

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 671 789**

51 Int. Cl.:

**G01V 1/30** (2006.01)

**G01V 1/38** (2006.01)

**G01V 1/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **11.07.2014 PCT/US2014/046361**

87 Fecha y número de publicación internacional: **26.02.2015 WO15026451**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.07.2014 E 14744730 (4)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **04.04.2018 EP 3036566**

54 Título: **Búsqueda simultánea de fuentes durante la adquisición sísmica y la inversión sísmica**

30 Prioridad:

**23.08.2013 US 201361869292 P**

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

**08.06.2018**

73 Titular/es:

**EXXONMOBIL UPSTREAM RESEARCH  
COMPANY (100.0%)  
22777 Springwoods Village Parkway  
Spring TX 77389, US**

72 Inventor/es:

**KROHN, CHRISTINE, E. y  
ROUTH, PARTHA, S.**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 671 789 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

Búsqueda simultánea de fuentes durante la adquisición sísmica y la inversión sísmica

## 5 Campo de la invención

Esta divulgación se refiere en general al campo de la prospección geofísica y, más particularmente, al procesamiento de datos sísmicos tal como se utiliza en la exploración de hidrocarburos. Específicamente, la divulgación se refiere a un procedimiento para adquirir datos, a un costo de adquisición sísmica reducido, utilizando fuentes simultáneas en el campo, y a continuación construyendo pseudorregistros de fuente que cumplan mejor con los requisitos para utilizar una búsqueda simultánea adicional de fuentes para simulaciones por ordenador o modelado directo como parte de procedimientos de inversión iterativa que actualizan un modelo de subsuperficie, tales como FWI (*Full Wavefield Inversion*, inversión de forma de onda completa) o LSRTM (*Least-Square Reverse Time Migration*, migración de tiempo inverso de mínimos cuadrados), con una reducción adicional en los costos computacionales.

Antecedentes de la invención

## 20 Adquisición y luego separación

La búsqueda simultánea de fuentes, también denominada búsqueda de fuentes combinada, es un procedimiento de adquisición sísmica emergente para reducir los costos de adquisición y mejorar el muestreo espacial. Convencionalmente, se adquieren mediciones localizando una única fuente puntual o una disposición de fuentes puntuales en una única ubicación de fuente, detonando las fuentes al mismo tiempo y a continuación registrando la respuesta durante el tiempo necesario para que las fuentes dejen de detonar tras lo cual se produce un tiempo de escucha en el que se registra todo lo que devuelve el objetivo de la subsuperficie. Opcionalmente, es posible repetir la detonación de las fuentes y pueden registrarse múltiples registros en la misma ubicación. Entonces se mueve la disposición de fuente a otra ubicación, y se repite el proceso. El costo de la adquisición de datos sísmicos con este procedimiento secuencial está relacionado con el tiempo necesario para registrar cada ubicación de fuente individual y el número de tales ubicaciones, y a menudo este costo limita la capacidad para registrar datos con un muestreo fino. Mediante la detonación de una o varias fuentes puntuales en diferentes ubicaciones de fuente al mismo tiempo o casi al mismo tiempo dentro del mismo registro de datos, pueden reducirse el tiempo y costo de adquisición y aumentarse el muestreo. Esto puede denominarse adquisición simultánea. Originalmente, cuando se introdujo el procedimiento, las fuentes en cuestión se excitaban exactamente al mismo tiempo o simultáneamente. En la actualidad, se utiliza el mismo término también para una adquisición en la que las fuentes detonan dentro de la misma ventana de tiempo que otra fuente aunque la detonación de las fuentes no sea simultánea en el tiempo y difiera con cierto retardo de tiempo. En general, las fuentes que detonan casi al mismo tiempo dentro del mismo registro breve forman una disposición espacial o de área extendida, sin ninguna expectativa de que las posiciones de las fuentes puntuales individuales estén próximas entre sí. La desventaja de la adquisición simultánea es la necesidad de mitigar la energía solapante o interferencia entre las fuentes en diferentes ubicaciones mediante una combinación de codificación de fuente en el campo y mediante técnicas de filtrado y separación de fuentes en el procesamiento. El procesamiento convencional requiere registros individuales para cada ubicación de fuente y éstos deben extraerse o separarse de los registros de datos registrados.

45 La búsqueda simultánea de fuentes se utiliza más comúnmente para fuentes Vibroseis con funciones de barrido largo, que pueden codificarse fácilmente. Con el procedimiento Vibroseis, cada vibrador individual puede accionarse con un barrido que difiere en cierto modo de los barridos para otros vibradores dentro de la disposición, por ejemplo utilizando las diferencias en la fase de barrido, función pseudoaleatoria, velocidad de barrido, intervalo de frecuencia de barrido, tiempo de inicio, etc. Algunos procedimientos requieren múltiples barridos y múltiples registros por ubicación para la separación. En el caso especial de que el número de barridos sea mayor que o igual al número de vibradores, entonces los registros de fuentes individuales pueden extraerse casi perfectamente de los múltiples registros combinados aplicando un filtro inverso tal como se describe para el procedimiento HFVS en Sallas, *et al.* (patente estadounidense n.º 5.721.710). Con este procedimiento y procedimientos similares, es crítico que las fuentes y los receptores no se muevan durante los múltiples barridos. Este procedimiento proporciona registros separados de alta calidad, porque la separación está bien planteada; existen tantos registros de entrada o barridos como registros de salida o sismogramas separados. Pero como son necesarios múltiples barridos, el procedimiento no es eficaz y los costos son mucho mayores que en el caso de los procedimientos con un solo barrido. La desventaja de realizar un solo barrido es que la separación no está bien planteada, y que habrá cierto ruido de interferencia residual tras la extracción de los sismogramas de fuentes. El problema de las interferencias se agrava por el hecho de que la firma o salida de los vibradores se relaciona de manera imperfecta con la señal piloto deseada por distorsión y la adición de armónicos y de que la señal real es desconocida. El ruido de interferencia se mitiga normalmente con un procedimiento de inversión y separación de datos iterativo (Neelamani, *et al.*, patente estadounidense n.º 8.248.886) o mediante filtrado (Huo *et al.*, publicación de patente estadounidense n.º 2012/0290214).

65

El documento US2007165486 se refiere a procedimientos y sistemas para adquirir datos sísmicos marinos con cable remolcado. Un procedimiento y sistema comprende colocar una pluralidad de embarcaciones de remolque de sólo fuente y una o varias embarcaciones de remolque de cable de fuente para adquirir una medición sísmica acimutal amplia y/o completa sin que sea necesario que el tendido repita un trayecto una vez atravesado. Otro procedimiento y sistema permite medir una característica geológica submarina utilizando un tendido sísmico marino, realizando el tendido al menos una vuelta durante la medición y disparando y registrando durante la vuelta.

La búsqueda simultánea de fuentes también puede utilizarse para fuentes impulsivas aunque hay menos procedimientos y procedimientos menos potentes para codificar las fuentes impulsivas. Hay poco beneficio de ahorro de costos para el uso de búsqueda simultánea de fuentes para la adquisición en tierra con dinamita, aunque el uso de una búsqueda simultánea de fuentes para cañones de aire en la adquisición marina puede resultar beneficioso, especialmente para la adquisición acimutal amplia. El uso de tiempos de detonación aleatorios para fuentes marinas que detonan casi simultáneamente pero están ubicadas en diferentes embarcaciones se dio a conocer por Vaage (patente estadounidense n.º 6.906.981). Más recientemente, se ha propuesto la búsqueda simultánea de fuentes para el disparo de embarcación múltiple de mediciones marinas acimutales amplias (WAZ) (Beasley *et al.*, "A 3D simultaneous source field test processed using alternating projections: a new active separation method", *Geophysical Prospecting* 60, 591-601 (2012)). La búsqueda simultánea de fuentes es la única manera de poder adquirir puntos de fuente con una separación fina (por ejemplo 25-m) en una única pasada de los cables. Sin la búsqueda simultánea de fuentes, son necesarias múltiples pasadas y la medición tarda mucho más y los costos son significativamente mayores.

Se ilustra una configuración para una medición marina WAZ, en la figura 1 para mostrar el beneficio de la búsqueda simultánea de fuentes. La figura muestra la línea de fuente 123, que atraviesa una embarcación de fuente, y la línea de receptor 121, que atraviesa una embarcación que tira de múltiples cables de hidrófonos. Las dos embarcaciones se mueven en paralelo a la misma velocidad, normalmente como mínimo de 6 nudos. En la figura, la primera posición de las embarcaciones se muestra en negro y las posiciones futuras se muestran en gris. La embarcación de fuente se dispara en la posición 103 mientras que la embarcación de receptor está en la posición 101, y la respuesta se registra normalmente durante aproximadamente 10 s. Durante estos 10 s, las embarcaciones están en movimiento. Algunos segundos más tarde, la embarcación de fuente alcanza el punto de tiro siguiente en 113, normalmente a 20-40 m del tiro anterior, y la embarcación de receptor alcanza la posición 111. Para registrar acimuts más amplios, la embarcación de receptor puede realizar 4 pasadas de la línea de receptor 121 mientras que una embarcación de fuente atraviesa las líneas de fuente 123-126 en secuencia. Se trata de una opción cara aunque puede proporcionar un muestreo fino de fuentes para cada línea de fuente, por ejemplo, un intervalo de fuente de 25-m. Alternativamente, pueden utilizarse 4 embarcaciones de fuente, y las fuentes que se disparan cambian entre las líneas. Por ejemplo, puede dispararse una fuente en la posición 103, a continuación en la posición 114, 135, 136, y a continuación 143. Si una de las fuentes dispara en modo cambiante cada 25-m, entonces el intervalo de fuentes a lo largo de cada línea (de 103 a 143) es de 200 m, mucho más basto que en el caso de una medición de separación fina. No es posible disparar y registrar con una separación de tiro más fina, porque cuando se ha adquirido el registro completo las embarcaciones se han movido decenas de metros a lo largo de las líneas de navegación. Puede registrarse una medición de separación fina con un disparo simultáneo detonando las cuatro fuentes dentro del mismo registro de tiempo pero con un pequeño retardo aleatorio o fluctuación en la posición o el tiempo de disparo. Por ejemplo, las fuentes pueden detonarse en las posiciones 103, 104, 105 y 106 para formar un registro con energía de fuente solapante. Entonces para el registro siguiente se detonan las fuentes en 113, 114, 115 y 116, etc.

La fluctuación es una forma de codificación que permite eliminar parcialmente la interferencia mediante filtrado en el procesamiento. Como las embarcaciones están en movimiento, un retardo en el tiempo de detonación significa necesariamente un ligero desplazamiento en la posición de detonación alrededor del intervalo de búsqueda de fuentes nominal como se determina mediante la velocidad de la embarcación. En lugar de requerir una sincronización en el tiempo entre embarcaciones puede ser más sencillo desde el punto de vista funcional implementar retardos de tiempo aleatorios generando un "patrón previo" de posiciones de búsqueda de fuentes a lo largo de cada línea con variaciones de posición aleatorias alrededor del intervalo de fuentes nominal. Durante la adquisición, cada embarcación dispara independientemente de las demás embarcaciones en posiciones de búsqueda de fuentes predeterminadas. Con este procedimiento, se predetermina la posición de detonación exacta pero no el tiempo de detonación, aunque el resultado sigue siendo una aleatorización en el tiempo. En la presente invención, se entiende que la aleatorización de la posición o el tiempo de búsqueda de fuentes son equivalentes. En cualquier caso, es importante determinar la posición de detonación y el tiempo de detonación real y estos valores junto con otras características de búsqueda de fuentes comprenden la función de codificación.

El registro de datos combinado obtenido con la búsqueda simultánea de fuentes debe separarse en registros individuales para cada fuente para un procesamiento convencional. En la figura 2 se muestra un diagrama de flujo del proceso estándar, y el proceso se ilustra en la figura 3. En la etapa 201, se obtienen registros de fuentes de longitud  $T_{\text{registro}} > T_{\text{escucha}}$  con múltiples excitaciones de fuente durante el registro. Durante la búsqueda de fuentes se utiliza algún tipo de esquema de codificación de campo tal como posición o tiempos de inicio con fluctuación.  $T_{\text{escucha}}$  es el tiempo necesario para que la energía se desplace desde la fuente al objetivo y luego al receptor. En la figura 3, 304 es una simple ilustración de un registro de fuente para una única fuente. En estos diagramas y en diagramas

posteriores, la respuesta de una única fuente se ilustra con un evento lineal 302 y un evento hiperbólico 303. En el registro de fuentes simultáneas 309, las cuatro fuentes detonan con pequeños retardos de tiempo y un evento lineal y uno hiperbólico de cada una de las cuatro fuentes interfieren. Supóngase que estas 4 fuentes están a distancias transversales largas en las líneas de fuente 123-126 en la figura 1, pero sólo se muestran una embarcación y una fuente en la vista de sección transversal de 309. A continuación, en la etapa 202, se determinan las funciones de codificación, incluyendo las posiciones de fuente y los tiempos de inicio, para las fuentes que contribuyen a los registros. El tiempo y la ubicación de fuente proyectados sobre la ventana de registro se indica mediante el rayo de sol 301 para la única fuente. La variación de posición de fuente correspondiente es relativamente pequeña en comparación con la escala de la figura y no se ilustra en el diagrama. El registro de fuentes simultáneas 309 se genera por fuentes en posiciones proyectadas 305, 306, 307 y 308, teniendo cada una un desplazamiento de tiempo reducido entre sí. Entonces, en la etapa 203, se utiliza la función de codificación para extraer registros de fuentes individuales, uno para cada fuente que empieza en el tiempo de detonación de esa fuente y que continúa durante el tiempo de escucha apropiado  $T_{escucha}$ . Para datos Vibroseis, esta extracción puede incluir el proceso de correlación mediante el barrido particular utilizado para esa fuente. En este ejemplo marino, el único registro 309 se copia 4 veces y a continuación se desplaza en el tiempo de modo que el registro comienza (tiempo cero) en el tiempo de detonación para cada fuente respectiva. Por ejemplo, el registro 315 se obtiene copiando el registro 309 y realizando un desplazamiento en el tiempo hasta el tiempo de la fuente 305. El registro 316 corresponde a la fuente 306; el registro 317 corresponde a 307 y 318 corresponde a 308. Esta etapa se denomina a veces pseudoseparación o pseudodescomposición. En este ejemplo, nada del ruido de interferencia se ha eliminado en esta fase. A continuación, en la etapa 204 se utilizan procedimientos de procesamiento adicionales para filtrar la energía de interferencia no deseada en cada agrupamiento de fuentes, o para utilizar un esquema de inversión dispersa para mejorar la separación de los datos, dando como resultado un sismograma separado para cada fuente puesto que se ha registrado independientemente de las demás fuentes. Entonces, en la etapa 205, es posible invertir u obtener imágenes de manera convencional de los agrupamientos de fuentes separados.

Puede utilizarse el mismo procedimiento de procesamiento indicado en la figura 2 para un registro en tierra o en el fondo del mar. Con datos de tierra o del fondo del mar, ahora es posible registrar la respuesta de los receptores de manera continua. Los receptores inalámbricos contienen memoria y un reloj y pueden registrar sin detenerse durante semanas o meses. Durante este tiempo, las fuentes detonan y se registran sus tiempos de detonación. Pueden utilizarse múltiples fuentes y para reducir el costo y el tiempo de adquisición, estas fuente pueden detonar de modo que la respuesta se solape en el tiempo como se muestra en la figura 4A. La figura 4A muestra un único registro continuo largo 401 con múltiples excitaciones de fuente ilustradas por rayos de sol. A diferencia del caso del cable marino, las fuentes no se detonan a pequeños intervalos en comparación con la longitud del registro, y por tanto, no se cumplen las condiciones para el uso del término disposición de área. Pero como en el caso del cable marino, la etapa de pseudoseparación inicial 203 implica extraer ventanas con el tamaño de la longitud del registro deseada  $T_{escucha}$  que empieza en el tiempo de detonación de una de las fuentes tal como se muestra en la figura 4B. Por ejemplo se copia una ventana correspondiente a 412 que comienza en el tiempo de detonación de fuente 402 y se extrae para obtener un registro de fuente 422. Tiene energía de interferencia de otras fuentes en 433 y 424. A continuación se copia una ventana 413 y se extrae para la fuente 403 para obtener el registro de fuente 423, y se extrae una ventana 414 para la fuente 404 obteniendo el registro de fuente 424, etc.

