiendo el procedimiento:

- una etapa de generación de una serie de ondas ultrasónicas incidentes ( $US_{in}$ ) en una zona de dicho medio, por

medio de una red (10) de transductores (11), siendo dicha serie de ondas ultrasónicas incidentes una base de emisión (i); y

- una etapa de generación de una matriz de reflexión experimental  $R_{ui}(t)$  definida entre la base de emisión (i) de entrada y una base de recepción (u) de salida;

- 5 - una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  que comprende unas respuestas del medio entre un transductor virtual de entrada (TV<sub>in</sub>) de posición espacial  $r_{in}$  y un transductor virtual de salida (TV<sub>out</sub>) de posición espacial  $r_{out}$ , tomándose las respuestas del transductor virtual de salida (TV<sub>out</sub>) en un instante temporal desplazado por un retraso adicional  $\delta t$  con respecto a un instante temporal de las respuestas del transductor virtual de entrada (TV<sub>in</sub>),

- 10 - una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para el transductor virtual de entrada (TV<sub>in</sub>) y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda en función de la velocidad del sonido  $c_0$  en el medio, y determinándose dicha imagen del frente de onda a partir:

- de la matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  y

- 15 - de una relación de propagación balística de tipo  $\delta t(\Delta r_{out}) = -sign(\Delta z_{out}) \cdot |\Delta r_{out}|/c_0$ , que permite extraer valores de la matriz de reflexión focalizada para construir la imagen del frente de onda, y en la que:

$\delta t$  es el retraso adicional,

- 20  $|\Delta r_{out}|$  es el módulo del vector entre el transductor virtual de entrada (TV<sub>in</sub>) y el transductor virtual de salida (TV<sub>out</sub>), siendo  $\Delta r_{out} = r_{out} - r_{in}$ ,

$\Delta z_{out}$  es la componente según un eje Z de profundidad del vector de posición espaciales  $\Delta r_{out}$  comprendiendo dicha imagen del frente de onda una mancha focal,

- una etapa de determinación del centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda, y la determinación de la posición de profundidad en la dirección del eje Z de esta mancha focal, denotándose esta posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(r_{in})$ , y

- 25 - una etapa de cálculo de una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)} r_{in}$ , a partir de la siguiente fórmula:

$$c^{(1)}(r_{in}) = c_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(0)}(r_{in})}{z_{in}}}$$

- 30 en la que  $z_{in}$  es la componente de profundidad según el eje Z del vector de posición espacial  $r_{in}$  del transductor virtual de entrada (TV<sub>in</sub>).

Gracias a estas disposiciones, el procedimiento permite, de manera ventajosa y no invasiva, sondear localmente la focalización de la onda ultrasónica en cualquier punto del medio y en cualquier dirección y con cualquier desplazamiento temporal con respecto a un tiempo balístico de propagación de la onda ultrasónica en el medio.

Este procedimiento permite entonces determinar una imagen de la focalización de la onda en el marco de referencia balístico, imagen que se denomina "imagen del frente de onda" y que sigue la propagación de la onda hacia un punto de focalización, y que permite estimar la calidad de la focalización. Entonces es posible deducir un valor de velocidad del sonido (integrado) para ese punto de focalización.

La determinación local de la velocidad del sonido integrada constituye un nuevo contraste en la imagen ultrasónica, complementario de una imagen de la reflectividad (imagen ecográfica "clásica"). Esta determinación de la velocidad del sonido en cualquier punto de focalización permite entonces mejorar también la calidad de la imagen ecográfica mediante un cálculo y, por tanto, sin necesidad de iterar nuevas emisiones y/o adquisiciones, presentando así una ventaja económica y un ahorro de tiempo y disponibilidad del personal, pacientes y equipos nada despreciables, por ejemplo, en el caso de exámenes médicos a personas. También permite caracterizar el medio de propagación prácticamente en tiempo real, lo que es una ventaja importante, en particular cuando se mide *in vivo*.

En diversos modos de realización del procedimiento según la presente invención, además, se puede recurrir, eventualmente, a una y/o a otra de las siguientes disposiciones.

Según una variante, el centro de la mancha focal se determina buscando en la imagen del frente de onda la posición espacial del punto de mayor valor.

Según una variante, la determinación de la imagen del frente de onda se realiza únicamente en el eje Z en profundidad.

Según una variante:

- entre la etapa de determinación de una imagen del frente de onda y la etapa de determinación de la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(r_{in})$  de una mancha focal, se realiza una etapa de mejora de la imagen del frente de onda en la que se realiza una combinación lineal de un conjunto de imágenes del frente de onda correspondientes a una zona de coherencia, tomándose cada imagen del frente de onda entre un transductor virtual de entrada (TV<sub>in</sub>) elegido, de posición espacial  $r_{in}$  diferente, y unos transductores virtuales de salida (TV<sub>out</sub>), de posición espacial  $r_{out}$ , tales

como  $\mathbf{r}_{out} = \Delta \mathbf{r}_{out} + \mathbf{r}_{in}$ , estando  $\Delta \mathbf{r}_{out}$  predefinidos y siendo idénticos para todas las imágenes del frente de onda del conjunto, y siendo los transductores virtuales de entrada elegidos vecinos unos de otros, para obtener una imagen del frente de onda mejorada, asociada a un transductor virtual de entrada de referencia ( $TV_{in,ref}$ ), siendo este transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  característico de los transductores virtuales de entrada del conjunto de imágenes del frente de onda utilizadas y asociadas a la zona de coherencia ZC, y

- en la etapa de determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$ , se utiliza la imagen del frente de onda mejorada en lugar de la imagen del frente de onda, la posición de profundidad del centro de la mancha focal es relativa a la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$ , y esta posición de profundidad del centro de la mancha focal permite estimar una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{in,ref})$  en la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$ .

Según una variante, la combinación lineal está determinada por un cálculo de descomposición en valor singular (SVD) del conjunto de imágenes del frente de onda para obtener un vector singular ( $\mathbf{W}_1$ ) asociado al valor singular de descomposición en valor singular de mayor valor absoluto, siendo entonces este vector singular ( $\mathbf{W}_1$ ) la imagen del frente de onda mejorada correspondiente a dicho transductor virtual de entrada de referencia ( $TV_{in,ref}$ ) y para los mismos retrasos adicionales  $\delta t$ .

Según una variante, se determina una velocidad del sonido óptima del medio mediante el cálculo de una velocidad del sonido integrada y tomando para la combinación lineal del conjunto de imágenes del frente de onda, un conjunto de imágenes del frente de onda correspondientes a transductores virtuales de entrada ( $TV_{in}$ ) elegidos que cubren sustancialmente el conjunto de una zona de interés del medio.

Según una variante:

- las etapas de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$ , de determinación de una imagen del frente de onda, de determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(n)}$  del centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda, se iteran utilizando la velocidad del sonido integrada  $c^{(n)}$  determinada en una iteración anterior en lugar de la velocidad del sonido utilizada anteriormente o en lugar de la velocidad del sonido  $c_0$  utilizada en la primera etapa, y
- durante la etapa de cálculo de una velocidad del sonido integrada, se utiliza la siguiente fórmula recurrente,

$$c^{(n+1)}(\mathbf{r}_{in}) = c^{(n)}(\mathbf{r}_{in}) \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(n)}(\mathbf{r}_{in})}{z_{in}}},$$

y en la que el valor de la velocidad del sonido integrada en el punto del medio correspondiente al transductor virtual de entrada es la velocidad del sonido integrada  $c^{(n)}(\mathbf{r}_{in})$  calculada en una etapa n del procedimiento, estando determinada esta etapa n por un número predeterminado de iteraciones o por un umbral de parada para la diferencia entre dos valores consecutivos de velocidad del sonido integrada o una combinación de los dos.

Según una variante:

- se invierte el papel del o de los transductores virtuales de entrada y del o de los transductores virtuales de salida para determinar una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{out})$  con respecto a un transductor virtual de salida, y
- se combina la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{in})$  con referencia al transductor virtual de entrada y la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{out})$  con referencia al transductor virtual de salida para obtener una velocidad del sonido integrada mejorada.

Según una variante, el procedimiento comprende además una etapa de determinación de una imagen de velocidad del sonido integrada determinando una velocidad del sonido integrada para una pluralidad de puntos del medio, correspondiendo cada uno a un transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  o a un transductor virtual de entrada de referencia de referencia ( $TV_{in,ref}$ ) de posición espacial  $\mathbf{r}_{in,ref}$

Según una variante, se determina una imagen de velocidad del sonido, en la que los valores en cada punto de esta imagen de velocidad del sonido se calculan a partir de los valores de la imagen de velocidad del sonido integrada.

Según una variante, en la etapa de determinación de la matriz de reflexión focalizada:

el cálculo de las respuestas del transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) corresponde a un proceso de focalización de entrada a partir de la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  que utiliza un tiempo de vuelo de ida de las ondas entre la base de emisión y el transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) para crear una mancha focal de entrada en la posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$ ,

el cálculo de las respuestas del transductor virtual de salida ( $TV_{out}$ ) corresponde a un proceso de focalización de salida a partir de la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  que utiliza un tiempo de vuelo de vuelta de las ondas entre el transductor virtual de salida ( $TV_{out}$ ) y los transductores de la base de recepción  $\mathbf{u}$ , para crear una mancha focal de salida en la posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ ,

siendo el retraso adicional  $\delta t$  un retraso temporal añadido a los tiempos de los vuelos de ida y vuelta durante los procesos de focalización.

Según una variante, la matriz de reflexión focalizada se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t) = \frac{1}{N_{in} N_{out}} \sum_{i_{in}} \sum_{u_{out}} \mathbf{R}_{ui}(\mathbf{u}_{out}, i_{in}, \tau(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}, i_{in}, \delta t))$$

en la que

$N_{in}$  es el número de elementos de la base de emisión ( $i$ ),

$N_{out}$  es el número de elementos de la base de recepción ( $u$ ) de salida,

$\mathbf{R}_{ui}(t)$  es la matriz de reflexión experimental, de la que  $\mathbf{R}_{ui}(\mathbf{u}_{out}, i_{in}, \tau(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}, i_{in}, \delta t))$  es el elemento de la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  registrado por el transductor de posición espacial  $\mathbf{u}_{out}$  consecutivo a la emisión de índice  $i_{in}$  en la base de emisión y al tiempo  $\tau$ ,

$\tau$  es un tiempo que es la suma del tiempo de vuelo de ida  $\tau_{in}$  de la onda ultrasónica entre los transductores de la base de emisión ( $i$ ) y el transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$ , y del tiempo de vuelo de vuelta  $\tau_{out}$  de la onda ultrasónica entre el transductor de salida ( $TV_{out}$ ) de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$  y los transductores de la base de recepción  $u$ , y del retraso adicional  $\delta t$ , como se explica mediante la siguiente fórmula:

$$\tau(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}, i_{in}, \delta t) = \tau_{in}(\mathbf{r}_{in}, i_{in}) + \tau_{out}(\mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}) + \delta t$$

**La presente descripción se refiere, según un segundo aspecto, a un sistema** de caracterización ultrasónica de un medio para determinar un valor de velocidad del sonido integrada en cualquier punto del medio, y configurado para la implementación de procedimientos de caracterización ultrasónica tales como los descritos anteriormente. El sistema de caracterización ultrasónica según el segundo aspecto comprende:

- una red de transductores adaptados para generar una serie de ondas ultrasónicas incidentes en una zona del medio, y para registrar en función del tiempo las ondas ultrasónicas retrodifundidas por dicha zona; y
- una unidad de cálculo asociada a la red de transductores y adaptada para implementar el procedimiento según el primer aspecto.

## DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

Se apreciarán otras ventajas y características de la técnica presentada anteriormente tras la lectura de la descripción detallada más adelante, presentada de manera no limitativa con fines ilustrativos y redactada con referencia a las figuras en las que:

las **figuras 1A a 1C** (ya descritas) ilustran mecanismos de emisión/recepción conocidos para la obtención de imágenes y cuantificación ultrasónica;

la **figura 2** (ya descrita) ilustra el impacto de las aberraciones en la obtención de imágenes ultrasónicas, según la técnica anterior;

la **figura 3** ilustra un ejemplo de sistema de caracterización ultrasónica para implementar unos procedimientos de caracterización ultrasónica según la presente descripción;

la **figura 4** ilustra las definiciones utilizadas en el procedimiento de caracterización ultrasónica según la presente descripción;

la **figura 5** muestra una imagen ecográfica en la que se selecciona una posición asociada a un elemento ecogénico y se determinan imágenes de propagación alrededor de esta posición para varios retrasos adicionales;

la **figura 6** muestra una imagen ecográfica en la que se selecciona una posición asociada a un conjunto de difusores de resolución insuficiente y de reflectividad comparable y se determinan imágenes de propagación alrededor de esta posición para varios retrasos adicionales;

la **figura 7** muestra una imagen ecográfica en la que se selecciona un conjunto de posiciones asociadas a difusores de resolución insuficiente de reflectividad comparable y se determinan imágenes de propagación de onda coherente resultantes de una combinación de las imágenes de propagación asociadas a cada posición seleccionada para varios retrasos adicionales;

la **figura 8A** muestra curvas de variaciones temporales de la intensidad del punto central de una imagen de propagación asociada a una posición correspondiente a difusores de resolución insuficiente y de reflectividad comparable y de la imagen de propagación de onda coherente;

la **figura 8B** muestra espectros de frecuencia de las curvas de la figura 8A;

la **figura 9A** muestra la amplitud de la imagen del frente de onda asociado en la misma posición que la de la figura 5;

la **figura 9B** muestra la parte real de la misma imagen del frente de onda que la utilizada en la figura 9A;

la **figura 10** muestra la amplitud de varias imágenes del frente de onda asociadas en la misma posición que la seleccionada para la figura 5 y obtenidas para 3 supuestas velocidades del sonido, y unas curvas de intensidad en el eje de ordenadas  $\Delta z$  de estas imágenes del frente de onda;

la **figura 11** muestra imágenes ecográficas y las correspondientes imágenes de velocidad del sonido integradas;

la **figura 12** muestra imágenes ecográficas obtenidas sin corrección de aberración (imagen A), con una corrección

de aberración lateral habitual (imagen B) y con una corrección de aberración axial utilizando mediciones en imágenes del frente de onda según la presente divulgación;

la **figura 13** muestra una imagen ecográfica (A) que comprende varias zonas con fibras musculares inclinadas en diversas direcciones e imágenes del frente de onda (B, C, D, E) correspondientes a estas diferentes zonas del medio;

la **figura 14** muestra una curva de cálculo del ángulo de una dirección preferida de inclinación de la fibra muscular en el medio;

la **figura 15** muestra una matriz de direcciones preferidas determinadas superpuestas a una imagen ecográfica de un medio con fibras musculares;

la **figura 16** muestra una imagen ecográfica (A), una ampliación de una zona de esta imagen ecográfica (B) alrededor de un punto particular, la señal temporal local en parte real (C) y amplitud (D) estimada para este punto particular y el análisis espectral de esta señal temporal local del medio;

la **figura 17** muestra una imagen ecográfica (A) y una estimación del espectro promedio en función de la profundidad Z para la imagen ecográfica correspondiente de esta figura;

la **figura 18** muestra una imagen ecográfica (A) y la imagen de correlación espectral determinada para la imagen ecográfica correspondiente de esta figura.

En los diferentes modos de realización que se van a describir con referencia a las figuras, los elementos similares o idénticos llevan las mismas referencias salvo que se estipule lo contrario.

## DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

En la siguiente descripción detallada, solo se describen algunos modos de realización en detalle para garantizar la claridad de la presentación, pero estos ejemplos no pretenden limitar el alcance general de los principios que se desprenden de la presente descripción.

Los diferentes modos de realización y aspectos descritos en la presente descripción se pueden combinar o simplificar de múltiples formas. En particular, las etapas de los diferentes procedimientos se pueden repetir, intercambiar y/o ejecutar en paralelo, salvo que se especifique lo contrario.

La presente descripción se refiere a unos procedimientos y sistemas de caracterización ultrasónica de un medio y se aplica, en concreto, a la obtención de imágenes médicas de tejidos vivos o no. El medio es, por ejemplo, un medio heterogéneo que se busca caracterizar para, por ejemplo, identificar y/o caracterizar las heterogeneidades. Eventualmente, estos procedimientos y sistemas se pueden aplicar a las pruebas no destructivas de productos, tales como piezas metálicas u otras. Estas técnicas de caracterización son, por tanto, no invasivas del medio, que entonces se ve preservado.

La **figura 3** ilustra un ejemplo de un sistema 40 de caracterización ultrasónica para la implementación de los procedimientos de caracterización ultrasónica de un medio tal como un medio heterogéneo 20, según la presente descripción. El sistema 40 comprende al menos una red 10 de transductores 11, por ejemplo, una red lineal o bidimensional o matricial; los transductores son, por ejemplo, transductores piezoeléctricos ultrasónicos que pueden presentarse clásicamente en forma de una tira rígida puesta en contacto directa o indirectamente con el medio 20. La red de transductores forma parte, por ejemplo, de un dispositivo de sondeo 41 (normalmente denominado sonda); la red de transductores está conectada a una unidad de cálculo 42, que a su vez puede conectarse o asociarse a un dispositivo de visualización 43; la unidad de cálculo emite y registra señales eléctricas hacia y/o procedentes de cada uno de los transductores 11. Luego, los transductores ultrasónicos transforman estas señales eléctricas en ondas ultrasónicas y a la inversa. Por "conexión" o "vinculación" entre el dispositivo de sondeo 41, la unidad de cálculo 42 y el dispositivo de visualización 43, se entiende cualquier tipo de conexión por cable de tipo eléctrico u óptico, o cualquier tipo de conexión inalámbrica que utilice cualquier protocolo tal como WiFi™, Bluetooth™ u otros. Estas conexiones o vinculación son unidireccionales o bidireccionales.

La unidad de cálculo 42 está configurada para la implementación de etapas de cálculo o procesamiento, en concreto, para la implementación de etapas de procedimientos según la presente descripción. Por convención, se define un marco de referencia espacial del medio 20, tomando un primer eje X y un segundo eje Z perpendicular al mismo. Para simplificar, el primer eje X corresponde a la dirección transversal en la que los transductores 11 están alineados para una red lineal y el segundo eje Z corresponde a la profundidad del medio 20 con respecto a esta red 10 de transductores 11. Esta definición puede adaptarse al contexto y, por tanto, ampliarse, por ejemplo, a un marco de referencia espacial de tres ejes en el caso de una red bidimensional 10.

En la **figura 3** como en el resto de la descripción, se hace referencia a una red de transductores para la emisión y recepción, entendiéndose que, en un caso más general, se pueden utilizar varias redes de transductores simultáneamente. Asimismo, una red puede estar constituida de uno (1) a N transductores, del mismo tipo o de distintas naturalezas. Los transductores pueden ser a la vez emisor y receptor, o bien solo emisor para algunos y solo receptor para otros.

La red de transductores sirve, por ejemplo, a la vez como emisor y como receptor, o está constituido por varias

subredes de transductores, estando algunos dedicados a la emisión, otros a la recepción de las ondas ultrasónicas. Por red de transductores, se entiende al menos un transductor, una sucesión alineada o no de transductores o una matriz de transductores.

- 5 Cuando en la presente descripción, se hace referencia a etapas de cálculo o procesamiento para la implementación en concreto de etapas de procedimiento, se entiende que cada etapa de cálculo o procesamiento se puede implementar por software, hardware, firmware, microcódigo o cualquier combinación apropiada de estas tecnologías o tecnologías relacionadas. Cuando se utiliza un software, cada etapa de cálculo o procesamiento se puede  
10 implementar mediante instrucciones de programa informático o de un código que puede, por ejemplo, interpretarse o ejecutarse. Estas instrucciones pueden almacenarse o transmitirse a un medio de almacenamiento legible por ordenador (o unidad de cálculo) y/o ser ejecutadas por un ordenador (o unidad de cálculo) para implementar estas etapas de cálculo o procesamiento.

#### **Análisis de un punto del medio mediante una matriz de reflexión focalizada**

- 15 La presente descripción describe procedimientos y sistemas de caracterización ultrasónica de un medio. En los casos prácticos, se supone que el medio es heterogéneo. Estos procedimientos y sistemas se basan en definiciones representadas en la **figura 4**:

- 20 En el medio se define:

- un primer punto P1 de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  en el marco de referencia espacial del medio,
- un segundo punto P2 de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$  en el marco de referencia espacial del medio.

- 25 Estas posiciones espaciales  $\mathbf{r}_{in}$  y  $\mathbf{r}_{out}$  están marcadas en negrita, para indicar que estos elementos son vectores de posición, vectores tomados en el marco de referencia espacial del medio (X, Z). Son posibles otras representaciones y definiciones de las posiciones de los puntos y accesibles para cualquier especialista en la profesión de los ultrasonidos.

- 30 Estos dos puntos P1 y P2 se eligen más bien a una distancia corta entre sí, es decir a unos milímetros el uno del otro y, por ejemplo, a veinte (20) milímetros o menos, a frecuencias ultrasónicas.

