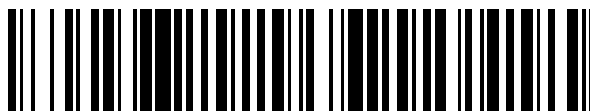


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 422 706**

51 Int. Cl.:

A61B 8/08 (2006.01)

G01H 5/00 (2006.01)

G01N 29/46 (2006.01)

G01N 29/06 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.06.2010 E 10737999 (2)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.04.2013 EP 2440140**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo ultrasónico para caracterizar un medio**

30 Prioridad:

11.06.2009 FR 0902856

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

13.09.2013

73 Titular/es:

**CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE (50.0%)**

3, Rue Michel-Ange

75794 Paris, FR y

**L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE - (PARIS
6) (50.0%)**

72 Inventor/es:

MINONZIO, JEAN-GABRIEL;

TALMANT, MARYLINE y

LAUGIER, PASCAL

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 422 706 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 dispositivo ultrasónico para caracterizar un medio

La presente invención se refiere a un procedimiento y a un dispositivo ultrasónico para caracterizar un medio.

5 La presente invención se aplica, en particular, para la caracterización de medios sólidos que constituyen objetos y en que se trata de conocer la naturaleza, la composición, el grado de homogeneidad, el estado, una dimensión etc., en particular en comparación con resultados establecidos anteriormente para medios conocidos.

10 Se puede tratar en particular de detectar de manera no destructiva el estado de una pieza mecánica. Más concretamente, se puede tratar de explorar el estado de un hueso humano o animal, en particular el estado de la capa cortical del hueso, por ejemplo para conocer la fase de evolución de un hueso en los niños, el estado de un hueso en el caso de algunos perjuicios que afectan al esqueleto, o también detectar patologías óseas tales como la osteoporosis y evaluar cuando proceda el grado de gravedad de la patología detectada.

Los procedimientos ultrasónicos ofrecen numerosas ventajas con respecto a los procedimientos radiográficos que requieren un material costoso y un entorno adaptado, que tiene efectos secundarios indeseables y cuya frecuencia de aplicación sobre un mismo individuo se debe limitar.

15 Se conocen procedimientos de caracterización que consisten en aplicar una excitación ultrasónica en un sitio de emisión y en detectar en varios sitios de recepción sucesivos la llegada de la primera señal generada por esta excitación, luego se calcula la velocidad de propagación de esta primera señal. El procedimiento se puede emplear aplicando una sonda sobre la superficie exterior del cuerpo del paciente. La solicitud de patente francesa nº 2.839.877 enseña un procedimiento y un dispositivo que eliminan la influencia de un espesor eventualmente variable de tejidos blandos (piel, músculo) entre la sonda y el hueso que se debe explorar. En la capa cortical de un hueso, la velocidad de la primera señal varía en función de parámetros tales como el espesor de la capa cortical, la presencia de osteoporosis etc. La única medida de la velocidad de la primera señal no permite siempre, por lo tanto, discriminar distintos síntomas.

20

Otro documento pertinente es la solicitud de patente internacional nº 03/045251 A1.

25 Ahora bien, la señal ultrasónica observada en los receptores en respuesta a una excitación tal como un impulso u otra excitación multifrecuencia contiene varias contribuciones asociadas a ondas que se propagan a velocidades diferentes, variables en función de la frecuencia, y con niveles de energía diferentes. Se conoce detectar los estados de excitación, sucesivos en el tiempo, de los múltiples receptores repartidos sobre el trayecto de las señales, y de establecer con el resultado de estas detecciones una imagen de los niveles de energía, en función del tiempo y del espacio, señales ultrasónicas transmitidas a lo largo del medio de estudio. Esta imagen espacio-temporal de los niveles de energía es rica en informaciones ya que agrupa las consecuencias, en términos de excitación, de los distintos modos vibratorios suscitados por la señal de excitación en el medio de estudio. Se saben extraer de las señales recibidas por los detectores sucesivos una cartografía de los niveles de energía en función de la frecuencia y de la velocidad de propagación. Esta cartografía toma por ejemplo la forma de una representación, por niveles de color o de gris, de la energía en cada punto de una marca frecuencia-velocidad de propagación. Se ven aparecer líneas de fuerte energía, denominadas "trayectorias", que reflejan cada una un modo vibratorio y que forman un conjunto característico del medio de propagación.

30

35

40 En una realización que se refiere a la obtención de esta cartografía, la imagen espacio-temporal puede ser tratada en particular por transformación de Fourier bidimensional numérica para extraer un espectro de las frecuencias temporales y de las frecuencias espaciales, y establecer, en particular, una correspondencia entre los valores de las frecuencias espaciales y los valores de las frecuencias temporales. Las señales recibidas, muestreadas en el tiempo y, a causa del número finito de receptores, en el espacio, se ponen bajo la forma de una matriz (tiempo - espacio) de los niveles de energía en el espacio y en el tiempo. Se realiza a continuación una transformación de Fourier numérica de dos dimensiones (TF2D) de la matriz de los niveles de energía, de tal modo que pasen variables tiempo y espacio a las variables frecuencia y velocidad de propagación. La cartografía antes citada corresponde a una visualización de la transformada de Fourier de dos dimensiones (TF2D).

45

Esta técnica presenta no obstante una serie de limitaciones y/o inconvenientes. Los modos débilmente energéticos tienden a ser encubiertos por los procedimientos más energéticos. La calidad de la imagen obtenida se degrada en los medios ruidosos. Además la técnica conocida demanda una gran cantidad de adquisiciones, sobre todo si el número de detectores está limitado por la forma o las dimensiones del objeto que incorporan el medio que se debe caracterizar. En particular, una técnica para hacer el método conocido más eficaz consiste en efectuar cada medida un gran número de veces, luego se debe tratar matemáticamente (TF2D) una matriz formada por las medias de las medidas efectuadas. Esto elimina en gran parte los errores que ocurren de forma aleatoria, pero no algunas fuentes de errores sistemáticas.

50

55 El objetivo de la presente invención consiste en remediar al menos algunos de los inconvenientes antes citados proponiendo un procedimiento y/o un dispositivo de caracterización por vía ultrasónica que sea fundamentalmente más eficaz que la técnica conocida.

Según la invención, el procedimiento ultrasónico de caracterización de un medio, comprende las etapas descritas en la reivindicación 1.

5 Se sabe que la respuesta a una excitación ultrasónica se analiza como una adición de componentes vibratorios que tienen, cada una, una amplitud (nivel de energía), una frecuencia, un posicionamiento en el tiempo (fase), y una velocidad de propagación.

La excitación (por ejemplo un impulso de Dirac) se analiza tal como se forma por componentes vibratorios que tienen, cada una, una frecuencia y una amplitud (nivel de energía). La excitación se caracteriza también por el sitio de emisión en que se aplica, ya que en el sentido de la invención se considera que dos señales de excitación son diferentes si se componen idénticamente pero aplicadas en sitios de emisión diferentes.

10 Una segunda señal de excitación, diferente de una primera señal de excitación, genera en cada detector una diferente respuesta de la generada en este mismo detector en respuesta a la primera señal de excitación.

15 Esta propiedad se puede explotar de distintas maneras. Se pueden por ejemplo realizar varias veces el método conocido, cambiando la señal de excitación de una vez a otra, obtener cada vez la cartografía que corresponde a la señal de excitación emitida, luego comparar y/o añadir las cartografías obtenidas para generar una cartografía resultante más fiable.

La invención prevé preferentemente utilizar más de dos señales de excitación diferentes, por ejemplo alrededor de una decena, para mejorar también los resultados de base de la invención.

20 Se prefiere según la invención que las señales de excitación diferentes difieren por la distancia entre su sitio de emisión respectivo y cada sitio de recepción. Se prefiere también, en este caso, que las señales de excitación no presentan otra diferencia entre sí, es decir su espectro de componentes vibratorios elementales sea sensiblemente el mismo. Se puede por ejemplo utilizar sistemáticamente como señal de excitación un impulso de Dirac. Se sabe que la respuesta de un transductor ultrasónico a tal impulso presenta un espectro formado por frecuencias situadas en un determinado intervalo con una distribución de Gauss de las amplitudes por una y otra parte de una frecuencia central.

25 Como la respuesta a una excitación en un medio dado se forma por componentes vibratorios que se propagan a velocidades diferentes, los componentes vibratorios de las dos respuestas a dos señales de excitación idénticamente compuestas pero aplicadas a distancias diferentes de un detector dado se añaden diferentemente al paso delante de este detector. Las dos señales captadas por cada detector son, por lo tanto, diferentes. Ahí también, se pueden emplear más de dos señales diferentes, por ejemplo una decena de señales aplicadas cada una a un sitio de emisión respectivo.

30 Así, en el caso general, esta versión preferida del procedimiento utiliza a N^E emisores y N^R receptores. Preferentemente, los emisores se activan sucesivamente, una sola a la vez, y cada vez que se activa un emisor, se procede a la adquisición de N^R señales temporales, una sobre cada una de las N^R receptores. En total, se obtiene $N^E \times N^R$ señales temporales.

35 En la práctica, para precisar la detección, cada medida se puede efectuar un número predeterminado de veces y cada señal temporal antes citada, elegida para la continuación del procedimiento, puede estar constituida por la media de las señales obtenidas en respuesta a este número predeterminado de excitaciones idénticas. De aquí en adelante, para la claridad de la exposición, no se mencionará ya esta posibilidad que cada señal temporal adquirida para la continuación del procedimiento sea en realidad una media de varias señales efectivamente detectadas.