La búsqueda simultánea de fuentes seguida de la separación de fuentes también puede utilizarse como ayuda con simulación de datos sísmicos más cara desde el punto de vista computacional o modelado directo como se describe en Neelamani *et al.* (patente estadounidense n.º 8.248.886). Tal modelado directo es un componente de formación de imágenes sísmicas o inversión sísmica siendo la salida una imagen de reflectividad o de propiedades de formación tales como la velocidad sísmica de la subsuperficie. El modelado directo utiliza un modelo de velocidad detallado y calcula los campos de onda complejos generados teóricamente por cada fuente. Puede ahorrarse un tiempo de cálculo considerable reduciendo el número de fuentes a modelar a la vez utilizando la búsqueda simultánea de fuentes con algún tipo de esquema de codificación, y a continuación separando los datos en los sismogramas de fuentes individuales. Este procedimiento es idéntico a la adquisición de campo, aunque hay más opciones de esquemas de codificación cuando se realizan en el ordenador, y la secuencia codificada específica para una fuente se conoce perfectamente. Un esquema de codificación común es utilizar un ajuste a escala aleatorio en el que la salida de cada fuente se multiplica aleatoriamente por más o menos uno. Este esquema no puede implementarse físicamente en el campo para fuentes de impulso tales como cañones de aire o explosivos.

Como se describió anteriormente, puede utilizarse la búsqueda simultánea de fuentes para reducir los costos para adquirir datos sísmicos en el campo o para simular datos sísmicos en el ordenador. Esto implica registrar uno o varios registros compuestos que contienen interferencia de múltiples fuentes. Puede ser un registro corto con fuentes excitadas muy próximas en el tiempo y que forman una disposición de fuentes espacial. También puede ser un registro largo continuo con fuentes individuales excitadas a intervalos aleatorios o fijos. Para una formación de imágenes e inversión convencional, el registro compuesto debe separarse en agrupamientos de fuentes individuales. Normalmente, esto implica una pseudoseparación extrayendo una ventana alrededor del tiempo de detonación de las fuentes y a continuación el uso de operaciones de filtrado o inversión para eliminar la interferencia o ruido de interferencia. En el caso especial, en el que el número de registros es el mismo o mayor que el número de fuentes individuales dentro de una disposición espacial, la separación es bastante buena, aunque la adquisición de múltiples

registros es cara. Con menos registros, existe el problema de que la separación es imperfecta quedando algo de ruido de interferencia o habiendo eliminado una señal importante por el filtrado o la inversión.

#### Inversión sin separación

5 La búsqueda simultánea de fuentes también se utiliza para ahorrar costos computacionales asociados con la formación de imágenes y la inversión de datos sísmicos. En estos procedimientos, los agrupamientos de fuentes sísmicas individuales adquiridos secuencialmente, es decir, un tiro de fuente o disposición de fuente a la vez, se codifican en el ordenador y se suman para formar un registro de fuentes simultáneas que a continuación se utiliza para formar una imagen de reflectividad sísmica o para determinar propiedades de subsuperficie. El uso de este procedimiento para aumentar la velocidad y reducir el costo de la migración convencional (no iterativa y no mejora un modelo de subsuperficie) se da a conocer por Ober *et al.* (patente estadounidense n.º 6.021.094) y el uso del procedimiento en inversión se da a conocer por Krebs, *et al.* (patente estadounidense n.º 8.121.823). La interferencia entre fuentes también es un problema para este uso de la búsqueda simultánea de fuentes y tal interferencia se manifiesta como ruido en las salidas de inversión y formación de imágenes. La interferencia puede minimizarse en cierto modo optimizando las funciones de codificación por ordenador, tal como utilizando ajuste a escala aleatorio en lugar de rotación de fase, aunque los resultados pueden no ser tan buenos como con el uso secuencial de las fuentes individuales que requiere más cálculo.

20 La búsqueda simultánea de fuentes es particularmente útil para la inversión, tal como inversión de forma de onda completa (FWI) y migración de tiempo inverso de mínimos cuadrados (LSRTM). Estos procedimientos, a diferencia de la formación de imágenes tradicional, funcionan para actualizar de manera iterativa un modelo experimental para minimizar una función de desajuste de datos. El modelo son las propiedades de subsuperficie tales como velocidad para FWI, o la reflectividad para LSRTM. Obsérvese que la función de desajuste se calcula sin separación de fuentes. Como tanto el modelado directo como el procedimiento de actualización de modelo requieren mucho cálculo, la búsqueda simultánea de fuentes resulta muy ventajosa. Normalmente todas las fuentes en la medición o todas las fuentes en un barrido o línea de navegación se codifican y suman para obtener una disposición de fuentes simultáneas muy grande. Para minimizar el ruido de interferencia y para mejorar los resultados, las fuentes pueden volver a codificarse y volver a sumarse en cada iteración y a continuación utilizarse para una actualización de modelo (Krebs, patente estadounidense n.º 8.121.823). Cada grupo de datos codificados y sumados puede denominarse implementación de los datos. Se consiguen los mejores resultados y una interferencia reducida cuando se utilizan múltiples implementaciones en el proceso iterativo.

35 En la figura 5 se muestra un proceso típico para el uso de la búsqueda simultánea de fuentes en inversión. En la etapa 501, se obtienen varios registros de campo, cada uno con la misma extensión de tendido  $L_{\text{tendido}}$  y duración de registro  $T_{\text{escucha}}$ . La duración de registro  $T_{\text{escucha}}$  deberá incluir el tiempo necesario para que las ondas sísmicas se desplacen desde la fuente al objetivo y a continuación a los receptores. Para cada registro puede utilizarse una disposición de área o fuente única. A continuación se codifican los registros por ordenador, preferiblemente con un esquema de codificación aleatorizado en la etapa 502. Por ejemplo, los registros pueden multiplicarse aleatoriamente por más o menos 1 o aplicarse una rotación de fase por un factor aleatorio. A continuación se suman o acumulan todos los registros en la línea de navegación o barrido o en toda la medición, formando un registro de fuentes simultáneas. Esto se denomina implementación de los datos. A continuación, en la etapa 503, se simula la respuesta sísmica en el ordenador para el tiempo de desplazamiento  $T_{\text{escucha}}$  para todas las fuentes a la vez utilizando el esquema de codificación por ordenador. Esta etapa utiliza un modelo inicial o actualizado. Los registros simulados y medidos se comparan en la etapa 504, y se utiliza la comparación o función de desajuste para actualizar el modelo de propiedades o imágenes de subsuperficie. Si son necesarias múltiples iteraciones (etapa 506), es preferible volver a la etapa 502 y volver a codificar los registros de campo, llevando a cabo una segunda implementación de los datos. Cambiando la codificación de cada iteración, se reducen los artefactos y el ruido residual.

50 El uso de la búsqueda simultánea de fuentes para la inversión iterativa supone que el tendido de receptores y la longitud del registro son fijos, es decir, que todos los receptores registran para todas las fuentes durante la misma longitud de tiempo de modo que los registros puedan sumarse entre sí. El ordenador se utiliza para aplicar un modelo directo a todas las fuentes para todos los receptores como si se iniciaran al mismo tiempo o casi al mismo tiempo. Si los datos de fuente puntual no se registran con un tendido fijo, por ejemplo si se utilizan diferentes ubicaciones de receptor para registrar diferentes tiros, entonces el caso de modelado directo no coincide con el caso de datos de campo. Esto puede crear problemas porque la función de desajuste, la diferencia entre los datos de campo y los datos del modelado directo, estará dominada por la energía que falta entre los datos de modelado directo y los datos medidos y no podrá utilizarse para actualizar el modelo experimental. Los datos de campo registrados por un cable marino son particularmente problemáticos, porque el cable de receptor se mueve con la embarcación y no es fijo. Con un registro en tierra o en el fondo del mar se alcanza más comúnmente un tendido fijo, aunque incluso en este caso puede obtenerse un tendido rodante en el que las líneas de receptor activas cambian con la posición de fuente y pueden no cumplirse los supuestos de un tendido fijo.

65 La figura 6 ilustra el problema con la adquisición de datos convencionalmente con un cable marino y a continuación el uso de una búsqueda simultánea de fuentes para reducir el esfuerzo de cálculo requerido en la inversión. En 61,

se detona una fuente en la posición 602 y se capta un registro 601. En este ejemplo, la embarcación avanza entonces hacia la posición 604 y capta el registro 603 y a continuación a la ubicación 606 para el registro 605. Los receptores están en movimiento de modo que los receptores reales están en diferentes ubicaciones a lo largo de la línea de fuente. Si todas las trazas se disponen por sus verdaderas posiciones a lo largo de las líneas de navegación, se codifican y suman, se obtiene un agrupamiento de fuentes simultáneas 610. A continuación, si las tres fuentes (622, 623, 624, correspondientes a 602, 604 y 606) se excitan simultáneamente en el ordenador, se obtiene el registro simulado 612. Existe un desajuste inmediato entre los datos medidos y los simulados. Los datos medidos no incluyen trazas para receptores a la izquierda de cada fuente, ni miden los desplazamientos más largos. Por tanto, los eventos mostrados para los datos simulados, por ejemplo 644 y 645 y 646, faltan en el registro de datos medidos 610. Se han propuesto varios procedimientos para realizar la inversión en el caso del tendido no fijo incluyendo Rickett, *et al.* (publicación de patente estadounidense n.º 2012/0215506), que propone separar los datos simulados antes de calcular el desajuste, y Routh *et al.* (publicación de patente estadounidense n.º 2012/0143506) que propone utilizar la función objetivo de correlación cruzada. Estas dos soluciones son compromisos que no solucionan totalmente el problema. Puede haber errores en la separación de los datos para el primer enfoque, y la función objetivo de correlación cruzada es menos sensible a la información de amplitud en los datos en comparación con la función objetivo de mínimos cuadrados convencional.

Otros intentos publicados para tratar el fallo del supuesto de receptor fijo incluyen (1). "Hybrid method for full waveform inversion using simultaneous and sequential source method", de Routh *et al.*, patente estadounidense n.º 8.437.998; (2) "Simultaneous source encoding and source separation as a practical solution for full wavefield inversion", de Routh *et al.*, publicación estadounidense n.º 2012/0073825; (3) "Orthogonal source and receiver encoding", de Krebs, *et al.*, publicación estadounidense n.º 2013/0238246; (4) Haber *et al.*, "An effective method for parameter estimation with PDE constraints with multiple right hand sides", publicación previa - UBC en la dirección de Internet <http://www.math.ubc.ca/~haber/pubs/PdeOptStochV5.pdf> (2010).

En esta sección se ha comentado la generación de un agrupamiento de fuentes simultáneas en el ordenador a partir de datos registrados secuencialmente en el campo. Krebs, *et al.* (patente estadounidense n.º 8.121.823) enseñó que pueden utilizarse los registros codificados de campo adquiridos con una disposición de fuentes de área codificada en un registro corto en la inversión tal como se adquiere, sin la etapa de separación comentada en la sección de "Adquisición y después separación" de este documento. Al no separar los datos, no se incluyen los errores de los procesos de separación en las etapas de inversión o formación de imágenes. Tales errores pueden incluir una pérdida o eliminación de determinadas componentes de reflexión que son importantes, por ejemplo pueden eliminarse difracciones de inmersión pronunciadas por error y limitar la capacidad para obtener imágenes nítidas de las terminaciones de capa con pequeños fallos. Sin embargo, sigue existiendo el problema de que en el campo no pueden conseguirse determinados procedimientos de codificación potentes disponibles en el ordenador, tales como ajuste a escala aleatorio. Además, si todas las fuentes se adquieren simultáneamente en el campo con un conjunto de funciones de codificación, el patrón de codificación es fijo y no puede cambiarse cada iteración para obtener múltiples implementaciones de los datos. Finalmente, no siempre se alcanzan los requisitos para utilizar la búsqueda simultánea de fuentes para la inversión cuando se utiliza en el campo la búsqueda simultánea de fuentes. Como se comentó anteriormente es un requisito que los datos se registren con un tendido fijo, no móvil de los receptores para una longitud de tiempo corta fija. Los problemas de los tendidos móviles tal como se ilustró anteriormente para fuentes marinas son incluso peores cuando se realiza una búsqueda simultánea de fuentes en el campo. Además, no es práctico utilizar simulación por ordenador para simular exactamente los datos según se adquieren de manera continua mediante receptores inalámbricos en tierra durante semanas, como se ilustra en la figura 4A. Para ser prácticos, la longitud del registro simulado en el ordenador deberá ser corta, del orden de algunos segundos. Del registro 4A no puede extraerse un registro de este tipo con un pequeño grupo de fuentes registradas durante un periodo de tiempo al tiempo que están aisladas de otras fuentes.

La presente invención utiliza la búsqueda simultánea de fuentes en el campo superando los problemas de los tendidos no fijos y los tiempos de registro largos para obtener una pluralidad de pseudoregistros de súperfuente que pueden codificarse y acumularse por ordenador para obtener múltiples implementaciones de los datos que pueden cambiarse con cada iteración de la inversión.

#### Sumario de la invención

Esta invención es un procedimiento para adquirir datos, a un costo de adquisición sísmica reducido, utilizando fuentes simultáneas en el campo, y a continuación construir pseudoregistros de fuente que cumplen mejor con los requisitos para utilizar la búsqueda simultánea adicional de fuentes para simulaciones por ordenador o modelado directo como parte de una inversión iterativa, tal como FWI (*Full Wavefield Inversion*) o LSRTM (*Least-Squares Reverse Time Migration*), con una reducción adicional de los costos computacionales. Al cumplir mejor con los requisitos de la búsqueda simultánea de fuentes para FWI o RTM, se reducen los artefactos y la interferencia en la salida. El procedimiento puede utilizarse para la adquisición con cable marino y otras geometrías de tendido no fijas para adquirir desplazamientos positivos y negativos y para mitigar el problema de la "falta de datos" para la FWI de fuentes simultáneas. También puede utilizarse para datos en tierra para superar los problemas con los tendidos móviles y registros continuos largos, donde un registro continuo largo significa un registro de datos demasiado largo para una simulación eficaz por ordenador.

Una primera forma de realización de la invención es un procedimiento según la reivindicación 1. Una segunda forma de realización de la invención es un procedimiento según la reivindicación 11.

5 La primera forma de realización de la invención descrita anteriormente puede utilizarse sin las características adicionales de la segunda forma de realización, por ejemplo cuando se procesan datos en los que todas las fuentes iluminan un tendido completo de receptores. El modelo de velocidad actualizado o ajustado resultante del presente procedimiento inventivo puede utilizarse para migrar los datos sísmicos para generar una imagen de la subsuperficie, o para otros fines de procesamiento e interpretación de datos sísmicos relativos a la exploración de hidrocarburos.