Como se ha representado en la **figura 4**, el procedimiento de caracterización ultrasónica implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 comprende:

- 35 - una etapa de generación de una serie de ondas ultrasónicas incidentes  $US_{in}$  en una zona de dicho medio, por medio de una red 10 de transductores 11, siendo dicha serie de ondas ultrasónicas incidentes una base de emisión  $i$ ; y  
- una etapa de generación de una matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  definida entre la base de emisión  $i$  de  
40 entrada y una base de recepción  $u$  de salida;  
- una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  que comprende unas respuestas del medio entre un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  y un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ , tomándose las respuestas del transductor virtual de salida  $TV_{out}$  en un  
45 instante temporal desplazado por un retraso adicional  $\delta t$  con respecto a un instante temporal de las respuestas del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ .

Las respuestas de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  corresponden a un campo de presión acústica calculado en cualquier punto del medio.

- 50 La base de emisión  $i$  de entrada es, por ejemplo, una base de ondas generadas, cada una, por uno solo de los transductores 11 de la red 10 o una base de ondas planas de inclinación angular  $\theta$  con respecto al eje X, como se ha descrito anteriormente en la descripción de las **figuras 1A a 1C**.

- La base de recepción  $u$  es, por ejemplo, la base de los transductores 11. Eventualmente, se puede utilizar otra base  
55 de recepción en recepción.

De este modo, la etapa de generación de las ondas ultrasónicas se extiende entre la base de emisión  $i$  y la base de recepción  $u$ . Esta etapa de generación ultrasónica está, por tanto, definida para cualquier tipo de ondas ultrasónicas de tipo focalizadas o no focalizadas, tal como las ondas planas.

- 60 En la etapa de generación de la matriz, la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  está definida entre la base de emisión  $i$  de entrada y una base de recepción  $u$  de salida. Esta matriz contiene el conjunto de respuestas temporales del medio, medidas en el tiempo  $t$  por cada transductor 11 de coordenada espacial  $\mathbf{u}_{out}$  y para cada emisión  $i_{in}$ . Se entiende que los elementos denotados con el índice "in" se refieren a la emisión (es decir, la entrada) y los elementos denotados con el índice "out" se refieren a la recepción (es decir, la salida). Esta matriz experimental también puede registrarse  
65 y/o almacenarse, por ejemplo, en la memoria de la unidad de cálculo o en cualquier otro medio, extraíble o no, que



permita un almacenamiento permanente o temporal.

Más específicamente, en la etapa de determinación de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$ , se aplica:

- 5 - un proceso de focalización de entrada a partir de la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  que utiliza un tiempo de vuelo de ida de las ondas entre la base de emisión ( $\mathbf{i}$ ) y el transductor virtual de entrada de  $TV_{in}$  y que crea una mancha focal, denominada de entrada, alrededor del primer punto P1 de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$ , correspondiendo dicha mancha focal de entrada al transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ ,
- 10 - un proceso de focalización de salida a partir de la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  que utiliza un tiempo de vuelo de vuelta de las ondas entre el transductor virtual de salida ( $TV_{out}$ ) y los transductores de la base de recepción ( $\mathbf{u}$ ) y que crea una mancha focal, denominada de salida, alrededor del segundo punto P2 de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ , correspondiendo dicha mancha focal de salida al transductor virtual de salida  $TV_{out}$ ,
- un retraso adicional  $\delta t$  que es un retraso temporal añadido a los tiempos de vuelo de ida y vuelta durante los procesos de focalización.

Estos procesos de focalización de entrada y salida en realidad forman de hecho un proceso de focalización de entrada-salida, denominado a lo largo de esta descripción proceso de focalización.

Dicho de otro modo, en este procedimiento de caracterización ultrasónica, el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  corresponde a una "fuente virtual" de ultrasónica situada en la posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  en el medio y el transductor virtual de salida de  $TV_{out}$  corresponde a un "sensor virtual" ultrasónico situado en la posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ . Esta fuente virtual y este sensor virtuales están separados espacialmente por la diferencia de sus posiciones espaciales  $\Delta \mathbf{r} = \mathbf{r}_{out} - \mathbf{r}_{in}$ . También están separados temporalmente del retraso adicional  $\delta t$ , que es un retraso arbitrario y ajustable independientemente de la distancia espacial  $|\Delta \mathbf{r}|$ . De este modo, el procedimiento es capaz de sondear el medio

Por ejemplo, un cálculo de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  desde el medio entre el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y el transductor virtual de salida  $TV_{out}$  por dichos procesos de focalización de entrada y salida, es un procedimiento de formación de haces mejorado, que se puede expresar mediante la siguiente fórmula simplificada:

$$\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t) = \frac{1}{N_{in}N_{out}} \sum_{i_{in}} \sum_{u_{out}} \mathbf{R}_{ui}(\mathbf{u}_{out}, i_{in}, \tau(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}, i_{in}, \delta t)) \quad (\text{Ec. 1})$$

en la que

$N_{in}$  es el número de elementos de la base de emisión  $\mathbf{i}$ ,

$N_{out}$  es el número de elementos de la base de recepción  $\mathbf{u}$  de salida,

$\mathbf{R}_{ui}(t)$  es la matriz de reflexión experimental, de la que  $\mathbf{R}_{ui}(\mathbf{u}_{out}, i_{in}, \tau(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}, i_{in}, \delta t))$  es el elemento de la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  registrado por el transductor  $\mathbf{u}_{out}$  consecutivo a la emisión  $i_{in}$  en el momento  $\tau$ .

El tiempo  $\tau$  es la suma del tiempo de vuelo de ida  $\tau_{in}$  de la onda ultrasónica entre los transductores de la base de emisión  $\mathbf{i}$  y el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  (primer punto P1), desde el tiempo de vuelo de vuelta  $\tau_{out}$  de la onda ultrasónica entre el transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$  (segundo punto P2) y los transductores de la base de recepción  $\mathbf{u}$ , y el retraso adicional  $\delta t$ , como se explica mediante la siguiente fórmula:

$$\tau(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}, i_{in}, \delta t) = \tau_{in}(\mathbf{r}_{in}, i_{in}) + \tau_{out}(\mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}) + \delta t \quad (\text{Ec. 2})$$

Los tiempos de vuelo  $\tau_{in}$  y  $\tau_{out}$  se calculan a partir de un modelo de velocidad del sonido. La hipótesis más simple consiste en establecer la hipótesis de un medio homogéneo con una velocidad del sonido constante  $c_0$ . En ese caso, los tiempos de vuelo se obtienen directamente a partir de las distancias entre los transductores de la sonda y los transductores virtuales.

El número de elementos de la base de emisión  $N_{in}$  es por ejemplo superior o igual a uno (1) y ventajosamente superior o igual a dos (2). El número de elementos de la base de recepción  $N_{out}$  es, por ejemplo, superior o igual a dos (2).

Esta fórmula mejorada de formación de haces es, por tanto, una doble suma de las respuestas temporales registradas en la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}$ , una primera suma según la base de emisión  $\mathbf{i}$  que traduce una focalización en la emisión y una segunda suma según la base de recepción  $\mathbf{u}$  vinculada a una focalización en la recepción, este cálculo se realiza para las coordenadas espaciales de los dos puntos P1 y P2 (de las posiciones espaciales  $\mathbf{r}_{in}$ ,  $\mathbf{r}_{out}$ ). El resultado de esta fórmula mejorada de formación de haces es, por tanto, una señal temporal para estas dos coordenadas espaciales ( $\mathbf{r}_{in}$ ,  $\mathbf{r}_{out}$ ), pero que también es en función del retraso adicional  $\delta t$  entre la entrada y la salida,

regulándose este retraso adicional de manera arbitraria.

Esta formulación de formación de haces también se puede complementar con términos de ponderación de entrada y salida, a menudo denominados apodización de recepción y/o emisión. De este modo, un técnico en este campo puede completar todo el conjunto de fórmulas de formación de haces con estas ponderaciones.

La matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  registrada puede ser una matriz "real", es decir, compuesta por coeficientes reales en el dominio del tiempo, siendo las señales eléctricas registradas por cada uno de los transductores números reales. Como variante, esta matriz puede ser una matriz "compleja", es decir, compuesta de valores complejos, por ejemplo, en el caso de la demodulación para una formación de haces en fase y en cuadratura (conocida en inglés con el nombre de "beamforming IQ").

Se obtiene así una matriz de reflexión focalizada.  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  que contiene señales temporales. Esta matriz de reflexión focalizada es de cinco (5) dimensiones en el caso de una sonda lineal; dos espacios para posiciones espaciales  $\mathbf{r}_{in}$  y  $\mathbf{r}_{out}$ , así como el retraso adicional  $\delta t$ , lo que es muy diferente y mucho más rico en información que en las matrices de reflexión focalizadas del estado de la técnica.

En este análisis, gracias al retraso adicional  $\delta t$ , los transductores virtuales de entrada  $TV_{in}$  y salida  $TV_{out}$  no están definidos al mismo instante temporal, lo que permite hacer resaltar virtualmente la propagación de la onda ultrasónica entre el primer punto P1 del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y el segundo punto P2 del transductor virtual de salida  $TV_{out}$ . Este retraso adicional  $\delta t$  puede ser positivo o negativo, lo que permite sondear la focalización de la onda ultrasónica en el segundo punto P2, respectivamente, antes y después de un instante temporal de referencia de los recorridos de la onda ultrasónica en el medio.

Este instante temporal de referencia se denomina tiempo balístico  $t_b$ . Este tiempo balístico es el tiempo de ida y vuelta de la onda ultrasónica entre los transductores de la base de emisión  $i$  hacia el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ , después, entre el transductor virtual de salida  $TV_{out}$  y los transductores de la base de recepción  $u$ .

Este tiempo balístico  $t_b$  se define mediante la siguiente fórmula:

$$t_b = (\|\mathbf{u}_{out} - \mathbf{r}_{out}\| + \|\mathbf{u}_{in} - \mathbf{r}_{in}\|)/C_0 \quad (\text{Ec. 3})$$

en la que:

$C_0$  es la supuesta velocidad del sonido del medio (velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas).

Gracias a estas disposiciones, - el procedimiento permite sondear muy localmente el medio en el segundo punto P2 con respecto al primer punto P1, con un retraso adicional  $\delta t$  entre las señales provenientes de estos dos puntos. Esta información local está enteramente contenida en los valores de la respuesta temporal calculados a partir de la matriz de reflexión focalizada,  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  del medio y que se pueden aprovechar posteriormente (y sin nuevas emisiones y/o adquisiciones) para caracterizar cada punto del medio.

De este modo, es posible deducir de esta respuesta temporal después de la formación del haz, una estimación de la reflectividad del medio considerando el valor absoluto de las señales confocales caracterizadas por posiciones espaciales iguales de entrada y salida  $\mathbf{r}_{in} = \mathbf{r}_{out}$  y el retraso adicional cero  $\delta t = 0$  (es decir, el tiempo balístico sin este retraso adicional). Esta estimación de la reflectividad del medio es el valor de un píxel de una imagen ecográfica del medio. De este modo, para construir una imagen ecográfica, se puede escanear o elegir un conjunto de posiciones espaciales  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{in} = \mathbf{r}_{out}$  que correspondan a un conjunto de posiciones de píxeles en la imagen ecográfica.

La imagen ecográfica  $I^{(0)}(\mathbf{r})$  se puede construir a continuación, a partir de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  tomando  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{in} = \mathbf{r}_{out}$ , y  $\delta t = 0$ , es decir:

$$I^{(0)} = \mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out} = \mathbf{r}_{in}, \delta t = 0) \quad (\text{Ec. 4})$$

### Imágenes de propagación alrededor de un punto del medio

El procedimiento de caracterización ultrasónica implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 se puede entonces completar construyendo una o más imágenes de propagación a partir de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$ , determinándose esta o estas imágenes de propagación para uno o más valores del retraso adicional  $\delta t$ , para un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  (primeros puntos P1) y para una pluralidad de transductores virtuales de salida  $TV_{out}$  (segundos puntos P2), estando los transductores virtuales de salida  $TV_{out}$  situados en posiciones espaciales  $\mathbf{r}_{out}$  alrededor del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$ .

En el caso de una única imagen de propagación, esta imagen de propagación se determina a partir de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  para un único retraso adicional  $\delta t$  predeterminado.

Esta imagen de propagación representa la forma en la que se propaga una onda ultrasónica entre los transductores virtuales y, por ejemplo, cerca del transductor virtual de entrada, y en un instante temporal igual al retraso adicional (instante temporal tomado de manera relativa con respecto al tiempo balístico).

Entonces, el sistema 40 es entonces opcionalmente capaz de mostrar una o varias imágenes de propagación en el dispositivo de visualización 43.

La unidad de cálculo 42 también puede calcular una serie de imágenes de propagación para varios retrasos adicionales temporalmente sucesivos, por ejemplo, para construir una película de propagación de la onda ultrasónica alrededor del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  (primer punto P1). Esta película de propagación puede mostrarse opcionalmente en el dispositivo de visualización 43 o en cualquier otro medio.

Los retrasos adicionales temporalmente sucesivos tomados para construir esta película de propagación se toman para el presente ejemplo en un intervalo de retraso adicional.

Por ejemplo, el intervalo de retraso adicional puede adoptar la forma de un rango temporal adaptado para ir desde el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$  al conjunto de transductores virtuales de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$ . Este intervalo de retraso adicional se denota entonces, por ejemplo,  $[-\delta t_{min}, +\delta t_{max}]$ , siendo  $\delta t_{min} = z_{out}^{max} - z_{in} / c_0$  y  $\delta t_{max} = z_{out}^{min} - z_{in} / c_0$ , donde  $z_{in}$  y  $z_{out}$  son respectivamente las profundidades en la dirección positiva del segundo eje Z del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$  y del transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$ .

Por ejemplo, el intervalo de retraso adicional puede ser simétrico alrededor del valor cero ( $\delta t=0$ ) y de amplitud  $\delta t_{max}$ , denotándose este intervalo de retraso adicional  $[-\delta t_{max}, +\delta t_{max}]$ . Por ejemplo, puede estar definido por  $\delta t_{max} = \max(|\Delta r|) / c_0$  para los transductores de salida  $TV_{out}$  utilizados para la imagen de propagación.

La imagen de **referencia A** de la **figura 5** muestra una imagen ecográfica de un fantoma o medio de estudio ilustrativo, que incluye heterogeneidades predeterminadas de varios tipos. En este medio, se considera una zona de análisis  $ZA_{out}$  rectangular (compuesta por segundos puntos P2 de transductores virtuales de salida  $TV_{out}$ ) que se escanea mediante un cálculo para construir una o más imágenes de propagación alrededor del primer punto P1 del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$ , en este caso situado en el medio de la zona de análisis de  $ZA_{out}$ . El área de análisis se puede colocar en cualquier posición independientemente de la posición del transductor virtual de entrada. Sin embargo, es particularmente interesante que la zona de análisis rodee el transductor virtual de entrada.

El transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  (primer punto P1) está, en esta imagen de referencia A, ubicado sobre o cerca de un elemento reflectante (objetivo ecogénico) del medio.

Las imágenes de **referencia B a F** de la **figura 5** son imágenes de propagación de la zona de análisis  $ZA_{out}$  de la imagen A de la figura 5, para cinco (5) valores de retraso adicionales  $\delta t$ . Estos retrasos adicionales son  $-3,86 \mu s$ ,  $-1,93 \mu s$ ,  $0 \mu s$ ,  $1,93 \mu s$ ,  $3,86 \mu s$  en nuestro ejemplo ilustrativo. Cada imagen de propagación se compone de:

- una primera imagen de índice 1 (por ejemplo,  $B_1$ ) correspondiente a la amplitud de los valores de la matriz de reflexión focalizada para un conjunto de puntos de la zona de análisis  $ZA_{out}$ , y
- una segunda imagen de índice 2 (por ejemplo,  $B_2$ ) correspondiente a la parte real de los valores de la matriz de reflexión focalizada para el mismo conjunto de puntos de la zona de análisis  $ZA_{out}$ .

En estas imágenes, el nivel de amplitud o el nivel de la parte real está representado por un nivel de grises cuya escala aparece en las imágenes  $B_1$  y  $B_2$  de la figura 5. Los puntos o píxeles de estas imágenes de propagación tienen como posición espacial  $\Delta r = r_{out} - r_{in}$ , es decir, la posición relativa de los transductores virtuales de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$  con respecto a la posición  $r_{in}$  del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ . En la figura que ilustra este ejemplo, en estas imágenes, las coordenadas se denotan  $\Delta x$  en la abscisa y  $\Delta z$  en la ordenada.

Estas imágenes de propagación ilustran las explicaciones dadas anteriormente sobre la matriz de reflexión focalizada calculada con un retraso adicional  $\delta t$ . Permiten visualizar la propagación de una onda coherente. En concreto, para retrasos adicionales negativos que se aproximan al cero, esta onda coherente converge hacia el primer punto P1 del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ , y está idealmente concentrada y focalizada en una mancha focal delimitada por los límites de difracción para el retraso adicional cero ( $\delta t = 0$ ). Esta onda coherente es a continuación divergente para unos retrasos adicionales positivos y crecientes.

Esta onda coherente resulta de un proceso de inversión temporal digital de los ecos procedentes de la fuente virtual ubicada en el transductor virtual de entrada de posición espacial  $r_{in}$  y medidos por los transductores de la sonda. Realizando la formación de haces de recepción para un conjunto de posiciones espaciales  $r_{out}$  alrededor del transductor virtual de entrada de posición espacial  $r_{in}$ , y en los diversos tiempos adicionales  $\delta t$ , se ilustra la focalización de recepción fuera de la posición confocal (es decir,  $r_{in} = r_{out}$ ).

Como estas imágenes de propagación se obtienen para un primer punto P1 del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  ubicado sobre o cerca de un elemento reflectante (objetivo ecogénico) del medio, la onda coherente es fácilmente identificable en estas imágenes de propagación y presenta una buena relación de señal sobre ruido en comparación con las señales vecinas.

La imagen de **referencia A** de la **figura 6** muestra la misma imagen ecográfica que la de la figura 5, para la que se considera otra zona de análisis  $ZA'_{out}$  rectangular (de mismas dimensiones en este ejemplo) que se escanea mediante un cálculo para construir imágenes de propagación alrededor de otro primer punto P1' del transductor virtual de entrada  $TV'_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$ .

Este otro primer punto P1' del transductor virtual de entrada  $TV'_{in}$  está en este caso asociado a una celda de resolución que contiene un conjunto de difusores de resolución insuficiente, dispuestos aleatoriamente y con una reflectividad comparable. En la escala de longitud de onda, un medio de este tipo se denomina "moteado ultrasónico" y está caracterizado por una reflectividad aleatoria resultante de las interacciones destructivas y constructivas entre cada uno de los difusores de resolución insuficiente, responsable del efecto granular de la imagen ecográfica en modo B.

Las imágenes de **referencia B a F** de la **figura 6** son imágenes de propagación de esta otra zona de análisis  $ZA'_{out}$  de la imagen A de la figura 6, para los mismos 5 valores de retraso adicionales  $\delta t$  que para las imágenes B a F de la figura 5.

Las amplitudes y partes reales de los valores de la matriz de reflexión focalizada para un conjunto de segundos puntos de esta otra zona de análisis  $ZA'_{out}$  están representados en este caso de la misma manera.

Estas imágenes de propagación para un difusor también muestran una onda ultrasónica coherente (rodeada por líneas de trazos mixtos) que converge, se concentra en el primer punto P1' del transductor virtual de entrada  $TV'_{in}$ , y que luego diverge. Sin embargo, es más difícil discernir esta onda coherente debido a los ecos generados por los difusores situados aguas arriba o aguas abajo del plano focal, que presentan una reflectividad comparable a la de la fuente virtual estudiada.

Además, y de manera recíproca a la definición anterior de las imágenes de propagación, también es posible construir una o más imágenes de propagación entre una pluralidad de transductores virtuales de entrada  $TV_{in}$  (primeros puntos P1) y un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  (segundos puntos P2). De este modo, las imágenes de propagación se construyen a partir de la matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$ , determinándose esta o estas imágenes de propagación para uno o más valores del retraso adicional  $\delta t$ , para un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  (segundo punto P2) y para una pluralidad de transductores virtuales de entrada  $TV_{in}$  (primeros puntos P1), estando los transductores virtuales de entrada  $TV_{in}$  situados en posiciones espaciales  $r_{in}$  alrededor del transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$ .

De hecho, las definiciones de las imágenes de propagación con respecto a los transductores de entrada y de salida están invertidas. Debido a la reciprocidad de la propagación de las ondas, las imágenes producidas son muy similares y los diversos cálculos y determinaciones realizados a partir de estas imágenes de propagación y explicados a continuación se pueden realizar de manera similar. En aras de una mayor sencillez, la presente descripción detallada solo explicará el primer sentido entre un transductor de entrada y una pluralidad de transductores virtuales de salida. Pero se entenderá que, en cada una de las definiciones que aparecen en este documento, es posible intercambiar los elementos con índice "out" e índice "in", y las denominaciones "entrada" y "salida".

Adicionalmente, también es posible utilizar los dos tipos de imágenes de propagación (según el primer y el segundo sentido), y combinarlas o promediar estas dos imágenes de propagación para obtener una imagen de propagación promedio más representativa y más contrastada de la propagación de las ondas en el medio. También es posible combinar resultados provenientes o determinados a partir de estos dos tipos de imágenes para obtener un resultado que suele ser más preciso.

La matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  como se ha definido anteriormente utiliza las posiciones espaciales  $r_{in}$ ,  $r_{out}$  de los transductores virtuales de entrada  $TV_{in}$  y de salida  $TV_{out}$ . Estas posiciones espaciales son posiciones absolutas en un marco de referencia espacial. Sin embargo, también es posible utilizar una única posición espacial absoluta y una posición espacial relativa con respecto a esta posición espacial absoluta. Por ejemplo, se puede tomar la posición espacial absoluta  $r_{in}$  del transductor virtual de entrada y la posición espacial relativa  $\Delta r_{out}$  del transductor virtual de salida, siendo  $\Delta r_{out} = r_{out} - r_{in}$ . De manera recíproca, se puede tomar la posición espacial absoluta  $r_{out}$  del transductor virtual de salida y la posición espacial relativa  $\Delta r_{in}$  del transductor virtual de entrada, siendo  $\Delta r_{in} = r_{in} - r_{out}$ . Cada uno de los cálculos y/o determinaciones de la presente descripción se puede realizar con la ayuda de una u otra de las definiciones anteriores o de cualquier otra definición similar y/o equivalente.

#### Extracción de onda coherente

El procedimiento de caracterización ultrasónica implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 se puede completar aplicando una etapa de combinación en la que se realiza una combinación lineal de un conjunto de películas

de propagación, tomándose cada película de propagación del conjunto entre un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  elegido, de posición espacial  $r_{in}$  diferente y unos transductores virtuales de salida  $TV_{out}$ , de posición espacial  $r_{out}$ , tales como  $r_{out} = \Delta r_{out} + r_{in}$ , estando  $\Delta r_{out}$  predefinidos e idénticos para todas las películas de propagación del conjunto y siendo los transductores virtuales de entrada elegidos vecinos unos de otros.

Dicho de otro modo, se selecciona un conjunto de posiciones espaciales vecinas de transductores virtuales de entrada  $TV_{in}$  elegidos, formando este conjunto de posiciones espaciales una zona de interés para la correlación, denominada, más simplemente, zona espacial de correlación ZC, y que permite correlacionar las películas de propagación de estos transductores virtuales de entrada. Esta zona espacial de correlación es, por ejemplo, una zona rectangular alrededor de un punto de referencia. También puede ser la imagen en su totalidad o cualquier zona de forma simétrica o no. Las posiciones espaciales vecinas son, por ejemplo, posiciones espaciales que cercanas entre sí.

Mediante esta combinación de un conjunto de varias películas de propagación, se obtiene entonces una película de propagación de onda coherente mejorada, por ejemplo, en términos de coherencia y contraste. Las imágenes de esta nueva película de propagación denominada película de propagación de onda coherente se obtienen para los mismos retrasos adicionales  $\delta t$ , y para las mismas posiciones relativas  $\Delta r_{out}$ .

Esta nueva película de propagación de onda coherente puede entonces asociarse a un transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  de posición espacial  $r_{in,ref}$  que representa los transductores virtuales de entrada elegidos del conjunto de películas de propagación (los transductores virtuales de entrada de la zona espacial de correlación).

Según un primer ejemplo, el transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  es un transductor virtual de entrada de posición espacial correspondiente al promedio de las posiciones espaciales de los transductores virtuales de entrada elegidos. De este modo, en esta variante anterior, se puede expresar la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia mediante:

$$r_{in,ref} = \frac{1}{N_{in}} \sum_{r_{in}} \bar{r}_{in} \quad (\text{Ec. 5})$$

$\bar{r}_{in}$  siendo los transductores virtuales de entrada elegidos,  
 $N_{in}$  siendo el número de transductores virtuales de entrada elegidos, que componen la zona espacial de correlación.

Según otro ejemplo, el transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  es un transductor virtual de entrada de posición espacial correspondiente a un promedio ponderado de las posiciones espaciales de los transductores virtuales de entrada elegidos, basándose dicha ponderación, por ejemplo, en el valor de reflectividad de cada punto de los transductores virtuales de entrada elegidos. De este modo, en esta variante, se puede expresar la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia mediante:

$$r_{in,ref} = \frac{\sum_{r_{in}} \bar{r}_{in} \cdot |RFoc(\bar{r}_{in} = \bar{r}_{out}, \delta t = 0)|}{\sum_{r_{in}} |RFoc(\bar{r}_{in} = \bar{r}_{out}, \delta t = 0)|} \quad (\text{Ec. 6})$$

Por ejemplo, esta combinación lineal está determinada o realizada por una descomposición en valores singulares, denotada SVD durante la cual se realiza un cálculo de descomposición en valores singulares del conjunto de películas de propagación para obtener un vector singular  $V_1$  asociado al valor singular de mayor valor absoluto, siendo entonces este vector singular  $V_1$  la película de propagación de onda coherente asociada a dicho transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  y para los mismos retrasos adicionales  $\delta t$ .

La pluralidad de películas de propagación del conjunto se procesa en este caso por descomposición en valores singulares para combinar varias películas, es decir, varias mediciones o experimentaciones del desorden acústico de una región vecina a un transductor virtual de entrada, lo que permite mejorar el contraste de la película de propagación y así mejorar ventajosamente su aprovechamiento.

Para realizar este cálculo de descomposición en valores singulares (en particular porque las herramientas habituales actuales de descomposición en valores singulares usuales funcionan en matrices bidimensionales), es posible construir una matriz de reflexión focalizada concatenada **RFoc'** en la que las filas de esta matriz de reflexión focalizada concatenada **RFoc'** son los índices del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  elegidos de posición espacial  $r_{in}$ , y las columnas de esta matriz de reflexión focalizada concatenada **RFoc'** son las películas de propagación concatenadas  $\{\Delta r_{out}, \delta t\}$  (conjunto de imágenes) para cada transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  elegido, tomándose estas películas de propagación para una misma sucesión temporal de retrasos adicionales  $\delta t$ . Esta matriz de reflexión focalizada concatenada es, por tanto, la matriz de reflexión focalizada **RFoc** recentrada en el punto de focalización de entrada  $r_{in}$ .

Por ejemplo, esta matriz de reflexión focalizada concatenada **RFoc'** se denota:

$$\mathbf{RFoc}' = [\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \{\Delta \mathbf{r}_{out}, \delta t\})] = [\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \{\mathbf{r}_{in} + \Delta \mathbf{r}_{out}, \delta t\})]$$

Esta etapa de descomposición en valores singulares SVD proporciona entonces un vector singular **V<sub>1</sub>** que maximiza las correlaciones entre cada una de las fuentes de los transductores virtuales de entrada **TV<sub>in</sub>** elegidos. El vector singular **V<sub>1</sub>** está asociado al valor singular de descomposición en el valor singular de mayor valor absoluto. El vector singular **V<sub>1</sub>** es entonces la película de propagación de onda coherente asociada a un transductor virtual de entrada de referencia **TV<sub>in,ref</sub>** y para los mismos retrasos adicionales  $\delta t$ .

Por tanto, la utilización de la descomposición en valores singulares SVD permite combinar varias películas de propagación de onda evitando al mismo tiempo la reflectividad aleatoria introducida por el régimen de tipo moteado. Siendo la onda coherente un elemento común a cada una de las películas de propagación, esta surge durante el proceso de combinación, mientras que las contribuciones de los difusores situados fuera de cada transductor virtual de entrada **TV<sub>in</sub>** son eliminados por interferencia destructiva. Esto equivale a filtrar las películas de propagación para extraer la onda coherente.

La imagen de **referencia A** de la **figura 7** presenta la misma imagen ecográfica que la de las figuras 5 y 6. En esta figura se considera un ejemplo de zona de análisis **ZA<sub>out</sub>** asociado con un transductor virtual de entrada elegido de entre el conjunto de transductores virtuales de entrada **TV<sub>in</sub>** elegidos, estando estos transductores virtuales elegidos representados en esta imagen A por una cuadrícula de puntos de forma rectangular. Los puntos de esta cuadrícula representan el conjunto de los transductores virtuales de entrada **TV<sub>in</sub>** elegidos, denominada zona de coherencia ZC (es decir, los transductores virtuales de entrada elegidos vecinos) para realizar la combinación coherente de las películas de propagación.

Las imágenes de **referencias B a F** de la **figura 7** son imágenes de propagación de onda coherente de la zona de análisis **ZA<sub>out</sub>** de la imagen A de la figura 7 para varios valores de retraso adicionales  $\delta t$  que representan el primer vector singular **V<sub>1</sub>**. En este ejemplo se utiliza la misma representación de la primera imagen de amplitud y de la segunda imagen de parte real que la presentada en las figuras anteriores.

Las imágenes de la figura 7 muestran que se puede extraer la parte coherente de la onda ultrasónica también para un conjunto de primeros puntos P1 (transductor virtual de entrada **TV<sub>in</sub>**) situados en la mota. De hecho, en estas imágenes, se observa una única onda coherente que se mueve de abajo hacia arriba concentrándose al nivel de la posición del transductor virtual de entrada **TV<sub>in</sub>**, mientras que las imágenes de propagaciones no procesadas por el proceso de descomposición en valores singulares SVD de esta experimentación se parecerían a las presentadas en las imágenes de referencia B a F de la figura 6.

La descomposición en valores singulares permite extraer de manera muy fiable la onda coherente de las imágenes/películas de propagación. Por ejemplo, en la **figura 8A**, la primera curva A1 corresponde a la amplitud de la señal en el punto confocal en función del retraso adicional  $\delta t$  (en este caso entre  $-3 \mu s$  y  $+3 \mu s$ ) de una de las películas de propagación obtenidas para un transductor virtual de entrada **TV<sub>in</sub>** perteneciente a la zona de coherencia ZC. El punto confocal es el punto de las imágenes de propagación definido por  $\Delta x = \Delta z = |\Delta \mathbf{r}| = 0$  ( $\mathbf{r}_{in} = \mathbf{r}_{out}$ ) representado en nuestro ejemplo por la cruz situada en el centro de cada imagen de propagación y que corresponde a la posición del transductor virtual de entrada. Esta curva A1 es muy caótica en el caso representado, porque la posición confocal  $|\mathbf{r}|$  coincide con una zona de tipo denominada "moteada". La onda coherente queda entonces total o parcialmente oculta por los ecos procedentes de los difusores ubicados aguas arriba o aguas abajo de esta zona confocal. En esta figura, la curva A2 corresponde a la amplitud de la señal de la película de propagación de onda coherente (primer vector singular **V<sub>1</sub>**) proveniente de la descomposición en valores singulares de la película de propagación anterior, y para el mismo punto confocal. Esta curva A2 muestra un único máximo centrado en el retraso adicional  $\delta t$  cero, lo que demuestra una buena focalización de la onda incluso para este caso específico en el que se trata de un elemento poco reflectante.

La **figura 8B** muestra los espectros de frecuencia de las señales de la figura 8A, correspondiendo la curva S1 al espectro de frecuencia de la señal de la curva A1, y correspondiendo la curva S2 al espectro de frecuencia de la señal de la curva A2. Sin embargo, se observa una pérdida de resolución temporal de la onda coherente (visible en la figura 7), lo que resulta en una reducción de la anchura espectral de las señales estudiadas. En caso necesario, este fenómeno se puede corregir con la ayuda de una etapa de equalización del espectro.

Las imágenes de propagación de onda coherente son análogas a las imágenes de propagación asociadas con un difusor ecogénico, pero cuya anchura espectral se ha reducido.

Estas curvas A2, S2 ilustran la efectividad de la etapa de combinación/descomposición en valores singulares para extraer o filtrar películas de propagación de onda coherente con un único máximo (una única onda principal).

## Onda coherente en un marco de referencia balístico

El cálculo de la matriz de reflexión focalizada.  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  supone un modelo de la velocidad de las ondas ultrasónicas en el medio (por ejemplo, una velocidad del sonido  $c_0$ , constante). De hecho, los tiempos de vuelo de ida  $T_{in}$  y los tiempos de vuelo de vuelta  $T_{out}$  de la onda convencionalmente se calculan con fórmulas geométricas para calcular la distancia entre los transductores 11 y cada punto del medio y con esta hipótesis de velocidad del sonido constante.

Por consiguiente, las imágenes de propagación, las películas de propagación y las películas de propagación de onda coherente previamente calculadas incluyen esta hipótesis de velocidad del sonido  $c_0$  constante. En estas imágenes y películas, la onda coherente resulta de un proceso de inversión temporal digital basado en el modelo supuesto de velocidad del sonido. Por tanto, esta onda se propaga a la supuesta velocidad del sonido  $c_0$ . En el tiempo  $\delta t = 0$ , está situada en la profundidad del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  (la cruz central en estas figuras), es decir para  $\Delta z = 0$ . El tiempo de vuelo de la onda coherente sigue, por tanto, la siguiente relación de propagación balística:

$$\delta t(\Delta \mathbf{r}_{out}) = -\text{sign}(\Delta z_{out}) \cdot |\Delta \mathbf{r}_{out}| / c_0 \quad (\text{Ec. 7})$$

en la que:

$c_0$  es la velocidad del sonido en el medio,

$|\Delta \mathbf{r}_{out}|$  es el módulo del vector entre el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y el transductor virtual de salida  $TV_{out}$ ,

$\Delta \mathbf{r}_{out} = \mathbf{r}_{out} - \mathbf{r}_{in}$ ,

$\delta t$  es el retraso adicional,

$\Delta z_{out}$  es la componente según el segundo eje Z del vector de posición espacial  $\Delta \mathbf{r}_{out}$ .

Dicho de otro modo, en estas imágenes de propagación, la onda teórica que se propaga a la velocidad del sonido  $c_0$  forma un arco de círculo centrado en el origen de la imagen (es decir, el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$ ). La relación de propagación balística relaciona, por tanto, la posición relativa  $\Delta \mathbf{r}_{out}$  con el retraso adicional  $\delta t$  por la velocidad del sonido  $c_0$ . El signo negativo enfatiza el hecho de que se trata de un proceso de inversión temporal digital.

Entonces es posible extraer de la película de propagación o de la película de propagación de onda coherente, una imagen de focalización de la onda en el marco de referencia balístico, imagen que se denomina imagen del frente de onda y que sigue esta onda teórica a la velocidad del sonido  $c_0$ : Para cada imagen de propagación o imagen de propagación de onda coherente, con un retraso adicional  $\delta t$ , se extraen los valores (valor de presión acústica) que se sitúan en este arco de círculo (es decir, que respetan la relación de propagación balística anterior). Se construye así una nueva imagen, denominada imagen del frente de onda que representa la evolución de la película de propagación o película de propagación de onda coherente en el marco de referencia balístico. Esta imagen del frente de onda es, por tanto, una imagen del frente de onda en el marco de referencia balístico.

Según una primera variante, se determina la imagen del frente de onda indirectamente calculando una película de propagación o una película de propagación de onda coherente y extrayendo los datos apropiados de esta película como se explicó anteriormente para determinar la imagen del frente de onda durante el intervalo de retraso adicional.

Por tanto, el procedimiento de caracterización ultrasónica implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 puede completarse aplicando una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  o para un transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda a partir:

- de las imágenes de una película de propagación o de una película de propagación de onda coherente, y
- de una relación de propagación balística de tipo:
- $\delta t(\Delta \mathbf{r}_{out}) = -\text{sign}(\Delta z_{out}) \cdot |\Delta \mathbf{r}_{out}| / c_0$  que permite extraer valores de cada una de las imágenes de las películas para construir la imagen del frente de onda.

Según una segunda variante, se determina una imagen del frente de onda directamente a partir de la matriz de reflexión experimental  $R_{ui}(t)$ , imponiendo la relación de propagación balística anterior.

Por tanto, el procedimiento de caracterización ultrasónica implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 puede completarse aplicando una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda a partir:

- de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  y
- de una relación de propagación balística de tipo
- $\delta t(\Delta \mathbf{r}_{out}) = -\text{sign}(\Delta z_{out}) \cdot |\Delta \mathbf{r}_{out}| / c_0$ , que permite extraer valores de la matriz de reflexión focalizada para construir la imagen del frente de onda.

En todas estas variantes, la imagen del frente de onda permite estimar el campo de presión (respuesta de emisión-

recepción) generado por el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  o de referencia  $TV_{in,ref}$  a partir de los ecos medidos por los transductores de sonda.

Cabe señalar que las señales contenidas en la imagen del frente de onda son una submatriz de la matriz de reflexión focalizada. Por tanto, para los cálculos, es posible limitarse a señales que verifiquen la relación de propagación balística anterior. En ese caso, la imagen del frente de onda es la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$ .

Los puntos o píxeles de estas imágenes del frente de onda tienen como posición espacial  $\Delta \mathbf{r}_{out} = \mathbf{r}_{out} - \mathbf{r}_{in}$ , es decir, una posición relativa con respecto a la posición  $\mathbf{r}_{in}$  del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ . De este modo, en estas imágenes, las coordenadas se denotan  $\Delta x$  en la abscisa y  $\Delta z$  en la ordenada. Estas imágenes del frente de onda también se pueden determinar para un procedimiento de obtención de imágenes tridimensionales. Luego se utilizan otras coordenadas para representar imágenes del frente de onda en diversos planos.

La **figura 9A** muestra la amplitud de tal imagen del frente de onda y la **figura 9B** muestra la parte real de esta imagen del frente de onda. Se constata en esta figura 9B un salto de fase de  $\pi$  radianes al pasar por el punto de focalización del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  (posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  de coordenadas  $\Delta x = \Delta z = 0$  en esta figura). A este salto de fase se le conoce por la denominación salto de fase de Gouy. La imagen del frente de onda permite ilustrar claramente este fenómeno.

Al igual que para las imágenes de propagación, es posible invertir el papel que desempeñan los transductores virtuales de entrada  $TV_{in}$  y los transductores virtuales de salida  $TV_{out}$ . En este caso se obtiene una estimación del campo de presión generado por la focalización de salida.

#### Determinación de la velocidad del sonido integrada

El procedimiento y sistema de caracterización ultrasónica de un medio según la presente divulgación e implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 también es capaz de determinar la velocidad del sonido integrada en un punto del medio. La velocidad del sonido integrada es una estimación del valor promedio de la velocidad del sonido entre los transductores del dispositivo de sondeo 41 y un punto del medio. Más exactamente, esta velocidad del sonido integrada integra el conjunto de velocidades del sonido locales de las zonas atravesadas por el recorrido de ida y luego de vuelta de la onda ultrasónica.

En ese caso, el procedimiento comprende:

- una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda como se ha descrito anteriormente en función de una velocidad del sonido  $c_0$  en el medio,
- una etapa de determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}$  del centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda para el transductor virtual de entrada de  $TV_{in}$ , y
- una etapa de cálculo de una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}$  a partir de la siguiente fórmula:

$$c^{(1)}(\mathbf{r}_{in}) = c_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})}{z_{in}}}$$

(Ec. 8)

en la que  $z_{in}$  es la componente según un segundo eje Z del vector de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ .

Por "centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda", se entiende, por ejemplo, a la posición del máximo de la mancha focal en la imagen del frente de onda; es decir, la posición del píxel que tiene el mayor valor de toda la imagen del frente de onda. Hay que señalar que, en la imagen del frente de onda, solo se observa una única mancha focal y su posición es, por tanto, única. De este modo, la posición del centro de la mancha focal también es única y representa la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$  a utilizar para corregir la velocidad del sonido  $c_0$ , para el punto del medio correspondiente a la posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ .

Por ejemplo, el centro de la mancha focal se determina buscando en la imagen del frente de onda la posición espacial del punto de mayor valor y la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}$  del centro de la mancha focal es entonces la componente en la dirección del eje Z de profundidad, correspondiente al eje  $\Delta z$ , de este punto de mayor valor.

Cabe señalar que la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}$  se determina para cada transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  tomado en el medio o viceversa para cada transductor virtual de salida  $TV_{out}$  tomado en el medio. De manera más general, esta posición de profundidad depende de cada punto de posición espacial  $\mathbf{r}$  considerado y se puede denotar  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r})$  siendo  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{in}$  o  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_{out}$ .



De hecho, en las imágenes de la película de propagación o de la película de propagación de onda coherente, la onda ultrasónica se focaliza en el instante del retraso adicional  $\delta t$  cero ( $\delta t=0$ ) solo si la velocidad del sonido  $c_0$ , utilizada para el cálculo de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  a través de los cálculos del tiempo de vuelo de ida y del tiempo de vuelo de vuelta, y para el cálculo de la imagen del frente de onda a través de la relación de propagación balística, es un valor de velocidad del sonido que corresponde a una velocidad del sonido integrada correcta para el medio real entre los transductores 11 del dispositivo de sondeo 41 y el punto del medio correspondiente al transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$ .

Por ejemplo, la **figura 10** ilustra este proceso. En esta figura 10, las imágenes con las referencias A, B y C muestran imágenes del frente de onda obtenidas con velocidades del sonido  $c_0$  predefinidas respectivamente de 1440 m/s, 1540 m/s y 1640 m/s. En estas imágenes del frente de onda, se observa una mancha focal que se desplaza según el eje de ordenadas  $\Delta z$ , es decir, en profundidad (dirección Z). El gráfico con la referencia D muestra entonces las tres curvas de intensidad  $CI_A$ ,  $CI_B$  y  $CI_C$  de estas imágenes del frente de onda en este eje de ordenadas  $\Delta z$ , es decir, el eje para el que  $\Delta x = 0$ .

