



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 282 688**

51 Int. Cl.:  
**G01V 1/00** (2006.01)  
**G01V 1/37** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Número de solicitud europea: **03770244 .6**  
86 Fecha de presentación : **21.08.2003**  
87 Número de publicación de la solicitud: **1549975**  
87 Fecha de publicación de la solicitud: **06.07.2005**

54 Título: **Método de conformación de un barrido de vibrador.**

30 Prioridad: **04.09.2002 US 234963**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**16.10.2007**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**16.10.2007**

73 Titular/es: **WesternGeco Seismic Holdings Limited**  
**Citco Building, P.O. Box 662**  
**Road Town, Tortola, VG**

72 Inventor/es: **Moerig, Rainer**

74 Agente: **Torner Lasalle, Elisabet**

ES 2 282 688 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

Método de conformación de un barrido de vibrador.

5 **Antecedentes de la invención**

En la adquisición de datos sísmicos, se usan ondas sísmicas para determinar la naturaleza, orientación y ubicación de las formaciones geológicas de la subsuperficie. A finales de los años 50, Conoco, Inc. fue pionera en el desarrollo de un nuevo tipo de técnica de prospección geofísica, conocida generalmente en la actualidad como prospección “vibroseis”. La prospección vibroseis emplea un vibrador sísmico utilizado para generar un tren de ondas controlado que se propaga a través de la porción de tierra que han de detectar los detectores sísmicos. El operador de vibración selecciona un intervalo de activación (barrido), junto con un período subsiguiente durante el cual el vibrador no está activado. Las señales reflejadas se reciben tanto durante el período en que el vibrador está activado como cuando no lo está. Típicamente, la activación se efectúa en forma de vibración sinusoidal de frecuencia continuamente variable aplicada sobre la superficie de la tierra (o en un cuerpo de agua) durante un período de barrido que dura desde dos hasta aproximadamente 20 segundos, o incluso más.

Varios tipos de barridos son posibles, utilizando cada uno de ellos algún tipo de cono de amplitud aplicado al principio y al final del barrido para asegurar que la amplitud del barrido llegue a cero suavemente en sus extremos. La frecuencia del barrido puede variar linealmente o no linealmente con el tiempo. La señal estándar es un barrido lineal. Un barrido lineal es una señal de tipo sinusoidal con una envolvente de amplitud en esencia constante, en la que la frecuencia de la señal varía de manera lineal con el tiempo, ya sea creciendo o decreciendo monotónicamente dentro de una gama de frecuencias determinada, y produce una tasa de barrido constante. Un barrido no lineal es una señal de tipo sinusoidal cuya frecuencia varía de manera no lineal con el tiempo.

Recientemente se ha desarrollado un nuevo tipo de señal para su uso en la prospección vibroseis, conocido como “barrido conformado”. La tecnología del barrido conformado se describe, por ejemplo, en la patente US 5,347,494, a nombre de Andersen. Un beneficio en el uso de un barrido conformado consiste en que dicho barrido está diseñado para tener una longitud de pulso por autocorrelación y un espectro de respuestas a impulsos que facilitan las subsiguientes actividades de procesamiento de datos.

En la técnica vibroseis, los datos generados a partir de la fuente de vibración se correlacionan con un barrido de referencia para producir un registro de correlación. Por lo general, una señal de barrido de referencia es una señal ideal que el vibrador tiene programado aplicar. El registro de correlación se asemeja a un registro sísmico convencional, tal como cabría esperar de una fuente sísmica explosiva o impulsiva.

Es bien conocido en la técnica sísmica que un resultado indeseado de las señales sísmicas generadas por vibración es la “energía de lóbulo lateral”. Los lóbulos laterales son resultado del proceso de correlación y alargan y complican la ondícula sísmica correlacionada que se desea. Visualmente, la energía de lóbulo lateral tiene la apariencia de pequeñas oscilaciones a cada lado de los tres lóbulos centrales de la ondícula sísmica. Dicha energía de lóbulo lateral degrada la calidad de los datos y afecta de manera adversa a la capacidad de estimación y control de la ondícula sísmica durante su procesamiento. Por lo tanto, existe la necesidad de generar datos de correlación de vibrador que tienen una forma de ondícula simple con la mínima energía de lóbulo lateral. Tales datos reducen la distorsión de la señal sísmica y mejoran la resolución sísmica.

Al intentar resolver el problema del lóbulo lateral, Rietsch, “Vibroseis Signals with Prescribed Power Spectrum” (Señales vibroseis con espectro de energía prescrito), *Geophysical Prospecting* (Prospección geofísica), Vol. 25, páginas 613-620 (1977), desarrolló una relación entre una función de fase instantánea de barrido y su densidad espectral de energía para los barridos que tienen una envolvente de amplitud constante. Dicha relación se basa en el hecho de que el espectro de energía de un barrido está inversamente relacionado con la tasa de cambio de frecuencia de dicho barrido. Rietsch propuso un método para determinar una función de fase apropiada para un barrido que tiene un cierto espectro de energía predeterminado, señalando que el método se podría utilizar para diseñar barridos con funciones de autocorrelación que tienen lóbulos laterales bajos. En teoría, los barridos que tienen espectros de energía predeterminados podrían haberse diseñado utilizando dicha relación; sin embargo, los sistemas de control electrónico de vibrador de aquella época no podían reproducir con exactitud o seguir un barrido definido por el usuario.

Después de Rietsch, la llegada de unos instrumentos de control de vibrador de nueva generación basados en una tecnología de microprocesador avanzada permitió un control estricto de la fuerza de salida del vibrador (tanto en amplitud como en fase). Dicho avance permitió que los barridos definidos por el usuario se reprodujeran con mayor exactitud y que el vibrador los siguiera. Por ejemplo, en la patente US 5,347,494, Andersen aprovechó el método de Rietsch para producir formas de ondícula mejoradas con una mínima energía lateral, mediante el uso de un bucle de retroalimentación que compensa los efectos de una envolvente de amplitud no constante (cono). Andersen propone además ciertos espectros de energía que producen una ondícula básicamente de tres lóbulos. Tanto Rietsch como Andersen emplean métodos que relacionan una función de fase de barrido con su espectro de energía.

Las técnicas de barrido en cascada desarrolladas recientemente adolecen en parte del problema del lóbulo lateral descrito anteriormente. En dichas técnicas, diversos barridos (segmentos) se enlazan por sus extremos de salida mediante el vibrador y se registran mediante un único período de escucha en el extremo del barrido en cascada. Esto

reduce considerablemente el tiempo de campo requerido para registrar los datos en comparación con los métodos convencionales. A continuación, los datos de barrido en cascada registrados se correlacionan con una secuencia de barrido en cascada de referencia. Los datos correlacionados muestran una estructura (de segmentos) repetitiva, debido a la concatenación de los barridos. Como resultado de dicha estructura, los lóbulos laterales de las primeras interrupciones de un segmento pueden extenderse a un segmento previo, enmascarando las reflexiones débiles y, en consecuencia, degradando la calidad de los datos.