40 Se sabe que toda función temporal se puede analizar como una adición de funciones sinusoidales del tiempo, que tiene una amplitud, una frecuencia, y una fase (posicionamiento con el tiempo). La amplitud y la fase se pueden expresar como el módulo y el argumento, respectivamente, de un mismo número complejo que se denomina "amplitud compleja". Se recuerda que un número complejo está formado por una parte real y de una parte imaginaria. Se puede representar como un vector en una marca definida por un eje real y un eje imaginario, que se cruzan perpendicularmente en el punto de origen del vector. El módulo es la longitud del vector, el argumento es el ángulo que forma con el eje real.

45 La transformación de Fourier, realizable numéricamente por ordenador, permite conocer la amplitud compleja asociada a cada función sinusoidal que compone una función. Se denomina transformación de Fourier temporal esta transformación aplicada a una función del tiempo para obtener una suma de componentes vibratorios. El paso de las frecuencias (intervalo entre dos frecuencias sucesivas) de las funciones sinusoidales que aparecen en la transformada de Fourier temporal se elige a discreción, en general en el marco de un compromiso entre la precisión deseada de los resultados, la duración del cálculo, y cuando proceda los límites de capacidad de los medios informáticos utilizados.

55 En una versión preferida de la invención, se determina, en particular por la transformación de Fourier temporal, el espectro de los componentes vibratorios de cada señal ultrasónica recibida, es decir cada una de las $N^E \times N^R$ señales temporales mencionadas más arriba. La serie de frecuencias utilizada para todas las transformaciones de

Fourier es la misma. Así para cada frecuencia de la serie, se obtiene una amplitud compleja asociada a cada una de las $N^E \times N^R$ señales temporales.

Resulta, para cada frecuencia, $N^E \times N^R$ amplitudes complejas que se pueden poner en forma de una matriz de dimensión $N^E \times N^R$.

- 5 Con respecto al estado de la técnica anterior en el cual se pasaban directamente señales de medida a la cartografía por medio de una transformada de Fourier bidimensional, la invención propone, por lo tanto, en esta fase, pasar por una transformada de Fourier unidimensional, a saber simplemente temporal, y no espacio-temporal.

10 Se constató que la energía que se propaga en un medio tiene un comportamiento lineal en función de la frecuencia. Esto significa que la energía asociada a un componente vibratorio en la señal de excitación se encuentra en los componentes vibratorios con la misma frecuencia de la respuesta a esta excitación. Esta particularidad permite aplicar el cálculo matricial.

15 Si se conoce una velocidad de fase, se sería capaz de excitar el conjunto de los emisores a la frecuencia correspondiente y de manera coordinada, en particular, en términos de posicionamiento temporal (fase), para que cada emisor a partir del segundo refuerce la señal que pasa delante de él procedente del o de los emisor(es) situado (s) aguas arriba. Se podría así por una parte amplificar la excitación y, por otra parte, observar mejor la respuesta del medio a esta excitación, en particular, en términos de nivel energético.

Se encontró que el cálculo matricial permite simular esta investigación y así marcar con precisión las velocidades de desplazamiento de la energía a cada frecuencia en el medio que se debe caracterizar.

20 El cálculo matricial enseña una operación denominada "descomposición en valores singulares" (SVD) aplicable a cualquier matriz. Según esta técnica matemática, la matriz de dimensión $M \times N$ se divide en una serie de números de tripletes que incluyen cada uno un valor singular y dos vectores singulares asociados. Uno de los vectores es de dimensión M , el otro vector es de dimensión N . el número de tripletes es igual a la más pequeña de las dos dimensiones M y N de la matriz.

25 Al aplicar esta descomposición en valores singulares a cada una de las matrices antes citadas, asociadas cada una a una frecuencia, se obtiene para cada matriz (cada frecuencia) N^E tripletes que incluye un vector emisión a N^E coordenadas complejas, un vector recepción a N^R coordenadas complejas y un valor singular que es un número real positivo.

Para una frecuencia dada, los N^E vectores emisión constituyen una base de vectores ortogonales del espacio matemático de las excitaciones.

- 30 El valor singular es indicativo del nivel energético de los modos asociados a esta frecuencia.

Para cada frecuencia, los N^E vectores singulares de recepción constituyen una base de vectores ortogonales en el espacio matemático de las respuestas.

35 A continuación, se busca a qué onda plana se asocian los vectores singulares de recepción. Está constituida de un vector que representa una onda plana en cada punto de recepción. Se calcula sobre la base de los vectores singulares de recepción las coordenadas del vector de frecuencia dada y de velocidad de fase fijada. Así, para cada frecuencia, se exploran todas las ondas planas haciendo variar la velocidad de fase.

40 Se asocia a cada valor del par (frecuencia, velocidad de fase), la suma de las coordenadas al cuadrado así calculada. Se constituye así una imagen en niveles de gris, estando los valores del nivel comprendidos entre 0 y 1. La imagen así obtenida evidencia las curvas de velocidad de fase de los modos que se propagaron a lo largo de la red de receptores.

45 En la señal frecuencia-velocidad de propagación, todas las trayectorias no tienen un mismo nivel energético, y el nivel puede incluso variar mucho a lo largo de una trayectoria. Una visualización de los niveles de energía reales tal como se los obtiene directamente por la técnica anterior de la TF2D carece en la práctica de claridad, ya que algunas trayectorias poco energéticas podrán no aparecer e incluso algunas trayectorias bastante energéticas podrán ser encubiertas por el entorno de trayectorias muy energéticas. Por esta razón, es ventajoso normalizar la representación de los niveles de energía, por ejemplo dando el valor 1 al nivel máximo para cada frecuencia.

La solución propuesta normalizó automáticamente los niveles representados sobre la cartografía ya que los niveles de energía se expresan en los valores singulares y éstos, en la solución preferida según la invención, en una determinada fase se eliminan del cálculo de los niveles representados por la cartografía.

- 50 Según una particularidad importante de la invención, no se conserva para la cartografía más que las respuestas frecuenciales que tienen los más altos niveles de energía. En el modo de realización que incluye la descomposición en valores singulares de las matrices de respuestas frecuenciales, el filtrado de las respuestas frecuenciales para no conservar más que los más energéticos se puede efectuar muy simplemente sólo conservando los vectores

5 singulares de recepción asociados a un valor singular que supera un determinado umbral. Se puede por ejemplo, para cada frecuencia, no conservar más que un número predeterminado de vectores singulares de recepción, asociados a los valores singulares más elevados que se encontraron para esta frecuencia. Como variante, se pueden para cada frecuencia no conservar más que los vectores singulares de recepción que se asocian a valores singulares que superan un determinado umbral que puede ser el mismo para todas las frecuencias, o variar según las frecuencias o los espectros de frecuencias.

Este filtrado permite eliminar del análisis los modos débilmente energéticos ya que se considera que corresponden a ruido.

10 El nivel representado en cada punto de la imagen expresa el grado de contribución de una onda plana dada en la base de los vectores singulares de recepción. Cuanto más elevado y más es el modo de vibración contribuye en la respuesta vibratoria.

15 Se puede también mejorar la calidad de los resultados que sólo se conservan en la imagen resultante los valores superiores en un cierto umbral predeterminado, por ejemplo 0,6 ó 0,7. Se puede elegir no representar más que los modos a más fuerte contribución aplicando este umbral. Todos los puntos que no se retienen se visualizan por ejemplo como si su nivel fuera nulo.

Las zonas de fuerte energía tienen un poco la forma de una cadena de montaña que tiene un pico que corresponde a una trayectoria tal como se define más arriba. Se pueden tratar los resultados para no hacer aparecer más que las trayectorias.

20 Según un segundo aspecto de la invención, el dispositivo para el empleo del procedimiento antes citado, que incluye una sonda equipada de medios de emisión ultrasónica y de una fila de receptores ultrasónicos, de medios para activar los medios de emisión y recibir las señales procedentes de los receptores en una ventana de tiempo después de la activación de los medios de emisión, y de los medios de tratamiento para extraer las señales recibidas una cartografía de los niveles de energía en una señal frecuencia-velocidad de propagación, se caracteriza porque los medios de emisión incluyen varios emisores y los medios de tratamiento establecen la cartografía combinando matemáticamente las señales recibidas en respuesta a distintos estados de activación de los emisores.

Tal como se expuso anteriormente, los distintos estados de activación de los emisores pueden por ejemplo consistir en que, cada vez, se activa un solo emisor y los otros están en reposo, el emisor activado no siendo los mismos de una vez a otra.

Los medios de tratamiento realizan:

- 30
- la transformada de Fourier temporal de cada señal recibida por cada receptor en respuesta a cada estado de activación, de tal modo que se obtenga para cada frecuencia una matriz $N^E \times N^R$ de las N^E respuestas adquiridas por los N^R detectores en respuesta a las N^E estados de activación,
 - la descomposición en valores singulares de estas matrices para extraer de cada una de ellas al menos un vector singular que forma parte constitutiva de una base del espacio de recepción,
- 35
- el cálculo de las coordenadas de un vector que representa una onda plana dada en la base de los vectores singulares de recepción.

Esto será el origen de la imagen proporcionada tal como se explica más arriba.

Otras particularidades y ventajas de la invención resultarán también de la siguiente descripción, relativa a dos ejemplos de realización no limitativos.