Breve descripción de los dibujos

15 La presente invención y sus ventajas se entenderán mejor haciendo referencia a la siguiente descripción detallada y los dibujos adjuntos en los que:

la figura 1 es un diagrama esquemático de las posiciones de cuatro embarcaciones de fuente y una embarcación de cable de receptor a medida que se mueven hacia la derecha a lo largo de líneas predeterminadas para una medición de adquisición acimutal amplia convencional;

20 la figura 2 es un diagrama de flujo de las etapas convencionales utilizadas para procesar datos adquiridos con una búsqueda codificada simultánea de fuentes en el campo y a continuación separados en el procesamiento;

25 la figura 3 es una ilustración de registros sísmicos adquiridos para datos marinos con una búsqueda codificada simultánea de fuentes según la figura 1, seguida del procedimiento de separación de fuentes de la figura 2;

las figuras 4A-4B ilustran un registro sísmico adquirido con la búsqueda codificada simultánea de fuentes para tierra (4A) y a continuación separado en agrupamientos de fuentes (4B) según el procedimiento de la figura 2;

30 la figura 5 es un diagrama de flujo de las etapas para utilizar la búsqueda codificada simultánea de fuentes en el ordenador para la inversión iterativa de datos sísmicos adquiridos con un tiro cada vez como se describe en el documento US 8.121.823;

35 la figura 6 ilustra la dificultad de utilizar las etapas en la figura 5 para utilizar la búsqueda simultánea de fuentes para la inversión utilizando adquisición marina de una sola fuente convencional, en la que los cables en movimiento violan el supuesto de receptor fijo necesario para el procedimiento de la figura 5;

40 la figura 7 es un diagrama de flujo que muestra las etapas básicas en una forma de realización del presente procedimiento inventivo;

la figura 8 es un diagrama que muestra un ejemplo de adquisición marina y la posición de embarcación de fuente y receptor y los cables en una forma de realización del presente procedimiento inventivo;

45 la figura 9 es una ilustración de una forma de realización marina de la presente invención que muestra los agrupamientos de fuentes tal como se adquieren y la construcción de un pseudorregistro de súperfuente;

la figura 10 es una ilustración de varios pseudorregistros de súperfuente que podrían construirse utilizando la forma de realización marina de la presente invención;

50 la figura 11 es una ilustración que muestra la construcción de un registro medido con fuentes simultáneas y la simulación por ordenador simultánea de todas las fuentes en una línea de navegación;

la figura 12 muestra una ilustración de dos registros de campo registrados en tierra o en el fondo del mar con un tendido en movimiento;

55 la figura 13 ilustra la generación de un tendido fijo a partir de los registros de campo de la figura 12;

la figura 14 es una ilustración de dos pseudorregistros de súperfuente contruidos a partir del registro de campo combinado de la figura 13;

60 la figura 15 ilustra la codificación y acumulación por ordenador de los pseudorregistros de súperfuente de la figura 14 y su simulación en el ordenador con todas las fuentes detonando simultáneamente; y

65 la figura 16 muestra los resultados de una prueba de modelo 2D de una forma de realización marina de la presente invención.

Por las restricciones de la ley de patentes respecto al uso del color, la figura 16 es una reproducción en blanco y negro de un original en color. La invención se describirá junto con formas de realización de ejemplo. Sin embargo, en la medida en que la siguiente descripción detallada sea específica de una forma de realización particular o un uso particular de la invención, será únicamente a modo ilustrativo y no deberá interpretarse como limitativo del alcance de la invención. Por el contrario, se pretende cubrir todas las alternativas, modificaciones y equivalentes que puedan incluirse en el alcance de la invención, tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.

#### Descripción detallada de las formas de realización de ejemplo

La invención se describe en primer lugar en su forma básica, a continuación se describirán formas de realización específicas para datos marinos y en tierra. Esta invención utiliza la búsqueda simultánea de fuentes en el campo para mejorar la capacidad para utilizar adicionalmente la búsqueda simultánea de fuentes en la inversión iterativa reduciendo los efectos del ruido de interferencia y aproximándose mejor a la adquisición mediante un tendido fijo de receptores. La invención construye, a partir de registros de adquisición, lo que pueden denominarse pseudorregistros de súperfuente (o súper tiro), cada uno con la misma duración y extensión espacial. Cada pseudorregistro de súperfuente contiene la energía registrada de múltiples fuentes, estando energizada cada fuente con un esquema de codificación de campo (por ejemplo, desplazamientos en el tiempo aleatorios, posiciones de fuente aleatorias, rotaciones de fase, función de barrido, u otros procedimientos) y cada registro se construye mediante las operaciones de función ventana, desplazamiento en el tiempo, suma y adición de los registros de campo originales. La medición se adquiere de modo que permite construir estos pseudorregistros de súper tiro de modo que las fuentes puedan simularse de manera apropiada simultáneamente en un ordenador. En particular, la energía sísmica que se generaría por una fuente sintética y registrada dentro de una distancia predeterminada  $D_{fuente}$  dentro del tendido y la duración de tiempo  $T_{fuente}$  se representa dentro del pseudorregistro de súper tiro medido. Este requisito puede requerir la repetición de algunos grupos de puntos de fuente en diferentes tendidos de receptor con la misma codificación que la utilizada previamente. Los múltiples registros de súper tiro se codifican entonces por separado en el ordenador, preferiblemente con un ajuste a escala aleatorio tal como multiplicando por +1 o -1 seleccionado aleatoriamente, y a continuación se suman y utilizan para la inversión o formación de imágenes. Preferiblemente, el esquema de codificación por ordenador se cambia en iteraciones posteriores de la inversión de la inversión o formación de imágenes.

En el diagrama de flujo de la figura 7 se proporcionan las etapas básicas en una forma de realización del presente procedimiento inventivo. En la etapa 701, se planifica una medición sísmica que incluye elegir el tipo de fuente y un número y separación óptimos de las ubicaciones de búsqueda de fuentes deseadas y un esquema de codificación de campo. El esquema de codificación de campo puede incluir cualquier parámetro relacionado con la excitación de fuente incluyendo su ubicación, tiempo de detonación, componentes de frecuencia, fase de fuente, etc. Además, se seleccionan dos parámetros:  $T_{fuente}$  y  $D_{fuente}$ .  $T_{fuente}$  es un tiempo mayor que o igual a  $T_{escucha}$  y, además, es un tiempo lo suficientemente largo como para que la amplitud de esa fuente se reduzca hasta un nivel en el que ya no proporciona un ruido de interferencia sustancial. Normalmente,  $T_{fuente}$  puede seleccionarse para ser igual a  $T_{escucha}$  a menos que se haya adquirido un registro continuo largo tal como en la figura 12.  $D_{fuente}$  está relacionado porque es igual o mayor que la distancia de interés de desplazamiento máximo o igual a la distancia en la que se reduce la amplitud de fuente de modo que ya no proporciona un ruido de interferencia sustancial. Estos parámetros se utilizan para guiar la adquisición y posterior generación de pseudorregistros de modo que los pseudorregistros puedan simularse con precisión dentro de una distancia  $D_{fuente}$  y tiempo  $T_{fuente}$  de cualquier ubicación de fuente y tiempo de detonación. De manera ideal los parámetros son lo más pequeños posible al tiempo que son lo suficientemente grandes como para incluir retornos desde el objetivo. Parámetros más pequeños significan requisitos menos estrictos para la adquisición y construcción de pseudoagrupamientos.

En la etapa 702, se obtienen uno o varios registros de campo que se generan con la búsqueda "simultánea" de fuentes de modo que la energía de las diferentes fuentes se solape parcialmente en el tiempo. Dicho de otro modo, las fuentes no tienen que activarse exactamente de manera simultánea, y los desplazamientos de tiempo reducidos entre las mismas son una manera de realizar la codificación de campo a la que se hace referencia en la etapa 702. Un registro de campo es normalmente el conjunto, o un subconjunto, de los datos registrados por los receptores activos (en movimiento o estacionarios) en un periodo de tiempo, con un tiempo de inicio y un tiempo de parada y sin espacios. Los registros de campo pueden ser registros discretos de una duración de tiempo fija o pueden ser un único registro de tiempo continuo. Si se mueve el tendido de registro durante la adquisición, entonces preferiblemente se repiten algunos de los puntos de fuente dentro de la distancia  $D_{fuente}$  del límite del primer tendido en el segundo tendido con el mismo esquema de codificación utilizado previamente de modo que toda la energía dentro de la distancia  $D_{fuente}$  se registre en ambos conjuntos de posiciones de tendido de modo que puedan añadirse entre sí.

Entonces, en la etapa 703, se construyen una pluralidad de lo que pueden denominarse pseudorregistros de súperfuente de extensión y duración fija. Preferiblemente, la extensión del registro abarcaría la anchura de medición, como si la medición se hubiera registrado mediante un tendido fijo de receptores por la anchura de la medición, y la duración de registro sería al menos igual de larga que el tiempo para que la energía sísmica se propague desde la fuente al objetivo y a los receptores con el desplazamiento o la distancia útil máxima desde la fuente. El proceso de construcción puede incluir operaciones tales como extracciones de diversas ventanas de tiempo y regiones de traza



a partir de los registros de campo. Además, puede agregarse un relleno de trazas cero y puede añadirse un relleno de tiempo antes o después de las ventanas. Un objetivo de la construcción de un pseudorregistro de súperfuente es que cada ubicación de receptor dentro de una distancia de desplazamiento  $D_{fuente}$  con respecto a la ubicación de la fuente tenga datos apropiados, es decir, datos que se habrían registrado si hubiera habido un tendido de receptores fijo cuando se produjo el tiro de fuente. Normalmente, los datos de cada registro de campo aparecerán en al menos un pseudorregistro de súperfuente. Entonces las diversas ventanas pueden añadirse o sumarse entre sí para formar un pseudorregistro de súperfuente. Entonces, en la etapa 704, cada tiro que influye en o contribuye a la región de interés se identifica junto con su función de codificación de campo, y tiempo de inicio con respecto al tiempo cero del pseudorregistro de súperfuente. Puede suponerse que los tiros de contribución o influencia son aquéllos para los cuales la fuente se excita dentro de la distancia  $D_{fuente}$  y un tiempo  $T_{fuente}$  desde el límite de la región de interés. Esta información se combina con la función de codificación por ordenador y se utiliza para la etapa de simulación por ordenador 706.

A continuación, en la etapa 705, se codifican por ordenador los diferentes pseudorregistros de súperfuente, preferiblemente, aunque no necesariamente (funcionará cualquier esquema de codificación incoherente), mediante ajuste a escala aleatorio en el que se multiplican aleatoriamente por más o menos uno ( $\pm 1$ ). Entonces se suman entre sí todos los pseudorregistros para formar un registro de fuentes simultáneas. Entonces se utiliza el ordenador para calcular la simulación de modelado directo en una etapa para todas las fuentes dentro del registro simultáneo, que se identificaron en la etapa 704, como si todas las fuentes se hubieran detonado simultáneamente o casi simultáneamente (etapa 706). (Dicho de otro modo, se resuelve una ecuación de propagación de ondas con condiciones iniciales y límite apropiadas y suponiendo un modelo de velocidad de subsuperficie, utilizando procedimientos numéricos tales como diferencia finita iterativa). La simulación por ordenador se realiza utilizando los esquemas de codificación por ordenador y de campo combinado, es decir, lo que podría denominarse codificación doble. Cuando en la etapa 706 se simula un registro de fuentes simultáneas correspondiente a un registro medido con fuentes simultáneas de la etapa 705, se genera el registro de fuentes simultáneas simulado utilizando una combinación de la codificación por ordenador que se utilizó en la etapa 705 combinada con la codificación de campo de la etapa 704/702. En la etapa 707, se comparan los registros registrados de 703 y los registros simulados de 706 por una región de interés, y se utilizan los resultados para actualizar el modelo de subsuperficie. Si son necesarias más iteraciones de la formación de imágenes o inversión como se determina en la etapa 708, entonces preferiblemente se repite la etapa de codificación por ordenador 705 con una función de codificación diferente.

#### Forma de realización marina

En esta sección, se describe una forma de realización particular que supera el problema del tendido en movimiento para un cable marino, que se ilustró en la figura 6. Esto explicará adicionalmente con una ilustración lo que quiere decirse con planificar una adquisición para permitir la pseudoconstrucción de súperfuente en la etapa 701, y cómo se construyen los pseudorregistros de súperfuente en la etapa 703. En esta forma de realización, se utiliza un patrón de detonación y geometría de adquisición de modo que pueden construirse los agrupamientos de súperfuente y aproximarse mejor a la geometría de tendido fijo necesaria para la simulación por ordenador. En la etapa 701, se planifica la adquisición lo que modifica la geometría de adquisición mostrada en la figura 1, ubicando una fuente en la parte posterior del cable para cada fuente en la parte anterior del cable tal como se muestra en la figura 8. A medida que avanzan las embarcaciones de fuente y cable, las fuentes posteriores siguen la misma línea de fuente que las fuentes anteriores. Obsérvese que las fuentes 803 y 807 siguen la línea de fuente 801, y las fuentes 804 y 808 siguen la línea de fuente 802. Esto es diferente de las geometrías acimutales amplias convencionales que pueden utilizar una fuente posterior (Treadgold, *et al.*, "Implementing A wide Azimuth Towed Streamer Field Trial, The What, Why, and Mostly How of WATS in Southern Green Canyon", SEG Expanded Abstracts, 2901-2903 (2006)), pero ubica las fuentes posteriores en diferentes líneas de navegación. Preferiblemente las distancias de desplazamiento cercanas son las mismas para las fuentes anterior y posterior. Por ejemplo, la distancia desde la fuente 803 al receptor más cercano 805 es la misma que desde la fuente 807 a su receptor más cercano 806.

Todas las fuentes detonan en el mismo intervalo de fuentes pero con diferentes retardos de tiempo aleatorios o posiciones aleatorias alrededor de la ubicación de fuente nominal, y se registra un único registro de longitud fija como se ilustra como 901 en la figura 9. En este ejemplo, dos embarcaciones de fuente, 803 y 804 están delante del cable y dos embarcaciones de fuente 807 y 808 detonan en la parte posterior del cable. La posición del tiro proyectado sobre el registro de fuente desde dos fuentes anteriores se muestra mediante los rayos de sol en 903. Las embarcaciones avanzan, detonando las cuatro fuentes cada intervalo de tiro, por ejemplo cada 25-m, con retardos de tiempo aleatorios o una fluctuación de posición aleatoria para cada grupo de tiros. Este retardo de tiempo o esta fluctuación de posición aleatorios se consideran una función de codificación. Cuando las fuentes posteriores se aproximan a la posición ocupada previamente por las fuentes anteriores 903, entonces no detonan aleatoriamente, sino que detonan lo más cerca de la misma posición que sea posible funcionalmente y con los mismos retardos de tiempo con respecto a otras fuentes posteriores que tenían las fuentes anteriores entre sí en la misma ubicación. Por ejemplo, el registro de fuente 906 se registra con las fuentes posteriores detonando con el mismo patrón 904 que cuando esta posición estaba ocupada por las fuentes anteriores para el registro 903 en 901. Y de nuevo cuando las fuentes posteriores alcanzan la posición 907 detonan con la misma función de codificación y en la misma ubicación que cuando las fuentes anteriores estaban en 905; véase el registro 908. Este patrón continúa preferiblemente para toda la línea de navegación.

En la etapa 703, se construye un pseudorregistro de súperfuente. Cada registro que se registró con fuentes posteriores y anteriores idénticas en la misma posición tiene una alineación en el tiempo para coincidir con la sincronización de fuente y se añaden. Las trazas pueden rellenarse (es decir, pueden añadirse ceros) al final o al principio. Esto da lugar a un registro largo 912 que abarca toda la línea de navegación con fuentes separadas por aproximadamente la longitud del cable. Ahora, este pseudorregistro de súperfuente se aproxima mejor a un tendido fijo porque se registran los desplazamientos tanto positivos como negativos de cada posición de fuente hasta una distancia de  $D_{fuente}$ . Aquí  $D_{fuente}$  es naturalmente la longitud de cable. Ahora todas estas fuentes pueden simularse simultáneamente en el ordenador, por ejemplo poniendo grupos de fuentes en 922, 932, 942 y 952.

En la etapa 703, se construyen pseudorregistros de súperfuente adicionales, teniendo cada uno la misma extensión espacial y duración de tiempo que se ilustra en la figura 10. Si el primer tiro fue en la posición 0, entonces comienza el primer registro de súperfuente. En el siguiente intervalo, por ejemplo 25-m con respecto al primero, comienza el segundo registro de súperfuente, sus tiros están desplazados un intervalo de tiro con respecto al primero. Esto continúa hasta que se utiliza toda la longitud de cable y las fuentes posteriores alcanzan la primera ubicación de las fuentes anteriores. Por ejemplo, los registros de súperfuente 1001-1004 tienen posiciones de fuente que están desplazadas por un intervalo de fuentes. En general, el número de registros de súperfuente que pueden generarse está relacionado con la longitud del cable dividida por el intervalo de tiro. Puede ser necesario rellenar trazas, por ejemplo en 1006, para construir un tamaño de tendido fijo para cada súperregistro.

