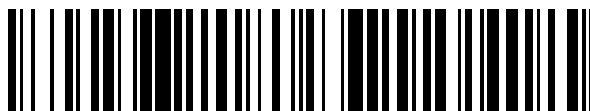


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 838 696**

51 Int. Cl.:

G01V 1/00

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **30.04.2014** **PCT/EP2014/058825**

87 Fecha y número de publicación internacional: **06.11.2014** **WO14177614**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.04.2014** **E 14720156 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.10.2020** **EP 2992359**

54 Título: **Aparato y método para la adquisición de datos sísmicos con activación simultánea de vibradores agrupados**

30 Prioridad:

01.05.2013 US 201361818002 P

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

02.07.2021

73 Titular/es:

CGG SERVICES SA (100.0%)
27, avenue Carnot
91300 Massy, FR

72 Inventor/es:

BIANCHI, THOMAS;
MEUNIER, JULIEN y
WINTER, OLIVIER

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 838 696 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

Aparato y método para la adquisición de datos sísmicos con activación simultánea de vibradores agrupados

Referencia cruzada a solicitudes relacionadas

5 Esta solicitud reivindica la prioridad y el beneficio de la Solicitud de Patente Provisional de los EE. UU. N.º. 61/818.002, presentada el 1 de mayo de 2013, para "Simultaneous Vibroseis Acquisition" ("Adquisición simultánea de vibraciones sísmicas").

Antecedentes

Campo técnico

10 Las realizaciones del tema descrito en este documento se refieren generalmente a métodos para la adquisición de datos sísmicos utilizando vibradores sísmicos agrupados que se colocan en diferentes puntos de vibración dentro de una distancia predeterminada entre sí y se activan simultáneamente.

Exposición de antecedentes

15 En el sector de la industria del petróleo y del gas en particular, las prospecciones sísmicas se utilizan comúnmente para buscar y evaluar depósitos de hidrocarburos subterráneos. Las prospecciones sísmicas son métodos de exploración que recopilan y registran datos relacionados con los reflejos de las ondas sísmicas procedentes de las interfaces entre las capas geológicas. Luego, los datos sísmicos se utilizan para crear modelos detallados de la estructura geológica subyacente.

20 La Figura 1 muestra esquemáticamente un sistema 100 de prospección sísmica terrestre para exploración sísmica en un entorno terrestre. El sistema 100 incluye una fuente 110 (por ejemplo, una fuente vibratoria) que genera ondas sísmicas, receptores 120 (por ejemplo, geófonos) para detectar las reflexiones sísmicas y un registrador 130. El registrador 130 está configurado para registrar señales eléctricas o datos sísmicos resultantes del muestreo de señales eléctricas generadas por los receptores 120 al detectar reflexiones sísmicas. Para realizar la prospección sísmica, la fuente 110, los receptores 120 y el registrador 130 se colocan en la superficie 150 del terreno. Sin embargo, la fuente 110 y el registrador 130, que se transportan en camiones, se pueden reposicionar, mientras que los receptores 120 están normalmente dispuestos sobre la estructura geológica inspeccionada a lo largo de las líneas del receptor.

En funcionamiento, la fuente 110 genera ondas sísmicas que pueden incluir ondas superficiales 140 y ondas corporales 160 que pueden reflejarse parcialmente en una interfaz 170 entre dos capas geológicas dentro de las cuales las ondas sísmicas se propagan con diferentes velocidades. Cada receptor 120 recibe el campo de ondas completo (es decir, ondas superficiales y corporales) y lo convierte en una señal eléctrica.

30 La fuente 110 puede ser una fuente vibratoria. Las fuentes vibratorias se activan en barridos que duran generalmente entre 2 y 60 segundos, tiempo durante el cual las fuentes vibratorias generan ondas sísmicas cuyas frecuencias varían en un intervalo determinado (por ejemplo, 2-200 Hz). Los receptores 120 registran datos en un período durante y después de que finalice el tiempo de barrido. Este período posterior al tiempo de barrido se conoce como tiempo de escucha. Durante el tiempo de escucha, la fuente 110 se puede mover desde una ubicación a la siguiente de acuerdo con un plan de prospección predeterminado. Los lugares donde se activan las fuentes sísmicas se conocen como puntos de vibración.