40 En los dibujos anexados:

- la figura 1 es una vista esquemática de un dispositivo según la invención;
 - la figura 2 muestra esquemáticamente la barra de emisores y de detectores o receptores de la sonda de la figura 1 aplicada sobre una placa de cobre de 2 mm de espesor;
 - la figura 3 representa las señales obtenidas sobre cada uno de los receptores en respuesta a una señal de excitación aplicada por el emisor $n^\circ i$ en el modo de empleo ilustrado en la figura 2;
 - la figura 4 representa los módulos de los valores singulares en función de la frecuencia;
 - la figura 5 representa un gráfico de utilización de la base de los vectores singulares de recepción;
 - la figura 6 representa por niveles de gris en una marca frecuencia-velocidad de propagación una cartografía del módulo al cuadrado de los componentes de las ondas planas en la base de los vectores singulares de recepción, después de la eliminación de los vectores de la base asociados a valores singulares inferiores a
- 50

un umbral predeterminado;

- la figura 7 representa la cartografía de la figura 6 después de tener en cuenta solamente las ondas planas tales como el vector asociado a una norma al cuadrado superior a 0,7 en la base de los vectores singulares de recepción;
- 5 - la figura 8 representa las trayectorias extraídas de la cartografía de la figura 7;
- la figura 9 es un gráfico comparativo de los resultados obtenidos con la tecnología anterior de la transformada de Fourier bidireccional (TF2D) y con la invención;
- la figura 10 representa parcial y esquemáticamente la aplicación de la sonda según la invención sobre el brazo de un paciente;
- 10 - la figura 11 es una vista análoga a la figura 5 pero en el caso de la aplicación de la sonda sobre un radio "in vitro";
- la figura 12 representa la cartografía correspondiente en la cual se representaron las líneas de nivel del nivel de gris;
- la figura 13 representa las trayectorias obtenidas por la utilización de la técnica según la invención;
- 15 - la figura 14 representa las trayectorias obtenidas por utilización de la técnica anterior por la TF2D;
- la figura 15 representa las trayectorias teóricas correspondientes;
- la figura 16 es una vista similar a la figura 11 pero cuando la invención se aplica a una placa de 2 mm de espesor de un material "de imitación" del hueso, estando los valores singulares indicados en decibelios;
- la figura 17 representa la cartografía correspondiente; y
- 20 - la figura 18 representa las trayectorias obtenidas y las trayectorias teóricas de la placa de material de imitación del hueso.

En el ejemplo representado en las figuras 1 y 2 el dispositivo según invención comprende una unidad de tratamiento 1 que se une a una pantalla de visualización 3 y a una impresora 3, así como a una sonda 4.

25 La sonda 4 incluye una cara activa 6 que es en general de forma plana y que está destinada a ser aplicada directa o indirectamente sobre el medio 5 que se debe caracterizar. La cara activa 6 presenta principalmente una parte de emisión 7 y una parte de recepción 8 separadas por una barrera 9 que impide la transmisión ultrasónica directa entre la parte de emisión 7 y la parte de recepción 8.

30 Tal como se ilustra en la figura 2, la parte de emisión 7 comprende un determinado número N^E de emisores 11 y la parte de recepción 8 comprende un determinado número N^R de receptores 12. Para no cargar la figura 2, sólo se hizo referencia a un reducido número de los emisores 11 y de los receptores 12. Se alinean los emisores 11 y los receptores 12 se ajustan en la misma línea que los emisores 11. El paso de los emisores y de los receptores es por ejemplo de 0,8 mm. En el ejemplo, este paso es el mismo para los emisores y los receptores. Pero puede ser ventajoso elegir pasos diferentes, en particular que no sean múltiplos uno del otro ni múltiplos de un divisor común.

35 La unidad de tratamiento 1 comprende de manera conocida de por sí medios para activar simultáneamente la emisión de una excitación ultrasónica por la parte de emisión 7 de la sonda, un recuento del tiempo, y un registro de las señales recibidas sobre cada uno de los receptores 12 durante una ventana de tiempo predeterminada a partir de la activación de la emisión.

40 La figura 3 representa la visualización gráfica de tal registro durante una ventana de tiempo de 40 μ s, representada en abscisas, y para una sonda que incluye catorce receptores 12 cuyos números se indican en ordenadas. Para cada receptor, el nivel cero de la señal corresponde al punto de partida de la señal asociada a este receptor sobre el eje vertical de las ordenadas.

45 Cada emisor 11 es un transductor ultrasónico que transforma una señal eléctrica recibida de la unidad de tratamiento 1 en una señal ultrasónica transmitida al medio 5 contra el cual se aplica la sonda. Cada receptor 12 es un transductor ultrasónico que transforma una señal ultrasónica recibida del medio 5 contra el cual la sonda se aplica en una señal eléctrica enviada a la unidad de tratamiento 1. La unidad de tratamiento 1 contiene medios para tratar las señales procedentes de la parte de recepción 8 de la sonda 4 y en extraer las variaciones de velocidad de fase en función de la frecuencia de las ondas ultrasónicas que se propagaron a lo largo de los receptores, tal como se expone con más detalle a continuación.

50 Según la invención, la unidad de tratamiento 1 es capaz de generar varios estados de activación de la parte de emisión 7 de la sonda 4 y de registrar las señales recibidas por el conjunto de los receptores 12 de la sonda 4 para

cada uno de los estados de activación. El intervalo de tiempo entre la generación de dos estados sucesivos es al menos tan grande que la ventana de tiempo (40 μs en el ejemplo de la figura 3) durante la cual la unidad de tratamiento 1 registra las señales recibidas.

5 En el ejemplo que se va a describir, cada estado de activación consiste en activar uno sólo de los emisores 11 dejando los otros en reposo. Los estados de activación se distinguen unos de otros por el número del emisor que se activa. Todos los emisores, cuando se activan, emiten una señal de excitación idéntica que es típicamente una respuesta a un impulso de Dirac. En este ejemplo, el número de estados de activación es, por lo tanto, igual al número N^E de los emisores, pero esto no es limitativo.

10 En la representación de la figura 2, el eje x es paralelo a la dirección de alineación de los dos emisores 11 y de los receptores 12, el índice "i" representa el número del emisor 11 en cuestión, que tiene una posición x_i^E a lo largo del eje x, y el índice "j" representa el número del receptor 12 en cuestión, que tiene una posición x_j^R a lo largo del eje x.

15 Así, para cada estado de activación, la unidad de tratamiento 1 registra N^R respuestas espacio-temporales que forman un conjunto similar al representado en la figura 3. Una vez que la unidad de tratamiento 1 generó los N^E estados de activación que corresponde cada uno a la activación de un respectivo de los emisores 11, la unidad de tratamiento 1 adquirió N^E conjuntos de N^R respuestas espacio-temporales, por lo tanto, en total $N^R \times N^E$ respuestas espacio-temporales. Se denomina de aquí en adelante $r_{ji}(t)$ la respuesta espacio-temporal adquirida por el detector $n^\circ j$ en respuesta a una activación del emisor $n^\circ i$. Se ve así en la figura 3 las 14 respuestas espacio-temporales $r_{11}(t)$ a $r_{141}(t)$ consecutivas a la activación del emisor $n^\circ i$.

Se va ahora a describir el tratamiento de las respuestas espacio-temporal por la unidad de tratamiento 1.

20 Por transformación de Fourier temporal, cada señal temporal $r_{ji}(t)$ recibida por un receptor "j" en respuesta a un estado de excitación, en el ejemplo la excitación de un emisor "i", es una adición de componentes vibratorios que tienen, cada una, una frecuencia y una amplitud compleja que se puede calcular para cada frecuencia por la fórmula siguiente:

$$R_{ji}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} r_{ji}(t) e^{-i2\pi ft} dt$$

25 Se obtiene así, para cada frecuencia (f), $N^R \times N^E$ amplitudes complejas que se puede escribir bajo la forma de la matriz R (f) siguiente que tiene N^R en fila y N^E en columnas:

$$\begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N^E} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2N^E} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{NR1} & R_{NR2} & \dots & R_{NRN^E} \end{pmatrix}$$

30 Según las reglas de la descomposición en valores singulares, cada una de las matrices R(f) de respuesta frecuencial se puede escribir bajo la forma siguiente, que corresponde a una suma de N^E términos en que cada uno es una matriz:

10

$$R(f) = \sum_{n=1}^{N^E} U_n(f) \cdot \sigma_n(f) \cdot V_n(f)^*$$

Se forma cada término de la suma de un vector (matriz columna) $U_n(f)$ multiplicado por un número real positivo $\sigma_n(f)$ multiplicado por una matriz en fila anotada como la transpuesta de la conjugada de otro vector $V_n(f)$.

35 En esta expresión, $U_n(f)$ es un vector denominado "singular" a N^R coordenadas complejas que se denomina "vector recepción", $V_n(f)$ es un vector denominado "singular" a N^E coordenadas complejas que se denomina "vector emisión", y $\sigma_n(f)$ es un valor singular. Se ve que hay por cada frecuencia f un número N^E (el número de estados de activación que es igual al número de emisores en el ejemplo) de tripletes formados, cada uno, de un vector singular de emisión, de un vector singular de recepción, y de un valor singular.

40 Se encontró según la invención que los vectores singulares emisión son cada uno descriptivos de una excitación combinada de los distintos emisores que estimula un modo de la respuesta, cada valor singular representa el nivel energético del modo asociado al vector singular de emisión correspondiente, y cada vector singular de recepción se

puede considerar como uno de los vectores unitarios de una base del espacio de las señales de recepción. Los vectores unitarios de cada base asociada a una frecuencia son ortogonales entre sí.

Se procede a continuación a una primera filtración que consiste en conservar no más que los vectores singulares que se asocian a los valores singulares más elevados, que corresponde, tal como se ve, a las respuestas más energéticas.

5 La figura 4 representa los valores singulares $\sigma_n(f)$ en función de la frecuencia. Se decide arbitrariamente un umbral S_1 . Se considera que los valores singulares inferiores al umbral S_1 están asociados a fenómenos de ruido y se eliminan los vectores de recepción correspondientes para la continuación del tratamiento matemático.