Existe la necesidad en el sector de la técnica de obtener métodos efectivos y eficientes para mejorar la calidad de los datos vibroseis. Tales métodos producen ondículas con una mínima energía de lóbulo lateral, resuelven el problema del lóbulo lateral en datos de barrido en cascada y proporcionan datos conformados cuando se utilizan barridos en cascada en disparo simultáneo con dos o más fuentes de vibración.

La patente US 4,925,213 concierne a un método de transmisión de señales de onda seno de barrido compuesto, en el que se obtiene una gama de frecuencias comprendida, por ejemplo, entre 10 Hz y 160 Hz, utilizando cuatro señales transmitidas simultáneamente que cubren las gamas siguientes: 10-20 Hz, 20-40 Hz, 40-80 Hz y 80-160 Hz. En el método de la patente US 4,925,213, los lóbulos laterales de autocorrelación de la señal compuesta se reducen en comparación con los métodos en los que las cuatro señales aumentan (o disminuyen) en frecuencia con el tiempo, disponiendo dos señales que aumentan en frecuencia con el tiempo y otras dos frecuencias que disminuyen en frecuencia con el tiempo.

El artículo "An approximation technique for determining optimal Combisweep parameters" (Una técnica aproximativa para determinar unos parámetros óptimos de barrido combinado), de S.M. Docherty y otros, publicado en "Geophysics" (Geofísica), Vol. 53, nº 7, páginas 989-991 (1988), hace referencia a la técnica de "barrido combinado" para reducir el ruido de correlación a base de combinar linealmente las autocorrelaciones individuales. Dicho documento trata la combinación óptima de autocorrelaciones y concluye que no es necesario sumar más de tres autocorrelaciones.

La presente invención proporciona un método para reducir la energía de lóbulo lateral de una ondícula que representa la autocorrelación de un barrido piloto, comprendiendo dicho método las etapas de conformar una frecuencia instantánea del barrido piloto y autocorrelacionar dicho barrido piloto, en el que la etapa de conformación comprende calcular la frecuencia instantánea del barrido piloto, y en el que la frecuencia instantánea se representa mediante un polinomio de grado  $n$ .

La presente invención proporciona métodos para producir formas de ondícula sísmica con una mínima energía de lóbulo lateral. Dichos métodos conforman la frecuencia instantánea de un barrido para obtener una ondícula de autocorrelación que es básicamente una ondícula de tres lóbulos con una mínima energía de lóbulo lateral. La frecuencia instantánea  $f(t)$  es una función de tiempo  $t$  no lineal y puede representarse mediante un polinomio de grado  $n$ . El polinomio se conforma variando sus coeficientes y su grado hasta que se obtiene la ondícula de autocorrelación deseada. Los métodos de la presente invención pueden utilizarse para diseñar barridos en cascada y, además, se pueden aplicar a barridos de cascada realizados con dos o más fuentes simultáneas.

De este modo, los métodos comprenden las etapas siguientes: en primer lugar, la frecuencia instantánea del barrido piloto, y, en segundo lugar, la autocorrelación. Un barrido piloto con una frecuencia instantánea adecuada tiene una ondícula de autocorrelación con una mínima energía de lóbulo lateral. En un ejemplo de realización de la presente invención, la etapa de conformación comprende calcular la frecuencia instantánea del barrido piloto, mitigar la frecuencia instantánea del barrido piloto dentro de las regiones cónicas, calcular una fase instantánea del barrido piloto y calcular un barrido piloto conformado. También en dicho ejemplo de realización, el paso de correlación comprende calcular un error entre la función de autocorrelación del barrido conformado y la ondícula de autocorrelación deseada y determinar si el error calculado es inferior a un valor umbral predeterminado.

### Breve descripción de los dibujos

Para que las características anteriormente mencionadas de la presente invención se puedan entender en detalle, se realiza a continuación una descripción más concreta de la invención, resumida anteriormente, haciendo referencia a unos ejemplos de realización de la misma descritos en la presente memoria descriptiva e ilustrados en los dibujos adjuntos. No obstante, cabe señalar que la memoria descriptiva y los dibujos adjuntos ilustran únicamente algunos ejemplos de realización de la invención y, en consecuencia, no se deben considerar como limitativos de su alcance, ya que la invención puede admitir otros ejemplos de realización igualmente efectivos.

La figura 1 es un diagrama de flujo que ilustra un ejemplo de realización del método básico de la presente invención.

La figura 2 es un diagrama de flujo para un ejemplo de realización del método de la presente invención, en el que se minimiza la diferencia entre una ondícula de autocorrelación calculada y una deseada.

La figura 3A es una gráfica sobre la frecuencia instantánea al comienzo de un barrido conformado de cuatro segundos.

## ES 2 282 688 T3

La figura 3B es una gráfica sobre la frecuencia instantánea al final de un barrido conformado de cuatro segundos.

La figura 4 ilustra la evolución del error durante el conformado de un barrido con una ondícula de autocorrelación de Ricker de 50 Hz.

La figura 5A es una gráfica sobre la frecuencia instantánea de un barrido lineal.

La figura 5B ilustra una ondícula de autocorrelación de un barrido lineal.

La figura 5C es una gráfica sobre la frecuencia instantánea de un barrido conformado.

La figura 5D ilustra una ondícula de autocorrelación de un barrido conformado.

La figura 6A ilustra la primera parte de los datos no tratados de un barrido lineal en cascada.

La figura 6B ilustra la primera parte de los datos no tratados de un barrido conformado en cascada para el mismo punto de vibrador que en la figura 6A.

La figura 7A ilustra los datos sísmicos de la figura 6A después de la correlación, utilizando un barrido lineal.

La figura 7B ilustra los datos sísmicos de la figura 6B después de la correlación, utilizando un barrido conformado.

La figura 8A ilustra la última parte de los datos de barrido correlacionados de un barrido lineal.

La figura 8B ilustra la última parte de los datos de barrido correlacionados de un barrido conformado.

La figura 9A ilustra los datos no tratados de los barridos conformados en cascada adquiridos con dos fuentes simultáneas.

La figura 9B ilustra los datos separados y comprimidos sobre la fuente de la izquierda de los datos de barrido en cascada de la figura 9A.

La figura 9C ilustra los datos separados y comprimidos sobre la fuente de la derecha de los datos de barrido en cascada de la figura 9A.