40 La Figura 2 ilustra un plan de prospección terrestre convencional. Los receptores sísmicos 210 (sólo unos pocos están etiquetados) están dispuestos a lo largo de las líneas 220, 224, 226 de receptores. Los receptores sísmicos individuales pueden desplegarse a lo largo de las líneas de los receptores a intervalos sustancialmente iguales, por ejemplo, de aproximadamente 25 m. La distancia entre líneas de los receptores adyacentes (por ejemplo, 220 a 224 o 224 a 226) puede ser, por ejemplo, de aproximadamente 200 m. La disposición del receptor ilustrada en la Figura 2 se puede lograr cuando el área inspeccionada permite tal disposición. Sin embargo, en la práctica, las líneas pueden no ser líneas rectas paralelas.

45 Los camiones que transportan fuentes sísmicas 230-241 se mueven a lo largo de las líneas de disparo SL, deteniéndose en sucesivos puntos de vibración. La Figura 2 ilustra una cuadrícula de puntos de vibración en las intersecciones de las líneas de disparo SL (paralelas a las líneas 220, 224, 226 de los receptores) y las líneas SN perpendiculares a las líneas de disparo SL. Una distancia entre líneas de tiro adyacentes puede ser de aproximadamente 25 m, y la distancia entre líneas SN puede ser de aproximadamente 50 m. Los camiones pueden usar equipo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para posicionar las fuentes sísmicas en los puntos de vibración de acuerdo con el plan de prospección. Después de que una fuente genera ondas sísmicas de acuerdo con un barrido predeterminado en un punto de vibración, el camión se mueve al siguiente punto de vibración. Suponiendo que las fuentes en los camiones 230-241 se activan una tras otra, un camión tiene aproximadamente ¼ minutos para moverse a un nuevo punto de vibración. Al menos una fuente está lista para ser activada en un punto de vibración cuando finaliza el tiempo de escucha de un barrido anterior.

Un plan de disparo incluye una gran cantidad de puntos de vibración para adquirir la información necesaria para llegar a conclusiones relacionadas con la presencia y ubicación de depósitos de hidrocarburos subterráneos. Incluso si el tiempo combinado de barrido y escucha para cada uno de los puntos de vibración es inferior a 30 s, la adquisición de datos sísmicos para todos los puntos de vibración en un plan de prospección típico lleva mucho tiempo, lo cual es costoso en términos de equipo y personal. Mientras tanto, existe un deseo permanente de aumentar la densidad de los puntos de vibración para lograr mejores imágenes de las estructuras subterráneas exploradas. Por lo tanto, aumentar la productividad es un esfuerzo continuo.

Un método para aumentar la productividad de la adquisición de datos sísmicos conocido como "deslizamiento-barrido" se describe en la publicación, Wams, J. y Rozemond J. (1998), "Recent Developments in 3-D acquisition using vibroseis in Oman" ("Desarrollos recientes en adquisición en 3D utilizando vibraciones sísmicas en Oman"), Leading Edge 17 No. 8, págs. 1053-1063. Según el método de deslizamiento-barrido, un barrido siguiente comienza antes del final del tiempo de escucha relacionado con un barrido anterior. El intervalo de tiempo entre barridos sucesivos se conoce como tiempo de deslizamiento. Sin embargo, para poder separar los datos sísmicos correspondientes a los diferentes barridos, el tiempo de deslizamiento está limitado por el requisito de evitar la superposición de energía armónica generada durante barridos sucesivos. Por ejemplo, utilizando el método de deslizamiento-barrido para un tiempo de deslizamiento de 5 s con el plan de la Figura 2, teóricamente se puede lograr una productividad nominal de 720 puntos inspeccionados por hora (en la práctica la productividad es sólo de unos 600 puntos inspeccionados por hora). Para separar los datos sísmicos correspondientes a las vibraciones sísmicas producidas por diferentes fuentes, los métodos descritos en la Patente de los EE. UU., N.º 7.050.356 solicitan adquirir datos barriendo repetidamente en los mismos puntos de vibración con diferentes tiempos de deslizamiento. En este caso, parece que la productividad ganada al iniciar un siguiente barrido antes de que finalice un barrido anterior se compensa repitiendo el barrido varias veces.

Se han desarrollado algunos algoritmos de reducción de ruido armónico, por ejemplo, como se describe en la Patente de los EE. UU., N.º 6.603.707 y la Patente de los EE. UU., N.º 8.451.686. El uso de estos algoritmos de reducción de ruido armónico ha permitido que la productividad aumente aún más.

Otra técnica para aumentar la productividad de la adquisición de datos sísmicos conocida como "barrido simultáneo independiente" (ISS) se describe en la Publicación de Solicitud de Patente de los EE. UU., N.º 2012/0290213. El ISS utiliza métodos estadísticos para eliminar la interferencia debida a barridos superpuestos no sincronizados de fuentes ubicadas a grandes distancias entre ellas (por ejemplo, 2 km).