10 El número de valores singulares de una matriz es igual a la más pequeña de sus dos dimensiones. En el ejemplo, se tiene $N^E = 8$ emisores y $N^R = 14$ receptores, y la más pequeña de las dimensiones de la matriz es, por lo tanto, $N^E = 8$. Hay, por lo tanto, por cada frecuencia ocho valores singulares. Después de la filtración, se obtiene, para cada frecuencia, un espacio de recepción que tiene un número N^{EK} de dimensiones que no es siempre el mismo, que es inferior o eventualmente igual al número N^E de estados de activación, y que es inferior al número N^R de receptores.

15 Se podría proceder a este primer filtrado de una manera un poco diferente, por ejemplo haciendo variar el umbral en función de la frecuencia, o sólo se acepta para cada frecuencia un número predeterminado de valores singulares, siendo este número el mismo para todas las frecuencias, o variable en función de la frecuencia o por espectros de frecuencias. Cualquiera que sea el modo de filtrado utilizado, se obtiene para cada frecuencia una base de N^{EK} vectores singulares de recepción para las ondas que se propagan a esta frecuencia a lo largo de la red de los receptores.

20 Por lo tanto, es posible expresar una onda plana cualquiera (asociada a un par frecuencia f , velocidad de fase c) en la base asociada a esta frecuencia. Esta onda se expresa por un vector $e^{test}(f,c)$ a N^R coordenadas cuyo coordenada de fila j se da por la ecuación:

$$e^{test}(f, c, j) = \frac{1}{\sqrt{N^R}} \exp \left[i \frac{2\pi f}{c} x_j \right]$$

25 La división por la raíz de N^R se destina a procurar que la suma de los cuadrados de los N^R componentes, es decir, el módulo del vector, sea igual a 1.

En la base de los vectores singulares de recepción, el vector prueba $e^{test}(f,c)$ se expresa de la siguiente forma:

$$e^{test}(f, c) = \sum_{n=1}^{N^{EK}} \langle e^{test}(f, c) | U_n(f) \rangle U_n$$

La notación $\langle \dots | \dots \rangle$ indica un producto escalar. La figura 5 ilustra esta operación que consiste en proyectar el vector

test sobre los dos ejes de una base de dos dimensiones ($N^{EK} = 2$).

30 Es interesante tener en cuenta que

$$\langle e^{test}(f, c) | U_n(f) \rangle = \tilde{U}(f, c)$$

expresión en la cual $\tilde{U}(f,c)$ es la transformada de Fourier espacial del vector singular U_n .

En este ejemplo, cada punto (frecuencia fijada, velocidad de fase fijada) de la imagen construida es definido por:

$$im(f, c) = \sum_{n=1}^{N^{EK}} \left| \langle e^{test}(f, c) | U_n \rangle \right|^2$$

35 Es el cuadrado del módulo de la proyección del vector test en la base de los N^{EK} vectores singulares de recepción conservados. Esto es en parte arbitrario, se habría podido también, por ejemplo, tomar como valor representativo el propio módulo, por lo tanto, la raíz cuadrada del valor que corresponde a la fórmula citada más arriba. Siendo el módulo del vector test igual a 1, el módulo de su proyección en la base de los vectores singulares de recepción conservados es siempre inferior o igual a 1. El cuadrado de este módulo es, por lo tanto, igualmente, siempre inferior

o igual a 1.

La figura 6 representa la imagen así obtenida, que se puede visualizar en la pantalla 2 de la figura 1, o ser objeto de una impresión gráfica por la impresora 3 de la figura 1. Una escala a la derecha de la figura aclara el valor asociado a cada nivel de gris. Los niveles de gris están comprendidos entre 0 y 1 ya que la imagen representa la norma al cuadrado de un vector que representa una onda plana, norma que no puede ser superior a 1 por construcción según la exposición citada más arriba. Hay por debajo de la figura y a la izquierda de la figura dos zonas triangulares enteramente blancas que corresponden a puntos que no se calcularon ya que son poco significativos.

Tal como se muestra en la figura 7, se puede también, en esta fase, efectuar un segundo filtrado, aplicando, esta vez sobre la imagen resultante, un segundo umbral S_2 elegido igual a 0,7 en este ejemplo. No se conserva entonces, entre las ondas planas que participan en los vectores singulares de recepción, más que aquellas que dan la más alta contribución (mediante los valores más elevados de la norma al cuadrado del vector test).

Se ve en la figura 7 que los puntos que corresponden a un nivel de gris superior al segundo umbral S_2 tienen una forma general de cadenas de montaña que tienen un pico. En la representación de la figura 8, sólo se conservaron los picos y se obtiene así una representación de las trayectorias tal como se las definidas más arriba.

En la representación de la figura 9, las trayectorias teóricas conocidas para una placa de cobre de 2 mm de espesor aparecen en trazos continuos y en trazos de punto. Las trayectorias obtenidas con el método anterior por la TF2D se definen por pequeños círculos que figuran cada uno un punto. Las trayectorias obtenidas con el método según la invención, que pasan por la descomposición en valores singulares (SVD) se definen por puntos negros. Todo indica por una parte que la invención evidencia trayectorias más próximas a la teoría, por lo tanto probablemente más exactas, y por otra parte que la invención revela un modo que el método anterior en absoluto no permitió detectar, en la zona comprendida entre 2,5 y 3 MHz.

La figura 10 muestra la aplicación de la sonda 4 sobre un paciente, por encima de la capa cortical 14 de un hueso 16 que puede ser por ejemplo un fémur, un radio, o etc. Se interpone un determinado espesor de tejidos blandos 16 entre la sonda 4 y la superficie exterior de la capa cortical 14.

La figura 11 representa los valores singulares obtenidos en función de la frecuencia con una sonda de 5 emisores aplicados directamente sobre un radio en el marco de un experimento "in vitro". Como hay cinco emisores, hay cinco valores singulares para cada frecuencia. La figura muestra también un ejemplo de umbral S_1 constante para todas las frecuencias. Los vectores singulares que corresponden a valores singulares situados por debajo de este umbral no se retienen para la continuación del tratamiento matemático.

La figura 12 representa las imágenes obtenidas después de un tratamiento matemático conforme al explicado más arriba. Sobre la escala de la derecha, el nivel de gris igual a 0,6 está cercado para indicar que puede ser elegido como segundo umbral S_2 por debajo del cual un punto está representado como que tiene un nivel de gris igual a cero, sensiblemente como expuesto anteriormente en referencia a la figura 7.

La figura 13 representa las trayectorias que corresponden a la visualización de la figura 12. La figura 14 representa las trayectorias obtenidas en condiciones experimentales comparables utilizando el método anterior de la TF2D. Las trayectorias de las figuras 13 y 14 se deben comparar con las trayectorias teóricas de la figura 15. Mientras que el resultado obtenido con la invención (figura 13) permite reconocer los modos teóricos, el resultado obtenido con el estado de la técnica anterior (figura 14) es difícilmente explotable ya que entorpecido de puntos parásitos.

Así, el procedimiento según la invención demuestra su aptitud a proporcionar un resultado más preciso, cuyo ruido ampliamente eliminado.

Las figuras 16 a 18 son relativas a ensayos que hayan consistido en emplear la invención sobre una placa de 2 mm de un material fabricado por Sawbones, una división de Pacific Research Laboratoires, Inc., situado en Vashon, Estado de Washington, Estados Unidos. Este material sintético se desarrolló con el fin de presentar características físico-mecánicas lo más próximas posible a las del hueso.

La figura 16 representa los valores singulares en función de la frecuencia temporal. Los valores singulares se expresan en decibelios de debilitamiento con respecto al valor 1 (correspondiente a 0 decibelios de debilitamiento). Esta representación en decibelios tiene por objeto visualizar los bajos valores más claramente que en la figura 11 por ejemplo. Además el umbral S_1 elegido no es constante, sino que varía en función de la frecuencia. A frecuencias elegidas con un paso por ejemplo de 0,2 MHz entre ellas, se asoció un umbral determinado empíricamente. Más concretamente, el umbral asociado a cada frecuencia se elige suficientemente bajo para conservar tanta información útil como posible pero suficientemente alto para eliminar en la medida de lo posible el ruido. Para hacer eso, se regula el umbral observando la banda horizontal que corresponde a la frecuencia en cuestión en la imagen de la figura 17, para que esta banda incluya tantas gamas oscuras que sea posible destacándose sobre un fondo claro.

La figura 17 representa la imagen, proporcionada sobre la pantalla del aparato, de la proyección de los valores singulares en el plan frecuencia temporal (ordenadas) - frecuencia espacial (abscisas). Para una frecuencia temporal dada, la frecuencia espacial indica la velocidad de propagación. En este sentido, el gráfico de la figura 17 es de la

misma clase que los de las figuras 6 y 7, dónde sin embargo la frecuencia temporal está en abscisas. En la figura 17, una escala vertical a la derecha aclara los niveles de gris tal como se explica en referencia en la figura 6.

5 La figura 18 muestra las velocidades de fase obtenidas por los máximos de la imagen de la figura 17. Los puntos obtenidos están figurados por pequeños círculos. Las líneas de trazos continuos y en trazos punteados ilustran las trayectorias teóricas.

Los resultados obtenidos para algunas trayectorias son bastante satisfactorios, pero no se obtienen algunas trayectorias y partes de trayectorias. Los resultados están menos completos que con la placa de cobre. No es sorprendente ya que el hueso es un medio más ruidoso y más atenuante que el cobre, por lo tanto la calidad de las señales registradas es menor.