En la etapa 704, se determinan la información de codificación y ubicación de fuente, incluyendo desplazamientos de tiempo, para cada pseudorregistro de súperfuente con respecto a los límites del pseudorregistro. Por ejemplo, el tiempo de inicio de cada fuente se ajusta por los desplazamientos de tiempo utilizados para formar el pseudorregistro y ahora se relaciona con el tiempo cero del pseudorregistro. Esta información se utilizará en la etapa 706, combinada con la codificación por ordenador utilizada en la etapa 705, para simular simultáneamente los pseudorregistros codificados.

En la etapa 705, cada pseudorregistro de súperfuente que contiene muchos tiros se codifica en el ordenador. Preferiblemente esto se realiza multiplicando aleatoriamente por +1 o -1. Alternativamente, pueden utilizarse rotaciones de fase u otra forma de codificación. Entonces se acumulan o suman los pseudorregistros codificados, tal como se muestra en la ilustración de 1112 en la figura 11, para formar un registro de fuentes simultáneas para toda la línea de navegación.

En la etapa 706, todas las fuentes en la línea de navegación se simulan por ordenador a la vez utilizando una combinación de la codificación de campo determinada en la etapa 704/702 y la codificación por ordenador utilizada en la etapa 705. Pueden conseguirse ahorros adicionales en el costo computacional limitando la región del modelo utilizado en una simulación de línea de navegación única. Esta simulación se ilustra con los rayos de sol en 1116. Esto puede implicar extender o rellenar el espacio de modelado con una región adicional tal como se indica en 1113, lo que permite que el modelado directo genere todos los bits de energía registrados en la ventana de datos 1118. A continuación, en la etapa 707, se compara el registro de fuentes simultáneas medido por la región de interés (1118 en el ejemplo) con el registro de fuentes simultáneas simulado y se utiliza el resultado para actualizar el modelo de subsuperficie. Como la energía simulada de todas las posiciones de fuente que influyen en la región de interés está presente en los datos tanto medidos como simulados, al menos hasta una distancia y un tiempo de  $D_{fuente}$  y  $T_{fuente}$  desde cada posición de detonación de fuente, se evita el problema de que la función de desajuste o comparación se distorsione por artefactos por crear el registro de fuentes simultáneas. Construyendo los pseudorregistros, se cumple con los requisitos de un tendido fijo y una duración de traza reducida. Con iteraciones adicionales de la etapa de inversión o formación de imágenes, la codificación por ordenador se cambia preferiblemente repitiendo la etapa 705 con una codificación diferente y formando así múltiples implementaciones de los datos que reducen adicionalmente la interferencia y los artefactos.

Es sencillo modificar el ejemplo mostrado en este caso para diferentes requisitos de adquisición que implican más embarcaciones de cable y conjuntos de cables y más embarcaciones de fuente. La posición de fuente y el patrón de detonación se eligen de modo que puedan construirse pseudoagrupamientos de súperfuente aproximándose mejor al registro por un tendido fijo para la línea de navegación o para toda la medición. Por ejemplo, pueden utilizarse fuentes de remolque de embarcaciones adicionales delante de la embarcación de cable y más atrás del extremo del cable y detonarse simultáneamente con las demás fuentes para registrar datos de desplazamiento más largo para la línea de navegación. Además, las embarcaciones pueden ubicarse en ambos lados de las embarcaciones de cable para aproximarse mejor a un tendido fijo transversal permitiendo que todas las fuentes en la medición se simulen simultáneamente en un esfuerzo de modelado directo computacional.

Forma de realización en tierra

A continuación se considerará la adquisición de datos en tierra o en el fondo del mar. En este caso los sensores no se mueven como en un cable marino, sino que el grupo de receptores activos puede cambiar durante la medición. Esto se denomina a menudo rodamiento del tendido. En la figura 12, se muestra un registro en una posición de tendido como 1212 y el segundo registro correspondiente a un conjunto diferente de posiciones de traza se muestra

en 1213. A menudo los receptores pueden registrar realizando de manera continua un registro largo para cada posición de tendido. En la etapa 701, se planifica la medición y se identifica  $T_{fuente}$  y  $D_{fuente}$ . Puede activarse la búsqueda de fuentes aleatoriamente o en un patrón. Preferiblemente, algo de la energía generada de múltiples posiciones de fuente se solapa en el tiempo y el espacio para reducir el tiempo y costo de adquisición. Cuando se mueve el tendido, se repiten los puntos de fuente dentro de una distancia de  $D_{fuente}$  desde el límite para el nuevo tendido utilizando los mismos desplazamientos de tiempo relativos. Por ejemplo si las fuentes 1201, 1202 y 1203 están dentro de la distancia  $D_{fuente}$  desde el límite de modo que no se registre toda la energía dentro de la distancia  $D_{fuente}$  desde una fuente, se repiten estas fuentes en la nueva posición de tendido con el mismo desplazamiento de tiempo relativo y la misma función de codificación utilizada previamente en esa posición de fuente. Por ejemplo 1221, 1222 y 1223 son una repetición de 1201, 1202 y 1203. Esto asegura que el registro combinado ha captado toda la señal importante, tal como 1224, de cada fuente.

En la etapa 703, se construyen varios pseudoregistros de súperfuente de tamaño y duración fijos. Preferiblemente la duración es más larga que  $T_{escucha}$  pero lo suficientemente corta para simularse de manera eficaz en el ordenador. La construcción para este ejemplo puede ilustrarse en dos etapas. En la figura 13 se combinan los dos registros de la figura 12 para obtener un tendido fijo. Como se han repetido algunos tiros cerca del límite con la misma función de sincronización y codificación relativa, se ha garantizado que toda la energía dentro de una distancia de  $D_{fuente}$  y un tiempo de  $T_{fuente}$  se capte en el registro combinado. A continuación, en la figura 14 se extraen ventanas de tiempo aisladas preferiblemente de longitud  $T_{fuente}$ . No es necesario aislar la energía medida de ninguna fuente dentro de la ventana, ni es necesario que ningún registro comience en el tiempo de detonación de ninguna fuente como en el caso de la pseudodescomposición. Por ejemplo se extraen las ventanas 1404 y 1406 del registro en la figura 13. Se ilustran sólo dos registros, aunque preferiblemente se extrae un número mayor. Se rellenan los registros en tiempo negativo por otra duración de tiempo de  $T_{fuente}$  tal como se muestra como 1403 y 1405 para obtener pseudosúperregistros 1401 y 1402.

Entonces, en la etapa 704, se identifican las ubicaciones de fuente, la función de codificación y el tiempo de detonación con respecto al tiempo cero de los registros de súperfuente 1401 y 1402. Las fuentes deberán estar dentro de un tiempo de  $T_{fuente}$  desde la parte superior de la ventana o dentro de una distancia de  $D_{fuente}$  desde los límites del registro. En la etapa 705, los registros de súperfuente se codifican y suman por ordenador, obteniendo un registro de fuentes simultáneas medido como se ilustra en la figura 15 como 1501. Entonces, en la etapa 706, se utilizan las posiciones de búsqueda de fuentes y las funciones de codificación de campo y ordenador para generar un registro de fuentes simultáneas simulado como se ilustra en 1502. Esta simulación es eficaz porque todas las fuentes se simulan simultáneamente durante un breve periodo de tiempo. A continuación, en la etapa 707, se compara la región de interés medida 1504 con la región de interés simulada 1506, y se utiliza el resultado para actualizar un modelo de subsuperficie. Como toda la energía dentro de la distancia  $D_{fuente}$  y  $T_{fuente}$  de cada posición de fuente se representa en ambos registros, se evitan los artefactos de la creación del registro simultáneo. Con iteraciones posteriores de la formación de imágenes e inversión, preferiblemente los registros de súperfuente se combinarían con diferentes funciones de codificación formando diferentes implementaciones de todos los datos, reduciendo el ruido de interferencia.

#### Ejemplos

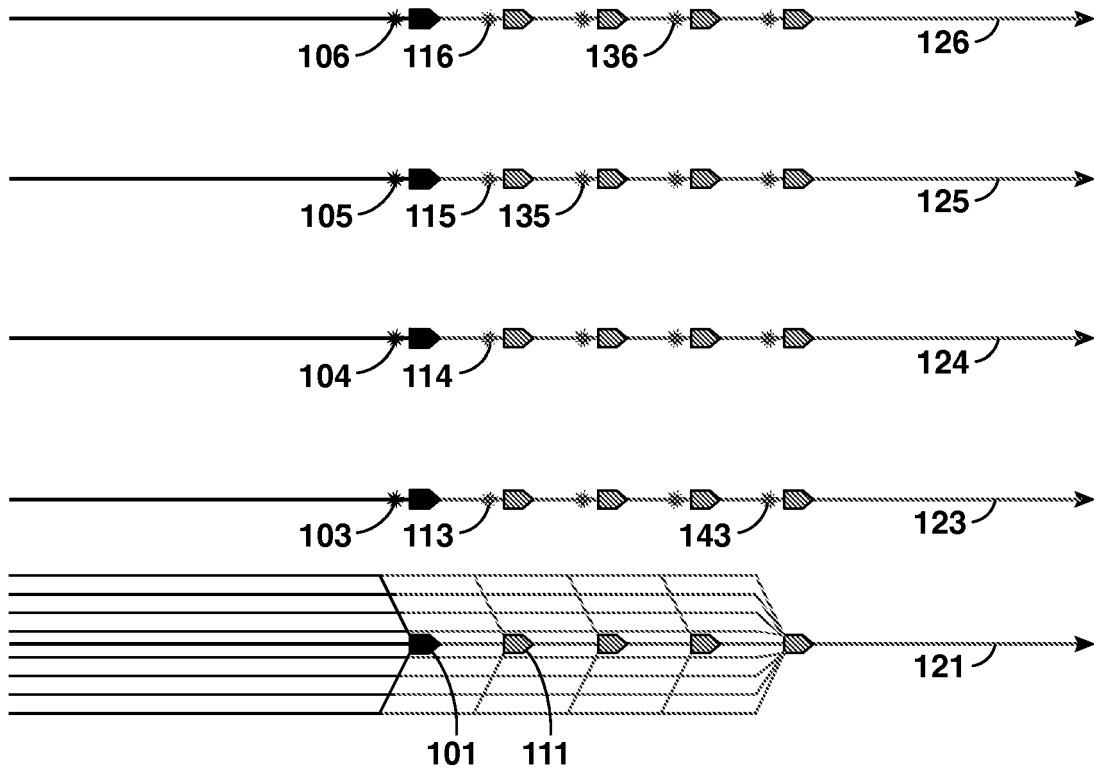
La figura 16 muestra un ejemplo de modelo de velocidad en 2D. Por las restricciones de la ley de patentes respecto al uso del color, la figura 16 es una reproducción en blanco y negro de una visualización de datos en la que la velocidad se representa cuantitativamente en una escala de colores. Los datos se han simulado por ordenador con una fuente anterior y posterior y codificación de campo con retardos de tiempo aleatorios de hasta 200 ms utilizando el modelo de superficie cercana mostrado en 1601. El uso del procedimiento convencional para la inversión de fuentes codificadas simultáneas con los datos de cable en movimiento no proporcionará los resultados correctos (no mostrado) debido al fallo del supuesto de receptor fijo. Entonces se construyen los agrupamientos de súperfuente como se describe en la forma de realización marina, y se realiza una inversión de baja frecuencia utilizando el presente procedimiento inventivo con los resultados mostrados en 1602. Puede observarse que el modelo deducido por la inversión de datos utilizando el presente procedimiento inventivo es comparable de manera muy favorable con el modelo "real" 1601.

La aplicación anterior se refiere a formas de realización particulares de la presente invención para su ilustración. Los expertos en la técnica reconocerán fácilmente que en formas de realización preferidas de la invención, al menos algunas de las etapas en el presente procedimiento inventivo se realizan en un ordenador, es decir, la invención se implementa por ordenador.