Por ejemplo, la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$  de la mancha focal se obtiene como se ilustra en la figura 10, es decir determinando la posición de profundidad del máximo de los valores de la imagen del frente de onda en el eje de ordenadas  $\Delta z$ , tal como  $\Delta x = 0$ . La posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$  de la mancha focal en la imagen del frente de onda se realiza buscando en la imagen del frente de onda la posición en el eje de ordenadas  $\Delta z$  que tiene un valor máximo en esta imagen del frente de onda, correspondiendo este eje de ordenadas  $\Delta z$  a una abscisa  $\Delta x$  cero en la imagen del frente de onda.

Por ejemplo, para la curva de intensidad  $CI_A$  del gráfico D, la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$  es de aproximadamente 4,5 mm, lo que conllevaría una estimación de la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{in})$  superior a la velocidad del sonido inicialmente supuesta  $c^{(0)}$ , en la posición  $\mathbf{r}_{in}$  del transductor virtual de entrada elegido  $TV_{in}$ , de modo que la posición vertical según el eje  $\Delta z$  de la mancha focal de la imagen A se desplazará hacia arriba y, por tanto, hacia el punto de origen ( $\Delta x = \Delta z = 0$ ) del transductor virtual de entrada, lo que corresponde a un reestablecimiento mediante el cálculo de la velocidad del sonido integrada para este punto del medio del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ .

Por consiguiente, en la práctica, es posible contentarse eventualmente con calcular los valores de la imagen del frente de onda en el eje  $\Delta z$ , para el que  $\Delta x=0$ , para determinar una velocidad del sonido o velocidad del sonido integrada.

De este modo, el procedimiento de caracterización ultrasónica de un medio, para determinar una velocidad del sonido integrada, comprende las siguientes etapas:

- una etapa de generación de una serie de ondas ultrasónicas incidentes  $US_{in}$  en una zona de dicho medio, por medio de una red 10 de transductores 11, siendo dicha serie de ondas ultrasónicas incidentes una base de emisión  $i$ ; y
- una etapa de generación de una matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  definida entre la base de emisión  $i$  de entrada y una base de recepción  $u$  de salida;
- una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  que comprende unas respuestas del medio entre un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  y un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ , tomándose las respuestas del transductor virtual de salida  $TV_{out}$  en un instante temporal desplazado por un retraso adicional  $\delta t$  con respecto a un instante temporal de las respuestas del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ ,
- una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda en función de la velocidad del sonido  $c_0$  en el medio, y determinándose dicha imagen del frente de onda a partir:

- de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  y
- de una relación de propagación balística de tipo  $\delta t(\Delta \mathbf{r}_{out}) = -\text{sign}(\Delta z_{out}) \cdot |\Delta \mathbf{r}_{out}|/c_0$ , que permite extraer valores de la matriz de reflexión focalizada para construir la imagen del frente de onda, y en la que:

$\delta t$  es el retraso adicional,

$|\Delta \mathbf{r}_{out}|$  es el módulo del vector entre el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y el transductor virtual de salida  $TV_{out}$ , siendo  $\Delta \mathbf{r}_{out} = \mathbf{r}_{out} - \mathbf{r}_{in}$ ,

$\Delta z_{out}$  es la componente según un eje Z de profundidad del vector de posición espacial  $\Delta \mathbf{r}_{out}$ ,

- una etapa de determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}$  del centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda, y
- una etapa de cálculo de una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}$ , a partir de la siguiente fórmula:

$$c^{(1)}(\mathbf{r}_{in}) = c_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})}{z_{in}}}$$

(Ec. 9)

en la que  $z_{in}$  es la componente según el eje Z de profundidad del vector de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ .

- 5 Eventualmente, este procedimiento se puede repetir una o varias veces como se ha definido anteriormente, calculando una nueva velocidad del sonido integrada  $c^{(n+1)}$  a partir de la determinación de una imagen del frente de onda obtenida con la anterior velocidad del sonido integrada  $c^{(n)}$ , de la determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(n)}$  del centro de la mancha focal, y del cálculo de la nueva velocidad del sonido integrada  $c^{(n)}$  por la misma fórmula de iteración:

$$10 \quad c^{(n+1)}(\mathbf{r}_{in}) = c^{(n)}(\mathbf{r}_{in}) \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(n)}(\mathbf{r}_{in})}{z_{in}}}$$

(Ec. 10)

15 En la práctica, este proceso iterativo converge extremadamente rápido a una velocidad del sonido integrada óptima que corresponde a la mejor velocidad del sonido integrada para los transductores 11 del dispositivo de sondeo y el punto elegido del medio (transductor virtual de entrada).

Además, en una variante, este procedimiento para determinar la velocidad del sonido integrada se puede mejorar realizándolo entre la etapa de determinación de una imagen del frente de onda y la etapa de determinación de la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$  de una mancha focal, una etapa de mejora de la imagen del frente de onda en la que se realiza una combinación lineal de un conjunto de imágenes del frente de onda correspondientes a una zona de coherencia ZC dada, tomándose cada imagen del frente de onda del conjunto entre un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  elegido, de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  diferente, y unos transductores virtuales de salida  $TV_{out}$ , de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ , tales como  $\mathbf{r}_{out} = \Delta \mathbf{r}_{out} + \mathbf{r}_{in}$ , estando  $\Delta \mathbf{r}_{out}$  predefinidos e idénticos para todas las imágenes del frente de onda del conjunto y siendo los transductores de entrada virtuales elegidos vecinos unos de otros. Se obtiene así una imagen del frente de onda mejorada o imagen del frente de onda coherente asociada a un transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$ , representando este transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  los transductores virtuales de entrada del conjunto de imágenes del frente de onda utilizadas asociadas a la zona de coherencia ZC elegida, y para las mismas posiciones relativas  $\Delta \mathbf{r}_{out}$ .

30 Por ejemplo, el transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  es un transductor virtual de entrada de posición espacial correspondiente al promedio de las posiciones espaciales de los transductores virtuales de entrada elegidos o un promedio ponderado de las posiciones espaciales de los transductores virtuales de entrada elegidos, como ya se explicó anteriormente en el caso de las películas de propagación.

35 En resumen, en el procedimiento de la presente divulgación, se añaden las siguientes etapas:

- entre la etapa de determinación de una imagen del frente de onda y la etapa de determinación de la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$  de una mancha focal, se realiza una etapa de mejora de la imagen del frente de onda en la que se realiza una combinación lineal de un conjunto de imágenes del frente de onda correspondientes a una zona de coherencia, tomándose cada imagen del frente de onda entre un transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) elegido, de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  diferente, y unos transductores virtuales de salida ( $TV_{out}$ ), de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ , tales como  $\mathbf{r}_{out} = \Delta \mathbf{r}_{out} + \mathbf{r}_{in}$ , estando  $\Delta \mathbf{r}_{out}$  predefinidos y siendo idénticos para todas las imágenes del frente de onda del conjunto, y siendo los transductores virtuales de entrada elegidos vecinos unos de otros, para obtener una imagen del frente de onda mejorada, asociada a un transductor virtual de entrada de referencia ( $TV_{in,ref}$ ), siendo este transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  característico de los transductores virtuales de entrada del conjunto de imágenes del frente de onda utilizadas y asociadas a la zona de coherencia ZC, y
- en la etapa de determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$ , se utiliza la imagen del frente de onda mejorada en lugar de la imagen del frente de onda, la posición de profundidad del centro de la mancha focal es relativa a la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$ , y esta posición de profundidad del centro de la mancha focal permite estimar una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{in,ref})$  en la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$ .

Luego se utiliza la imagen del frente de onda mejorada (imagen del frente de onda coherente) (en lugar de la imagen del frente de onda) para determinar la posición axial del centro de la mancha focal. Esta distancia o posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in,ref})$  es entonces característica de un modelo de velocidad del sonido incorrecta y se puede utilizar para estimar la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{in,ref})$  asociada a la posición espacial  $\mathbf{r}_{in,ref}$  del transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$ .

Según un modo de realización, la combinación lineal está determinada por un cálculo de descomposición en valor singular SVD del conjunto de imágenes del frente de onda para obtener un vector singular  $\mathbf{W}_1$  asociado al valor singular de descomposición en valor singular de mayor valor absoluto, siendo entonces este vector singular  $\mathbf{W}_1$  la imagen del frente de onda mejorada correspondiente a dicho transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  y para los mismos retrasos adicionales  $\delta t$ .

La pluralidad de las imágenes del frente de onda del conjunto se puede procesar en este caso por descomposición en valores singulares para combinar varias mediciones o experimentaciones del desorden acústico de una región vecina a un transductor virtual de entrada, lo que permite superar las fluctuaciones vinculadas al desorden y mejorar el contraste de la imagen del frente de onda y su aprovechamiento.

Además, es posible determinar una velocidad del sonido óptima del medio (realista para el medio en su totalidad) mediante el cálculo de una velocidad del sonido integrada como se ha descrito anteriormente, y tomando para la combinación lineal el conjunto de imágenes del frente de onda, un conjunto de imágenes del frente de onda correspondientes a transductores virtuales de entrada ( $TV_{in}$ ) elegidos que cubren sustancialmente el conjunto de una zona de interés del medio. En concreto, estos transductores virtuales de entrada elegidos pueden distribuirse uniformemente por toda la zona de interés del medio, con un espaciamiento predeterminado. Por ejemplo, estos transductores virtuales de entrada elegidos pueden representar el 20 % o más del número de transductores virtuales de entrada utilizados, por ejemplo, para construir una imagen ecográfica del medio que cubre la zona a estudiar.

Cabe señalar que las distancias o posiciones de profundidad  $\Delta z^{(0)}(r_{in})$  o  $\Delta z^{(0)}(r_{in,ref})$  pueden interpretarse como un error de focalización de salida debido a las aberraciones experimentadas durante la etapa de retropropagación de los ecos procedentes de las posiciones espaciales  $r_{in}$  o  $r_{in,ref}$ . La medición de la velocidad del sonido integrada también se puede determinar sondeando las aberraciones experimentadas por los frentes de onda en el camino de ida. Esta medición se describe invirtiendo las denominaciones "in" y "out" en las ecuaciones anteriores, intercambiando el papel de los transductores virtuales de entrada y salida, para obtener otra estimación de la velocidad del sonido integral  $c^{(1)}_{out}$ .

Además, es posible mejorar la estimación de la velocidad del sonido integrada combinando las mediciones o estimaciones de la velocidad del sonido integradas obtenidas a partir de las aberraciones generadas en la ida y/o la vuelta, es decir, las velocidades del sonido integradas  $c^{(1)}_{in}$  y  $c^{(1)}_{out}$ .

Luego el procedimiento se completa con las siguientes etapas:

- se invierte el papel del o de los transductores virtuales de entrada y del o de los transductores virtuales de salida para determinar una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(r_{out})$  con respecto a un transductor virtual de salida, y
- se combina la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(r_{in})$  con referencia al transductor virtual de entrada y la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(r_{out})$  con referencia al transductor virtual de salida para obtener una velocidad del sonido integrada mejorada.

### Imágenes de velocidad de sonido integrada

El procedimiento de caracterización ultrasónica implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 se puede completar construyendo una o más imágenes de velocidad del sonido integradas, determinándose esta o estas imágenes de velocidad del sonido integradas mediante al menos un cálculo de una velocidad del sonido integrada, como se ha descrito anteriormente, y para una pluralidad de puntos del medio correspondientes a transductores virtuales de entrada  $TV_{in}$  (primeros puntos P1) de posición espacial  $r_{in}$ .

La **figura 11** ilustra dos ejemplos de tales imágenes.

En el primer ejemplo correspondiente a las imágenes A1 y A2 de la figura 11, el medio es de tipo fantoma con una velocidad del sonido de referencia dada para sustancialmente  $c_{ref} = 1542$  m/s. La imagen A1 es la imagen ecográfica estándar, mientras que la imagen A2 es la imagen de la velocidad del sonido integrada obtenida mediante el procedimiento anterior. Esta imagen del sonido integrada A2 permite estimar un valor promedio de la velocidad del sonido en el medio de 1544 m/s con una desviación típica de  $\pm 3$  m/s, lo cual concuerda totalmente con el valor de velocidad del sonido de referencia de este medio.

En el segundo ejemplo, correspondiente a las imágenes B1 y B2 de la figura 11, el medio es un medio estratificado con una primera capa de casi 20 mm de espesor, con una estructura fibrosa y una velocidad del sonido de sustancialmente 1570 m/s colocado sobre el mismo medio de tipo fantoma que tiene una velocidad del sonido predeterminada por construcción de sustancialmente 1542 m/s. La imagen B1 es la imagen ecográfica estándar de este medio, mientras que la imagen B2 es la imagen integrada de la velocidad del sonido obtenida mediante el procedimiento descrito anteriormente. Esta imagen del sonido integrada B2 refleja una velocidad del sonido más elevada en la primera capa de aproximadamente 1580 m/s y una velocidad de sonido más baja por debajo, pero no idéntica a la de la velocidad del sonido esperada y correspondiente a la de este medio estudiado en el primer ejemplo. Este efecto se debe al hecho de que la velocidad del sonido calculada mediante el método es una velocidad del sonido integrada que corresponde a una velocidad del sonido promedio o integrada sobre la totalidad del recorrido de ida y vuelta de las ondas entre los transductores 11 y el punto del medio.

### Corrección de aberraciones axiales

El procedimiento y sistema de caracterización ultrasónica de un medio según la presente divulgación e implementado

por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 también es capaz de determinar una corrección axial.

El procedimiento de caracterización ultrasónica de un medio, para determinar una caracterización temporal y local de una focalización ultrasónica con una corrección axial comprende las siguientes etapas, ya explicadas para obtener una matriz de reflexión focalizada, es decir:

- una etapa de generación de una serie de ondas ultrasónicas incidentes  $US_{in}$  en una zona de dicho medio, por medio de una red 10 de transductores 11, siendo dicha serie de ondas ultrasónicas incidentes una base de emisión  $i$ ; y
- una etapa de generación de una matriz de reflexión experimental  $R_{ui}(t)$  definida entre la base de emisión  $i$  de entrada y una base de recepción  $u$  de salida;
- una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  que comprende unas respuestas del medio entre un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$  y un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$ , tomándose las respuestas del transductor virtual de salida  $TV_{out}$  en un instante temporal desplazado por un retraso adicional  $\delta t$  con respecto a un instante temporal de las respuestas del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ , y
- una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda como se ha descrito anteriormente en función de una velocidad del sonido  $c_0$  en el medio,
- una etapa de determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(r_{in})$  del centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda.

Por "centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda", se entiende, por ejemplo, a la posición del máximo de la mancha focal en la imagen del frente de onda; es decir, la posición del píxel que tiene el mayor valor de toda la imagen del frente de onda. El centro de la mancha focal y la posición de profundidad se pueden encontrar/determinar según una de las técnicas ya explicadas anteriormente.

Este procedimiento comprende además una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  mediante una traslación de las respuestas de la matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  de una traslación espacial en la dirección  $Z$  de profundidad, siendo dicha traslación espacial en función de la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(r_{in})$  determinada previamente.

Según una primera variante, la traslación espacial se realiza mediante la traslación espacial de la componente axial del transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$  (según el eje de profundidad  $Z$ ) de un valor de corrección  $\Delta z_{corr}(r_{in})$  igual a  $2 \cdot \Delta z^{(0)}(r_{in})$ , para obtener la matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$ , tal que:

$$RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t) = RFoc(r_{in}, \{x_{out}, z_{out} + \Delta z_{corr}(r_{out})\}, \delta t) \quad (Ec. 11)$$

Una imagen ecográfica corregida  $I^{(1)}(r_{in})$  luego se puede construir a partir de la matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  caracterizada por  $r = r_{in} = r_{out}$ , y  $\delta t = 0$  para obtener:

$$I^{(1)}(r) = RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out} = r_{in}, \delta t = 0) \quad (Ec. 12)$$

De manera recíproca, la traslación espacial también puede corresponder a la traslación espacial de las componentes según el eje  $Z$  de profundidad del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$  con un valor de corrección  $\Delta z_{corr}(r_{in})$  igual a  $2 \cdot \Delta z^{(0)}(r_{in})$  para obtener la siguiente matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$ :

$$RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t) = RFoc(\{x_{in}, z_{in} + \Delta z_{corr}(r_{in})\}, r_{out}, \delta t) \quad (Ec. 13)$$

Cabe señalar que la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}$  se determina para cada transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  tomado en el medio y es característica de la aberración experimentada durante el trayecto de vuelta. Al invertir las notaciones "in" y "out", es posible determinar la posición  $\Delta z^{(0)}(r_{out})$  característica de la aberración experimentada durante el recorrido de ida, para cada transductor virtual de salida  $TV_{out}$  tomado en el medio. Dicho de otro modo, de manera más general, esta posición de profundidad depende de cada punto de posición espacial  $r$  considerado y también se puede denotar  $\Delta z^{(0)} = \Delta z^{(0)}(r)$  siendo  $r = r_{in}$  o  $r = r_{out}$ .

Según una segunda variante, la traslación espacial se realiza mediante:

- el cálculo de un valor de corrección  $\Delta z_{corr}(r)$  igual a  $\Delta z^{(1)}(r)$  que está determinado por la siguiente fórmula:

$$\Delta z^{(1)}(r) = z^{(1)}(r) - z_{in}$$

siendo

$$z^{(1)}(\mathbf{r}) = z \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})}{z_{in}}}$$

(Ec. 14)

en la que se aplica esta ecuación para

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_{in} \text{ y } \mathbf{r} = \mathbf{r}_{out}$$

$z = z_{in}$  y  $z = z_{out}$  es la componente según un eje Z de profundidad de la posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  del transductor virtual de entrada TV<sub>in</sub> o posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$  del transductor virtual de salida TV<sub>out</sub>,

- el cálculo de la matriz de reflexión focalizada corregida  $\mathbf{RFoc}^{(1)}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  por traslación espacial de las componentes según el eje Z de profundidad del transductor virtual de entrada TV<sub>in</sub> de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  de dicho valor de corrección  $\Delta z_{corr}(\mathbf{r}_{in})$  y transductor virtual de salida TV<sub>out</sub> de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$  de dicho valor de corrección  $\Delta z_{corr}(\mathbf{r}_{out})$ , tal que:

$$\mathbf{RFoc}^{(1)}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t) = \mathbf{RFoc}(\{x_{in}, x_{in} + \Delta z_{corr}(\mathbf{r}_{in})\}, \{x_{out}, x_{out} + \Delta z_{corr}(\mathbf{r}_{out})\}, \delta t)$$

Este cálculo anterior, también se puede expresar en función de la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r})$  a partir de la siguiente fórmula:

$$c^{(1)}(\mathbf{r}_{in}) = c_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})}{z_{in}}}$$

(Ec. 15)

en la que  $z_{in}$  es la componente según un segundo eje Z del vector de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  del transductor virtual de entrada TV<sub>in</sub>, y

- el cálculo de la traslación  $\Delta z^{(1)}@$  mediante:

$$\Delta z^{(1)}(\mathbf{r}) = z^{(1)}(\mathbf{r}) - z_{in}$$

siendo

$$z^{(1)}(\mathbf{r}) = z_{in} \frac{c^{(1)}(\mathbf{r})}{c_0} = z_{in} \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(0)}(\mathbf{r})}{z_{in}}}$$

(Ec. 16)

Según unas modificaciones de las dos variantes anteriores, se pueden implementar las traslaciones calculando la transformada de Fourier espacial, desfase por una rampa de fase cuya pendiente depende del valor de corrección, luego transformada de Fourier espacial inversa. Esta implementación tiene la ventaja de permitir combinar la traslación y la interpolación para nuevas coordenadas espaciales.

A modo de ejemplo, el procedimiento así implementado realiza:

- una etapa de determinación de una matriz de frecuencias espacial  $\mathbf{RFreq}_z(\mathbf{r}_{in}, x_{out}, k_{zout}, \delta t)$  que es una transformada de Fourier espacial según una dirección de profundidad de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$ , según la ecuación:

$$\mathbf{RFreq}_z(\mathbf{r}_{in}, x_{out}, k_{zout}, \delta t) = TF_{zout}[\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)]$$

(Ec. 17)

en la que

$TF_{zout}$  es la transformada espacial de Fourier según la dirección de profundidad  $\Delta z_{out}$ ,

$k_{zout}$  es el número de onda correspondiente comprendido en el intervalo  $[\omega/c_0, \omega^*/c_0]$ , siendo las pulsaciones  $\omega$  y  $\omega^*$  las pulsaciones límite del ancho de banda de las ondas ultrasónicas, y

$x_{out}$  es la componente transversal en la dirección del eje X, de cada transductor virtual de salida TV<sub>out</sub> de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ .

- una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada corregida  $\mathbf{RFoc}^{(1)}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  correspondiente a la transformada de Fourier espacial inversa según la misma dirección de profundidad, del producto de la matriz de frecuencias espacial  $\mathbf{RFreq}_z(\mathbf{r}_{in}, x_{out}, k_{zout}, \delta t)$  por una rampa de fase del valor de corrección  $\Delta z_{corr}$  de profundidad, es decir, igual a  $2 \cdot \Delta z^{(0)}(\mathbf{r}_{in})$  según las variantes anteriores, y determinada para cada posición espacial del transductor virtual de entrada TV<sub>in</sub>, y en la que se aplica la siguiente fórmula:

$$\mathbf{RFoc}^{(1)}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t) = TF_{kzout}^{-1}[\mathbf{RFreq}_z(\mathbf{r}_{in}, x_{out}, k_{zout}, \delta t) e^{-ik_{zout} \Delta z_{corr}}]$$

(Ec. 18)

en la que

$e^{-ix}$  es la función exponencial compleja,

$\Delta z_{corr}$  es el valor de corrección determinado por la posición de profundidad del centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda.