10

REIVINDICACIONES

- 1.- Procedimiento ultrasónico de caracterización de un medio, que incluye:
- aplicar una señal de excitación ultrasónica al medio,
 - detectar una respuesta constituida de las señales ultrasónicas recibidas en varios sitios de recepción (12) situados a distintas distancias de un sitio de emisión (11) donde se aplicó la señal de excitación,
 - a partir del conjunto de las señales ultrasónicas recibidas, extraer una cartografía de los modos que se propagaron, en una señal frecuencia-velocidad de propagación,
- caracterizados porque para cada sitio de recepción (12) la detección se realiza sucesivamente para al menos dos señales de excitación diferentes, de modo que cada sitio de recepción vea pasar al menos dos respuestas cuyos componentes vibratorios son diferentes y/o diferentemente añadidas, porque se establece para cada frecuencia una matriz $N^E \times N^R$ de los niveles de energía y de los desfases de las respuestas para N^R sitios de recepción y N^E señales de emisión distintos y porque se somete la matriz de las respuestas frecuenciales iniciales a una descomposición en valores singulares de los que resulta para cada frecuencia una base de vectores singulares en el espacio de las excitaciones, y una base de vectores singulares en el espacio de las ondas que se propagaron a lo largo de los receptores, así como de los valores singulares.
- 2.- Procedimiento según la reivindicación 1, caracterizado porque señales de excitación diferentes difieren por la distancia entre sus sitios de aplicación respectivos y cada sitio de recepción.
- 3.- Procedimiento según la reivindicación 2, caracterizado porque fuera de la distancia entre el sitio de aplicación y cada sitio de recepción las señales de excitación son sensiblemente idénticas.
- 4.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque se aplican las señales de excitación diferentes en instantes diferentes, y se detectan separadamente las respuestas para cada señal de excitación.
- 5.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque se determina el espectro de los componentes vibratorios de cada señal ultrasónica recibida, en particular por cálculo de la transformada de Fourier temporal de cada señal recibida.
- 6.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque para cada frecuencia se expresa la base de las ondas planas en la base de los vectores singulares de recepción y se designan aquellas de las ondas planas que participan más en los vectores singulares de recepción.
- 7.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque se utilizan al menos dos emisores y se determina para cada frecuencia al menos una emisión combinada de los dos emisores, para la cual la respuesta recibida en los sitios de recepción se optimiza en términos de energía recibida con respecto a la energía emitida.
- 8.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, caracterizado porque se utilizan varios emisores y se determinan para cada frecuencia varias emisiones combinadas de los varios emisores para los cuales las respuestas frecuenciales respectivas se optimizan en términos de energía recibida con respecto a la energía emitida.
- 9.- Procedimiento según la reivindicación 8, caracterizado porque se seleccionan las respuestas frecuenciales más energéticas para la determinación de las ondas planas que participan en las señales de recepción, y se elimina al menos una respuesta frecuencial poco energética.
- 10.- Procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 9, caracterizado porque se normalizaron las respuestas frecuenciales.
- 11.- Dispositivo para el empleo de un procedimiento según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, que incluye una sonda (4) equipada de medios de emisión ultrasónica (11) y de una fila de receptores ultrasónicos (12), medios para activar los medios de emisión y recibir las señales procedente de los receptores en una ventana de tiempo después de la activación de los medios de emisión, y medios de tratamiento para extraer de las señales recibidas una cartografía de los modos que se propagaron, en una marca frecuencia velocidad de propagación, caracterizado porque los medios de emisión incluyen varios emisores (11) y los medios de tratamiento establecen la cartografía combinando matemáticamente las señales recibidas en respuesta a diferentes estados de activación de los emisores, y porque los medios de tratamiento realizan:
- la transformada de Fourier temporal de cada señal recibida por cada receptor en respuesta a cada estado de activación, de tal modo que se obtenga para cada frecuencia una matriz $N^E \times N^R$ de N^E respuestas adquiridas por N^R detectores en respuesta a N^E estados de activación,

- la descomposición en valores singulares de estas matrices para extraer de cada una de ellas al menos un vector singular que forma parte constitutiva de una base del espacio de recepción,
 - el cálculo de las coordenadas de un vector que representa una onda plana dada en la base de los vectores singulares de recepción.
- 5 12.- Dispositivo según la reivindicación 11, que incluye medios para eliminar vectores singulares que corresponden a niveles de energía relativamente bajos.