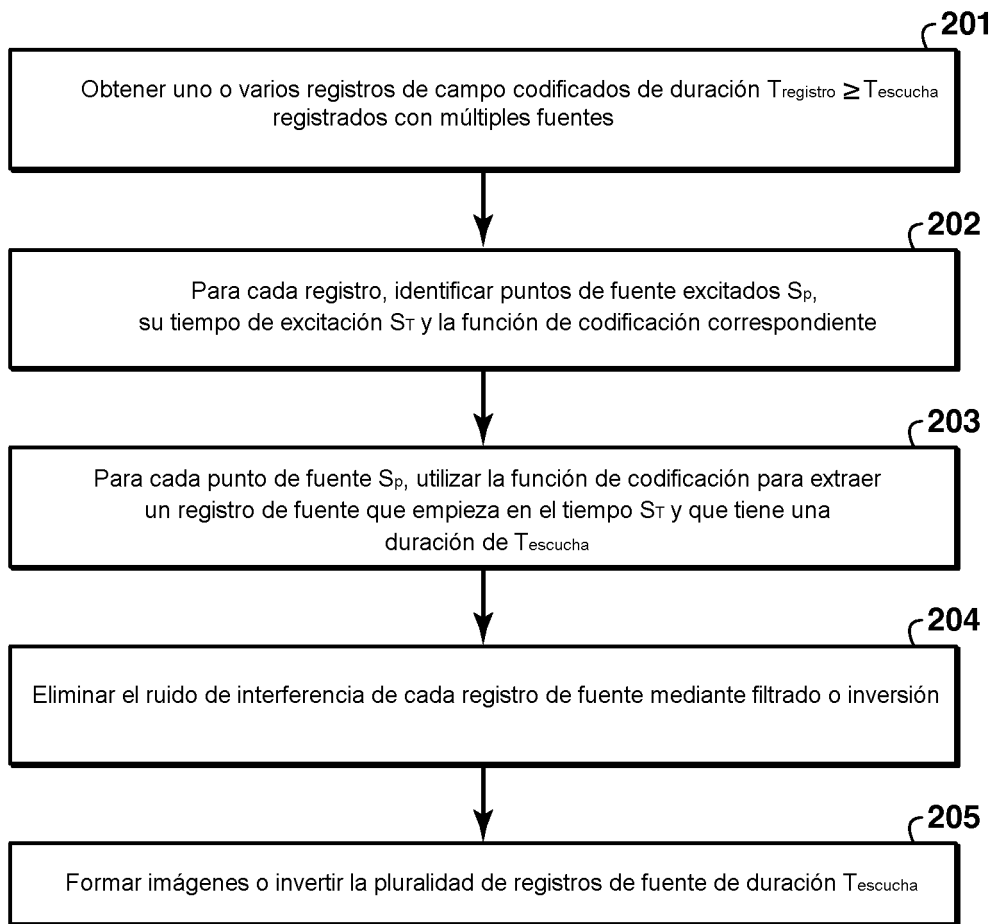
## REIVINDICACIONES

1. Un procedimiento para deducir un modelo de subsuperficie de velocidad u otra propiedad física, que comprende:
- 5 obtener (702) datos sísmicos adquiridos en una medición haciendo avanzar una fuente anterior y una fuente posterior de seguimiento a lo largo de una línea de fuente con un tendido no fijo de receptores, y activar cada fuente a intervalos seleccionados a lo largo de la línea de fuente, en el que cada ubicación de activación para la fuente posterior se sitúa sobre una ubicación de activación previa para la fuente anterior, y en el que se utiliza una
- 10 codificación de campo seleccionada para todos los tiros de fuente siendo la codificación de campo para la fuente posterior siempre la misma que la aplicada anteriormente a la fuente anterior en la misma ubicación de activación, dando como resultado una serie de registros de tiro, registrando cada uno simultáneamente ambas fuentes pero con cada tiro registrado por menos de un tendido completo de receptores; y
- 15 procesar los registros de tiro por etapas que comprenden:
- (i) construir (703) a partir de los registros de tiro una pluralidad de pseudorregistros de súpertiro, contruidos de modo que cada uno tiene datos de un tendido completo de receptores, en el que cada pseudorregistro de súpertiro incluye una pluralidad de ubicaciones de fuente;
- 20 (ii) codificar (705) cada pseudorregistro de súpertiro y acumularlo para formar un registro de fuentes simultáneas de datos medidos;
- (iii) utilizar un ordenador para simular (706) el registro de fuentes simultáneas de datos medidos, utilizando la misma codificación utilizada en (ii) y también la codificación de campo, y utilizando un modelo de subsuperficie supuesto de
- 25 velocidad u otra propiedad física; y
- (iv) comparar (707) el registro de fuentes simultáneas simulado con el registro de fuentes simultáneas de datos medidos, y determinar a partir de aquí un ajuste al modelo de subsuperficie de velocidad u otra propiedad física.
- 30
2. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que los datos de medición adquiridos incluyen al menos una línea de fuente adicional, adquirida simultáneamente, paralela, en el que cada línea de fuente tiene una fuente anterior y una fuente posterior de seguimiento con ubicaciones de activación de fuente coincidentes para todas las
- 35 líneas de fuente, en el que cada ubicación de activación para una fuente posterior en cualquier línea de fuente se sitúa sobre una ubicación de activación previa para la fuente anterior en esa línea de fuente, y en el que se utiliza una codificación de campo seleccionada para todos los tiros de fuente siendo la codificación de campo para cada fuente posterior siempre la misma que la aplicada anteriormente a su fuente anterior correspondiente en la misma ubicación de activación.
- 40
3. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que la fuente anterior y la fuente posterior están separadas por una distancia  $d$  fija que subdivide en un número entero  $N$  de intervalos de tiro, siendo tales intervalos de tiro el intervalo de tiro nominal o promedio para la medición.
4. El procedimiento según la reivindicación 3, en el que se construyen  $N + 1$  pseudorregistros de súpertiro en
- 45 (i), cada uno de duración y extensión espacial fijas, siendo la duración mayor que o igual a un tiempo de escucha utilizado en la medición y, además, es un tiempo mínimo para que las vibraciones de tiro de fuente se reduzcan hasta un nivel predeterminado; y siendo la extensión espacial mayor que o igual a una distancia de desplazamiento de receptores máxima utilizada en la medición y, además, es una distancia mínima por la que se reduce la amplitud de fuente hasta un nivel predeterminado.
- 50
5. El procedimiento según la reivindicación 4, en el que se repiten (i)-(iii) una pluralidad de veces utilizando otros registros de tiro de otras ubicaciones de tiro a lo largo de la línea de fuente, y a continuación se realiza (iv) utilizando los resultados de todas las repeticiones de (i)-(iii).
- 55
6. El procedimiento según la reivindicación 5, en el que todos los datos adquiridos a lo largo de la línea de fuente se incluyen en al menos un pseudorregistro de súpertiro.
7. El procedimiento según la reivindicación 1, que comprende además tomar el modelo de velocidad ajustada de (iv) y repetir las etapas (i)-(iv) utilizando una codificación por ordenador diferente en (ii).
- 60
8. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que la codificación de campo comprende uno o varios de desplazamientos en el tiempo aleatorios, posiciones de fuente aleatorias, rotaciones de fase y diferentes funciones de barrido.
- 65
9. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que la construcción en (i) comprende utilizar uno o varios de función ventana, desplazamiento en el tiempo, relleno de tiempo o trazas y adición.

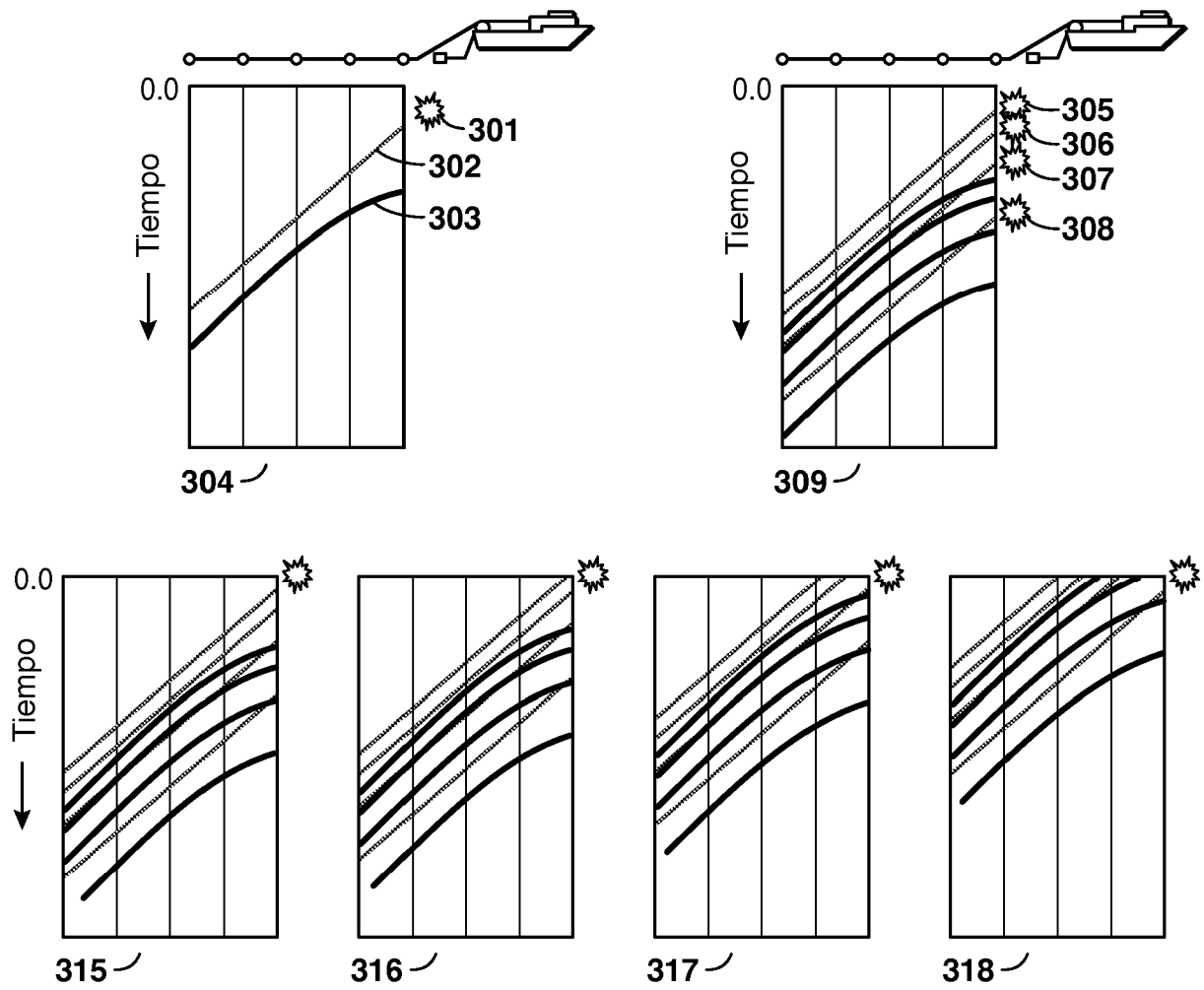
10. El procedimiento según la reivindicación 1, en el que la medición sísmica comprende:
- 5 una medición marina en la que una embarcación en movimiento remolca una o varias fuentes y uno o varios cables de receptores; o
- una medición en tierra o del fondo del mar que implica un tendido rodante de receptores a medida que avanza la medición a lo largo de una línea de medición.
- 10 11. Un procedimiento para llevar a cabo una medición sísmica con una pluralidad de fuentes simultáneas y un tendido no fijo de receptores, y deducir un modelo de subsuperficie de velocidad u otra propiedad física, que comprende:
- 15 (a) activar dos o más fuentes con una codificación de campo seleccionada aplicada a cada fuente en una ubicación a lo largo de una línea de fuente con un primer tendido parcial de receptores;
- (b) activar las dos o más fuentes, o fuentes idénticas, duplicando la codificación de campo en (a), en la misma ubicación a lo largo de la línea de fuente con un segundo tendido parcial de receptores, en el que el primer tendido parcial y el segundo tendido parcial, cuando se combinan, forman un tendido completo de receptores para la
- 20 ubicación a lo largo de la línea de fuente;
- (c) repetir (a) y (b) para una o varias ubicaciones adicionales a lo largo de la línea de fuente; a continuación procesar los registros de datos sísmicos registrados por los receptores de las activaciones en (a)-(c) con etapas que comprenden:
- 25 (d) construir a partir de los registros de tiro una pluralidad de pseudorregistros de súpertiro, contruidos para ser de la misma duración y extensión espacial, y de modo que cada uno tiene datos de un tendido completo de ubicaciones de receptor, en el que cada pseudorregistro de súpertiro incluye una pluralidad de ubicaciones de fuente;
- 30 (e) codificar por ordenador cada pseudorregistro de súpertiro y sumarlos para formar un único registro de fuentes simultáneas de datos medidos;
- (f) utilizar un ordenador y un modelo de subsuperficie de velocidad u otra propiedad física, simulando con una operación de modelado directo un registro de fuentes simultáneas de datos sintéticos para predecir el registro de
- 35 fuentes simultáneas de datos medidos; y
- (g) comparar el registro de fuentes simultáneas de datos medidos con el registro de fuentes simultáneas simulado, determinar un desajuste y utilizar el desajuste para ajustar el modelo de subsuperficie.
- 40 12. El procedimiento según la reivindicación 11, que comprende además tomar el modelo de subsuperficie ajustado de (g) y repetir las etapas (e)-(g) utilizando una codificación por ordenador diferente en (e).
13. El procedimiento según la reivindicación 11, en el que la codificación de campo comprende uno o varios de desplazamientos en el tiempo aleatorios, posiciones de fuente aleatorias, rotaciones de fase y diferentes funciones
- 45 de barrido.
14. El procedimiento según la reivindicación 11, en el que la construcción en (d) comprende utilizar uno o varios de función ventana, desplazamiento en el tiempo, relleno de tiempo o trazas y adición.
- 50 15. El procedimiento según la reivindicación 11, en el que la medición sísmica comprende:
- una medición marina en la que una embarcación en movimiento remolca una o varias fuentes y uno o varios cables de receptores; o
- 55 una medición en tierra o del fondo del mar que implica un tendido rodante de receptores a medida que avanza la medición a lo largo de una línea de medición.



**FIG. 1**  
(Técnica anterior)

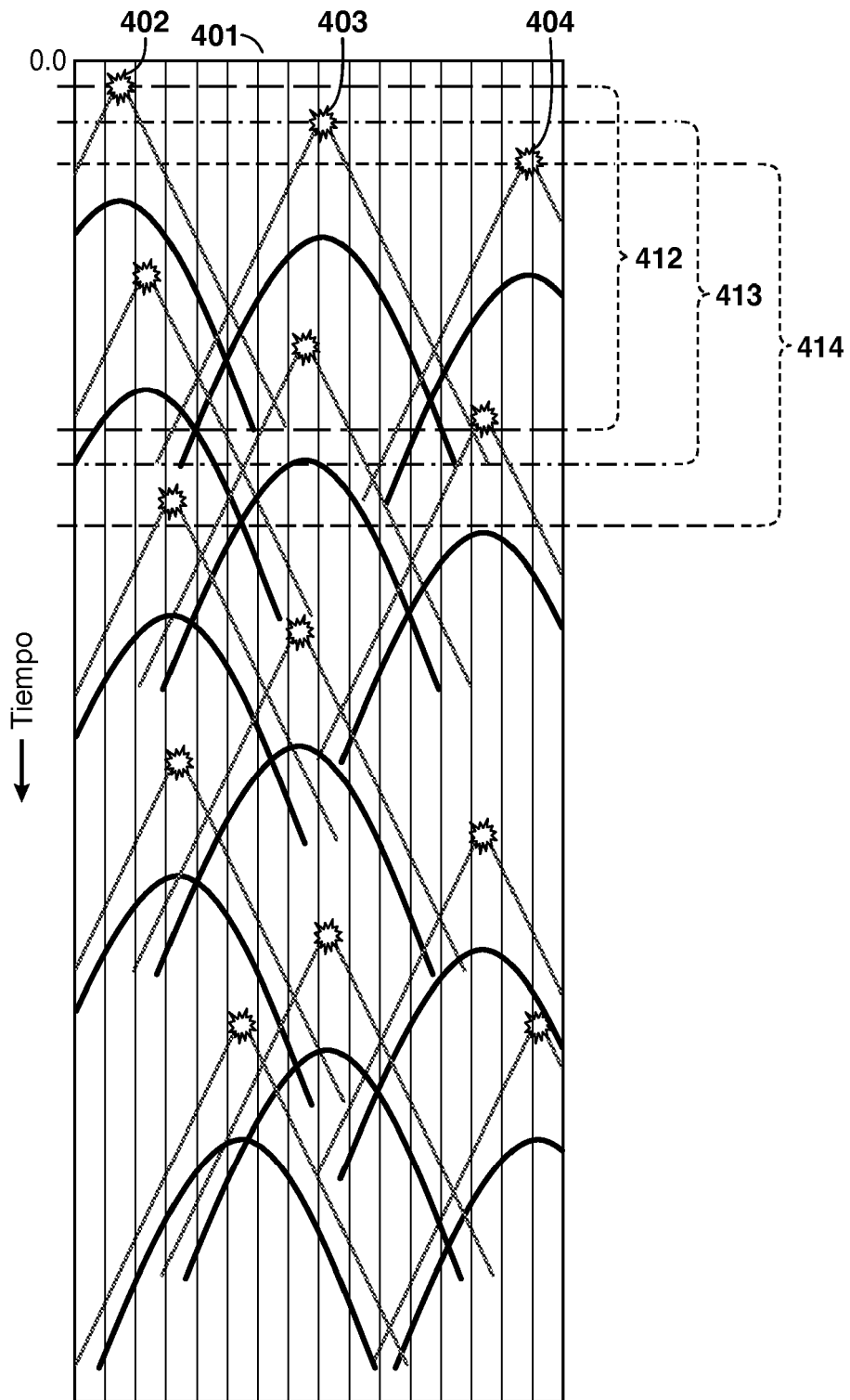


**FIG. 2**  
(Técnica anterior)

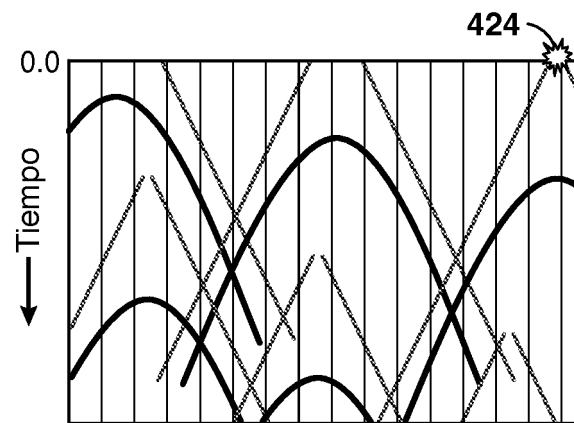
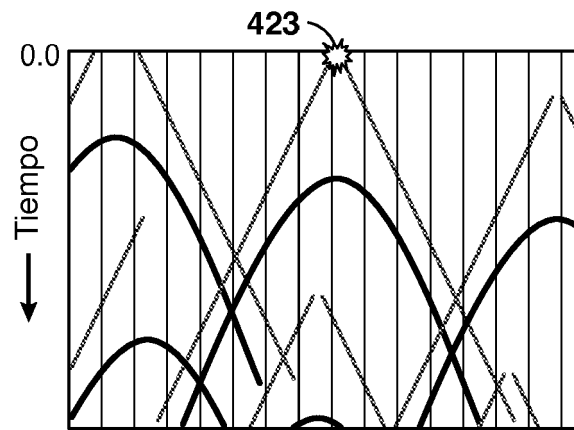
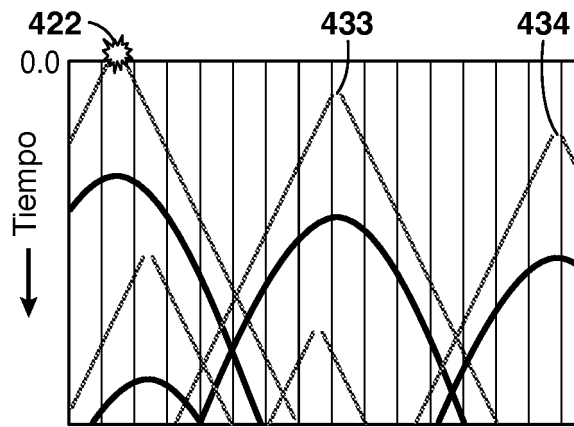