La transformada de Fourier espacial en la dirección  $\Delta z_{out}$  puede explicarse, por ejemplo, mediante la siguiente fórmula de transformada de Fourier espacial discreta:

$$\begin{aligned} RFreq_z(r_{in}, x_{out}, k_{z,out}, \delta t) &= TF_{zout} [RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)] \\ &= \sum_{\Delta z_{out}} RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t) e^{-ik_{z,out} \Delta z_{out}} \end{aligned} \quad (Ec. 19)$$

Existen otras fórmulas de transformada de Fourier y transformada de Fourier espacial.

La transformada de Fourier espacial inversa en la dirección  $\Delta z_{out}$  se puede explicar entonces mediante la siguiente fórmula recíproca:

$$\begin{aligned} RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t) &= TF_{kzout}^{-1} [RFreq_z(r_{in}, x_{out}, k_{z,out}, \delta t) e^{-ik_{z,out} \Delta z_{corr}}] \\ &= \sum_{k_{z,out}} RFreq_z(r_{in}, x_{out}, k_{z,out}, \delta t) e^{-ik_{z,out} \Delta z_{corr}} e^{-ik_{z,out} \Delta z_{corr}} e^{ik_{z,out} \Delta z_{out}} \end{aligned} \quad (Ec. 20)$$

Según una tercera variante, las respuestas se trasladan axialmente mediante un cálculo o determinación de una matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  con una nueva velocidad del sonido  $c_1(r)$  que sustituye la velocidad del sonido  $c_0$  supuesta.

El procedimiento de esta tercera variante comprende así además las siguientes etapas para obtener una matriz de reflexión focalizada corregida axialmente:

- una etapa de cálculo de una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(r)$  a partir de la siguiente fórmula:

$$c^{(1)}(r_{in}) = c_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(0)}(r_{in})}{z_{in}}} \quad (Ec. 21)$$

en la que  $z_{in}$  es la componente según un segundo eje Z del vector de posición espacial  $r_{in}$  del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ , y

- una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  que comprende unas respuestas del medio entre un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$  y un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$ , obteniéndose cada una de las respuestas con una velocidad del sonido corregida dependiendo del transductor virtual de entrada.

Para cada una de estas variantes, la matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  es una corrección axial de la matriz de reflexión focalizada, es decir, una matriz de reflexión focalizada cuyas aberraciones axiales han sido corregidas. Gracias a esta matriz de reflexión focalizada corregida, ventajosamente, resulta posible construir una imagen ecográfica con aberraciones axiales reducidas. De este modo, las distancias en dirección axial en esta imagen ecográfica corregida son más precisas y permiten, por ejemplo, la obtención de imágenes de mejor calidad.

La matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  se obtiene mediante una traslación espacial, que es, ya sea una traslación de la posición espacial en la dirección Z de la componente axial de uno o ambos transductores virtuales ( $TV_{in}$  y/o  $TV_{out}$ ), o ya sea una traslación por cambio de velocidad del sonido  $c$ . Estas alternativas permiten mejorar la etapa de formación de haces que es similar a un proceso de traducción de información temporal dada por las señales experimentales de la matriz de reflexión experimental  $R_{ui}(t)$  (también denominadas con frecuencia señales de RF) en una información espacial a través de la relación  $t = z / c$ . De este modo, las posiciones espaciales de los puntos del medio se corrigen axialmente en la dirección Z de profundidad, lo que permite obtener imágenes con un posicionamiento vertical más preciso.

Por ejemplo, la **figura 12** ilustra este proceso. En esta figura 12, la imagen con la referencia A corresponde a una imagen ecográfica obtenida con una velocidad del sonido  $c_0$  de  $c_0 = 1540$  m/s que es la velocidad del sonido en el fantoma, pero no la de la capa de agua por encima del fantoma que tiene una velocidad del sonido de  $c_{agua} = 1480$  m/s.

Por tanto, habitualmente se obtiene una imagen ecográfica A con una resolución y un contraste degradados debido a la heterogeneidad de los medios estudiados. Las técnicas conocidas de corrección de aberraciones permiten obtener la imagen con la referencia B mejorada lateralmente y que da una imagen de mejor calidad que las técnicas convencionales. Sin embargo, en esta imagen las posiciones de profundidad de los elementos reflectantes no están corregidas (véanse las flechas horizontales entre las imágenes A y B).

La imagen con la referencia C corresponde a una imagen ecográfica obtenida mediante la corrección axial propuesta en el procedimiento presentado anteriormente. En esta imagen C, los elementos reflectantes se desplazan ligeramente hacia arriba (hacia la superficie exterior), lo que muestra la influencia de la velocidad del sonido reducida en el agua con respecto a la del fantoma. De este modo, gracias a esta corrección axial, las posiciones axiales (de profundidad) de los puntos de la imagen están más cerca de la verdadera naturaleza del medio observado y las distancias medidas en tal imagen están más cerca de los valores exactos.

También es posible mejorar la técnica de una u otra de las tres variantes anteriores, determinando imágenes del frente de onda mejoradas utilizando combinaciones de un conjunto de imágenes del frente de onda y determinando la velocidad del sonido tanto de entrada como de salida como se explicó anteriormente en la parte de determinación de la velocidad del sonido integrada y, por ejemplo, mediante una técnica de descomposición en valores singulares.

La pluralidad de las imágenes del frente de onda del conjunto se procesa en este caso por descomposición en valores singulares para combinar varias mediciones o experimentaciones del desorden acústico de una región vecina a un transductor virtual de entrada, lo que permite de manera muy ventajosa mejorar el contraste de la imagen del frente de onda y su aprovechamiento.

#### Imagen ecográfica corregida corrigiendo las aberraciones axiales

El procedimiento de caracterización ultrasónica para determinar una corrección axial e implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 puede entonces completarse construyendo una o más imágenes ecográficas corregidas, determinándose una imagen ecográfica corregida calculando un valor de intensidad ecográfica para una pluralidad de puntos del medio, correspondiendo cada uno a un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$  de la matriz de reflexión focalizada corregida  $RFoc^{(1)}(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  e imponiendo un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  coincidente con el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ , es decir  $r_{in} = r_{out}$ .

#### Determinación de una dirección preferida de anisotropía de los difusores del medio

El procedimiento y sistema de caracterización ultrasónica de un medio según la presente divulgación e implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 también es capaz de determinar localmente una dirección preferida de una anisotropía de los difusores en el medio.

La anisotropía del difusor caracteriza cualquier difusor que es susceptible de generar ecos en una dirección preferida cuando está insonificado en una dirección incidente particular. Por tanto, esta anisotropía concierne a cualquier difusor cuyas dimensiones sean superiores a la longitud de onda. En particular, en el caso de la obtención de imágenes médicas, interesarán las fibras, las paredes de órganos, los instrumentos quirúrgicos tales como agujas de biopsia, ...

En ese caso, el procedimiento comprende etapas similares o idénticas a las ya explicadas anteriormente, hasta:

- una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda como se ha descrito anteriormente en función de una velocidad del sonido  $c_0$  en el medio.

El procedimiento además comprende:

- una etapa de determinación de una dirección preferida de la mancha focal en la imagen del frente de onda mediante el procesamiento de imágenes de dicha imagen del frente de onda.

Por ejemplo, la **figura 13** ilustra este proceso. En esta figura 13, la imagen con la referencia A corresponde a una imagen ecográfica con una variación espacial de la dirección de anisotropía de los tejidos. El medio del que se han obtenido imágenes en esta ecografía corresponde a un músculo de un paciente (una pantorrilla en este ejemplo) en el que se observan varias regiones con fibras inclinadas en direcciones muy diferentes. Esta aplicación a una imagen de un músculo no es más que un ejemplo de un medio anisotrópico al que se puede aplicar el procedimiento. Sin embargo, una imagen ecográfica de este tipo habitual proporciona información general distorsionada. La ecografía del estado de la técnica no permite una observación fiable de esta anisotropía, que es una característica local del medio, ya que la propagación de las ondas ultrasónicas en un medio de este tipo no es ni a velocidad constante ni se propaga en dirección rectilínea desde los transductores de la sonda.

Las imágenes con las referencias B, C, D y E de esta figura 13 corresponden a las imágenes del frente de onda construidas para las pequeñas regiones de la imagen ecográfica conectadas por las flechas. Estas imágenes del frente

de onda se procesan en este caso por descomposición en valores singulares de una pluralidad de transductores virtuales en cada una de estas regiones para capturar o sondear una pluralidad de experimentaciones del desorden acústico de esta región y mejorar así el contraste de la imagen del frente de onda producida y su análisis.

- 5 Todas estas imágenes del frente de onda B, C, D y E muestran una mancha focal muy alargada en la dirección vertical (dirección del eje de profundidad  $\Delta z$ ), pero con una inclinación diferente. Esta inclinación de la mancha focal en la imagen del frente de onda es una información de inclinación local que está muy correlacionada con el valor real de inclinación de las fibras musculares en la región considerada. De hecho, el eje de inclinación de la mancha focal es sustancialmente perpendicular a la dirección de las fibras, concretamente, en el centro de la imagen, ubicación donde la onda incidente tiene una dirección sustancialmente en la dirección Z de profundidad.

De este modo, el procedimiento determina la dirección preferida de la mancha focal en la imagen del frente de onda mediante un procesamiento de imágenes en esta imagen del frente de onda.

- 15 Según una primera variante, el procedimiento puede, por ejemplo, extraer un contorno de la mancha focal mediante un umbral a un nivel inferior al valor máximo en esta imagen del frente de onda, por ejemplo, a un 50 % o 70 % de este máximo. A partir de este contorno, se puede deducir la dirección preferida o dirección principal (la dirección de mayor dimensión para la mancha focal) y la dirección secundaria (la dirección de menor dimensión). Sin embargo, son posibles otras técnicas de procesamiento de imágenes para extraer la dirección preferida de la mancha focal.

Según una segunda variante, el procedimiento puede, por ejemplo:

- transformar la imagen del frente de la onda  $U(\mathbf{r}_{in}, \Delta x_{out}, \Delta z_{out})$  de un marco de referencia en coordenadas cartesianas a un marco de referencia en coordenadas polares, de tipo  $U(\mathbf{r}_{in}, \Delta s_{out}, \Delta \phi_{out})$
- 25 - sumar los valores de dicha imagen del frente de onda del marco de referencia en coordenadas polares, en una pluralidad de valores de desviaciones de alejamiento radial  $\Delta s_{out}$ , para obtener una función de sensibilidad angular  $f(\mathbf{r}_{in}, \Delta \phi_{out})$  para una pluralidad de valores angulares  $\Delta \phi_{out}$ ,
- determinar el valor angular óptimo  $\Delta \phi_{out}^{max}(\mathbf{r}_{in})$  correspondiente al máximo de la función de sensibilidad angular, correspondiendo dicho valor angular óptimo  $\Delta \phi_{out}^{max}(\mathbf{r}_{in})$  a la dirección preferida de la mancha focal asociada con el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ .

De este modo se tiene:

$$\Delta \phi_{out}^{max}(\mathbf{r}_{in}) = \max_{\Delta \phi_{out}} [\sum_{\Delta s_{in}} U(\mathbf{r}_{in}, \Delta s_{out}, \Delta \phi_{out})] \quad (\text{Ec. 22})$$

- 35 La **figura 14** muestra un ejemplo de una curva de función de sensibilidad angular  $f(\mathbf{r}_{in}, \Delta \phi_{out})$  de dicha imagen del frente de onda del marco de referencia en coordenadas polares correspondiente a la figura 13B, estando dicha función de sensibilidad angular, en este ejemplo ilustrativo, normalizada para tener un valor máximo igual a uno (1). Esta curva presenta un máximo hacia  $\Delta \phi_{out} = -11^\circ$  que, en este ejemplo, es el ángulo estimado de la dirección local preferida en el punto considerado en el medio.

Eventualmente, se aplica al valor angular  $\Delta \phi_{out}$ , una corrección correspondiente al ángulo de visión del punto considerado en el medio visto desde los transductores para obtener un valor angular de anisotropía  $\gamma_{out}(\mathbf{r}_{in})$ , que es característico de la dirección de anisotropía de los difusores ubicados en la posición espacial del transductor virtual de entrada.

Esta estimación se realiza en este caso a partir de la correlación de las señales de salida. De manera recíproca, se puede estimar otro valor angular de anisotropía  $\gamma_m(\mathbf{r}_{out})$ , que es característico de la dirección de anisotropía de los difusores ubicados en la posición espacial del transductor virtual de salida. Ventajosamente, es posible combinar los dos valores angulares de anisotropía  $\gamma_{out}(\mathbf{r}_{in})$  y  $\gamma_m(\mathbf{r}_{out})$ , para obtener una mejor caracterización local de la dirección de anisotropía del medio.

Según un ejemplo, el procedimiento podría completarse mediante las siguientes etapas:

- 55 - se invierte el papel del o de los transductores virtuales de entrada y del o de los transductores virtuales de salida para determinar una dirección preferida con respecto a un transductor virtual de salida, y
- se combina la dirección preferida con referencia al transductor virtual de entrada y la dirección preferida con referencia al transductor virtual de salida para obtener una dirección preferida mejorada.

- 60 Según otro ejemplo, el procedimiento podría completarse mediante las siguientes etapas:

- se invierte el papel del o de los transductores virtuales de entrada y del o de los transductores virtuales de salida para determinar un valor angular de anisotropía con respecto a un transductor virtual de salida  $\gamma_{out}(\mathbf{r}_{out})$ , y



- se combina el valor angular de anisotropía con referencia al transductor virtual de entrada  $\gamma_{out}(r_{in})$  y el valor angular de anisotropía con referencia al transductor virtual de salida  $\gamma_{out}(r_{out})$  para obtener un valor angular de anisotropía mejorado.

5 Un ejemplo de cálculo de valor angular de anisotropía puede venir dado por la siguiente fórmula (en el primer caso de valor angular de anisotropía con referencia al transductor virtual de entrada  $\gamma_{out}(r_{in})$ ):

$$\gamma_{out}(r_{in}) = -2(\Delta\phi_{out}^{max}(r_{in}) - \hat{\theta}_{out}(r_{in})) \quad (\text{Ec. 23})$$

10 Un cálculo de valor angular de anisotropía de este tipo procede, por ejemplo, de cálculos explicados en el documento. "Specular Beamforming", Alfonso Rodríguez-Molares y col., publicado en IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control (Volumen: 64, Edición: 9 de septiembre de 2017).

15 Se añade una definición de un ángulo de visión del punto de posición espacial  $r_{in}$  del transductor virtual de entrada, por ejemplo, de tipo:

$$\hat{\theta}_{out}(r_{in}) = \frac{1}{\sum_{u_{out}}^{u_{out}^+} \cos(\theta_{out}(r_{in}))} \sum_{u_{out}}^{u_{out}^+} \theta_{out}(r_{in}) \cos(\theta_{out}(r_{in})) \quad (\text{Ec. 24})$$

20 siendo

$$\theta_{out}(r_{in}) = \text{atan}\left(\frac{u_{out} - x_{in}}{z_{in}}\right)$$

en la que:  $u_{out}^{\pm}(r)$  son los valores máximo y mínimo de las posiciones espaciales de los transductores de la red.

25 Otras fórmulas de cálculo del valor angular de anisotropía son posibles para un técnico de este campo con el fin de obtener valores más realistas del ángulo de dirección preferido.

30 La **figura 15** muestra una imagen ecográfica en la que se superponen líneas correspondientes a estimaciones de direcciones preferidas para un conjunto de puntos distribuidos en la imagen ecográfica. Existe una gran coherencia entre las direcciones preferidas estimadas y las estructuras subyacentes visibles en la imagen ecográfica. Ventajosamente, el procedimiento propuesto permite estimar adecuadamente las direcciones preferidas en la totalidad de la imagen ecográfica.

35 La medición de esta dirección preferida, el ángulo de inclinación de la mancha focal para su mayor dimensión, es un parámetro importante para mejorar la calidad de la imagen ecográfica en esta región: El conocimiento de la misma permitirá adaptar las características de las ondas ultrasónicas incidentes en  $US_{in}$ ; por ejemplo, eligiendo ondas planas con una inclinación específica u ondas focalizadas en una ubicación específica. Esto también permite adaptar las apodizaciones elegidas en las recepciones durante la etapa de formación de haz.

40 La medición de esta dirección local preferida puede permitir analizar el grado de anisotropía de una región mayor y determinar así la posible existencia de lesiones en el tejido y localizarlas.

45 De este modo, el procedimiento de caracterización ultrasónica de un medio, para determinar localmente una dirección preferida de una anisotropía, comprende las siguientes etapas:

- una etapa de generación de una serie de ondas ultrasónicas incidentes  $US_{in}$  en una zona de dicho medio, por medio de una red 10 de transductores 11, siendo dicha serie de ondas ultrasónicas incidentes una base de emisión  $i$ ; y
- 50 - una etapa de generación de una matriz de reflexión experimental  $R_{ui}(t)$  definida entre la base de emisión  $i$  de entrada y una base de recepción  $u$  de salida;
- una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  que comprende unas respuestas del medio entre un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$  y un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$ , tomándose las respuestas del transductor virtual de salida  $TV_{out}$  en un
- 55 instante temporal desplazado por un retraso adicional  $\delta t$  con respecto a un instante temporal de las respuestas del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ ,
- una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para el transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda en función de la velocidad del sonido  $c_0$  en el medio, y determinándose dicha imagen del frente de onda a partir:

60

- de la matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$  y
- de una relación de propagación balística de tipo  $\delta t(\Delta \mathbf{r}_{out}) = -\text{sign}(\Delta z_{out}) \cdot |\Delta \mathbf{r}_{out}|/c_0$ , que permite extraer valores de la matriz de reflexión focalizada para construir la imagen del frente de onda, y en la que:

5  $\delta t$  es el retraso adicional,  
 $|\Delta \mathbf{r}_{out}|$  es el módulo del vector entre el transductor virtual de entrada  $\mathbf{TV}_{in}$  y el transductor virtual de salida  $\mathbf{TV}_{out}$ , siendo  $\Delta \mathbf{r}_{out} = \mathbf{r}_{out} - \mathbf{r}_{in}$ ,  
 $\Delta z_{out}$  es la componente según el eje Z de profundidad del vector de posición espacial  $\Delta \mathbf{r}_{out}$ ,

- 10 - una etapa de determinación de una dirección preferida de la mancha focal en la imagen del frente de onda mediante el procesamiento de imágenes de dicha imagen del frente de onda.

Es posible mejorar la técnica propuesta determinando imágenes del frente de onda mejoradas utilizando combinaciones de un conjunto de imágenes del frente de onda como se ha explicado anteriormente en la parte de determinación de la velocidad del sonido integrada y, por ejemplo, mediante una técnica de descomposición de valores singulares. En ese caso, la dirección preferida obtenida a partir de una imagen del frente de onda mejorada permite caracterizar la anisotropía del medio correspondiente a una zona de coherencia elegida y se atribuye a la posición espacial  $\mathbf{r}_{in,ref}$  del transductor virtual de referencia.

20 La pluralidad de las imágenes del frente de onda del conjunto se procesa en este caso por descomposición en valores singulares para combinar varias mediciones o experimentaciones del desorden acústico de una región vecina a un transductor virtual de entrada, lo que permite mejorar el contraste de la imagen del frente de onda y, por tanto, su aprovechamiento.

25 En el procedimiento, se puede ajustar de este modo las siguientes etapas:

- entre la etapa de determinación de una imagen del frente de onda y la etapa de determinación de la dirección preferida de la mancha focal, se realiza una etapa de mejora de la imagen del frente de onda en la que se realiza una combinación lineal de un conjunto de imágenes del frente de onda correspondientes a una zona de coherencia, tomándose cada imagen del frente de onda entre un transductor virtual de entrada ( $\mathbf{TV}_{in}$ ) elegido, de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  diferente, y unos transductores virtuales de salida ( $\mathbf{TV}_{out}$ ), de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ , tales como  $\mathbf{r}_{out} = \Delta \mathbf{r}_{out} + \mathbf{r}_{in}$ , estando  $\Delta \mathbf{r}_{out}$  predefinidos y siendo idénticos para todas las imágenes del frente de onda del conjunto, y siendo los transductores virtuales de entrada elegidos vecinos unos de otros, para obtener una imagen del frente de onda mejorada asociada a un transductor virtual de entrada de referencia ( $\mathbf{TV}_{in,ref}$ ), siendo este transductor virtual de entrada de referencia  $\mathbf{TV}_{in,ref}$  característico de los transductores virtuales de entrada del conjunto de imágenes del frente de onda utilizadas y asociadas a la zona de coherencia ZC, y
- en la etapa de determinación de una dirección preferida de la mancha focal, se utiliza la imagen del frente de onda mejorada en lugar de la imagen del frente de onda, la dirección preferida de la mancha focal es relativa a la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia  $\mathbf{TV}_{in,ref}$ .