### Descripción detallada de la invención

El objetivo de la tecnología del barrido conformado es proporcionar métodos para conformar un barrido de vibrados y así generar una forma de ondícula simple con una mínima energía de lóbulo lateral después de la correlación. Los barridos piloto utilizados para accionar los vibradores son, además de regiones cónicas, barridos de amplitud constante. El barrido más comúnmente utilizado para la adquisición de datos es un barrido lineal con una tasa de barrido constante (frecuencia instantánea lineal). Sin embargo, también se emplean comúnmente los barridos no lineales, conformados a base de modificar la tasa de barrido durante el mismo. Al realizar dicha operación se puede modificar el contenido espectral y la ondícula de autocorrelación, manteniendo a la vez una envolvente de amplitud constante. Los barridos no lineales se suelen utilizar para compensar la atenuación de la señal que se da cuando dicha señal atraviesa formaciones geológicas. Aun así, independientemente de si los barridos son lineales o no lineales, las ondículas de autocorrelación de dichos barridos son ondículas de múltiples lóbulos que tienen, por lo general, unos lóbulos laterales que sólo se deterioran lentamente.

Contrariamente a los métodos del estado de la técnica, los métodos de la presente invención no utilizan la relación entre la función de fase del barrido piloto y su espectro de energía para reducir al mínimo la energía de lóbulo lateral. En lugar de ello, en los métodos de la presente invención se conforma la frecuencia instantánea de un barrido piloto mediante un proceso de optimización para así obtener una ondícula de autocorrelación que es virtualmente una ondícula de tres lóbulos con una mínima energía de lóbulo lateral.

La figura 1 ilustra un diagrama de flujo del método de la presente invención. Por lo general, en la etapa 10 se conforma una frecuencia instantánea de un barrido piloto aplicando un algoritmo. A continuación, dicho barrido piloto se autocorrelaciona. Al hacerlo, la ondícula de autocorrelación producida tiene una energía de lóbulo lateral reducida.

La figura 2 ilustra un ejemplo de realización del método ilustrado en la figura 1. En relación con la figura 2, se escoge un polinomio de grado  $n$  donde  $n$  es del orden de, por ejemplo, 10 (etapa 100). En la etapa 102, se calcula la frecuencia instantánea  $f(t)$  del barrido piloto. Dicha frecuencia instantánea  $f(t)$  es una función de tiempo  $t$  no lineal y se representa mediante un polinomio de grado  $n$

$$f(t) = \sum_{i=0}^n a_i (t - \tau)^i, \quad (1)$$

## ES 2 282 688 T3

en el que los coeficientes  $a_i$ , el cambio de tiempo  $\tau$  y el grado  $n$  son parámetros que se utilizan para conformar el barrido. Los valores iniciales de los parámetros pueden ser

$$\tau = T/2 \quad (2)$$

$$a_0 = (f_1 + f_0)/2 = f_c \quad (3)$$

donde  $T$  es la longitud del barrido y  $f_0$  y  $f_1$  son la frecuencia inicial y final de un barrido lineal que, de otro modo, se habría utilizado en la zona de estudio. El valor de  $a_0$  será aproximadamente la frecuencia central  $f_c$  de la ondícula de correlación y se debe escoger de tal manera que esté comprendida en la gama de frecuencias recuperables de la zona de estudio. El valor inicial de  $a_1$  puede ser

$$a_1 = (f_1 - f_0)/T \quad (4)$$

que es, como ya se conoce, la tasa de barrido de un barrido lineal. Los valores iniciales de los demás coeficientes ( $i > 1$ ) son

$$a_i = 10^{-(i-2)} \quad \text{para} \quad 2 \leq i \leq n$$

lo cual es suficientemente pequeño para evitar inestabilidades numéricas en el cálculo del polinomio.

Además, es preferible obtener una función de frecuencia instantánea 1) que sea positiva para  $0 \leq t \leq T$ , y 2) en la que  $f$  aumenta monótonicamente con el tiempo. Sin embargo, no se suelen satisfacer ambos requisitos en todos los puntos del tiempo durante el barrido. En particular en el caso de polinomios de grado muy elevado, en la ecuación 1  $f(t)$  tiende a adoptar valores positivos o negativos extremadamente grandes en ambos extremos del soporte del polinomio, es decir, dentro de las zonas cónicas.

En consecuencia, a fin de alcanzar las propiedades anteriores, la función de frecuencia instantánea debe mitigarse dentro de las zonas cónicas (etapa 104) del barrido piloto. Esto se lleva a cabo a base de calcular una suma ponderada del polinomio de la ecuación 1 y otra función de frecuencia lineal  $d(t)$ :

$$(5)$$

$$f_s(t) = \left\{ \begin{array}{l} f(t) \cdot (1 - w_u(t)) + d_u(t) \cdot w_u(t) \text{ para } 0 \leq t \leq t_{cono} \\ f(t) \text{ para } t_{cono} < t < T - t_{cono} \\ f(t) \cdot (1 - w_d(t)) + d_d(t) \cdot w_d(t) \text{ para } T - t_{cono} \leq t \leq T \\ \text{con } d_u(t) = f_{\min} + \frac{f(t_{cono}) - f_{\min}}{t_{cono}} \cdot t, w_u(t) = 1 - \frac{t}{t_{cono}} \\ \text{y } d_d(t) = f(T - t_{cono}) + \frac{f_{\max} - f(T - t_{cono})}{t_{cono}} \cdot t - (T - t_{cono}), w_d(t) = \frac{t - (T - t_{cono})}{t_{cono}} \end{array} \right.$$

en la que  $d_u$  y  $d_d$  son las funciones de frecuencia lineal de las zonas cónicas ascendentes y descendentes,  $w_u$  y  $w_d$  son las funciones ponderadas correspondientes,  $f_{\min}$  y  $f_{\max}$  son límites de frecuencia especificados por el usuario y  $t_{cono}$  es la longitud del cono que, en el presente ejemplo de realización, se asume que tiene la misma longitud en las zonas cónicas ascendentes y descendentes. La ecuación 5 proporciona la frecuencia instantánea mitigada utilizando una función lineal de mitigación  $d(t)$ . En lugar de utilizar funciones lineales, otros ejemplos de realización podrían emplear funciones cuadráticas.

La ecuación 5 garantiza que la función de frecuencia instantánea  $f_s(t)$  comienza en  $f_{\min}$  y acaba en  $f_{\max}$ . Sin embargo, no garantiza que  $f_s(t)$  sea realmente una función monótonica. Por lo tanto, la ecuación 5 se aplica repetidamente hasta

## ES 2 282 688 T3

que se obtiene el comportamiento monótonico de la frecuencia instantánea (etapa 105). La frecuencia instantánea de un barrido conformado de cuatro segundos se determinó aplicando las ecuaciones 1 y 5 de la presente invención. En la figura 3 se pueden ver los resultados obtenidos dentro de las zonas cónicas del barrido conformado. La zona cónica del barrido dura 0,2 segundos. La curva etiquetada como “polinomio original” es la frecuencia instantánea de acuerdo con la ecuación 1. La curva etiquetada como “polinomio mitigado” es la frecuencia instantánea tras las aplicaciones repetidas de la ecuación 5 con  $f_{\min} = 3$  Hz y  $f_{\max} = 150$  Hz.