**FIG. 3**  
(Técnica anterior)

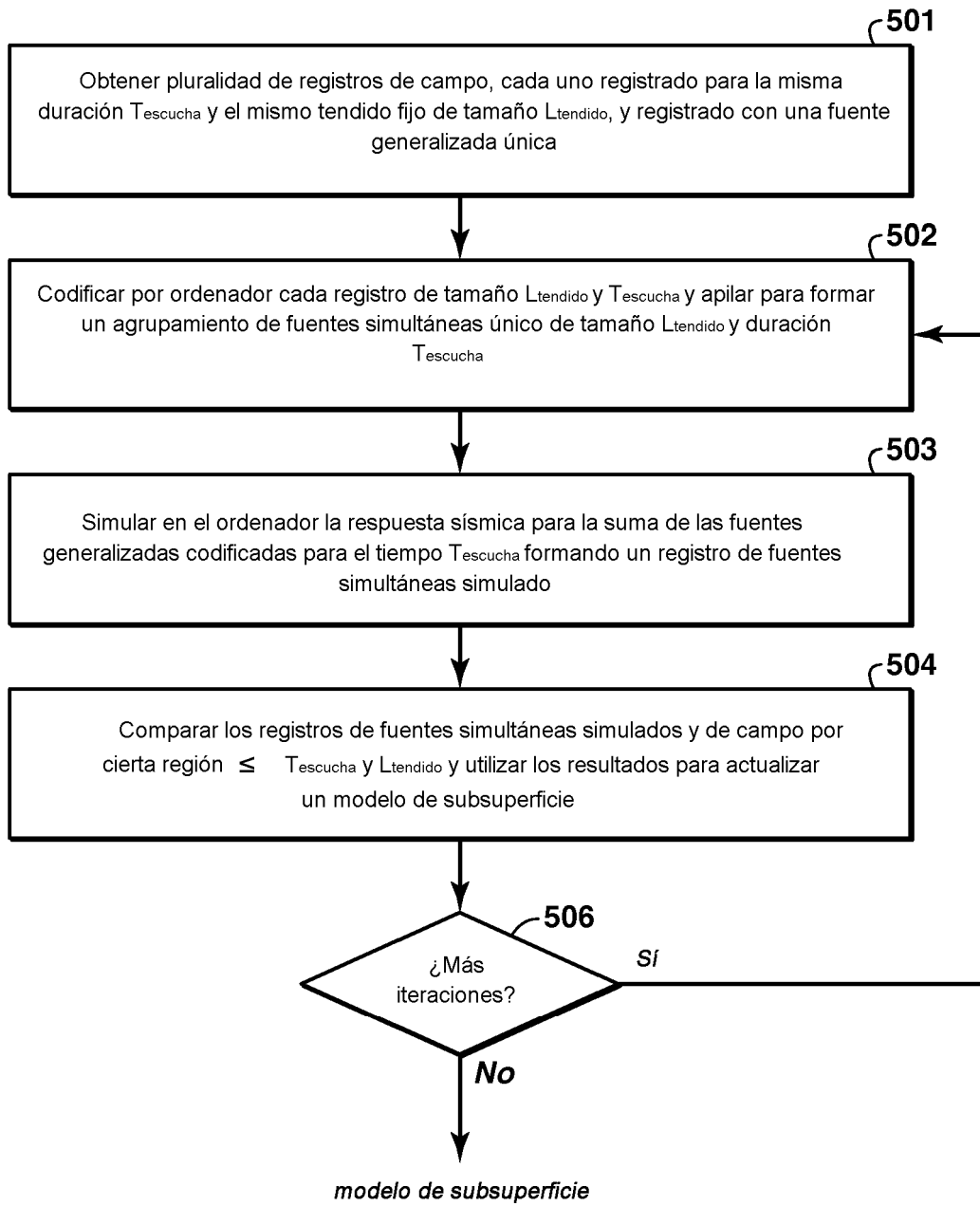




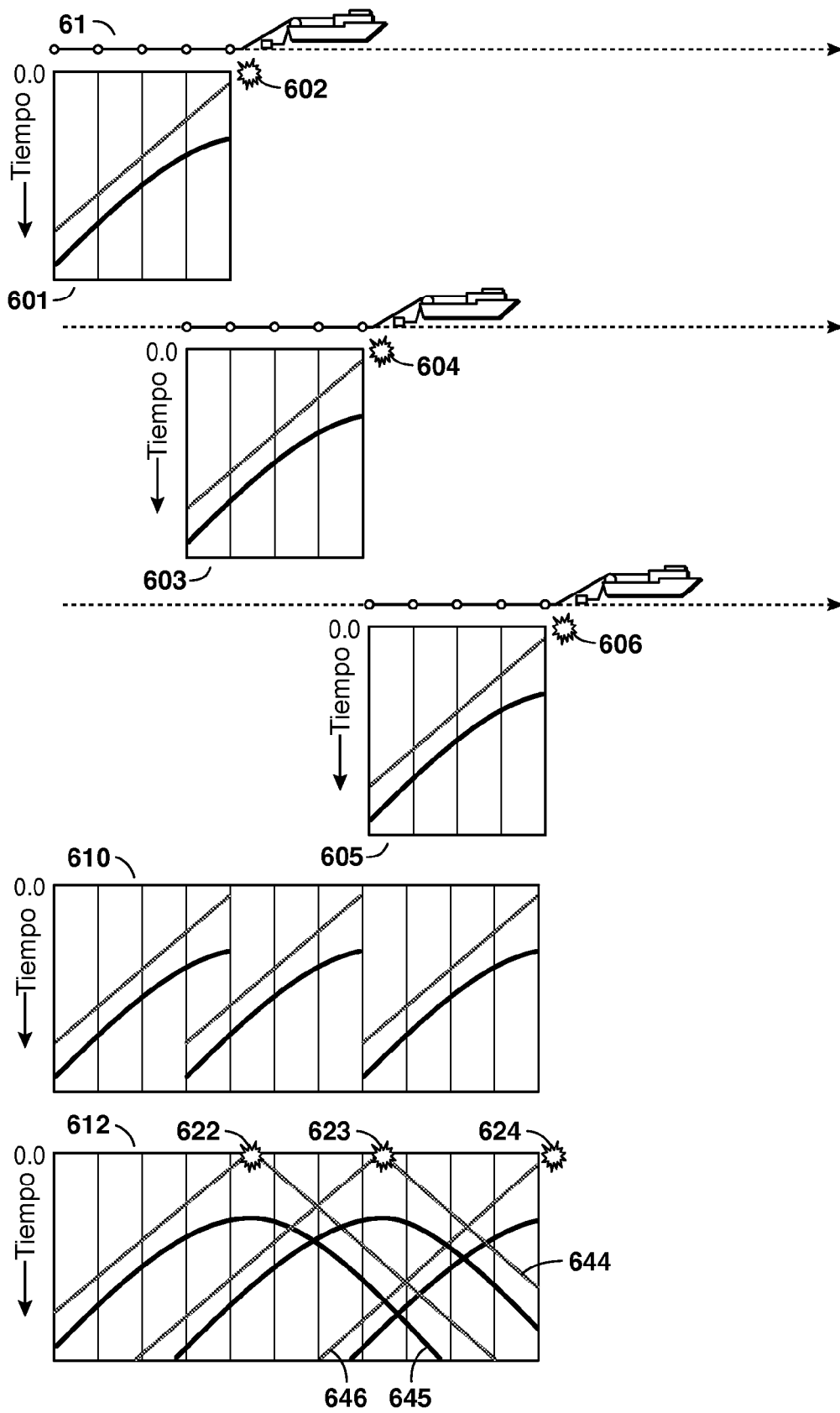
**FIG. 4A**  
(Técnica anterior)



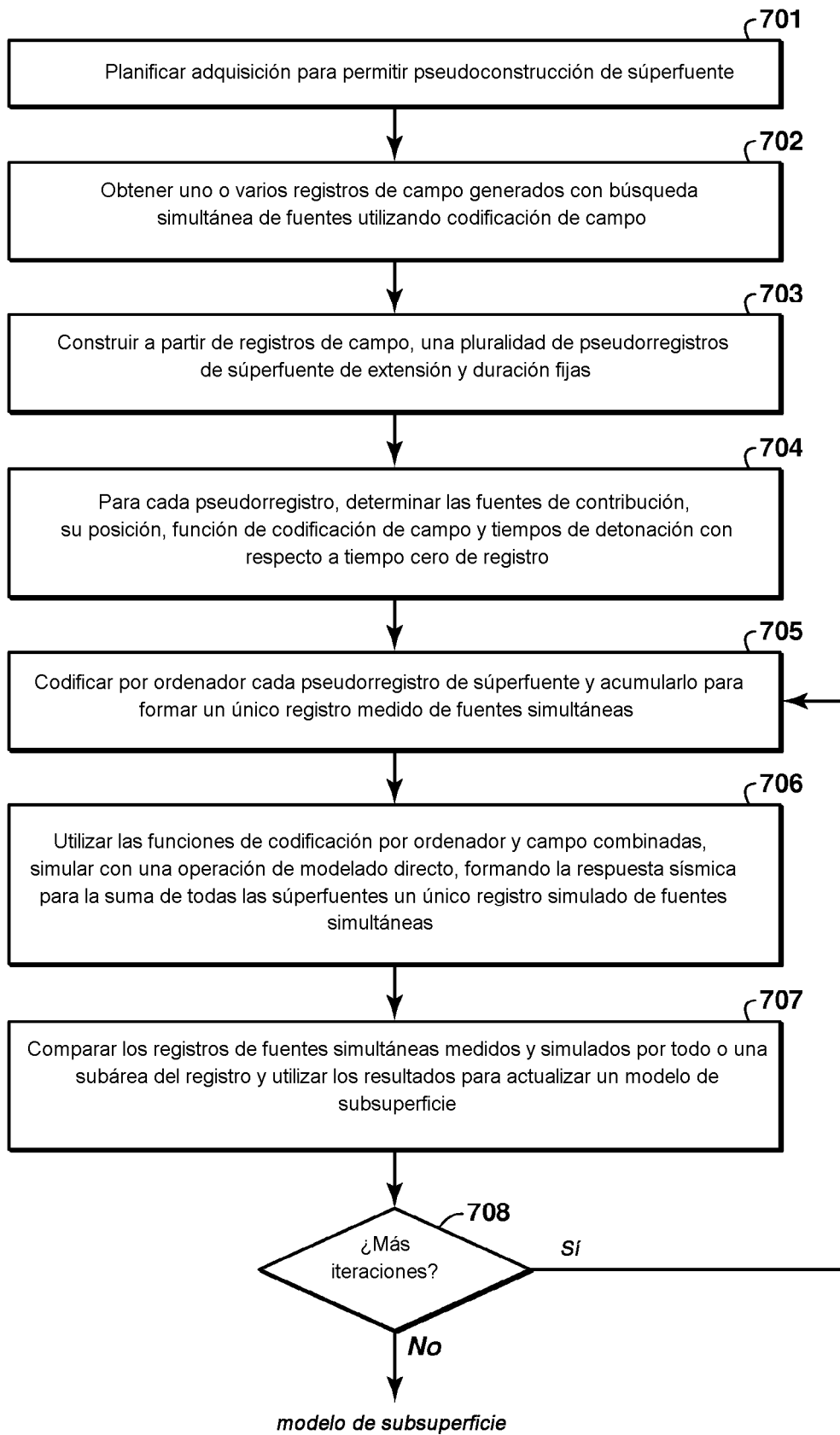
**FIG. 4B**  
(Técnica anterior)



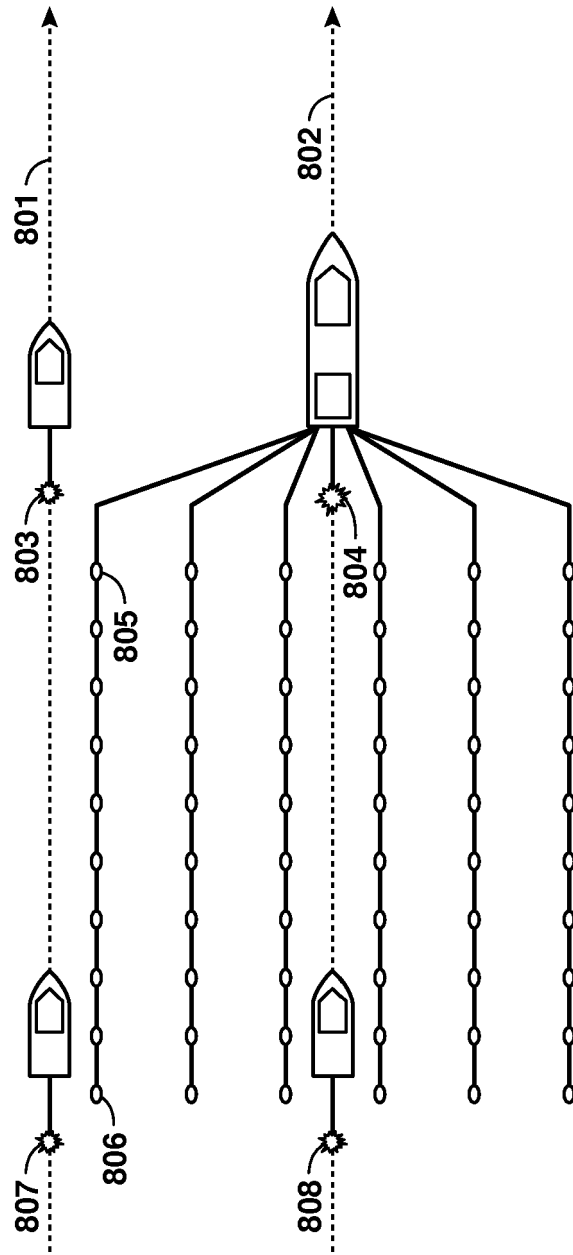
**FIG. 5**  
(Técnica anterior)