Además, invirtiendo el papel de los transductores virtuales de entrada  $\mathbf{TV}_{in}$  y de salida de  $\mathbf{TV}_{out}$ , es decir, al invertir las notaciones "in" y "out", es posible determinar la dirección preferida  $\Delta \phi^{max}_{in}(\mathbf{r}_{out})$  de la mancha focal asociada al transductor virtual de salida  $\mathbf{TV}_{out}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ . La combinación de las dos direcciones preferidas asociadas a la posición  $\mathbf{r}$ , es decir,  $\Delta \phi^{max}_{in}(\mathbf{r})$  y  $\Delta \phi^{max}_{out}(\mathbf{r})$  permite mejorar la medición de la anisotropía del difusor.

Gracias a este cálculo de dirección preferida y de estas imágenes, se puede caracterizar la anisotropía de los difusores del medio o caracterizar, por ejemplo, una estructura anisotrópica en el medio, tal como una aguja introducida en un tejido o una pared que separa diferentes tejidos. Se entiende por anisotropía de difusores, todo elemento más grande que la longitud de onda de las ondas ultrasónicas.

### Análisis de señales temporales para puntos confocales

El procedimiento y sistema de caracterización ultrasónica de un medio según la presente divulgación e implementado por la unidad de cálculo 42 del sistema 40 también es capaz de realizar un análisis espectral local de una focalización ultrasónica.

En tal análisis, interesan en particular las respuestas confocales, es decir, un transductor virtual de entrada  $\mathbf{TV}_{in}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  superpuesto al transductor virtual de salida  $\mathbf{TV}_{out}$  de posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ , es decir, siendo  $\mathbf{r}_{in} = \mathbf{r}_{out} = \mathbf{r}$ .

El retraso adicional  $\delta t$  se utiliza entonces para sondear la respuesta temporal de los difusores seleccionados por estos transductores virtuales.

En ese caso, el procedimiento comprende las siguientes etapas ya explicadas para obtener una matriz de reflexión focalizada, pero aplicadas a una misma posición espacial, es decir, en una posición confocal:

- una etapa de generación de una serie de ondas ultrasónicas incidentes  $US_{in}$  en una zona de dicho medio, por medio de una red 10 de transductores 11, siendo dicha serie de ondas ultrasónicas incidentes una base de emisión  $i$ ; y
- una etapa de generación de una matriz de reflexión experimental  $R_{ui}(t)$  definida entre la base de emisión  $i$  de entrada y una base de recepción  $u$  de salida;
- una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r, \delta t)$  que comprende unas respuestas del medio entre un transductor virtual de entrada  $TV_{in}$  de posición espacial  $r_{in}$  y un transductor virtual de salida  $TV_{out}$  de posición espacial  $r_{out}$ , estando superpuestos los transductores virtuales de entrada y salida en la misma posición espacial  $r$ , siendo  $r_{in} = r_{out} = r$ , y tomándose las respuestas del transductor virtual de salida de  $TV_{out}$  en un instante de tiempo desplazado por un retraso adicional  $\delta t$  con respecto a un instante temporal de las respuestas del transductor virtual de entrada  $TV_{in}$ .

A continuación, el procedimiento incluye las siguientes etapas que permiten realizar el análisis espectral local:

- una etapa de determinación de una matriz de frecuencias  $RFreq(r, \omega)$  que es una transformada de Fourier temporal de la matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r, \delta t)$

$$Freq_t(r, \omega) = TF_t[RFoc(r, \delta t)] \quad (Ec. 25)$$

en la que

$TF_t$  es la transformada de Fourier temporal, y  
 $\omega$  es una pulsación, donde  $\omega = 2\pi f$ , siendo  $f$  la frecuencia correspondiente a dicha pulsación.

La transformada de Fourier temporal se puede explicar, por ejemplo, mediante la siguiente fórmula de transformada de Fourier discreta temporal:

$$Freq_t(r, \omega) = TF_t[RFoc(r, \delta t)] = \sum_{\Delta \omega} RFoc(r, \delta t) e^{-i\omega \delta t} \quad (Ec. 26)$$

Existen otras formulaciones de transformada de Fourier y de transformada de Fourier temporal, por ejemplo, en forma discreta o integral, con o sin normalización, y también se puede utilizar.

$RFreq(r, \omega)$  contiene entonces una estimación local del espectro de los ecos retrodifundidos por el medio. Más específicamente, estos ecos proceden de difusores que están comprendidos en la mancha focal monocromática centrada en la posición  $r$ . En ausencia de aberración, estas dimensiones están, por tanto, previstas por los límites de difracción definidos en la frecuencia central de los ecos retrodifundidos por el medio.

Por tanto, este procedimiento se puede complementar con cualquier técnica de obtención de imágenes médicas basada en un análisis de frecuencias de los ecos retrodifundidos para mejorar la resolución espacial. Más específicamente, este proceso permite realizar una formación de haces espaciales de recepción para cada frecuencia, antes de realizar cualquier análisis espectral. Cabe señalar que la configuración confocal ventajosamente permite limitar los fenómenos de difracción de pulsos.

Por ejemplo, este procedimiento se puede completar mediante una etapa de filtrado durante la cual se realiza el filtrado de frecuencia de los elementos de la matriz de frecuencias  $RFreq(r, \omega)$ . En concreto, es posible realizar un filtrado de frecuencia paso bajo, paso banda o paso alto, para extraer las componentes deseadas en las respuestas de la matriz de reflexión focalizada, en función de la aplicación prevista. Por ejemplo, el filtrado de frecuencia eventualmente se puede adaptar para extraer componentes armónicas de una frecuencia fundamental de las ondas ultrasónicas incidentes  $US_{in}$ .

Por ejemplo, la **figura 16** ilustra este proceso. En esta figura 16, la imagen con la referencia A ilustra una imagen ecográfica de un medio que comprende burbujas. Estas burbujas son estructuras resonantes en el medio que alteran la imagen ultrasónica, ya que continúan oscilando después del paso de una onda incidente. Generan así ecos que llegan a los transductores de recepción con un tiempo de vuelo superior al tiempo de vuelo balístico, lo que produce artefactos en la imagen ecográfica aguas abajo de la burbuja. La imagen con la referencia B de la figura 14 muestra una ampliación de la imagen A en la que se observa un eco brillante de una burbuja en la posición espacial  $r = [x, z] = [11, 17]$  mm, y su artefacto aguas abajo situado debajo de esta posición (es decir, verticalmente en profundidad). Las imágenes con las referencias C1 y C2 corresponden a la imagen de propagación, respectivamente en amplitud y en parte real, para un retraso adicional  $\delta t$  cero.

La matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r, \delta t)$  del procedimiento permite estudiar las señales temporales de la oscilación de esta burbuja. Las imágenes con las referencias D-E-F en la figura 14 corresponden, respectivamente, a los trazados

de la parte real, la amplitud y del espectro de frecuencia de la respuesta  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}, \delta t)$  en el punto de posición espacial  $\mathbf{r}$  correspondiente a la posición de esta burbuja. En las imágenes D y E, se observa un segundo eco alrededor de 1,5  $\mu s$  después del eco principal centrado en  $\delta t = 0$ . La imagen F muestra un primer gráfico de espectro excluyendo este segundo eco y un segundo gráfico de espectro con este segundo eco. Este segundo gráfico de espectro comprende una frecuencia principal de alrededor de 6 MHz que corresponde a la frecuencia de la onda incidente, y otra frecuencia de alrededor de 3 MHz que corresponde a la frecuencia de resonancia (oscilación) de la burbuja.

El procedimiento realiza así un análisis espectral que permite, por ejemplo, identificar frecuencias de resonancias de burbujas o de cualquier otra estructura resonante en el medio observado.

De este modo es posible filtrar, por ejemplo, mediante un filtro paso banda predeterminado, las respuestas de la matriz de reflexión focalizada, y luego calcular una imagen ecográfica con la ayuda de estas respuestas filtradas que será mejorada. El efecto de las resonancias puede entonces atenuarse o eliminarse en la imagen ecográfica.

De manera recíproca, es posible construir imágenes de frecuencia de resonancia conservando únicamente aquellas resonancias en las respuestas de la matriz de reflexión focalizada. Cabe señalar, que la frecuencia de resonancia de una burbuja guarda relación con su tamaño y puede permitir estimar la presión local en el medio.

En un segundo ejemplo,  $\mathbf{RFreq}_t(\mathbf{r}, \omega)$  se puede utilizar para estudiar la atenuación ambiental. De hecho, este fenómeno depende de la frecuencia. Como las altas frecuencias están más atenuadas que las bajas frecuencias, es posible deducir un coeficiente de atenuación, por ejemplo, comparando el espectro de los ecos procedentes de dos profundidades diferentes en el medio observado. Por tanto, la técnica descrita anteriormente que permite estimar el espectro local de los ecos procedentes de una zona determinada está totalmente indicado para determinar la atenuación. Para ello, el procedimiento se puede completar, por ejemplo, con una etapa de determinación de un espectro promedio a una profundidad  $S(z, \omega)$  determinado por un promedio de los espectros de la matriz de frecuencias a una profundidad predeterminada  $z$  en el medio.

Por ejemplo, este espectro promedio a una profundidad se calcula mediante la siguiente fórmula, que es un promedio normalizado, promedio realizado sobre un conjunto de posiciones espaciales de la misma profundidad  $z$  y coordenada lateral  $x$  comprendida en un intervalo predeterminado.

$$S(z, \omega) = \left\langle \frac{\mathbf{RFreq}_t(\mathbf{r}, \omega)}{\max_{\omega} [\mathbf{RFreq}_t(\mathbf{r}, \omega)]} \right\rangle_x \quad (\text{Ec. 27})$$

Por ejemplo, la **figura 17** ilustra este cálculo del espectro promedio de profundidad, mediante la construcción de una imagen del conjunto de espectros para todas las profundidades de una imagen ecográfica. En esta figura 17, la imagen con la referencia A ilustra una imagen ecográfica *in vivo* de la pantorrilla de un individuo sano y la imagen con la referencia B presenta los espectros promedio de profundidad con una escala de niveles de gris. Esta imagen de espectros de profundidad muestra la atenuación más fuerte de las altas frecuencias para grandes profundidades.

Con la ayuda de tal imagen, se puede estimar la evolución de la atenuación en función de la profundidad gracias al conjunto del contenido de frecuencias mediante técnicas de ajuste entre un modelo teórico y/o experimental y dicha imagen.

En un tercer ejemplo, el procedimiento también se puede completar con una etapa de determinación de la anchura espectral de correlación  $\delta\omega(\mathbf{r})$  para el punto de posición espacial  $\mathbf{r}$ , mediante un cálculo de la anchura a media altura de la autocorrelación de cada espectro de la matriz de frecuencias  $\mathbf{RFreq}_t(\mathbf{r}, \omega)$ , es decir mediante la siguiente fórmula:

$$\delta\omega(\mathbf{r}) = FWHM\left(\frac{1}{\Delta\omega} \int_{\omega^-}^{\omega^+} \mathbf{RFreq}_t(\mathbf{r}, \omega) \mathbf{RFreq}_t^*(\mathbf{r}, \omega + d\omega) d\omega\right) \quad (\text{Ec. 28})$$

en la que

FWHM es la función de cálculo de la anchura a media altura

$()^*$  es la función de conjugación compleja,

$\omega^-$  y  $\omega^+$  son pulsaciones límite,  $\Delta\omega = \omega^+ - \omega^-$  es el intervalo de pulsaciones límite, es decir, el ancho de banda considerado de las ondas ultrasónicas.

Gracias a la resolución espacial de la matriz  $\mathbf{RFreq}_t(\mathbf{r}, \omega)$ , la anchura espectral de correlación  $\delta\omega(\mathbf{r})$  es un valor local que puede permitir caracterizar la naturaleza de los difusores contenidos en la mancha focal monocromática centrada en la posición espacial  $\mathbf{r}$ . Si la mancha focal contiene un único difusor no resonante, la anchura espectral de correlación  $\delta\omega(\mathbf{r})$  es del orden de magnitud del ancho de banda de la señal ultrasónica. Si la mancha focal contiene un conjunto de difusores distribuidos aleatoriamente y de una misma intensidad (régimen de moteado ultrasónico), el valor de

anchura espectral de correlación  $\delta\omega(\mathbf{r})$  se vuelve mucho más pequeño que el ancho de banda  $\Delta\omega$ .

El procedimiento también puede comprender una etapa de determinación de al menos una imagen de correlación espectral, obteniéndose dicha imagen de correlación espectral determinando las anchuras espectrales  $\delta\omega(\mathbf{r})$  para una pluralidad de puntos del medio, correspondiendo cada uno de ellos a un punto del medio de posición espacial  $\mathbf{r}$ .

- 5
  - 10
  - 15
- Por ejemplo, la **figura 18** ilustra este proceso. En esta figura 18, la imagen con la referencia A es una imagen ecográfica de un medio fantoma que contiene varios elementos diferentes: objetivos puntuales y un cilindro ecogénico. La imagen con la referencia B correspondiente es la imagen de correlación espectral de la imagen ecográfica anterior y se obtiene mediante el cálculo de la anchura espectral de correlación  $\delta\omega(\mathbf{r})$  para un conjunto de puntos de este medio. En esta imagen B, los bordes del cilindro y los objetivos puntuales tienen una anchura espectral de correlación  $\delta\omega(\mathbf{r})$  más grande que el resto del medio, que está constituido por un gran número de difusores de resolución insuficiente distribuidos aleatoriamente.
- Gracias a este cálculo de anchura espectral de correlación y de estas imágenes, se puede caracterizar la naturaleza de los objetivos en el medio. Por ejemplo, es posible diferenciar entre un grano de moteado brillante y un único difusor. Esto puede ayudar, por ejemplo, a identificar burbujas para la obtención de imágenes de contraste o microcalcificaciones características de la presencia de tumores, concretamente en el caso del cáncer de mama.

## REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de caracterización ultrasónica de un medio, para determinar un valor de velocidad del sonido integrada en el medio, comprendiendo el procedimiento:

- una etapa de generación de una serie de ondas ultrasónicas incidentes ( $US_{in}$ ) en una zona de dicho medio, por medio de una red (10) de transductores (11), siendo dicha serie de ondas ultrasónicas incidentes una base de emisión (**i**); y
- una etapa de generación de una matriz de reflexión experimental  $R_{ui}(t)$  definida entre la base de emisión (**i**) de entrada y una base de recepción (**u**) de salida;
- una etapa de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  que comprende unas respuestas del medio entre un transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) de posición espacial  $r_{in}$  y un transductor virtual de salida ( $TV_{out}$ ) de posición espacial  $r_{out}$ , tomándose las respuestas del transductor virtual de salida ( $TV_{out}$ ) en un instante temporal desplazado por un retraso adicional  $\delta t$  con respecto a un instante temporal de las respuestas del transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ),
- una etapa de determinación de una imagen del frente de onda para el transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) y para un intervalo de retraso adicional, determinándose dicha imagen del frente de onda en función de la velocidad del sonido  $c_0$  en el medio, y determinándose dicha imagen del frente de onda a partir:
- de la matriz de reflexión focalizada  $RFoc(r_{in}, r_{out}, \delta t)$  y
- de una relación de propagación balística de tipo  $\delta t(\Delta r_{out}) = -sign(\Delta z_{out}) \cdot |\Delta r_{out}|/c_0$ , que permite extraer valores de la matriz de reflexión focalizada para construir la imagen del frente de onda, y en la que:

$\delta t$  es el retraso adicional,

$|\Delta r_{out}|$  es el módulo del vector entre el transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) y el transductor virtual de salida ( $TV_{out}$ ), siendo  $\Delta r_{out} = r_{out} - r_{in}$ ,

$\Delta z_{out}$  es la componente según un eje Z de profundidad del vector de posición espacial  $\Delta r_{out}$ , comprendiendo dicha imagen del frente de onda una mancha focal,

- una etapa de determinación del centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda, y la determinación de la posición de profundidad en la dirección del eje Z de esta mancha focal, denotándose esta posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(r_{in})$ , y
- una etapa de cálculo de una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(r_{in})$ , a partir de la siguiente fórmula:

$$c^{(1)}(r_{in}) = c_0 \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(0)}(r_{in})}{z_{in}}}$$

en la que  $z_{in}$  es la componente de profundidad según el eje Z del vector de posición espacial  $r_{in}$  del transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ).

2. Procedimiento según la reivindicación 1, en el que el centro de la mancha focal se determina buscando en la imagen del frente de onda la posición espacial del punto en esta imagen del frente de onda que tiene el mayor valor.

3. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 2, en el que la determinación de la imagen del frente de onda se realiza únicamente en el eje Z de profundidad.

4. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 3, en el que:

- entre la etapa de determinación de una imagen del frente de onda y la etapa de determinación de la posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(r_{in})$  de una mancha focal, se realiza una etapa de mejora de la imagen del frente de onda en la que se realiza una combinación lineal de un conjunto de imágenes del frente de onda correspondientes a una zona de coherencia, tomándose cada imagen del frente de onda entre un transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) elegido, de posición espacial  $r_{in}$  diferente, y unos transductores virtuales de salida ( $TV_{out}$ ), de posición espacial  $r_{out}$ , tales como  $r_{out} = \Delta r_{out} + r_{in}$ , estando  $\Delta r_{out}$  predefinidos y siendo idénticos para todas las imágenes del frente de onda del conjunto, y siendo los transductores virtuales de entrada elegidos vecinos unos de otros, para obtener una imagen del frente de onda mejorada, asociada a un transductor virtual de entrada de referencia ( $TV_{in,ref}$ ), siendo este transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$  característico de los transductores virtuales de entrada del conjunto de imágenes del frente de onda utilizadas y asociadas a la zona de coherencia ZC, y
- en la etapa de determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(0)}(r_{in})$ , se utiliza la imagen del frente de onda mejorada en lugar de la imagen del frente de onda, la posición de profundidad del centro de la mancha focal es relativa a la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$ , y esta posición de profundidad del centro de la mancha focal permite estimar una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(r_{in,ref})$  en la posición espacial del transductor virtual de entrada de referencia  $TV_{in,ref}$ .

5. Procedimiento según la reivindicación 4, en el que la combinación lineal está determinada por un cálculo de descomposición en valor singular (SVD) del conjunto de imágenes del frente de onda para obtener un vector singular

( $\mathbf{W}_1$ ) asociado al valor singular de descomposición en valor singular de mayor valor absoluto, siendo entonces este vector singular ( $\mathbf{W}_1$ ) la imagen del frente de onda mejorada correspondiente a dicho transductor virtual de entrada de referencia ( $TV_{in,ref}$ ) y para los mismos retrasos adicionales  $\delta t$ .

6. Procedimiento según una de las reivindicaciones 4 a 5, en el que se determina una velocidad del sonido óptima del medio mediante el cálculo de una velocidad del sonido integrada y tomando para la combinación lineal del conjunto de imágenes del frente de onda, un conjunto de imágenes del frente de onda correspondientes a transductores virtuales de entrada ( $TV_{in}$ ) elegidos que cubren sustancialmente el conjunto de una zona de interés del medio.

7. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 6, en el que:

- las etapas de determinación de una matriz de reflexión focalizada  $\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t)$ , de determinación de una imagen del frente de onda, de determinación de una posición de profundidad  $\Delta z^{(n)}$  del centro de la mancha focal en la imagen del frente de onda, se iteran utilizando la velocidad del sonido integrada  $c^{(n)}$  determinada en una iteración anterior en lugar de la velocidad del sonido utilizada anteriormente o en lugar de la velocidad del sonido  $c_0$  utilizada en la primera etapa, y

- durante la etapa de cálculo de una velocidad del sonido integrada, se utiliza la siguiente fórmula recurrente,

$$c^{(n+1)}(\mathbf{r}_{in}) = c^{(n)}(\mathbf{r}_{in}) \sqrt{1 + \frac{\Delta z^{(n)}(\mathbf{r}_{in})}{z_{in}}},$$

y

en la que el valor de la velocidad del sonido integrada en el punto del medio correspondiente al transductor virtual de entrada es la velocidad del sonido integrada  $c^{(n)}(\mathbf{r}_{in})$  calculada en una etapa n del procedimiento, estando determinada esta etapa n por un número predeterminado de iteraciones o por un umbral de parada para la diferencia entre dos valores consecutivos de velocidad del sonido integrada o una combinación de los dos.

8. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 7, en el que:

- se invierte el papel del o de los transductores virtuales de entrada y del o de los transductores virtuales de salida para determinar una velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{out})$  con respecto a un transductor virtual de salida, y
- se combina la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{in})$  con referencia al transductor virtual de entrada y la velocidad del sonido integrada  $c^{(1)}(\mathbf{r}_{out})$  con referencia al transductor virtual de salida para obtener una velocidad del sonido integrada mejorada.

9. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 8, que comprende además una etapa de determinación de una imagen de velocidad del sonido integrada determinando una velocidad del sonido integrada para una pluralidad de puntos del medio, correspondiendo cada uno a un transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) de posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$  o a un transductor virtual de entrada de referencia de referencia ( $TV_{in,ref}$ ) de posición espacial  $\mathbf{r}_{in,ref}$ .

10. Procedimiento según la reivindicación 9, en el que se determina una imagen de velocidad del sonido, en la que los valores en cada punto de esta imagen de velocidad del sonido se calculan a partir de los valores de la imagen de velocidad del sonido integrada.

11. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 10, en el que en la etapa de determinación de la matriz de reflexión focalizada:

el cálculo de las respuestas del transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) corresponde a un proceso de focalización de entrada a partir de la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  que utiliza un tiempo de vuelo de ida de las ondas entre la base de emisión y el transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) para crear una mancha focal de entrada en la posición espacial  $\mathbf{r}_{in}$ ,

el cálculo de las respuestas del transductor virtual de salida ( $TV_{out}$ ) corresponde a un proceso de focalización de salida a partir de la matriz de reflexión experimental  $\mathbf{R}_{ui}(t)$  que utiliza un tiempo de vuelo de vuelta de las ondas entre el transductor virtual de salida ( $TV_{out}$ ) y los transductores de la base de recepción  $\mathbf{u}$ , para crear una mancha focal de salida en la posición espacial  $\mathbf{r}_{out}$ ,

siendo el retraso adicional  $\delta t$  un retraso temporal añadido a los tiempos de los vuelos de ida y vuelta durante los procesos de focalización.

12. Procedimiento según una de las reivindicaciones 1 a 11, en el que la matriz de reflexión focalizada se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\mathbf{RFoc}(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \delta t) = \frac{1}{N_{in}N_{out}} \sum_{i_{in}} \sum_{u_{out}} \mathbf{R}_{ui}(\mathbf{u}_{out}, \mathbf{i}_{in}, \tau(\mathbf{r}_{in}, \mathbf{r}_{out}, \mathbf{u}_{out}, \mathbf{i}_{in}, \delta t))$$

en la que

$N_{in}$  es el número de elementos de la base de emisión (**i**),

$N_{out}$  es el número de elementos de la base de recepción (**u**) de salida,

$R_{ui}(t)$  es la matriz de reflexión experimental, de la que  $R_{ui}(u_{out}, i_{in}, \tau(r_{in}, r_{out}, u_{out}, i_{in}, \delta t))$  es el elemento de la matriz de reflexión experimental  $R_{ui}(t)$  registrado por el transductor de posición espacial  $u_{out}$  consecutivo a la emisión de índice  $i_{in}$  en la base de emisión y al tiempo  $\tau$ ,

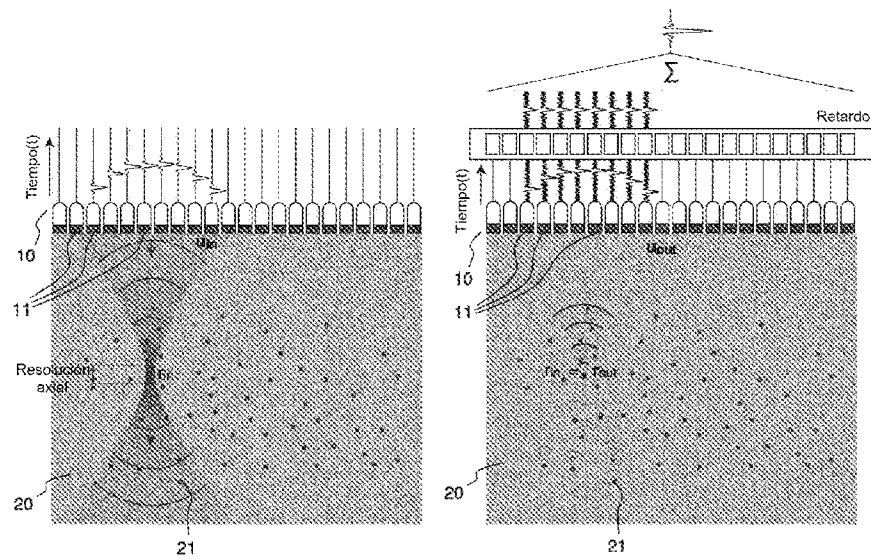
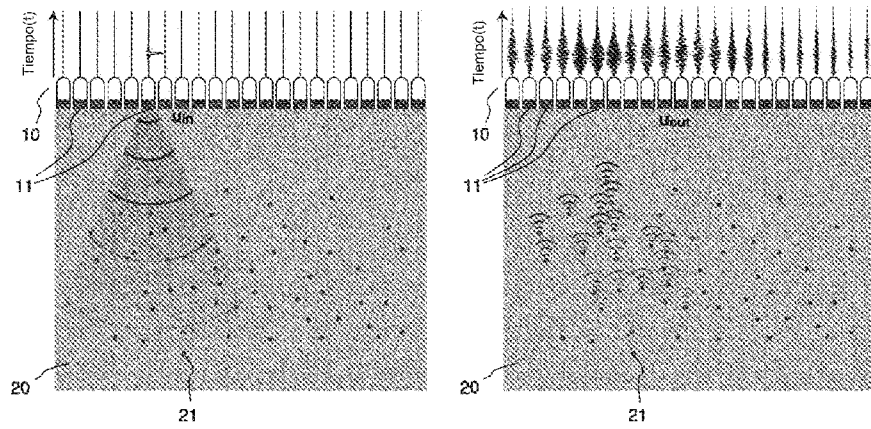
$\tau$  es un tiempo que es la suma del tiempo de vuelo de ida  $\tau_{in}$  de la onda ultrasónica entre los transductores de la base de emisión (**i**) y el transductor virtual de entrada ( $TV_{in}$ ) de posición espacial  $r_{in}$ , y del tiempo de vuelo de vuelta  $\tau_{out}$  de la onda ultrasónica entre el transductor de salida ( $TV_{out}$ ) de posición espacial  $r_{out}$  y los transductores de la base de recepción **u**, y del retraso adicional  $\delta t$ , como se explica mediante la siguiente fórmula:

$$\tau(r_{in}, r_{out}, u_{out}, i_{in}, \delta t) = \tau_{in}(r_{in}, i_{in}) + \tau_{out}(r_{out}, u_{out}) + \delta t$$

13. **Sistema (40) de caracterización ultrasónica de un medio (20)**, para determinar un valor de velocidad del sonido integrado local en el medio, comprendiendo el sistema:

- una red (10) de transductores adaptados para generar una serie de ondas ultrasónicas incidentes en una zona del medio, y para registrar en función del tiempo las ondas ultrasónicas retrodifundidas por dicha zona; y
- una unidad de cálculo (42) conectada a la red de transductores y adaptada para implementar el procedimiento según una de las reivindicaciones anteriores.





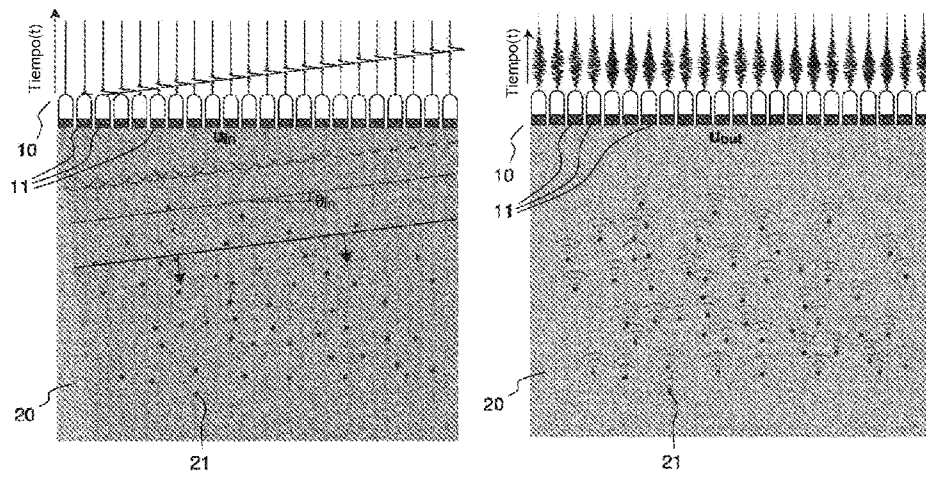


FIG. 1C (TÉCNICA ANTERIOR)

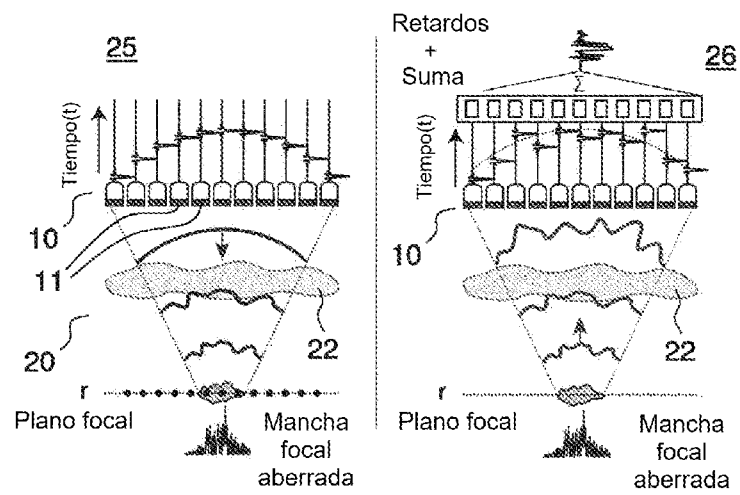
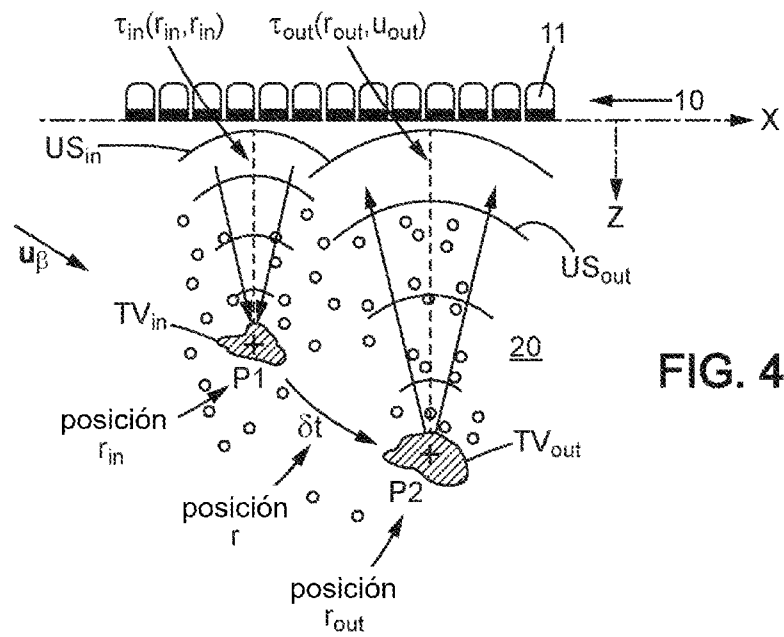
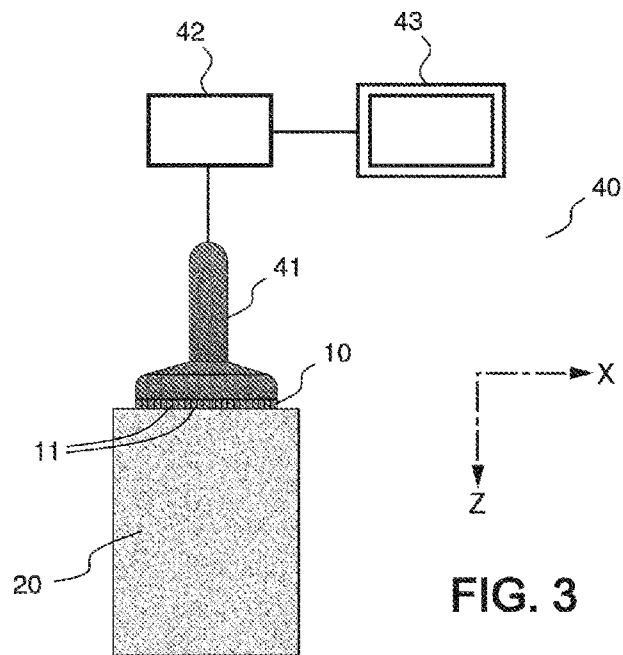


FIG. 2 (TÉCNICA ANTERIOR)



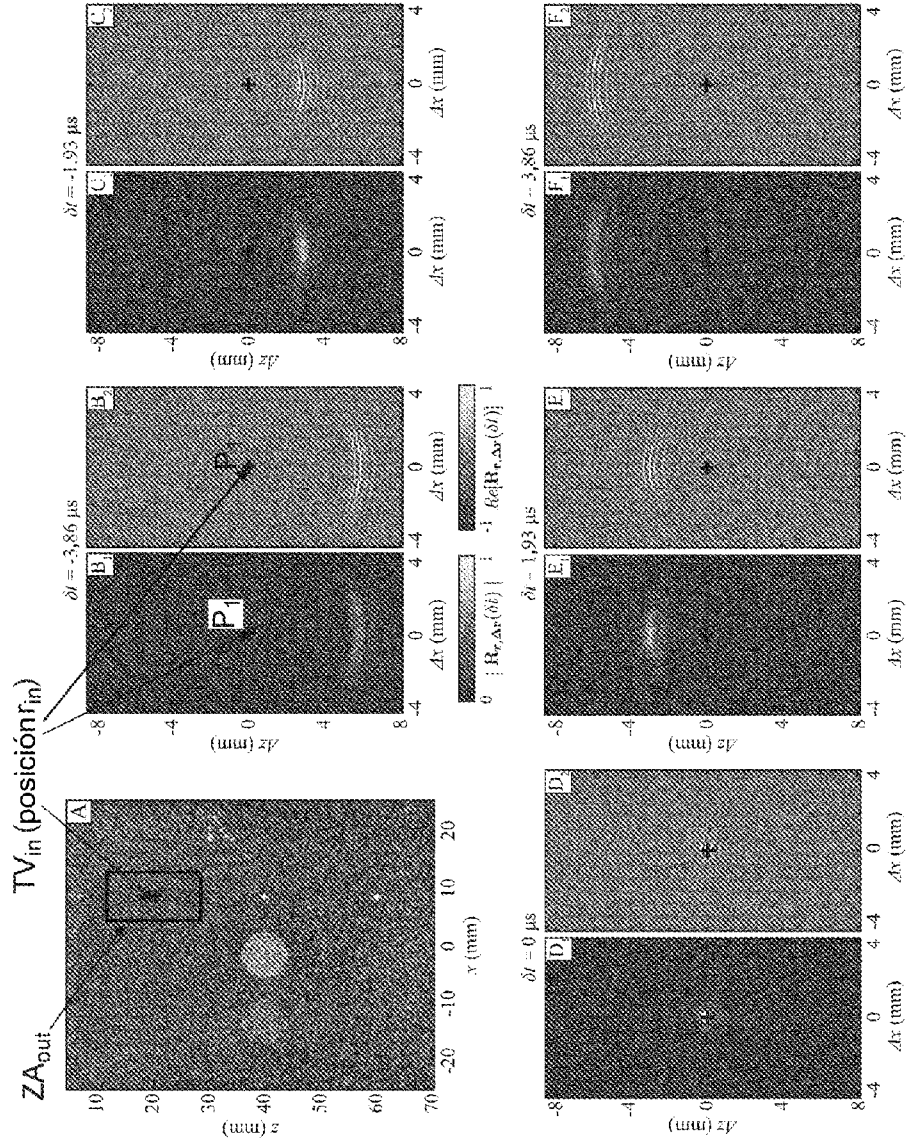


FIG. 5

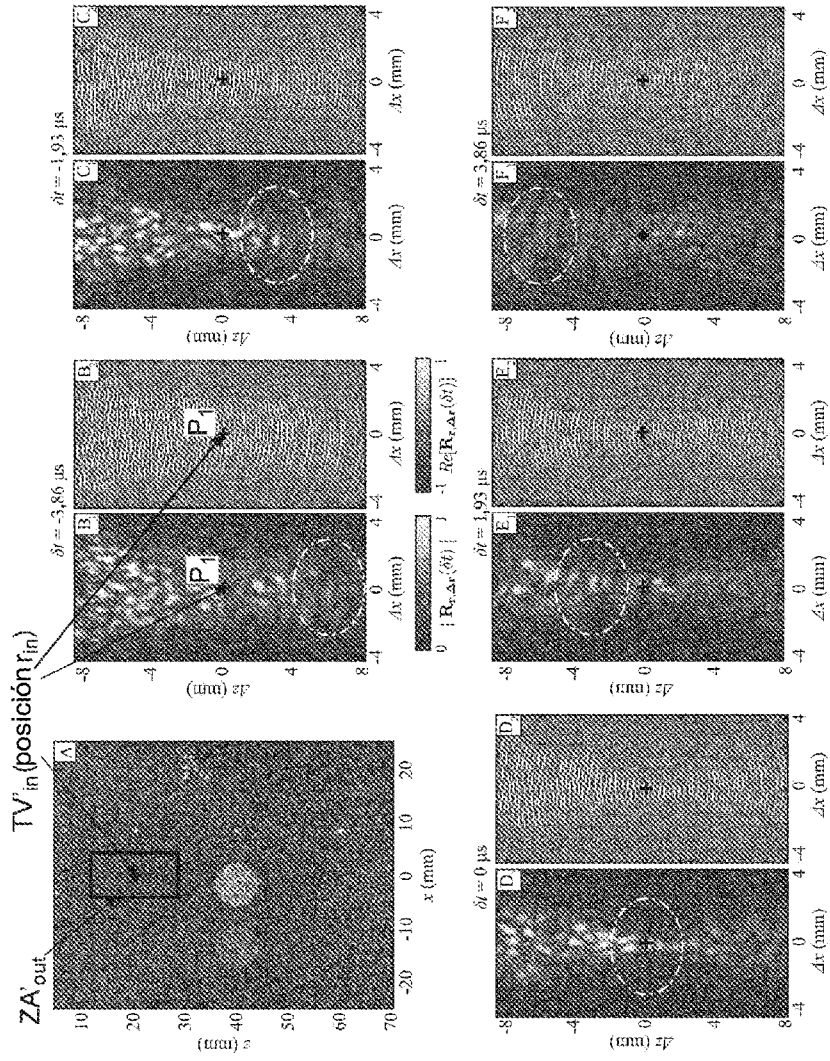


FIG. 6

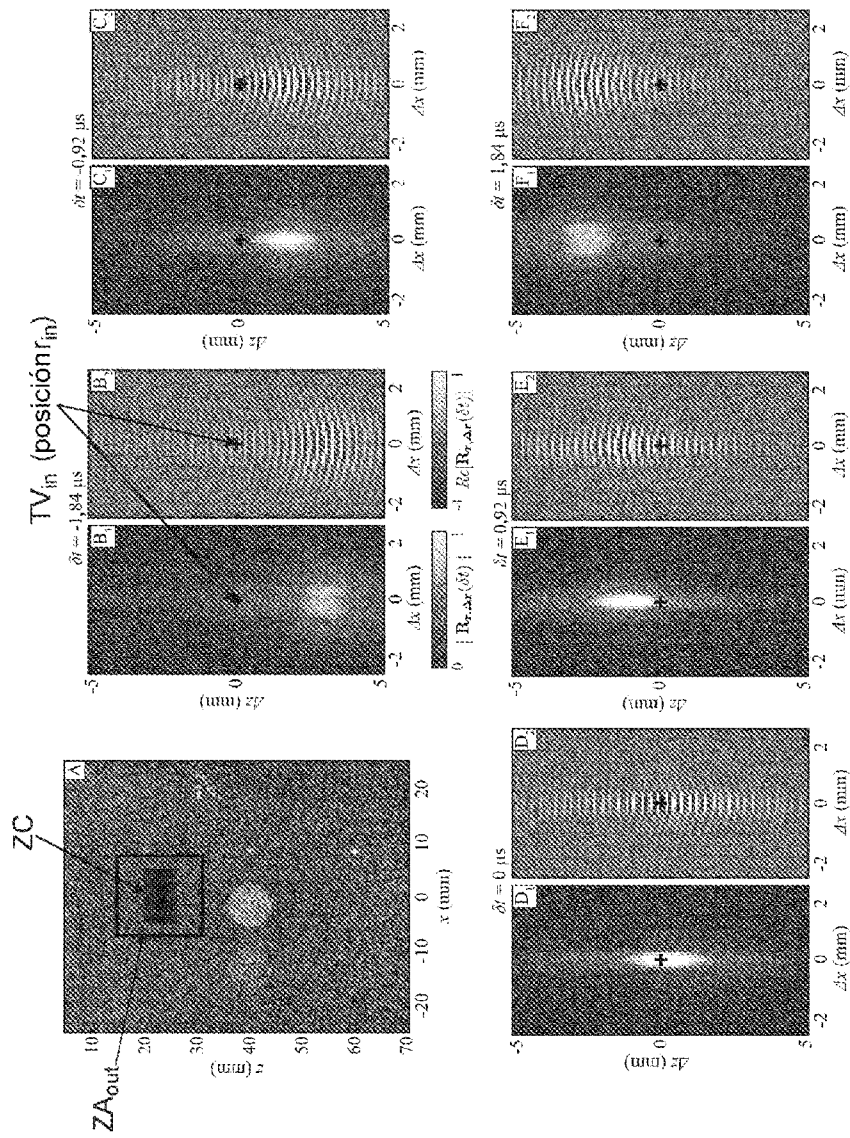


FIG. 7

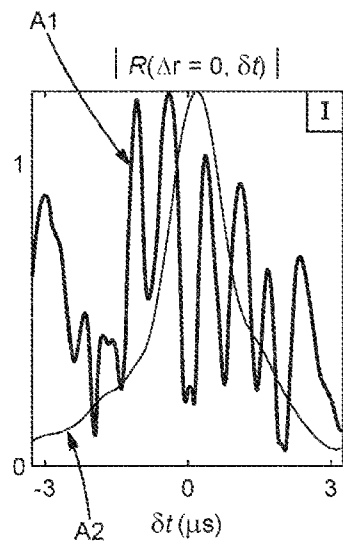


FIG. 8A

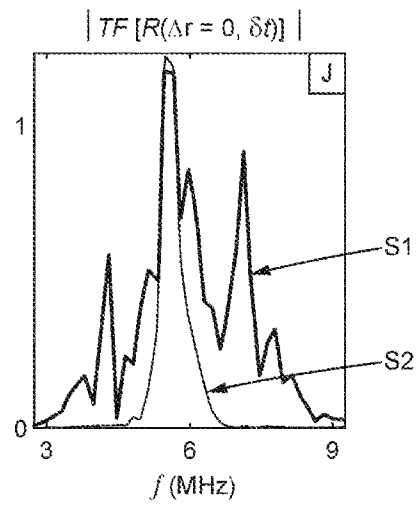
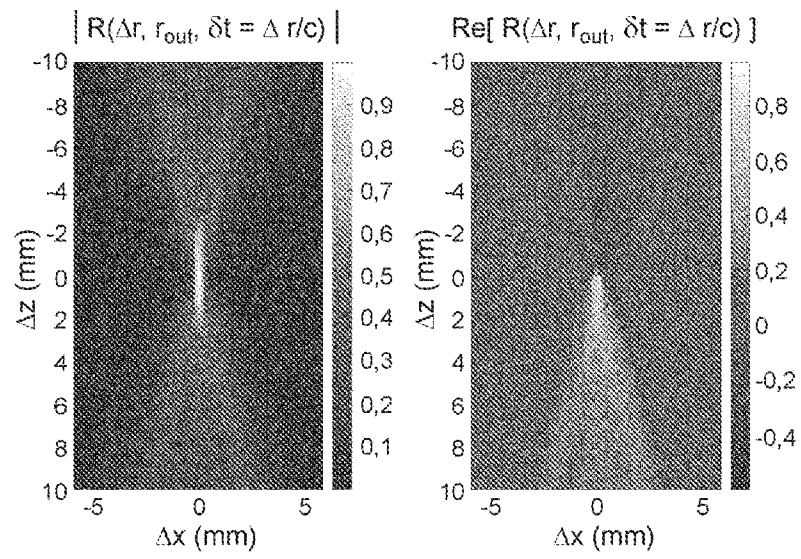