Una vez se ha alcanzado el comportamiento monótonico, se calcula la fase instantánea (etapa 106). La fase instantánea  $\Phi(t)$  es la integral de la frecuencia instantánea  $f_s(t)$ :

$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t f_s(t) dt \quad (6)$$

La integración en la ecuación 6 se realiza numéricamente. A continuación, se calcula el barrido conformado (etapa 108), según la siguiente ecuación:

$$S(t) = A(t) \cdot \sin[\phi(t) + \phi_0] \quad (7)$$

en la que  $A(t)$  es la envolvente de amplitud y  $\Phi(0)$  es la fase inicial.

Se calcula la autocorrelación de  $S(t)$  (etapa 110) y se compara con la ondícula de autocorrelación deseada. Se calcula y almacena el error, que es la suma de los cuadrados de la diferencia entre la ondícula de autocorrelación calculada y la deseada (etapa 114). Una vez se ha calculado el error, se determina si el error está situado por debajo de un valor umbral (o no disminuye en las subsiguientes iteraciones) (etapa 114). Si la respuesta a la determinación de la etapa 114 es “sí, el error está situado por debajo del valor umbral (o no disminuye en las subsiguientes iteraciones)”, el proceso se detiene (etapa 116). Si el error no está situado por debajo de un valor umbral, se realiza una nueva iteración del proceso.

Dicho proceso emplea un proceso de optimización tal como el método de Levenberg-Marquart (Press, Teukolsky, Vetterling, Flannery: *Numerical Recipes -Recetas Numéricas-*, Cambridge University Press) para continuar reduciendo la diferencia entre la ondícula de autocorrelación calculada y la deseada. En lugar de utilizar el método de Levenberg-Marquart, un experto en la materia puede escoger cualquier otro algoritmo de optimización adecuado para reducir el error. Dicho proceso de optimización supone repetir las etapas 100-110. En dicho proceso iterativo, el grado del polinomio de la etapa 100 aumenta, por ejemplo, en 1 ( $n + 1$ ) (etapa 118). Además, se determinan las derivadas de la función de autocorrelación de la etapa 110 (etapa 119) y se utilizan para calcular nuevos parámetros (etapa 120). Por último, el nuevo polinomio ( $n + 1$ ) (etapa 118) y los nuevos parámetros (etapa 120) se utilizan para calcular otra frecuencia instantánea más óptima (etapas 102-114).

La figura 4 ilustra la evolución del error durante el proceso de conformación del barrido de la presente invención con una ondícula de autocorrelación deseada que es una ondícula de Ricker de 50 Hz. En este ejemplo, el error para de disminuir esencialmente cuando el grado del polinomio se aproxima a 60.

### Ejemplo 1

Las figuras 5A-5D comparan las funciones de frecuencia instantánea y las ondículas de autocorrelación de un barrido lineal convencional de entre 10 y 100 Hz (figuras 5A y 5B) y de un barrido conformado utilizando los métodos de la presente invención y con una frecuencia central de 50 Hz (figuras 5C y 5D). Ambos barridos duraron cuatro segundos y la duración del cono fue de 0,2 segundos. La frecuencia inicial  $f_{\min}$  y la frecuencia final  $f_{\max}$  utilizadas en la ecuación 5 para el barrido conformado fueron de 3 Hz y 150 Hz, respectivamente. Al final del cono ascendente ( $t = 0,2$  segundos), la frecuencia del barrido conformado es de aproximadamente 15 Hz y, en el principio del cono descendente ( $t = 3,8$  segundos), la frecuencia del barrido conformado es de aproximadamente 110 Hz. El nivel de lóbulo lateral en la autocorrelación del barrido conformado está aproximadamente 60 dB por debajo del lóbulo principal de la ondícula de tres lóbulos.

### Ejemplo 2

Las figuras 6A y 6B ilustran la primera parte de unos datos de barrido en cascada no tratados utilizando un barrido lineal (figura 6A), y un barrido conformado mediante los métodos de la presente invención (figura 6B) para el mismo modelo geológico. Dichos datos contienen una distorsión armónica de quinto orden, cinco segmentos más un período de escucha en duración, en la que cada segmento y duración de período de escucha dura cuatro segundos. Las fases iniciales de los segmentos son 0, 144, 288, 72 y 216 grados.

Las figuras 7A y 7B ilustran los datos correlacionados (de las figuras 6A y 6B) después de la correlación con un barrido lineal (figura 7A) y con un barrido conformado (figura 7B). Es evidente la mejora de la calidad de los datos empleando un barrido conformado. Los datos del barrido lineal presentan mucho “ruido” en comparación con los

datos del barrido conformado. El inicio de las primeras interrupciones es mucho más claro y está mejor definido en los datos del barrido conformado que en los datos del barrido lineal, y puede servir para mejorar su estática. Además, los lóbulos laterales de nivel elevado en los datos del barrido lineal enmascaran unas reflexiones débiles que son claramente visibles en los datos del barrido conformado (marcadas con flechas).

5

Las figuras 8A y 8B ilustran la última parte de los datos correlacionados de un barrido lineal (figura 8A) y de un barrido conformado (figura 8B). El elevado ruido en amplitud con salida hiperbólica visto en los datos del barrido lineal y que cubre las reflexiones que aparecen más tarde (vistas en la figura 8A) es la energía de lóbulo lateral de las primeras interrupciones de cambio de fase en el segmento subsiguiente. Este efecto es generalmente pronunciado y afecta a menudo a uno o dos segundos de los datos correlacionados. Sin embargo, cuando se utiliza un barrido conformado, dicho efecto es mucho menos severo debido a la fuerte eliminación de los lóbulos laterales (figura 8B).

10

### Ejemplo 3

Las figuras 9A-9C ilustran los datos del barrido conformado en cascada adquiridos mediante dos fuentes simultáneas. Cuando se usa una única fuente o conjunto de vibrador, se puede obtener un resultado similar a los resultados ilustrados en las figuras 7B y 8B para el barrido conformado, utilizando un barrido lineal para la adquisición de datos y aplicando un filtro de conformación en el procesamiento de datos. Dicho filtro de conformación convierte la fuerza de base medida en la ondícula deseada. Sin embargo, el buen funcionamiento del mismo depende de la exactitud con la que la fuerza de base medida representa la fuerza de base real aplicada al suelo. Además, dicha conformación de los datos tras su adquisición no funciona bien en datos de barrido en cascada correlacionados, ya que los lóbulos laterales de las primeras interrupciones se arrastran desde el segmento contiguo.