FIG. 1

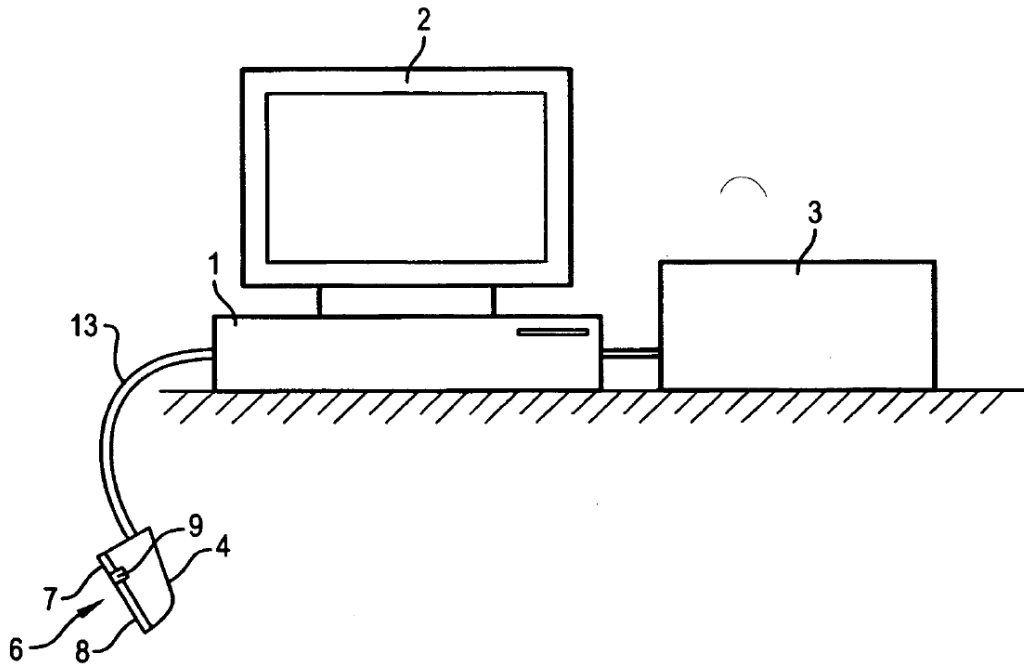


FIG. 2

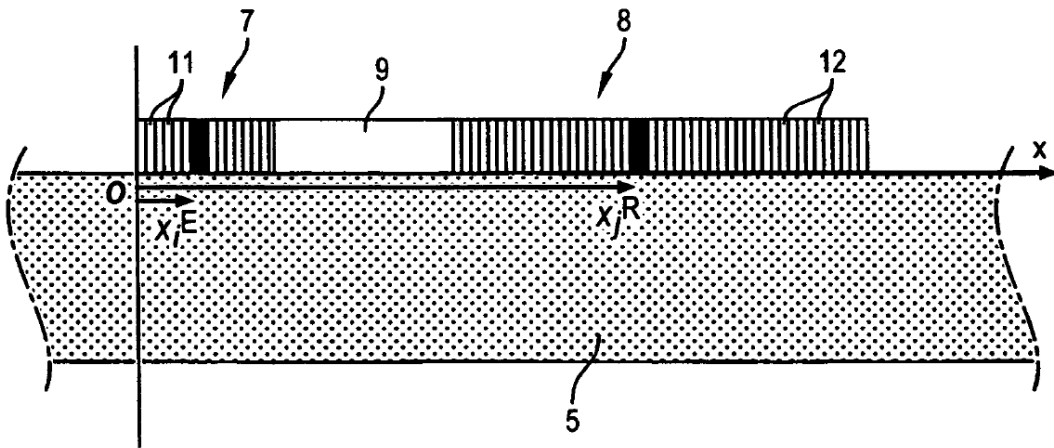


FIG. 3

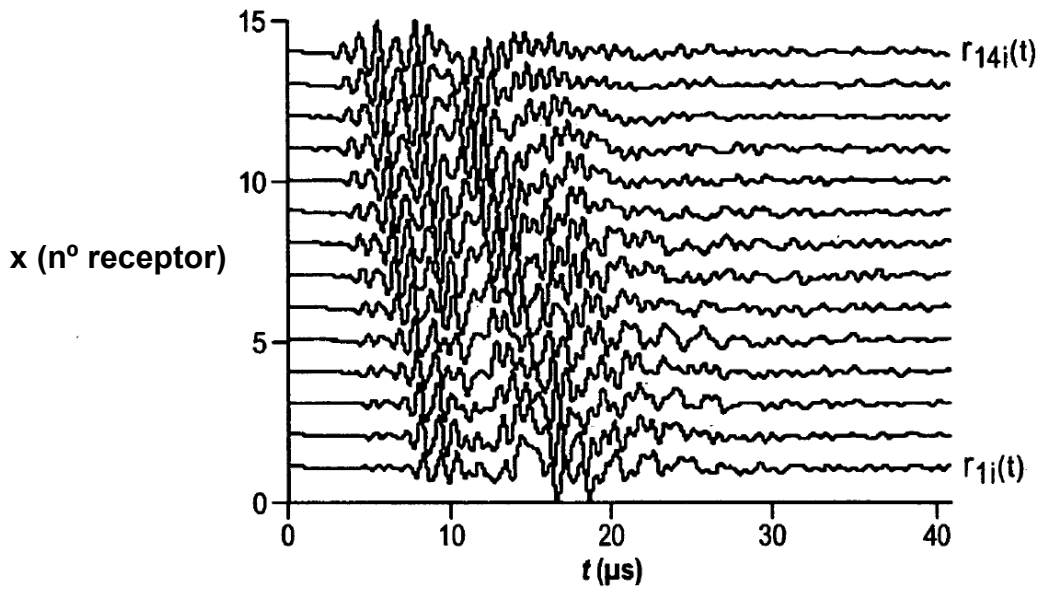


FIG. 4

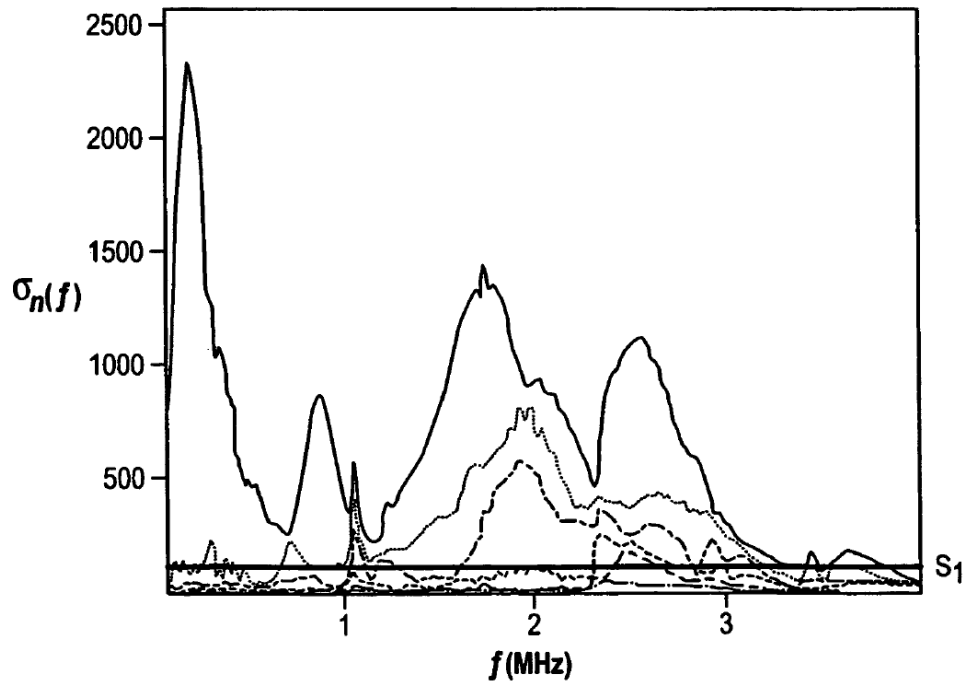


FIG. 5

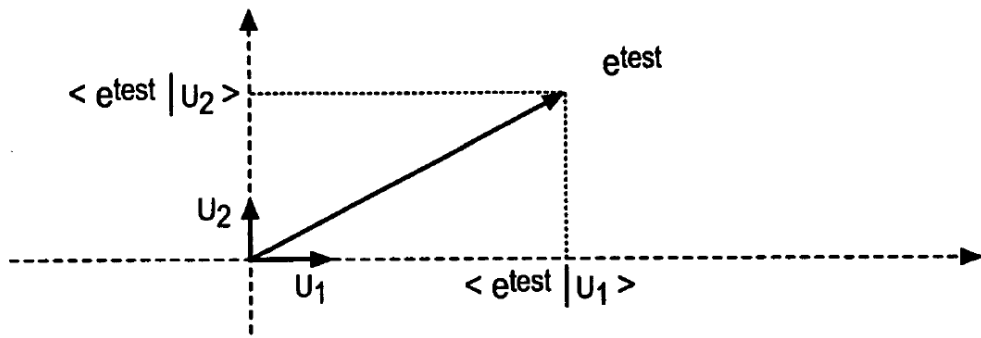


FIG. 6

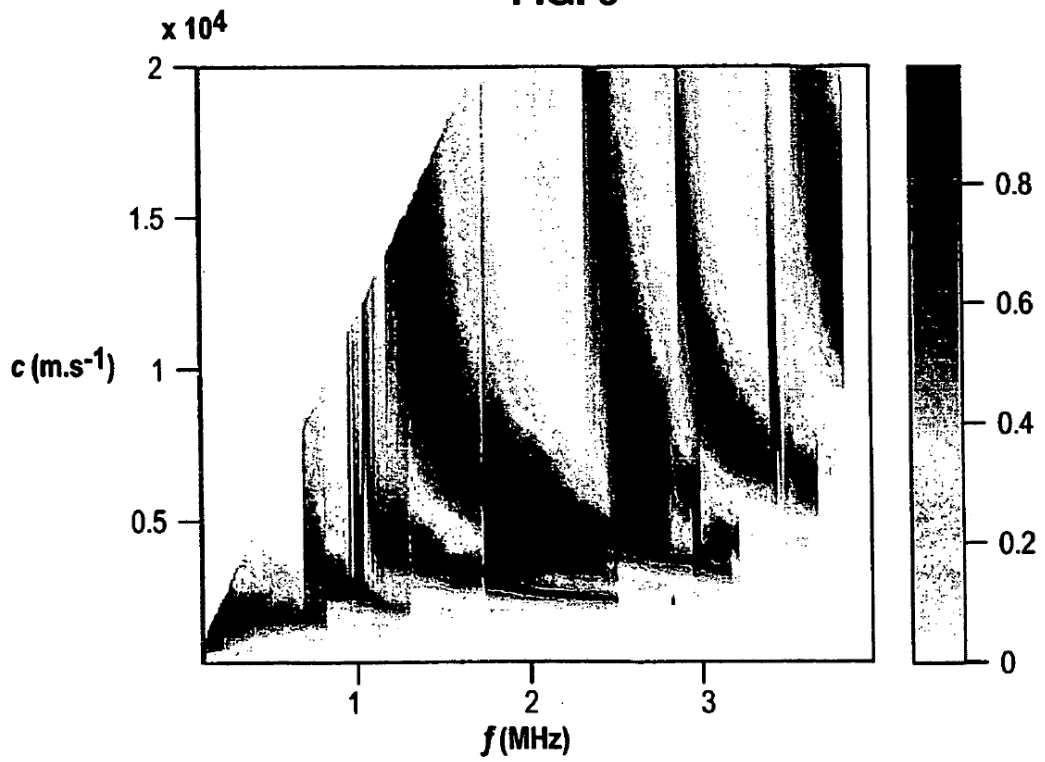