Sin embargo, como la separación de ISS sigue siendo imperfecta para un gran número de fuentes poco espaciadas, sigue siendo deseable mejorar la separación estadística de fuentes utilizando esquemas de adquisición especialmente diseñados para la separación.

Resumen

Para aumentar la productividad de la adquisición de datos, las fuentes vibratorias ubicadas de forma próxima (por ejemplo, a menos de 200 m de distancia) se activan simultáneamente para generar vibraciones sísmicas codificadas para permitir la separación de datos sísmicos individuales relacionados con las vibraciones sísmicas producidas por cada una de las fuentes activadas simultáneamente.

Según un método para la exploración sísmica de una formación subterránea está propuesta en la reivindicación 1.

El documento US 2012/008462 describe un método para la exploración sísmica de una formación subterránea, que comprende las operaciones de desplegar receptores sísmicos a lo largo de líneas de receptores sobre la formación subterránea explorada, agrupar las fuentes vibratorias en grupos; y activar los grupos cíclicamente, de modo que, en cada ciclo, las fuentes vibratorias dentro de uno de los grupos vibren durante un tiempo de barrido sustancialmente igual. El documento US 4.715.020 describe un método para realizar una pluralidad de prospecciones vibratorias simultáneamente, en el que cada fuente vibratoria transmite sucesivamente la misma señal, excepto en que una fase desplazada de la señal es desplazada selectivamente para transmisión sucesiva, siendo seleccionada la fase desplazada para permitir que la señal procedente de cada una de las fuentes vibratorias sea recuperada por un procesamiento de datos.

Breve descripción de los dibujos

Los dibujos adjuntos, que se incorporan y constituyen una parte de la memoria, ilustran una o más realizaciones y, junto con la descripción, explican estas realizaciones. En los dibujos:

La figura 1 es un diagrama esquemático de un sistema de prospección sísmica terrestre;

La figura 2 ilustra un plan de prospección terrestre convencional;

La figura 3 ilustra un plan de prospección terrestre según una realización;

La figura 4 es un diagrama de flujo de un método para la exploración sísmica de una formación subterránea según una realización;

La figura 5 ilustra el cambio de fase de un ciclo a otro, según una realización ejemplar;

La Figura 6 es un diagrama de flujo de un método para la exploración sísmica de una formación subterránea según otra realización; y

La figura 7 es un diagrama de bloques de un controlador según una realización.

5 Descripción detallada

La siguiente descripción de las realizaciones ejemplares se refiere a los dibujos adjuntos. Los mismos números de referencia en diferentes dibujos identifican elementos iguales o similares. La siguiente descripción detallada no limita la invención. En cambio, el alcance de la invención está definido por las reivindicaciones adjuntas. Las siguientes realizaciones se analizan utilizando la terminología de un sistema de adquisición de datos terrestres. Sin embargo, métodos similares también pueden ser pertinentes para la adquisición de datos sísmicos marinos y para la adquisición y procesamiento de datos basados en enfoques similares, tales como la medición de respuestas electromagnéticas o ultrasónicas de una estructura desconocida a excitaciones inyectadas en la estructura en diferentes ubicaciones.

La referencia a lo largo de la memoria a "una realización (concreta)" o "una realización (genérica)" significa que un rasgo, estructura o característica particular descrito en relación con una realización se incluye en al menos una realización del objeto expuesto. Así, la aparición de frases "en una realización (concreta)" o "en una realización (genérica)" en varios lugares a lo largo de la memoria no se refiere necesariamente a la misma realización. Además, los rasgos, estructuras o características particulares pueden combinarse de cualquier manera adecuada en una o más realizaciones.

Para aumentar la productividad, las fuentes vibratorias se agrupan en grupos de dos o más que emiten simultáneamente (es decir, sustancialmente durante el mismo tiempo de barrido). Las fuentes vibratorias en un grupo comienzan a barrer al mismo tiempo excepto, en algunas realizaciones, para pequeñas diferencias de tiempo estático (de 50 a 1000 ms) utilizadas para codificar como se explica a continuación (estas pequeñas diferencias de tiempo estático son sustancialmente menores que el tiempo de barrido y constantes a lo largo de una traza). Las vibraciones sísmicas emitidas durante este tiempo de barrido están codificadas para permitir la separación de los datos sísmicos individuales correspondientes a la vibración sísmica emitida por cada una de las fuentes vibratorias en el mismo grupo. A diferencia de los métodos de ISS en los que fuentes distantes producen barridos superpuestos no sincronizados, de acuerdo con varias realizaciones, en estas realizaciones, las fuentes vibratorias están físicamente cerca (por ejemplo, a menos de 200 m entre sí) y están correlacionadas en el tiempo.