15

20

Además, la conformación de los datos tras su adquisición fracasa por completo en datos de barrido en cascada no tratados que se adquieren con dos o más fuentes simultáneamente. Dichas fuentes simultáneas se tienen que separar en primer lugar sin comprimir los barridos (manteniendo los datos no tratados) antes de que se pueda aplicar un filtro de conformación para completar la conformación de los datos. La separación de las fuentes es posible si se utilizan unos esquemas de rotación de fase determinados, pero ralentizarían considerablemente la producción. En consecuencia, la conformación de los datos de fuentes múltiples tras su adquisición se considera poco práctica.

25

Por otro lado, la conformación antes de la adquisición (es decir, la utilización de barridos conformados) no se ve afectada por el número de fuentes simultáneas, tal como se puede apreciar en las figuras 9A-9C. La figura 9A ilustra los datos no tratados a partir de barridos en cascada adquiridos mediante dos fuentes simultáneas, utilizando barridos conformados. La figura 9B ilustra los datos del barrido conformado a partir de la fuente de la izquierda, que se ha separado y comprimido por correlación. La figura 9C ilustra los datos correspondientes a partir de la fuente de la derecha.

30

35

Las ecuaciones anteriores constituyen ejemplos ilustrativos de ecuaciones que se pueden utilizar para conformar la frecuencia instantánea de un barrido, a fin de obtener una ondícula de autocorrelación de tres lóbulos con una mínima energía de lóbulo lateral, de acuerdo con los métodos de la presente invención. Sin embargo, dichas ecuaciones no deberían considerarse como limitativas del alcance de la invención. Un experto en la materia podrá apreciar que las ecuaciones particulares utilizadas para realizar la conformación de la frecuencia instantánea se deben a la conveniencia y a la preferencia personal, y que también se pueden utilizar eficientemente derivadas de las mismas.

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

5 1. Método para reducir la energía de lóbulo lateral de una ondícula que representa la autocorrelación de un barrido piloto, que comprende las etapas siguientes:

conformar una frecuencia instantánea del barrido piloto, y  
autocorrelacionar dicho barrido piloto;

10 en el que la etapa de conformación comprende calcular la frecuencia instantánea del barrido piloto, y en el que dicha frecuencia instantánea se representa mediante un polinomio de grado  $n$ .

2. Método según la reivindicación 1, en el que el grado  $n$  del polinomio es mayor que 10, aproximadamente.

15 3. Método según la reivindicación 1, en el que la frecuencia instantánea del barrido piloto se calcula mediante la siguiente ecuación:

20 
$$f(t) = \sum_{i=0}^n a_i (t - \tau)^i$$

4. Método según la reivindicación 3, en el que los parámetros iniciales son los siguientes:

25 
$$\tau = T/2$$
  
$$a_0 = (f_1 + f_0)/2 = f_c$$

30

5. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de conformación comprende además mitigar la frecuencia instantánea del barrido piloto dentro de las zonas cónicas.

35 6. Método según la reivindicación 5, en el que la frecuencia instantánea del barrido piloto dentro de las zonas cónicas se mitiga mediante la siguiente ecuación:

40 
$$f_s(t) = \left\{ \begin{array}{l} f(t) \cdot (1 - w_u(t)) + d_u(t) \cdot w_u(t) \text{ para } 0 \leq t \leq t_{cono} \\ f(t) \text{ para } t_{cono} < t < T - t_{cono} \\ f(t) \cdot (1 - w_d(t)) + d_d(t) \cdot w_d(t) \text{ para } T - t_{cono} \leq t \leq T \\ \text{con } d_u(t) = f_{\min} + \frac{f(t_{cono}) - f_{\min}}{t_{cono}} \cdot t, w_u(t) = 1 - \frac{t}{t_{cono}} \\ \text{y } d_d(t) = f(T - t_{cono}) + \frac{f_{\max} - f(T - t_{cono})}{t_{cono}} \cdot t - (T - t_{cono}), w_d(t) = \frac{t - (T - t_{cono})}{t_{cono}} \end{array} \right\}$$

45

50

55 7. Método según la reivindicación 6, que comprende la etapa adicional de aplicar la ecuación 5 repetidamente hasta que la frecuencia instantánea del barrido piloto dentro de las zonas cónicas se comporta de manera monotónica.

60 8. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de conformación comprende además calcular una fase instantánea del barrido piloto.

9. Método según la reivindicación 8, en el que la fase instantánea del barrido piloto se calcula mediante la siguiente ecuación:

65 
$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t f_s(t) dt$$

## ES 2 282 688 T3

10. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de conformación comprende además calcular un barrido piloto conformado.

5 11. Método según la reivindicación 10, en el que dicho barrido piloto conformado se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S(t) = A(t) \cdot \sin[\phi(t) + \phi_0]$$

10 12. Método según la reivindicación 5, en el que la etapa de conformación comprende las siguientes etapas:

calcular una frecuencia instantánea del barrido piloto;

15 mitigar la frecuencia instantánea del barrido piloto dentro de las zonas cónicas;

calcular una fase instantánea del barrido piloto, y

calcular un barrido piloto conformado.

20 13. Método según la reivindicación 12, que comprende además, después de la etapa de mitigación, continuar dicha mitigación hasta que la frecuencia instantánea se comporte de manera monotónica dentro de las zonas cónicas.

25 14. Método según la reivindicación 1, en el que la etapa de autocorrelación comprende además calcular un error entre la ondícula de autocorrelación calculada y la deseada.

15. Método según la reivindicación 14, en el que la etapa de autocorrelación comprende además determinar si el error calculado está situado por debajo de un valor umbral.

30 16. Método según la reivindicación 15, que comprende además aumentar el grado del polinomio si el error calculado no está situado por debajo de un valor umbral.

35 17. Método según la reivindicación 1, que comprende además calcular derivadas de la función de autocorrelación del barrido piloto.