FIG. 7

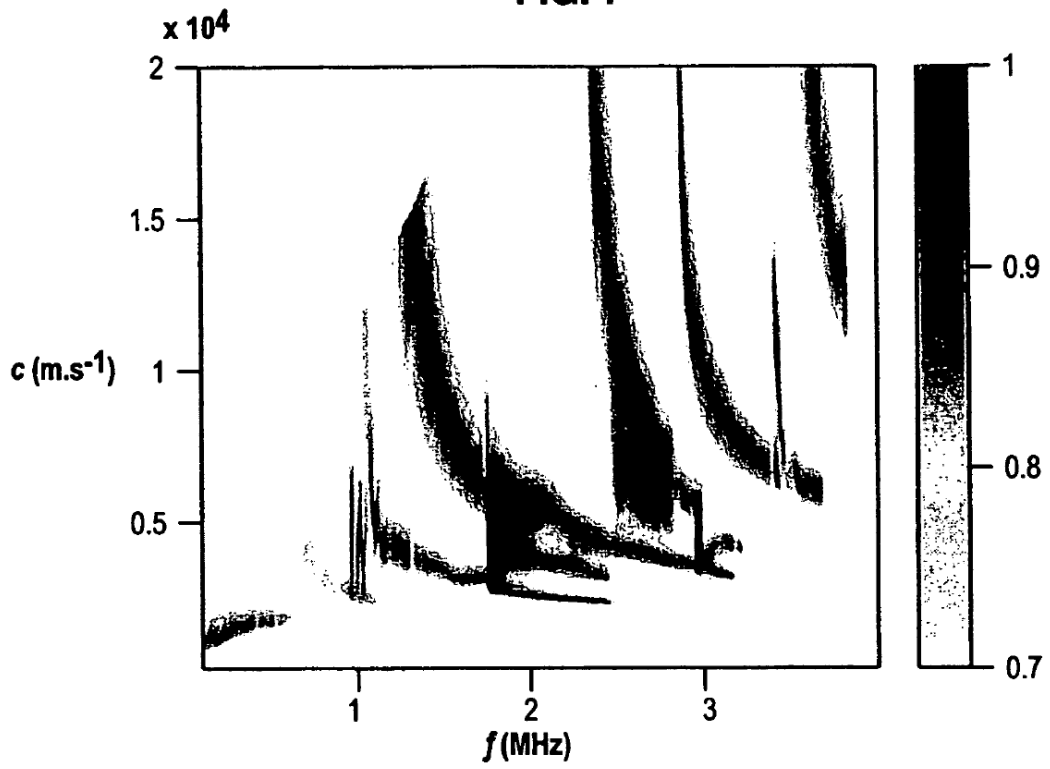


FIG. 8

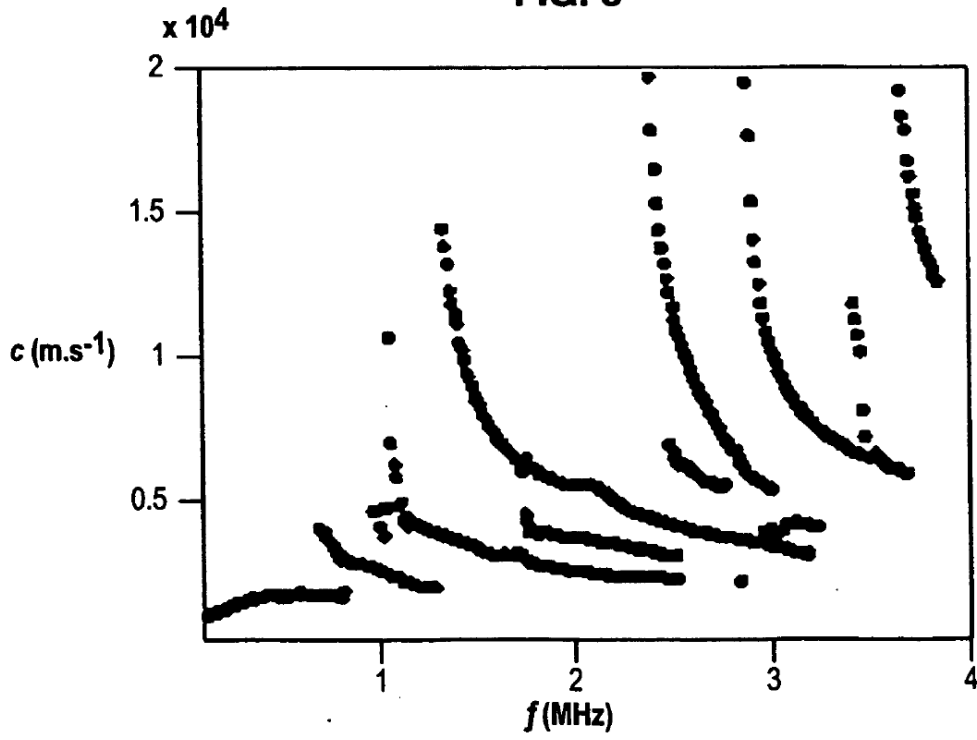


FIG. 9

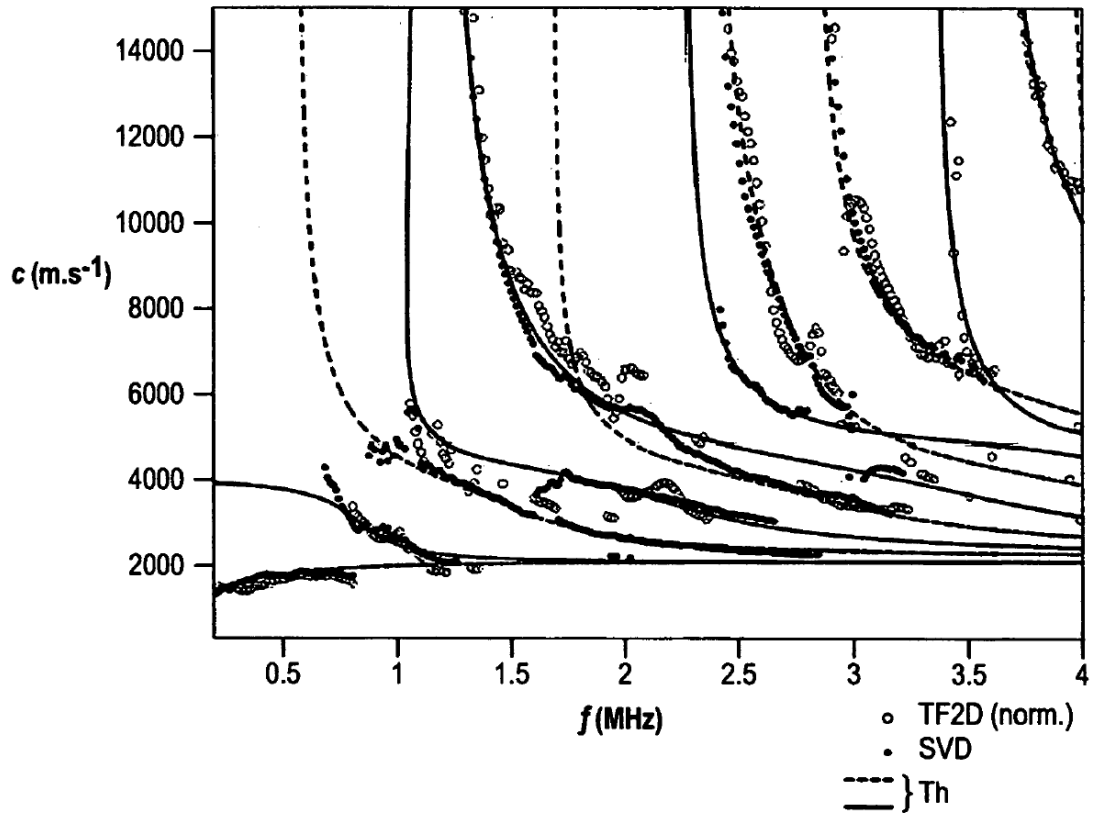


FIG. 10

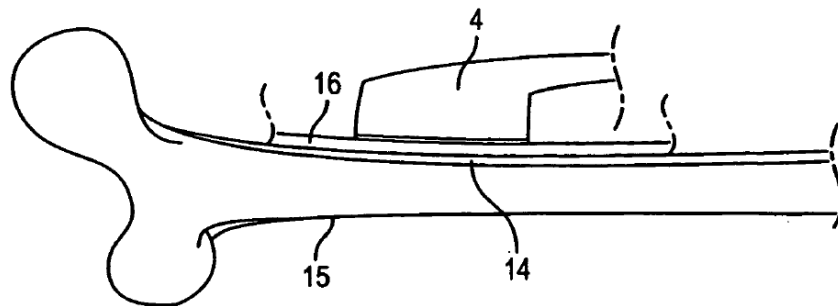


FIG. 11

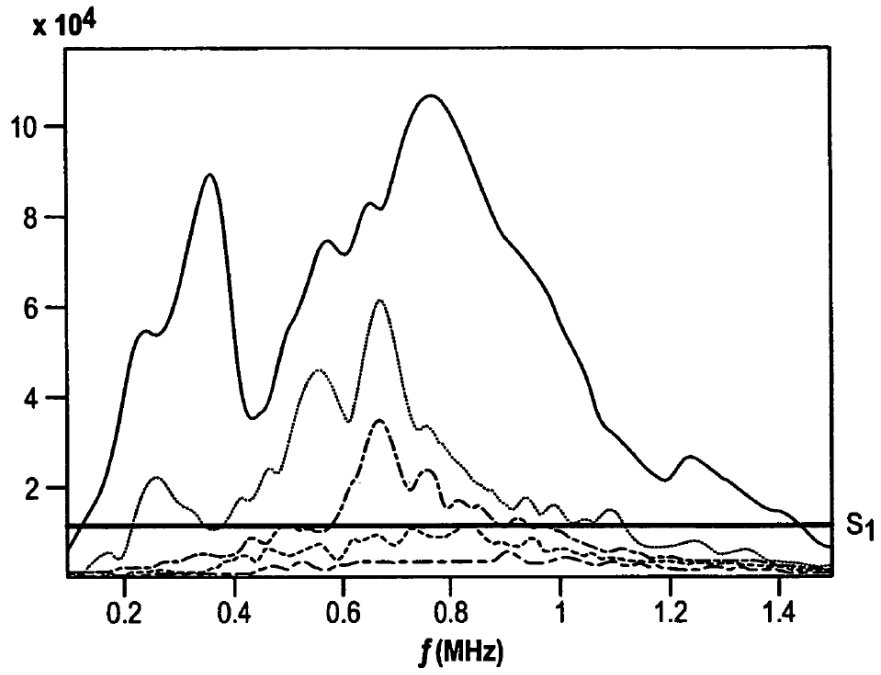
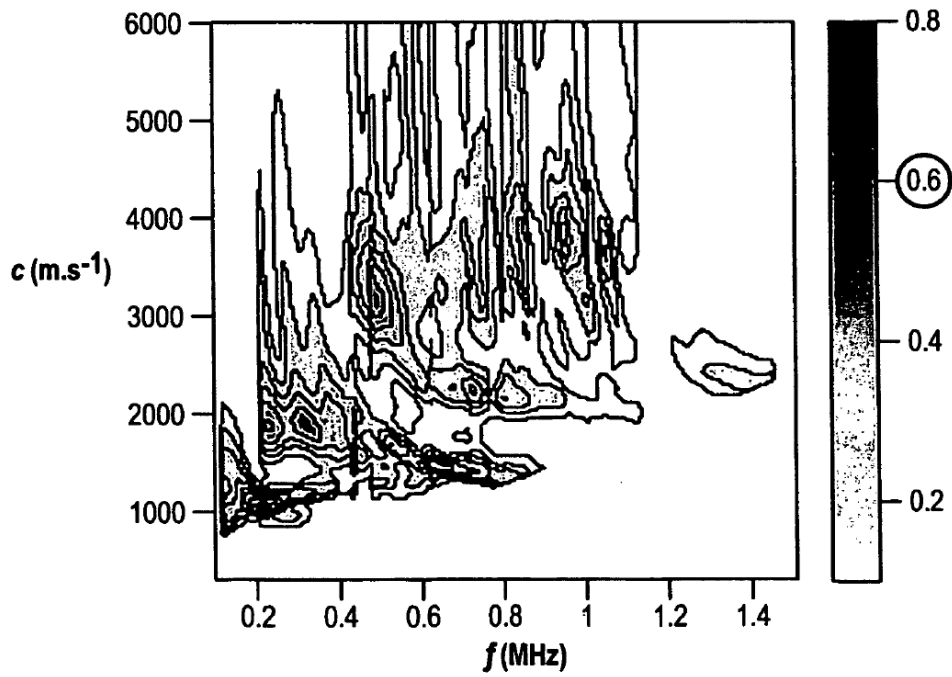