FIG. 8B





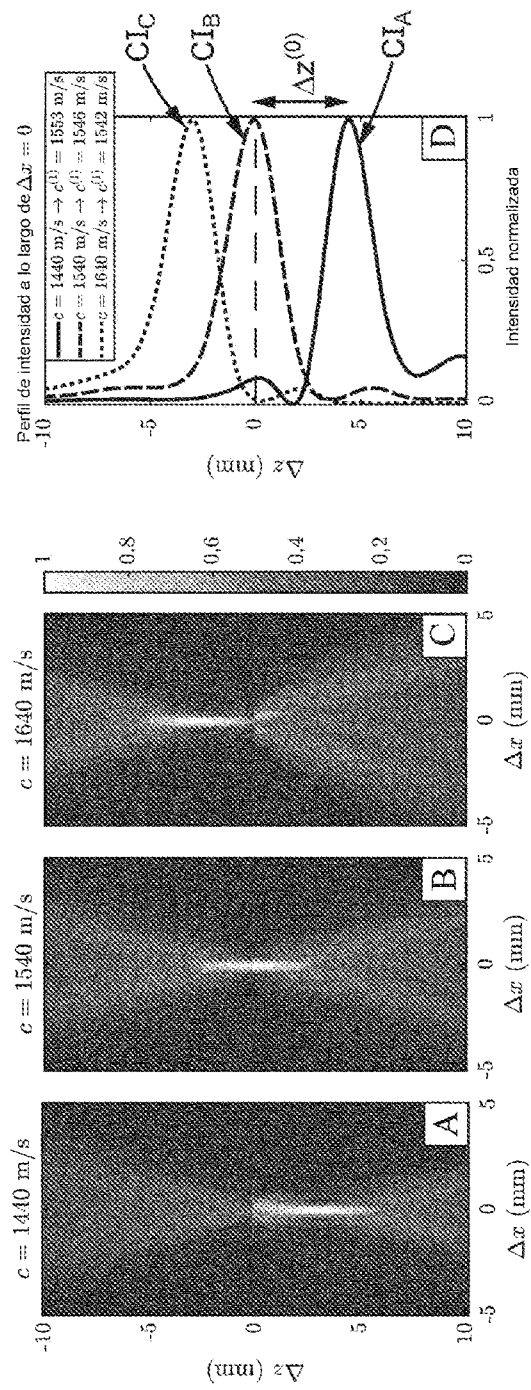


FIG. 10

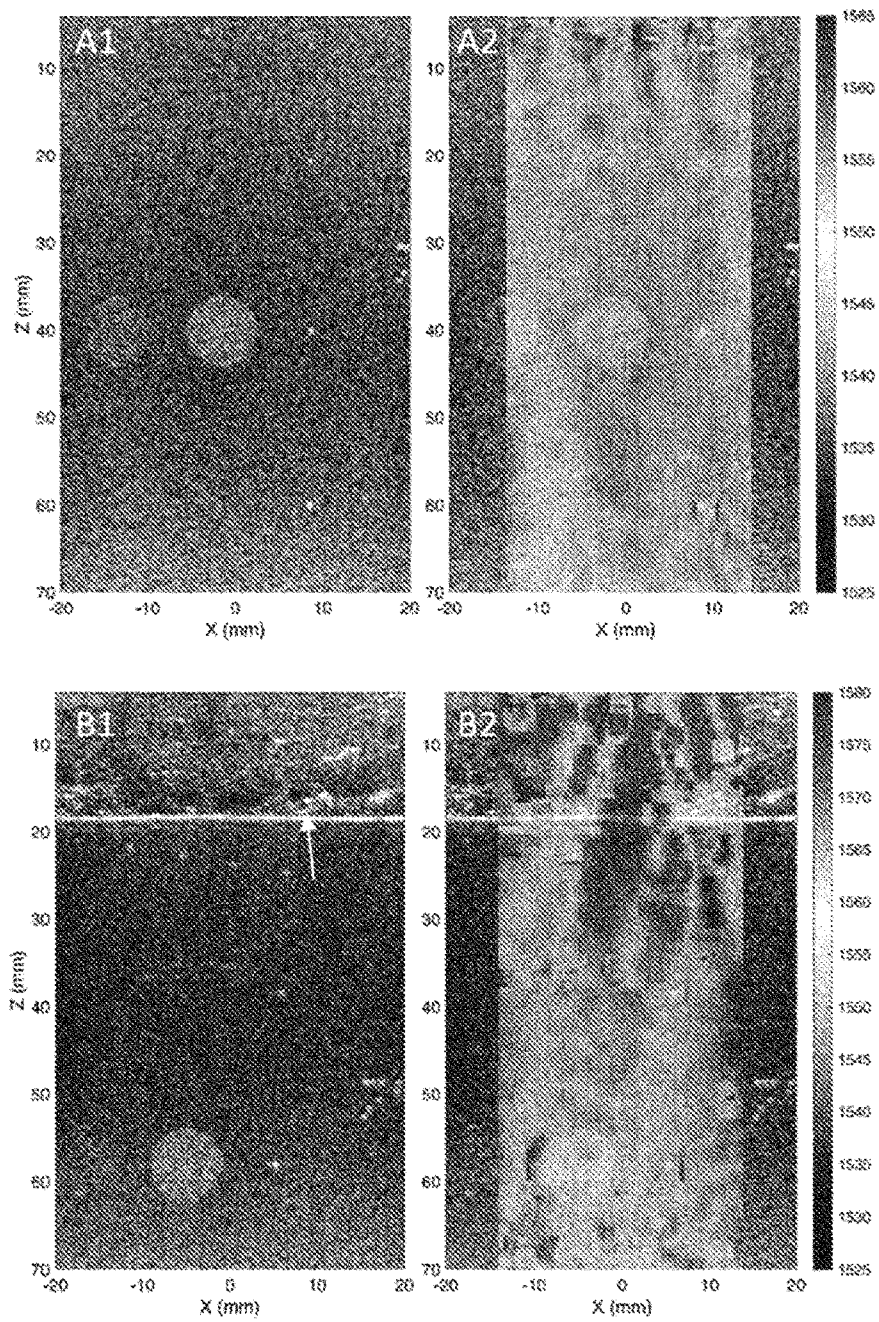


FIG. 11

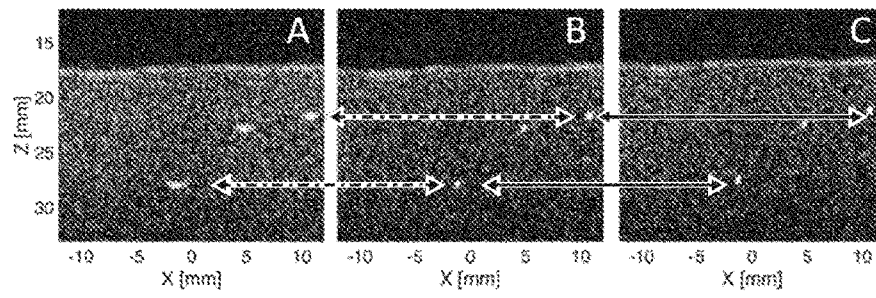


FIG. 12

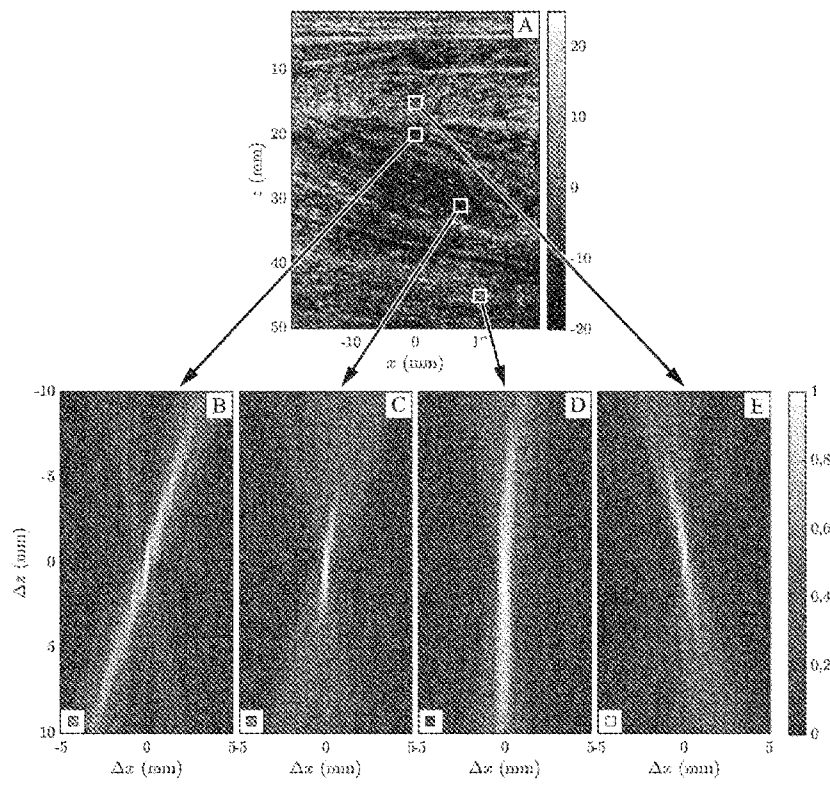


FIG. 13

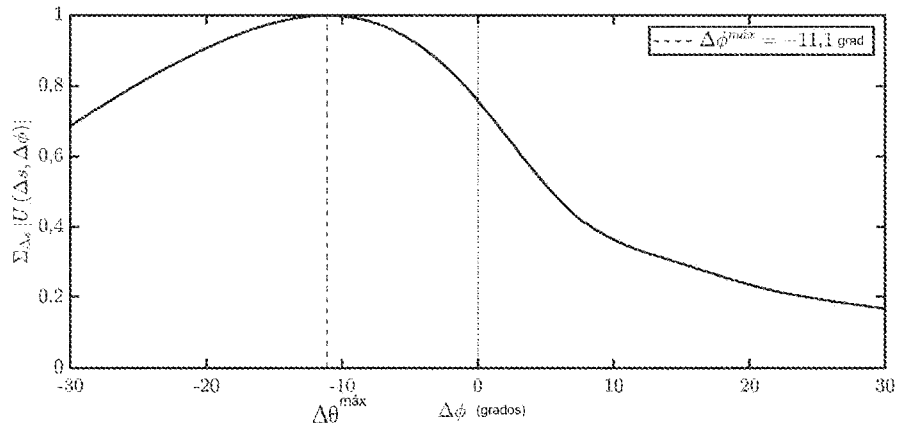


FIG. 14

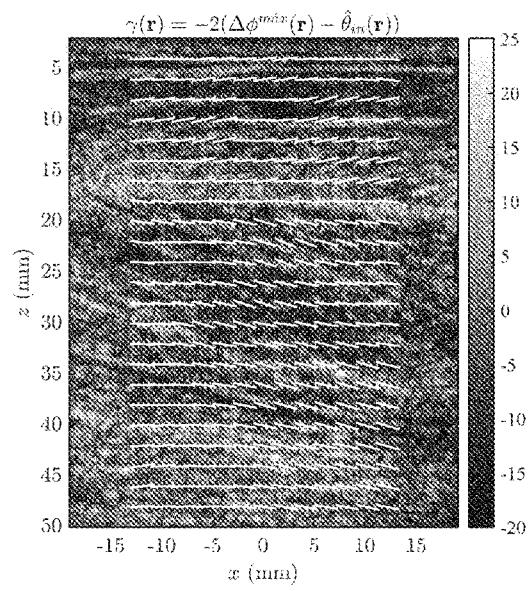
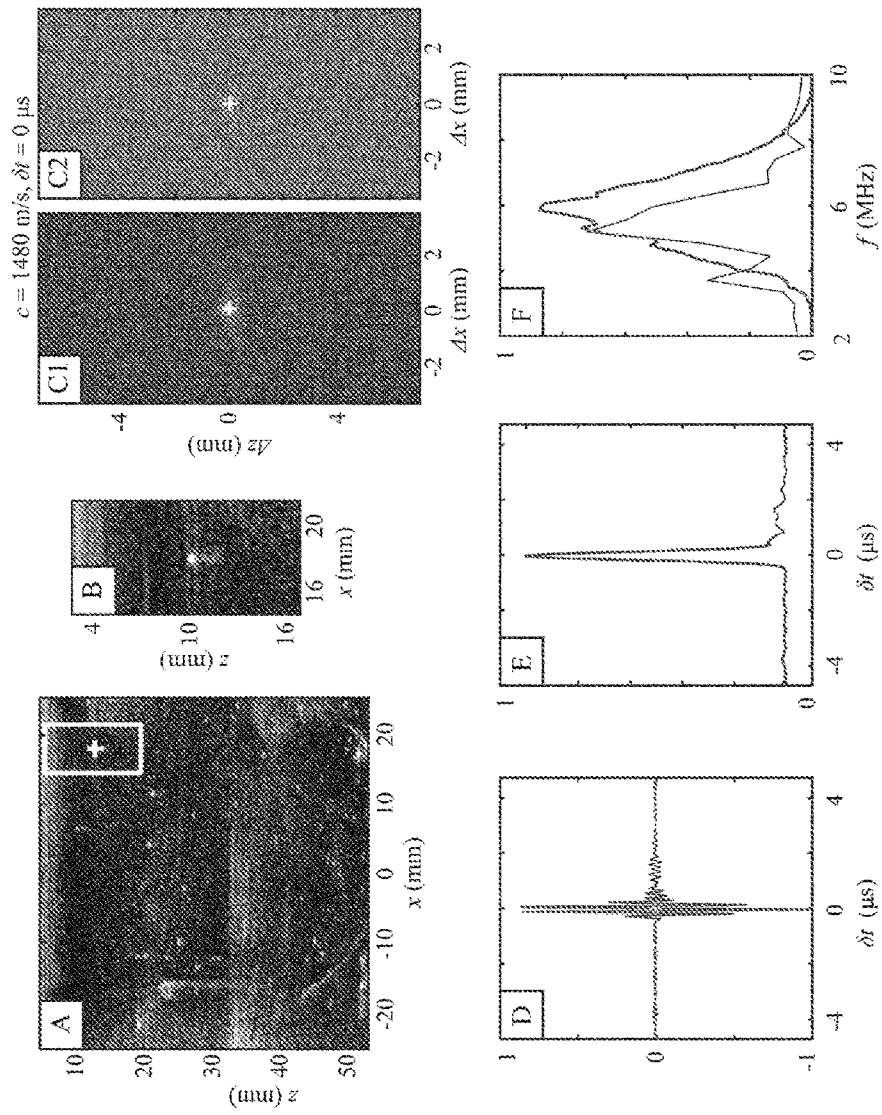


FIG. 15



**FIG. 16**

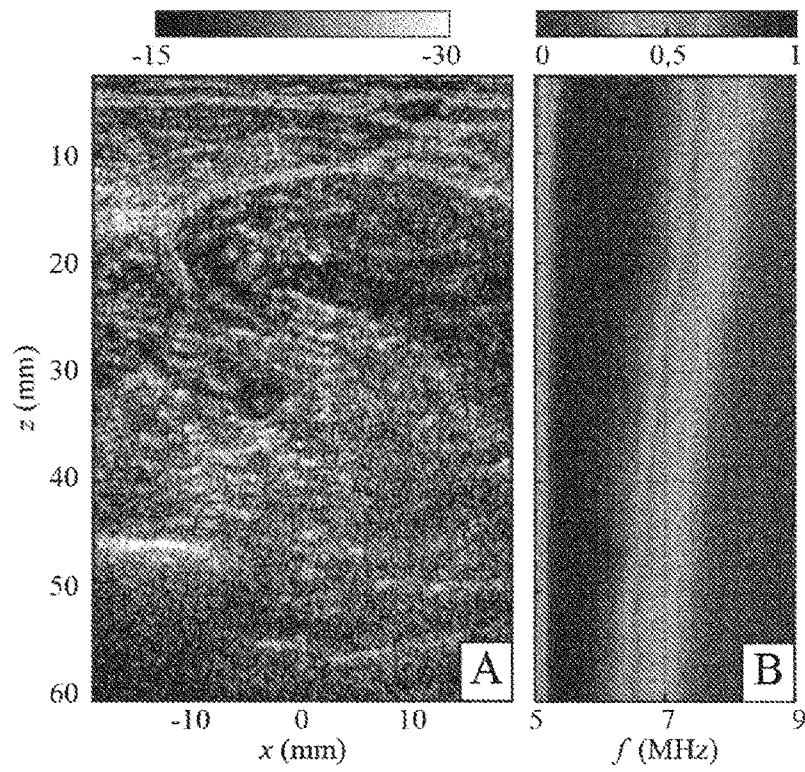


FIG. 17

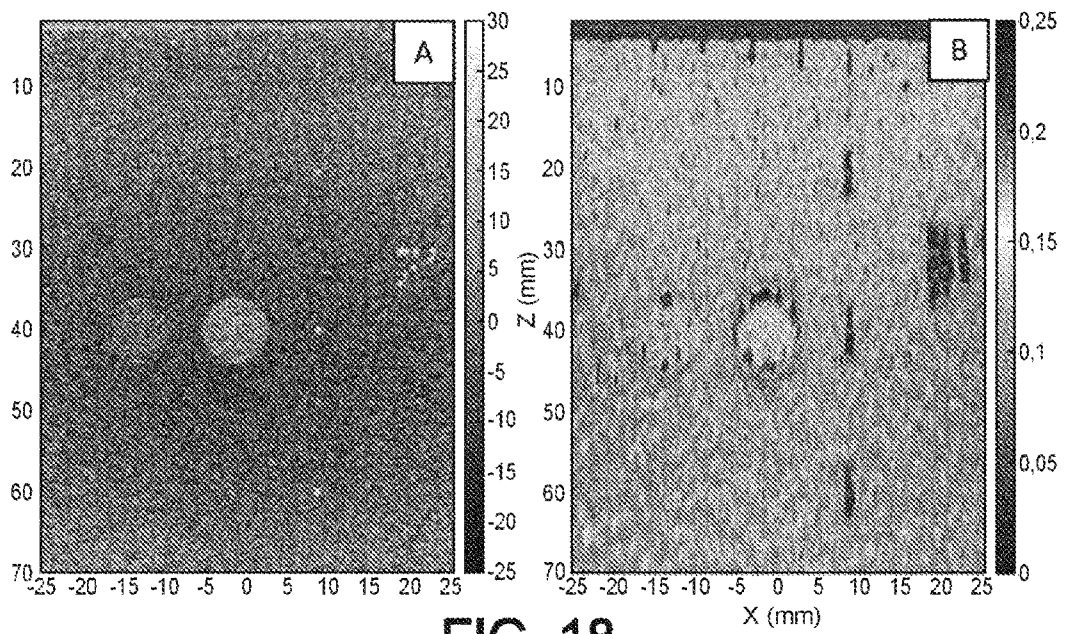


FIG. 18