40

45

50

55

60

65

70

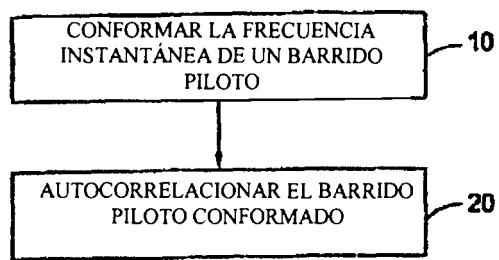
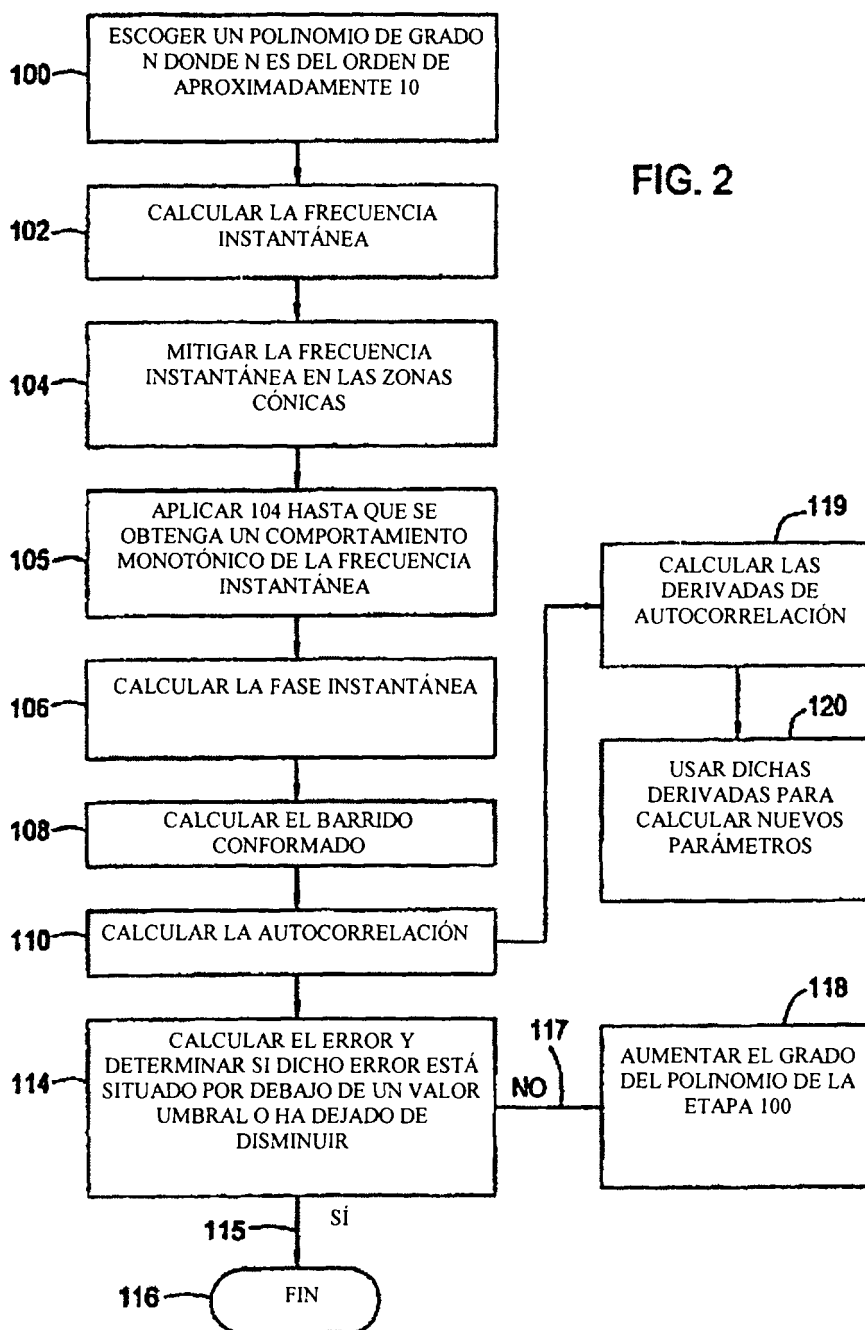