FIG. 12



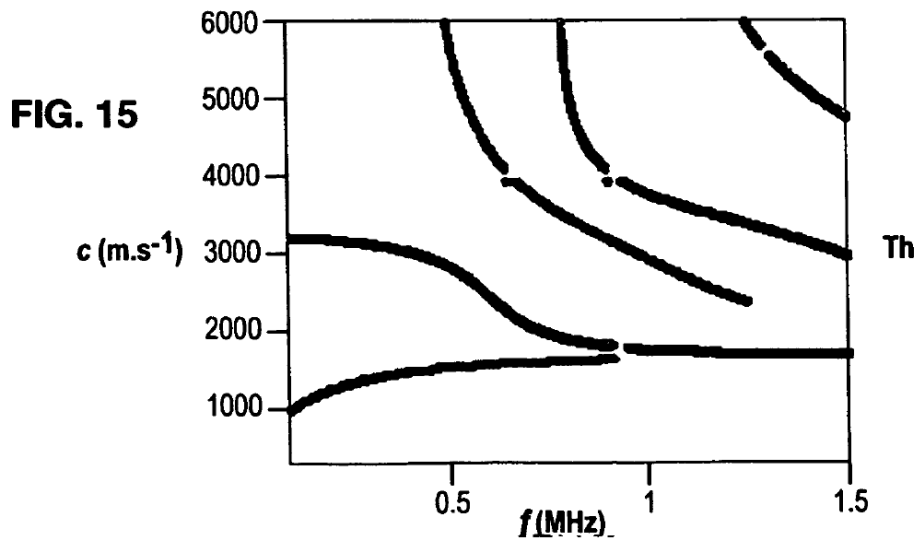
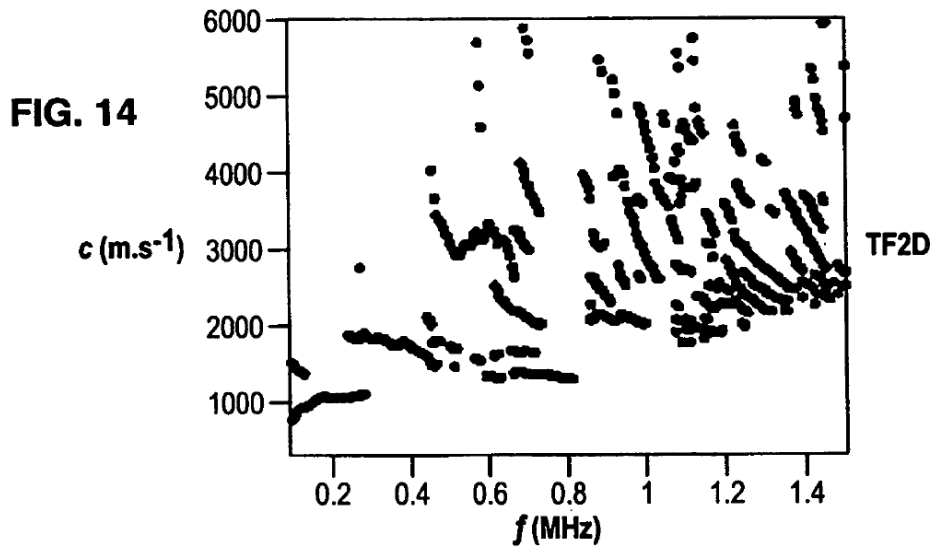
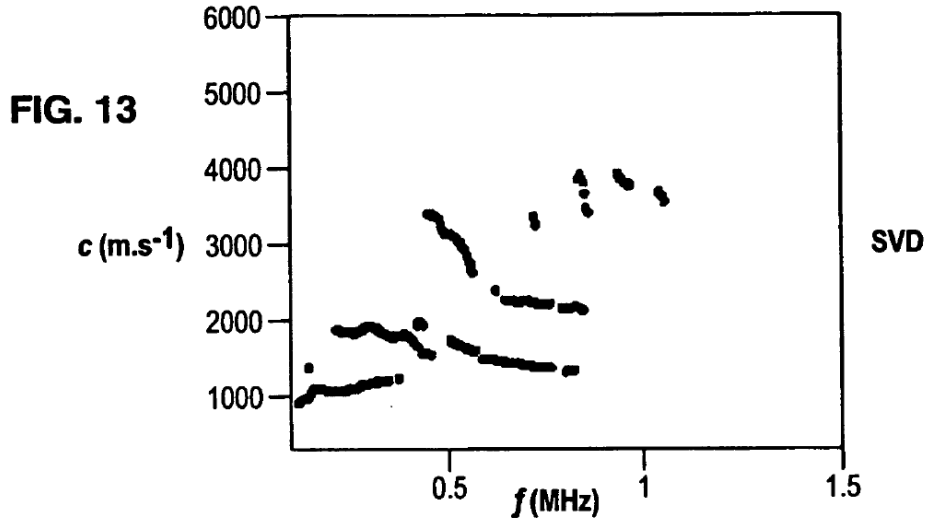


FIG. 16

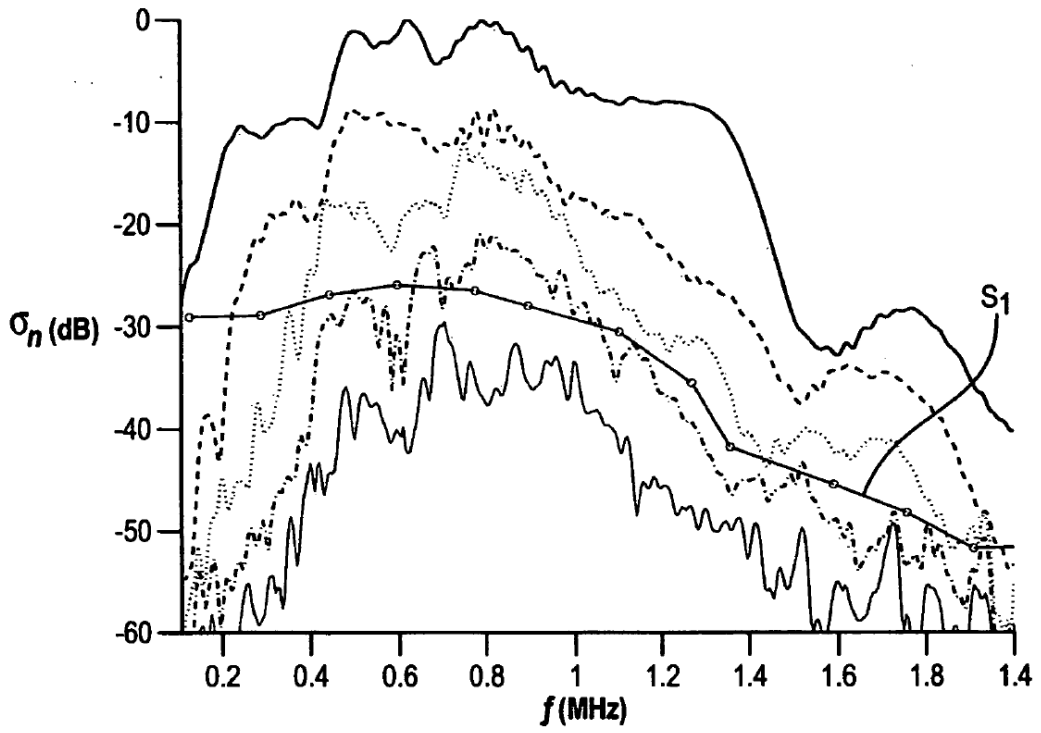


FIG. 17

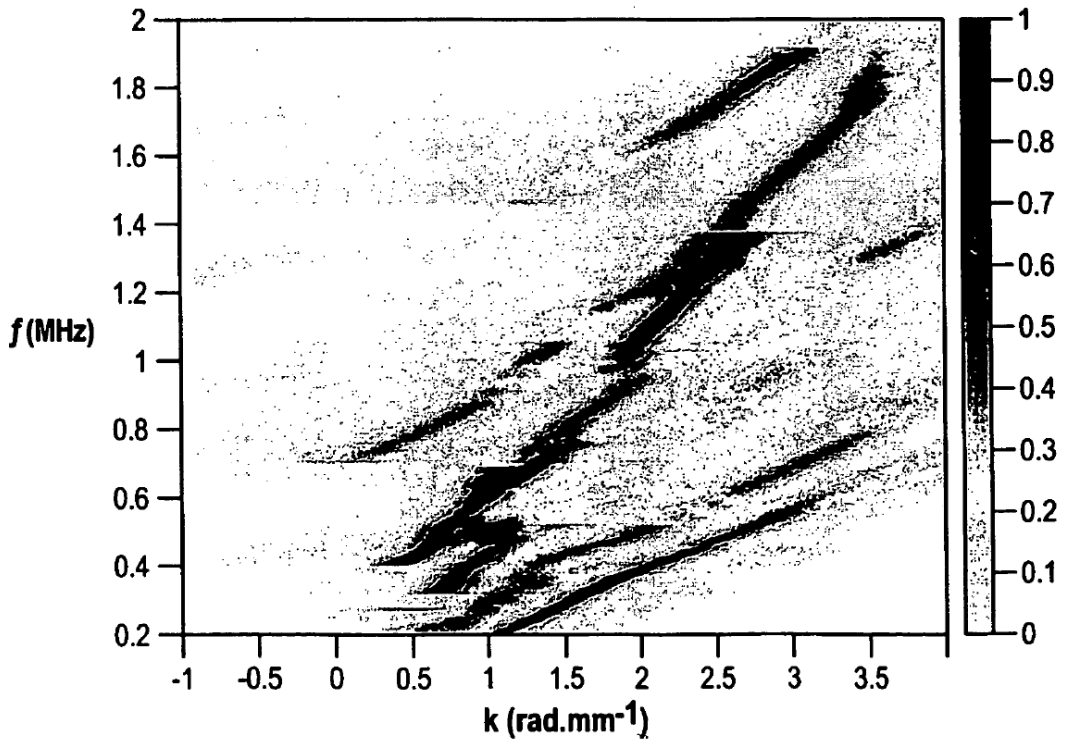


FIG. 18