La figura 3 ilustra un plan de prospección terrestre según una realización. Los receptores sísmicos 320 (sólo unos pocos están etiquetados) están dispuestos a lo largo de las líneas 322, 324, 326 de receptores. Los receptores sísmicos individuales pueden desplegarse a lo largo de las líneas de receptores a intervalos sustancialmente iguales de aproximadamente 25 m. La distancia entre líneas receptoras adyacentes (por ejemplo, 322 a 324 o 324 a 326) puede ser de aproximadamente 200 m.

Los camiones que transportan fuentes sísmicas 330-341 se mueven a lo largo de las líneas de disparo SL para colocar y activar las fuentes en puntos de vibración sucesivos, una cuadrícula de puntos de vibración resulta de la intersección de las líneas de disparo SL (paralelas a las líneas 322, 324, 326 de receptores) con las líneas SN perpendiculares a las líneas de disparo SL. Dado que, para la realización ilustrada en la Figura 3, se espera que la productividad sea el doble de la productividad convencional, una distancia entre líneas de disparo adyacentes es de 25 m y una distancia entre líneas SN también es de 25 m (es decir, una mayor productividad aumenta la densidad de puntos de vibración para el mismo tiempo de prospección). Los camiones pueden usar equipo del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para posicionar las fuentes sísmicas en posiciones de vibración de acuerdo con el plan de prospección. Después de que una fuente genera ondas sísmicas de acuerdo con un barrido predeterminado en una posición de vibración, el camión se mueve a la siguiente posición de vibración.

Las fuentes vibratorias 330-341 están agrupadas (es decir, grupos 350, 352, 354, 356, 358, 360) de modo que las fuentes en la misma agrupación se activan simultáneamente (es decir, durante sustancialmente el mismo tiempo de barrido). El grupo 350 incluye las fuentes 330 y 331, el grupo 352 incluye las fuentes 332 y 333, etc. En la Figura 3, en cada grupo, solo hay dos fuentes vibratorias dispuestas en diferentes líneas de disparo adyacentes. Sin embargo, esta disposición es una ilustración y no una limitación. Un grupo puede incluir más de dos fuentes vibratorias que pueden estar dispuestas de manera diferente (por ejemplo, en la misma línea de disparo). Las fuentes agrupadas se colocan cerca una de la otra cuando vibran, preferiblemente tan cerca como dos puntos de vibración adyacentes (por ejemplo, 25 m).

Los grupos se activan uno tras otro, cíclicamente, de acuerdo con una secuencia predeterminada o la activación de la fuente puede ser coordinada por un controlador 370 (en este caso, las fuentes no tienen que activarse cíclicamente). Las fuentes de al menos un grupo están listas para activarse antes de que finalice el tiempo de escucha correspondiente a un grupo previamente activado. Las fuentes pueden permanecer agrupadas a lo largo de la prospección. Sin embargo, los cambios en esta disposición pueden ser provocados por eventos de relieve u ocasionales (por ejemplo, un mal funcionamiento de la fuente o fuentes adicionales).

La Figura 4 ilustra un método 400 para la exploración sísmica de una formación del subsuelo, según una realización. El método 400 incluye el despliegue de receptores sísmicos (por ejemplo, 320) a lo largo de líneas de receptores (por ejemplo, 322, 324, 326) sobre la formación subterránea explorada, en 410. La operación 410 se puede realizar en preparación para una prospección sísmica. A veces, los receptores se dejan en el terreno durante meses o incluso años entre prospecciones sucesivas de un área objetivo.

El método 400 incluye además agrupar fuentes vibratorias en grupos, en 420. En la Figura 3, cada grupo (por ejemplo, 350) incluye una pluralidad de fuentes vibratorias (por ejemplo, el grupo 350 incluye una primera fuente vibratoria 330 y una segunda fuente vibratoria 331) que se colocan dentro de una distancia predeterminada una de otra (por ejemplo, 25 m). Sin embargo, en una visión más amplia, al menos uno de los grupos incluye varias fuentes vibratorias. La distancia predeterminada es menor que una distancia promedio entre líneas de receptores adyacentes, de modo que los mismos receptores detectan reflejos de vibración sísmica debida a las fuentes vibratorias en el mismo grupo.