**FIG. 6**



**FIG. 7**



**FIG. 8**

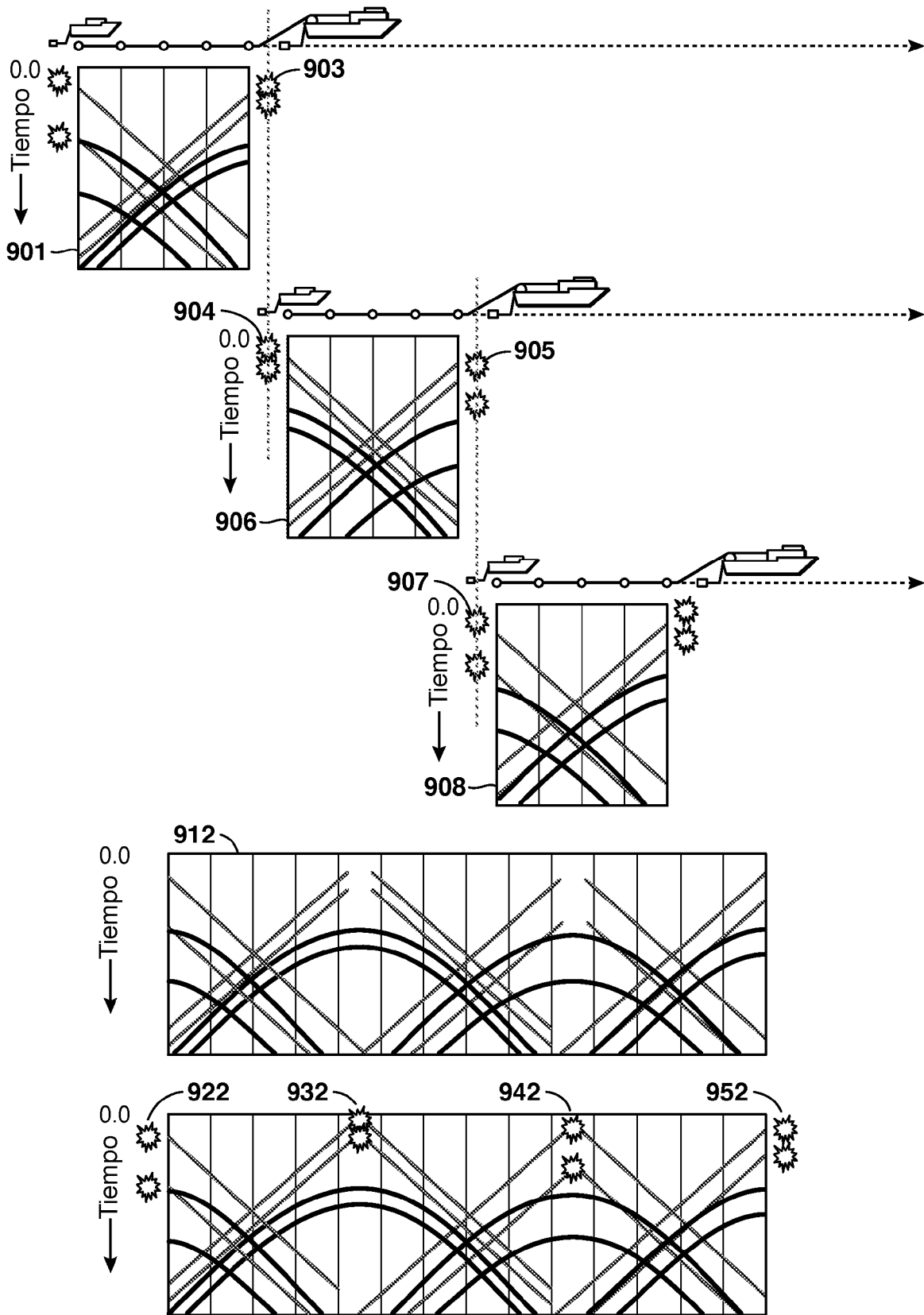
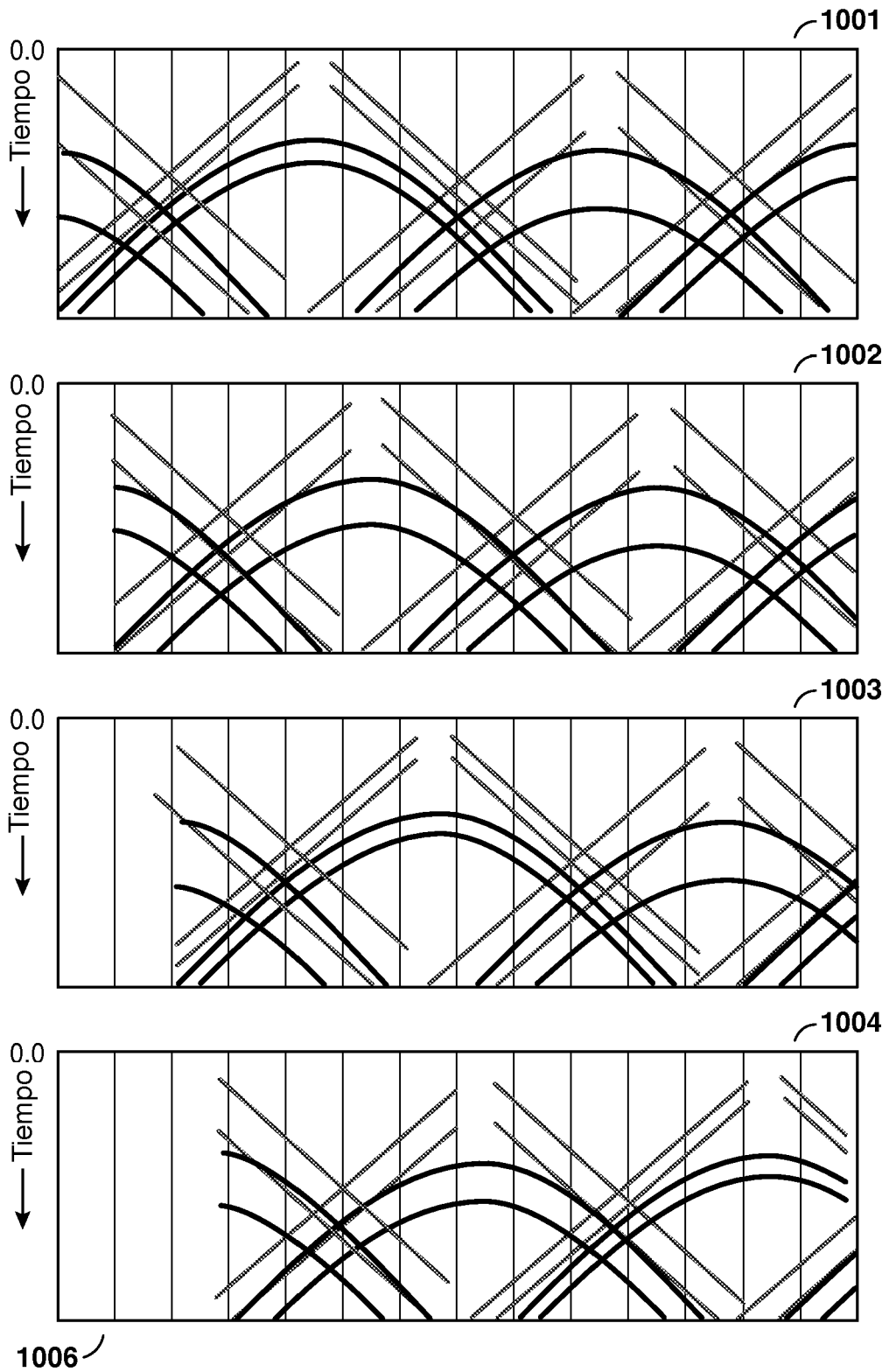
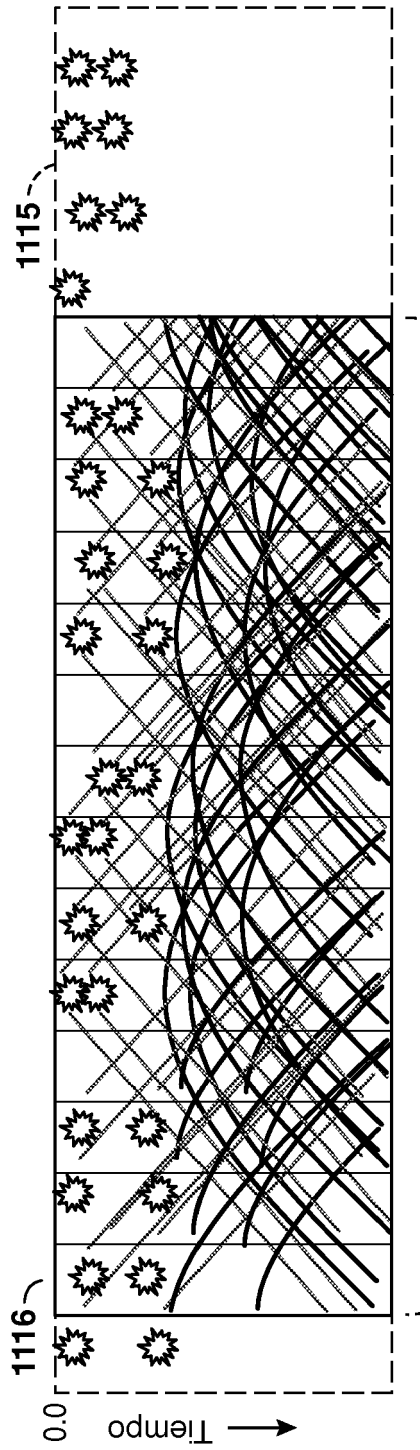
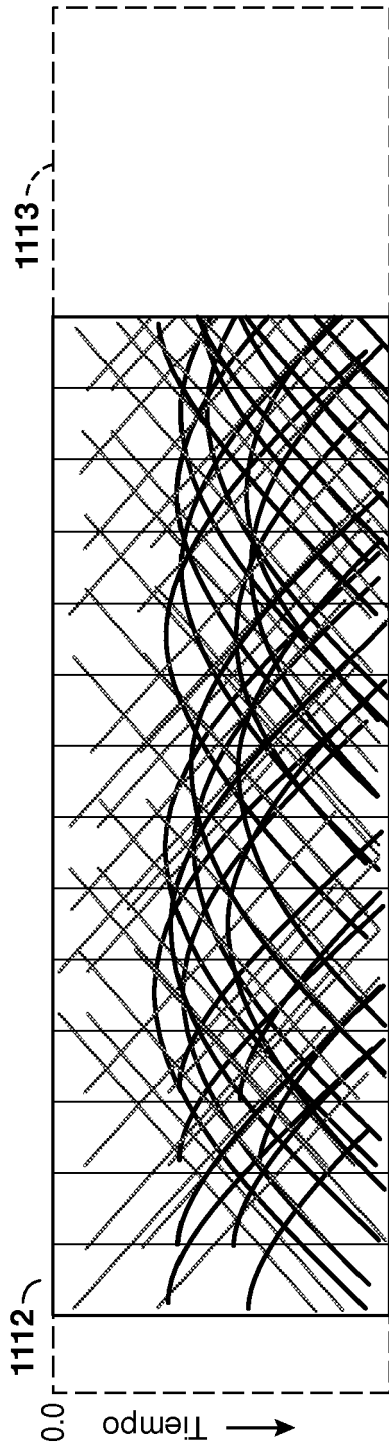


FIG. 9

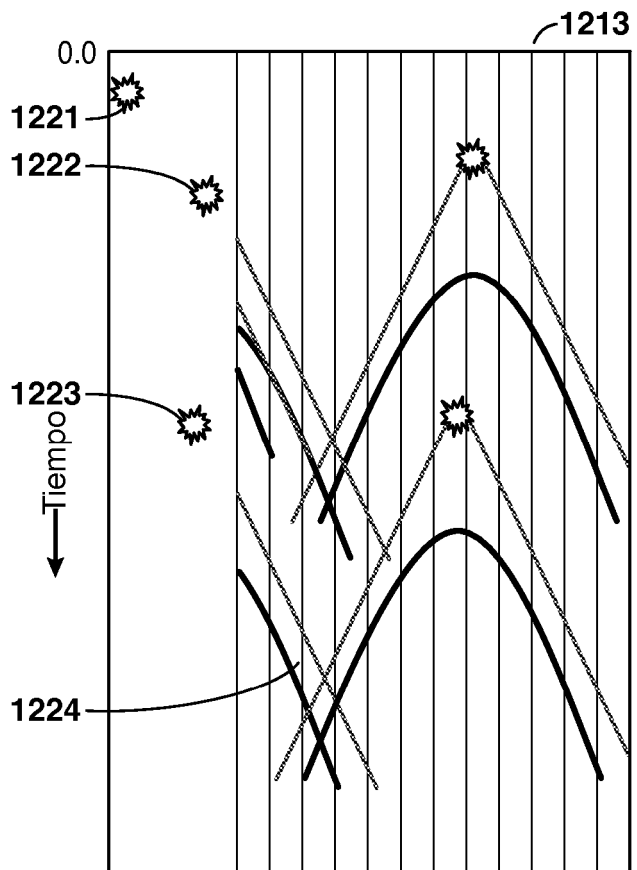
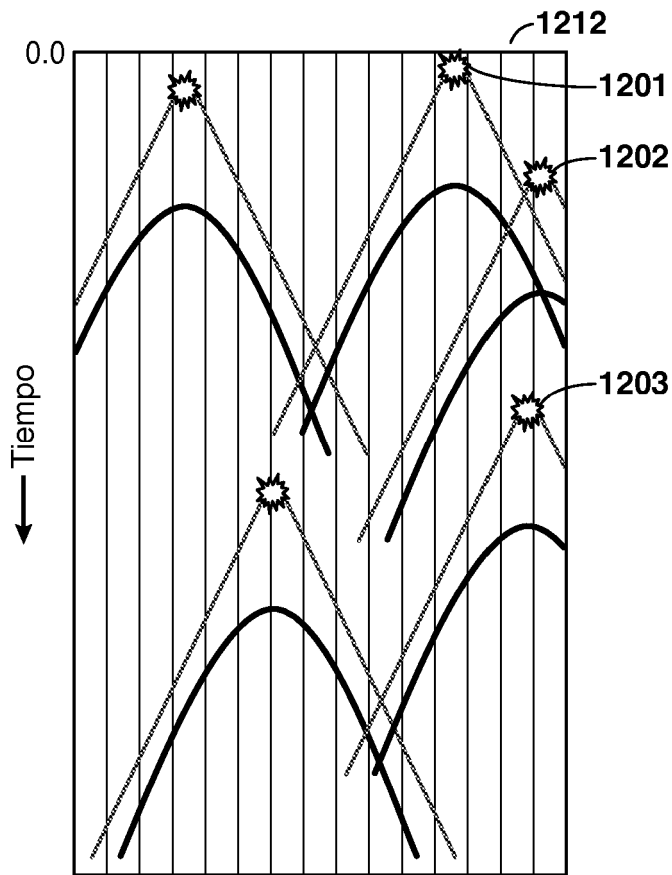