FIG. 1



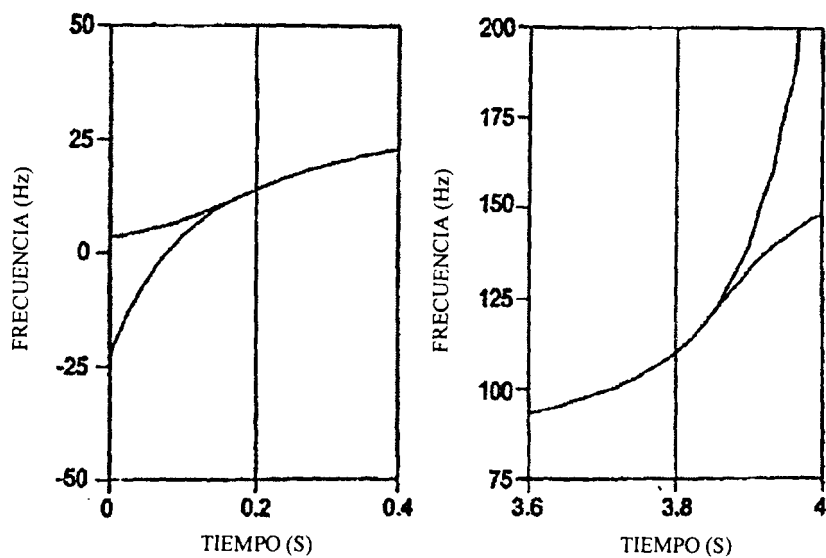


FIG. 3

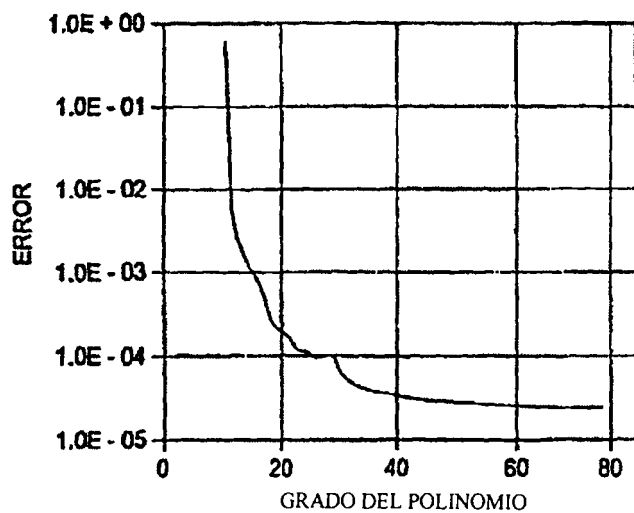


FIG. 4

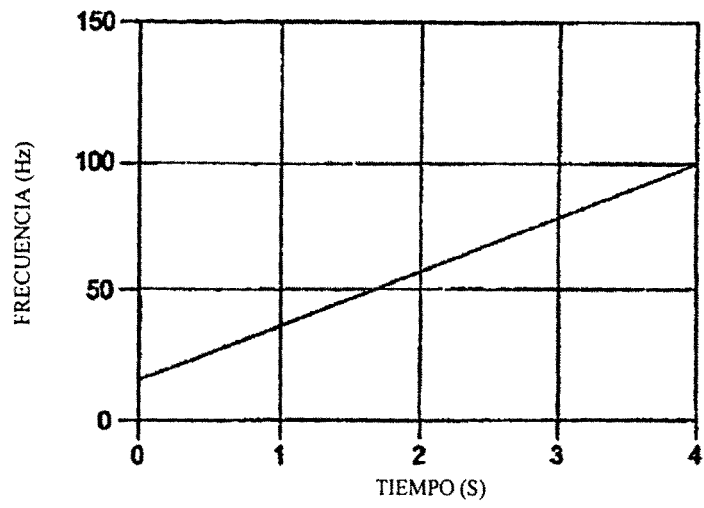


FIG. 5A

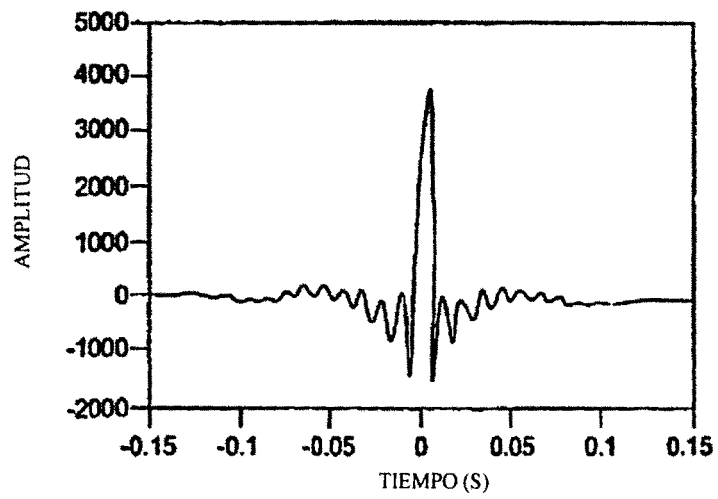


FIG. 5B

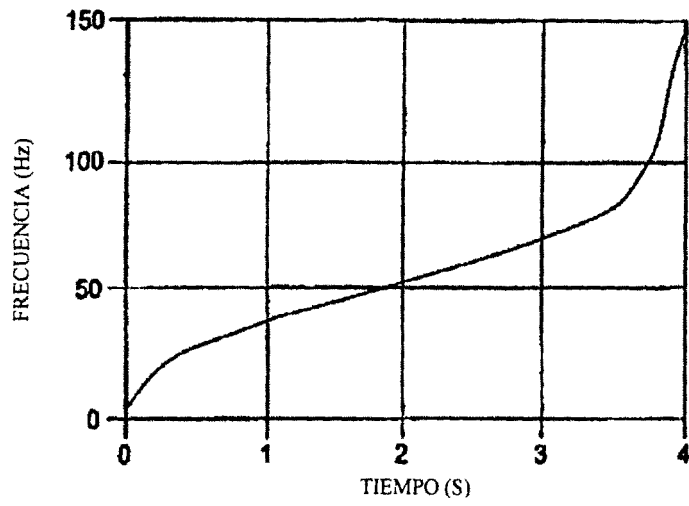


FIG. 5C

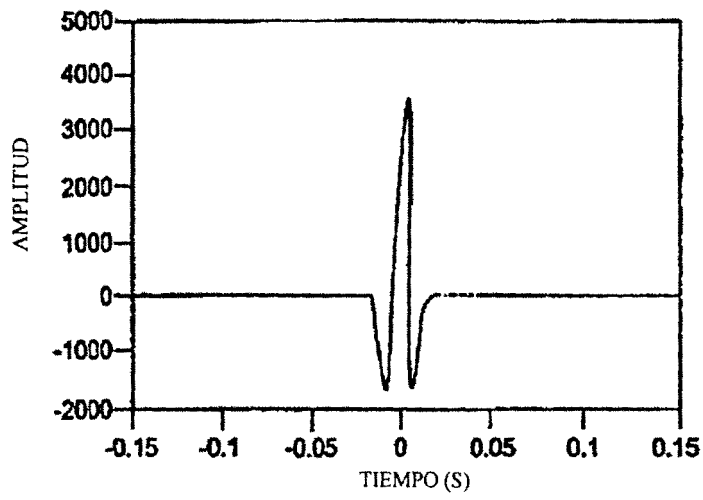


FIG. 5D

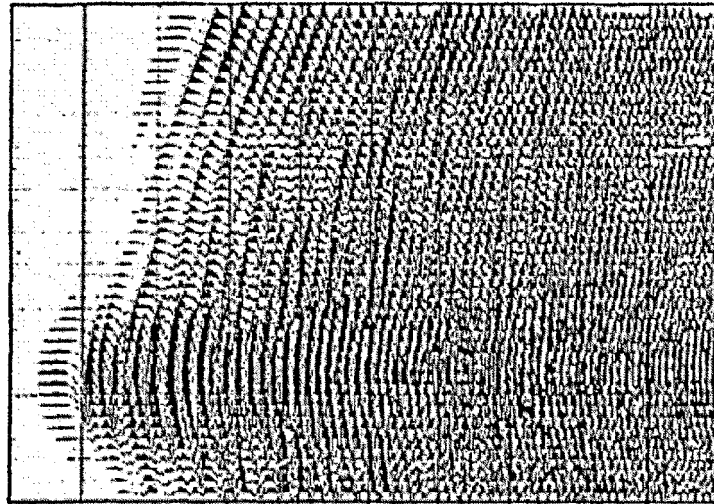


FIG. 6B