**FIG. 10**

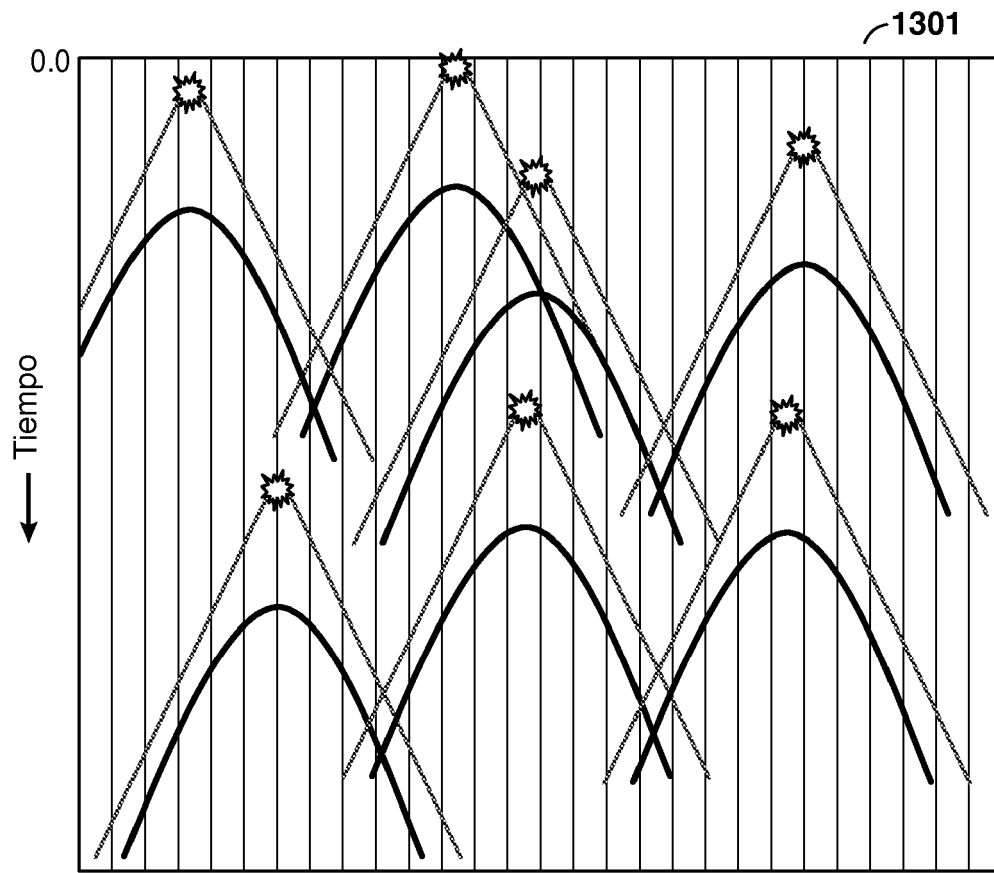




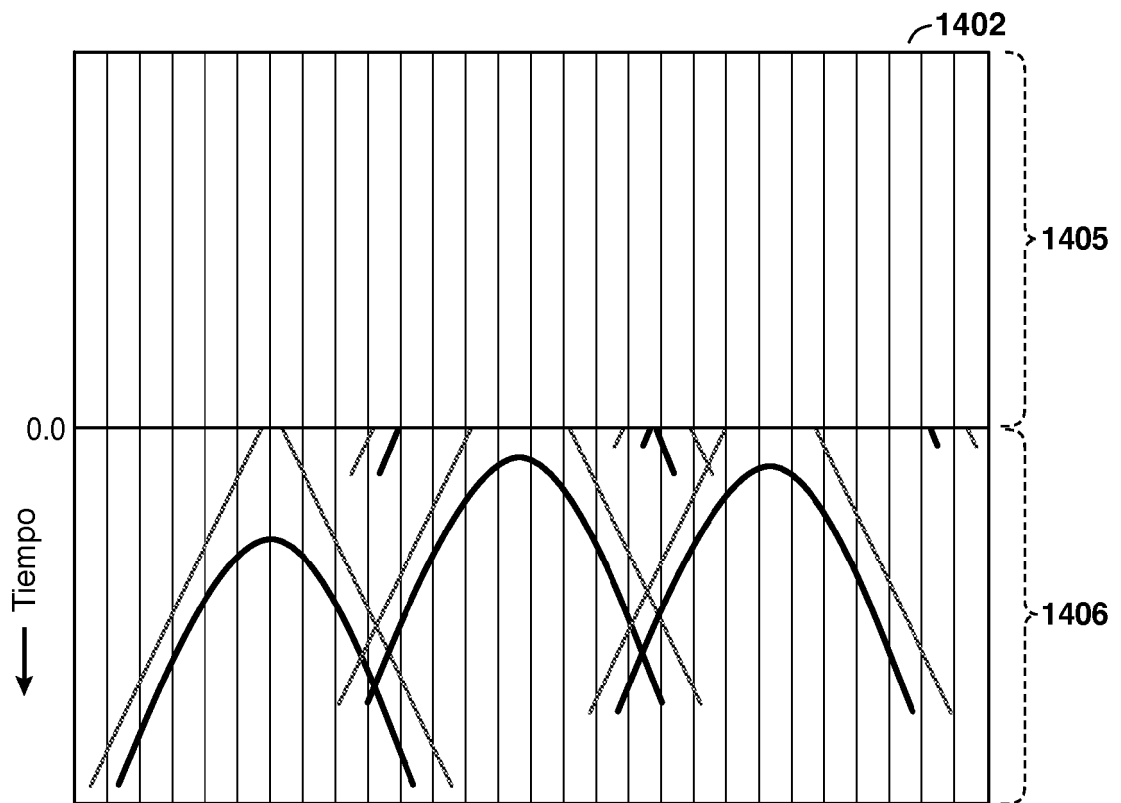
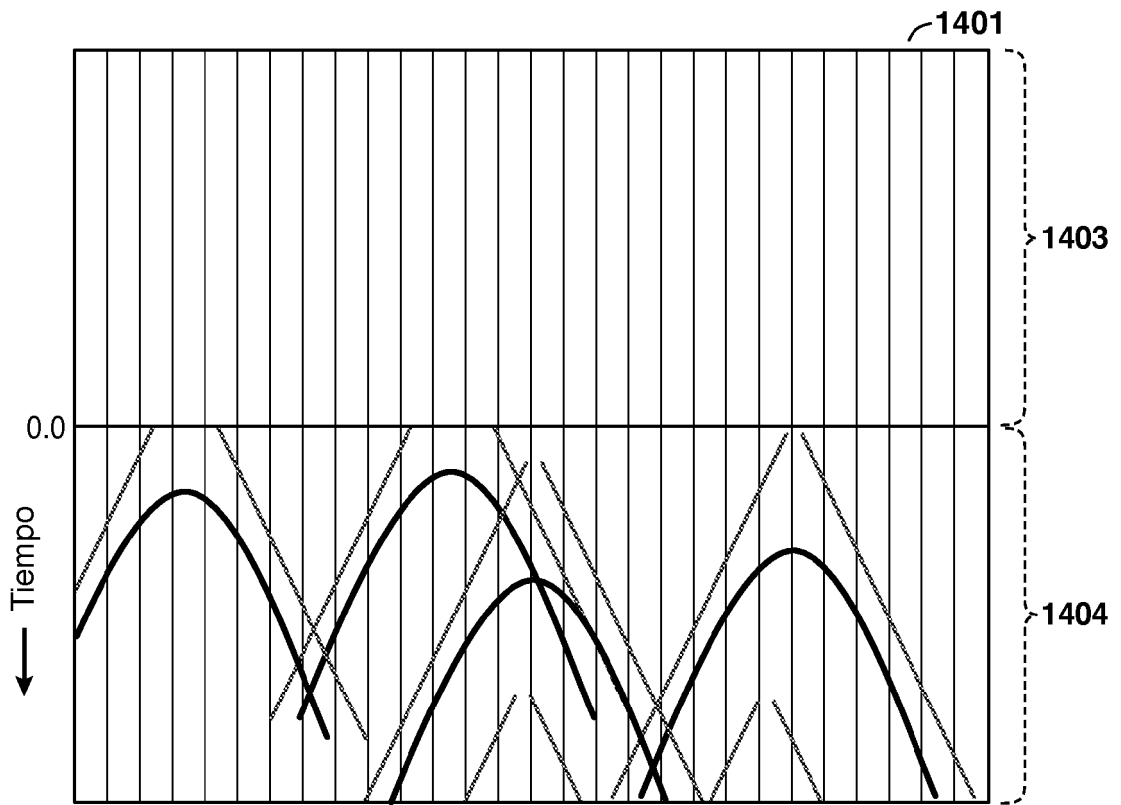
**FIG. 11**



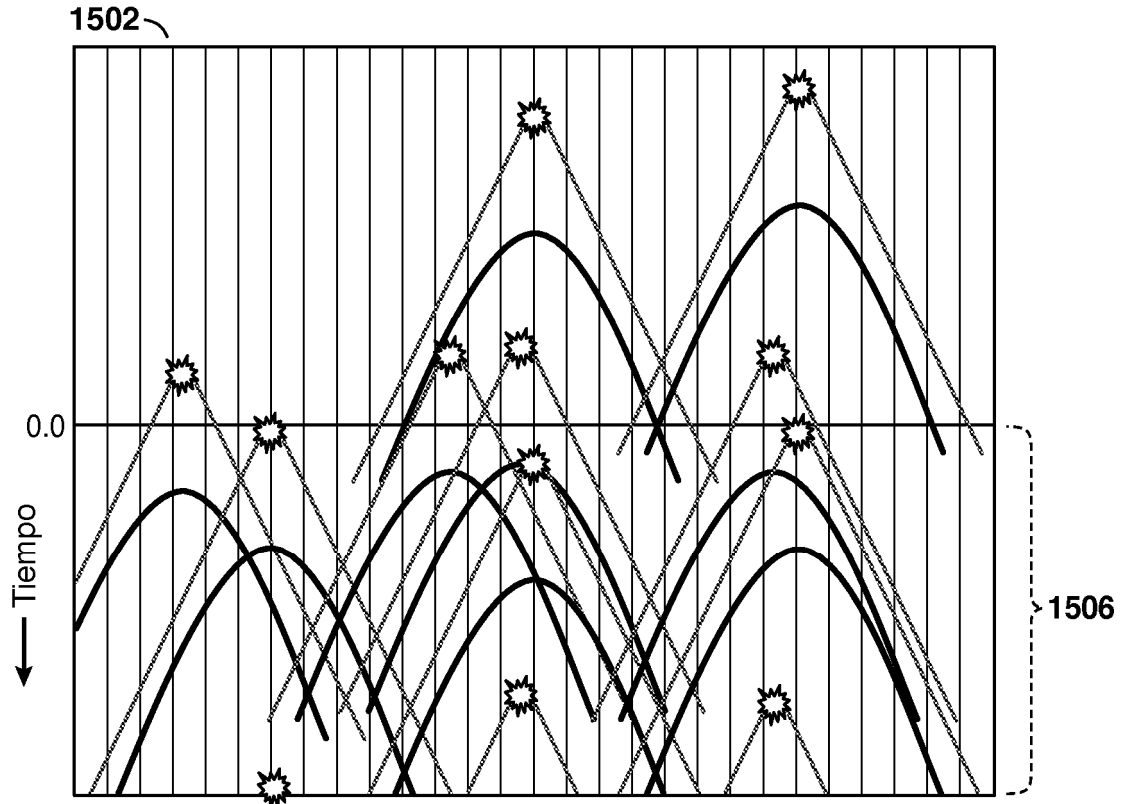
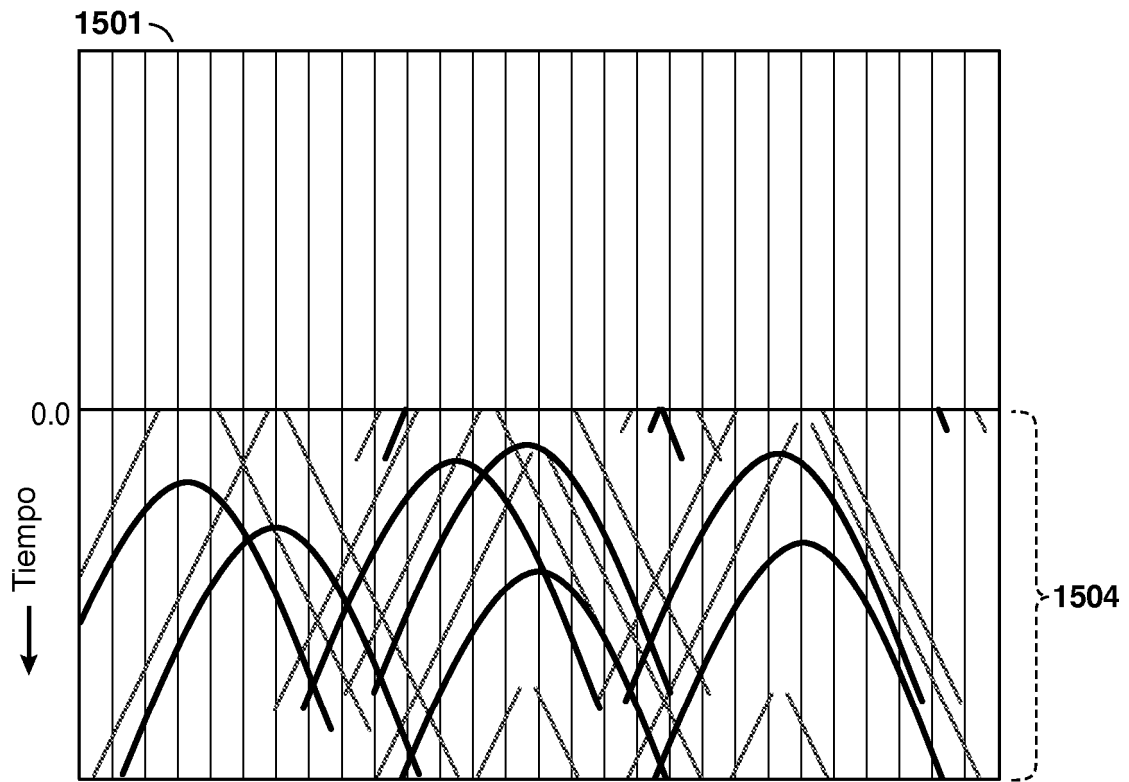
**FIG. 12**



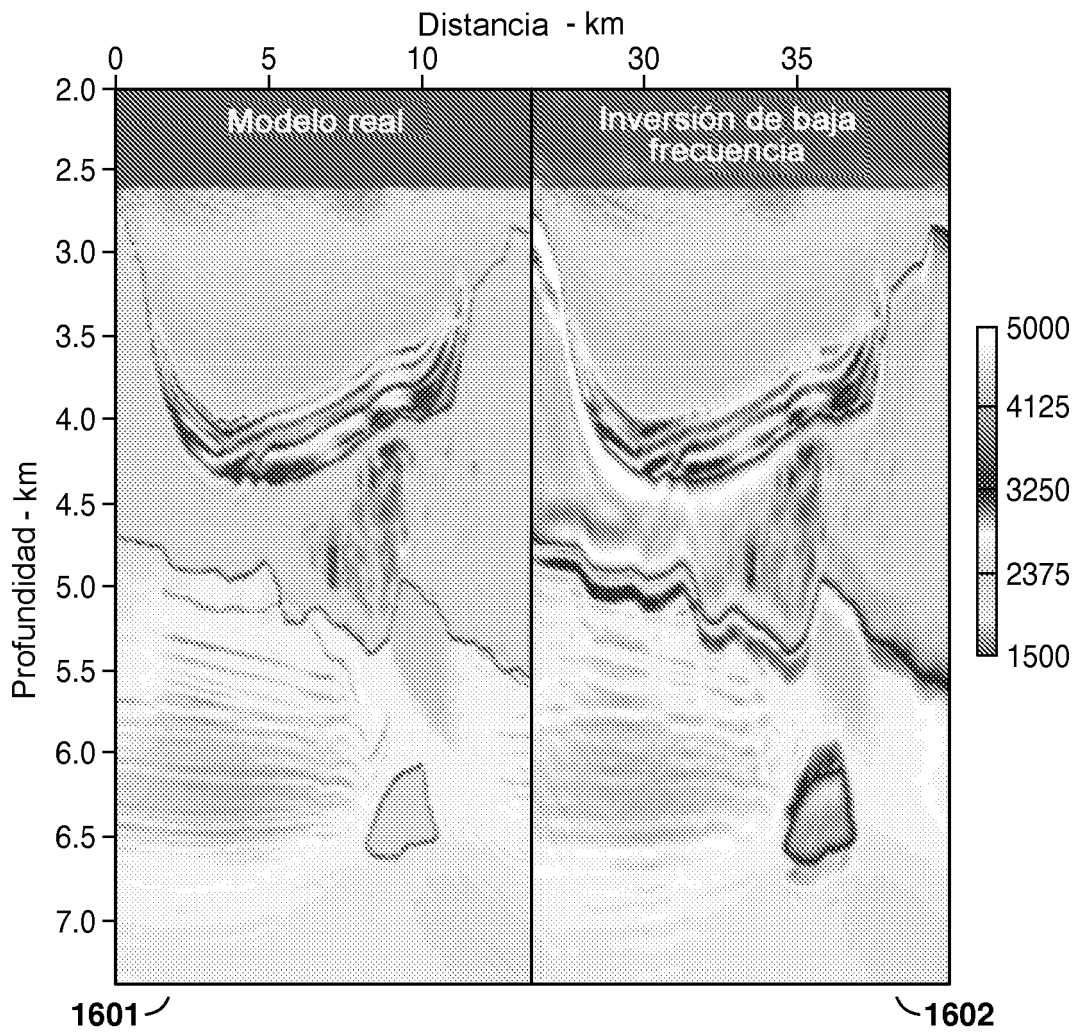
**FIG. 13**



**FIG. 14**



**FIG. 15**



**FIG. 16**