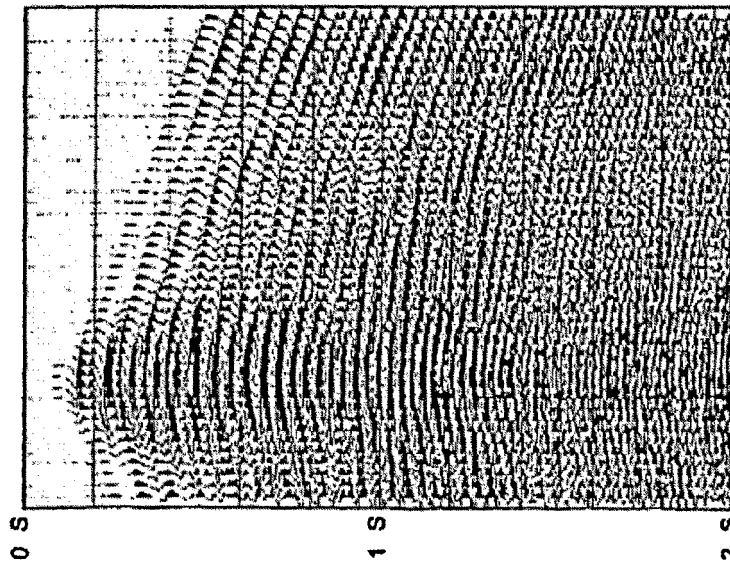
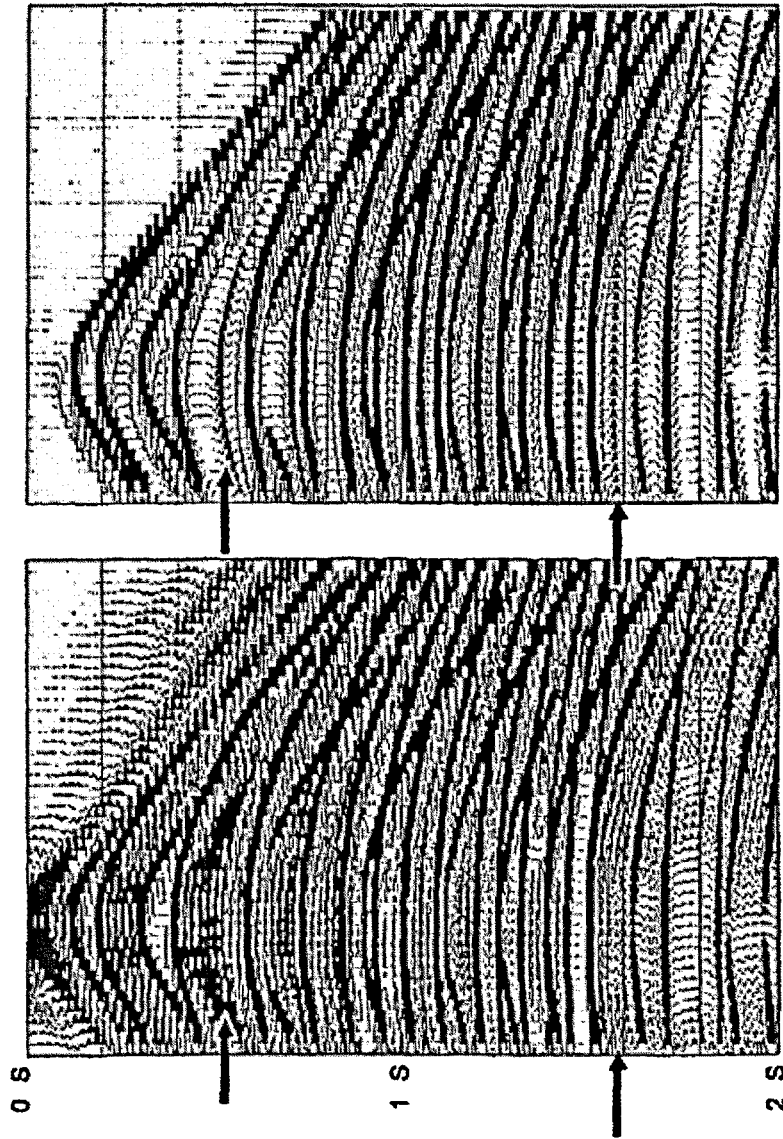


FIG. 6A



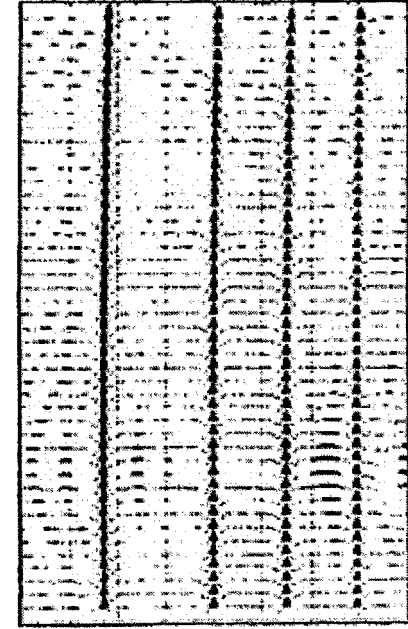


FIG. 8B

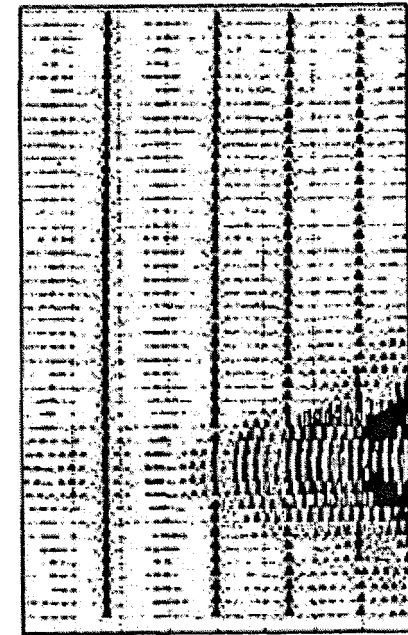


FIG. 8A

3.6 S

4.0 S

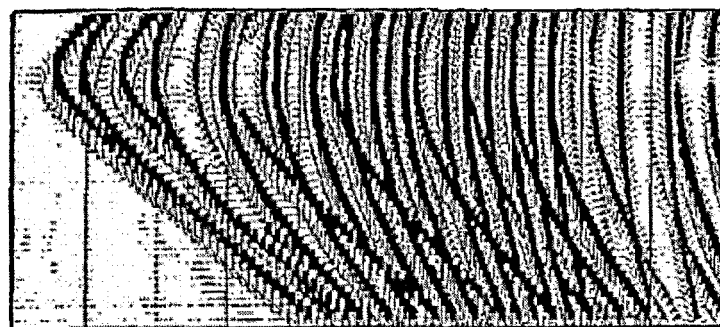


FIG. 9C

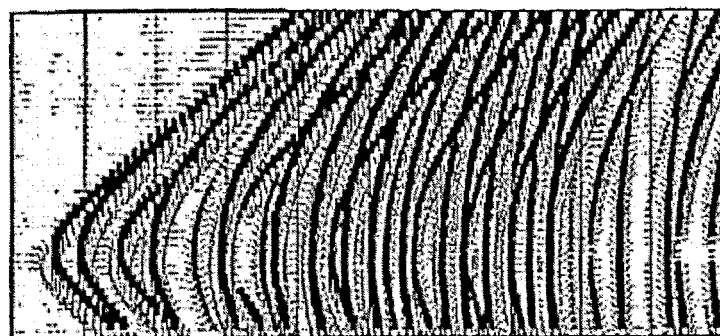


FIG. 9B

0 S  
0.5 S  
1 S

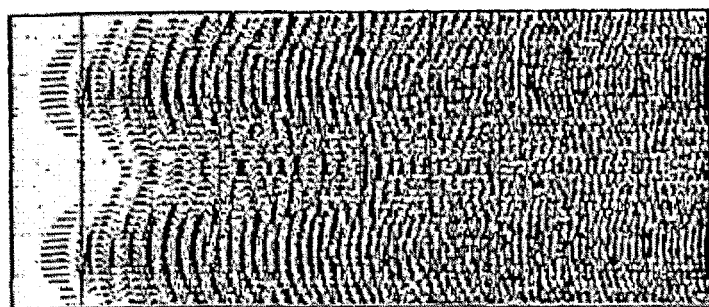


FIG. 9A

0 S  
1 S  
2 S