El método 400 incluye además activar los grupos cíclicamente, en 430. Durante un ciclo, cada grupo se activa una vez. Las fuentes vibratorias pertenecientes a un grupo vibran durante sustancialmente el mismo tiempo de barrido (es decir, como se expuso anteriormente, las diferencias estáticas de corto período mucho más pequeñas que el tiempo de barrido se consideran insignificantes). Las vibraciones sísmicas producidas por las fuentes vibratorias en el mismo grupo están codificadas para permitir la separación de los datos sísmicos registrados en subconjuntos, correspondiendo cada subconjunto a una o más de las vibraciones sísmicas.

Las vibraciones sísmicas pueden estar codificadas por una de entre diferencias estáticas de corto período, diferentes fases constantes, una combinación de diferencias de tiempo y fase, etc. Por ejemplo, considerando que las vibraciones son sinusoidales, las primeras vibraciones Y_1 correspondientes a una primera fuente y segundas vibraciones Y_2 correspondientes a una segunda fuente (donde Y_1 e Y_2 pueden ser presión o desplazamiento transversal) pueden escribirse como:

$$Y_1(t) = A_1(t) \sin(2\pi f_1(t)(t - t_{01}) + \varphi_1) \quad (1)$$

y

$$Y_2(t) = A_2(t) \sin(2\pi f_2(t)(t - t_{02}) + \varphi_2) \quad (2)$$

Donde $A_1(t)$ y $A_2(t)$ son la amplitud máxima de la primera y segunda vibraciones, respectivamente, $f_1(t)$ y $f_2(t)$ representan barridos individuales (es decir, variación de frecuencia con el tiempo para la fuente respectiva), t es el tiempo, t_{01} y t_{02} son los tiempos de inicio de la primera y segunda vibraciones, respectivamente, φ_1 y φ_2 son fases iniciales (que también pueden ser función del tiempo y la frecuencia). Si los barridos de las dos fuentes vibratorias son iguales, entonces $f_1(t) = f_2(t)$.

Si las primeras vibraciones sísmicas y las segundas vibraciones sísmicas se codifican mediante diferencias estáticas de corto período, significa que $t_{01} \neq t_{02}$, mientras que $f_1(t)$ puede ser igual a $f_2(t)$ y $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$.

Si las primeras vibraciones sísmicas y las segundas vibraciones sísmicas están codificadas a través de diferentes fases constantes, significa que $\varphi_1 \neq \varphi_2$ (pero φ_1 y φ_2 son constantes con el tiempo o la frecuencia) mientras que $f_1(t)$ puede ser igual a $f_2(t)$ y $t_{01} = t_{02}$. Por ejemplo, la Figura 5 ilustra las fases de origen en los ciclos sucesivos 550-554 para el grupo 350 y los ciclos sucesivos 560-568 para el grupo 352. Por tanto, como se ilustra en la Figura 5, si las vibraciones generadas por las fuentes 330 y 332 se consideran vibraciones de referencia (es decir, que tienen fases de 0°), las vibraciones generadas por las fuentes 331 y 333 tienen una fase aleatoria de $+90^\circ$ o -90° en los respectivos ciclos sucesivos. Por lo tanto, la diferencia de fase entre la primera y la segunda vibraciones sísmicas cambia de signo aleatoriamente en cada ciclo, como se ilustra en la Figura 5.

Sin embargo, en otra realización, el signo de la diferencia de fase entre la primera y la segunda vibraciones sísmicas puede alternar regularmente entre $+90^\circ$ o -90° de un ciclo al siguiente ciclo. Siempre que dos puntos vibrados adyacentes tengan una respuesta de la Tierra lo suficientemente cercana, tal esquema de rotación de fase conduce a un sistema lineal bien acondicionado de la forma: $D = \Phi^* E$, donde E contiene la respuesta de la Tierra para cada fuente, D son los grupos de disparo registrados y

$$\Phi = \exp i \frac{\pi}{180^\circ} \begin{pmatrix} 0 & 90^\circ \\ 0 & -90^\circ \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Un experto en la técnica apreciaría que la hipótesis sobre la localidad (es decir, los disparos adyacentes tienen una reflectividad cercana) probablemente se mantenga en el dominio del Radón (frecuencia, pendientes) para las transformaciones locales.

Si las primeras vibraciones sísmicas y las segundas vibraciones sísmicas se codifican mediante una combinación de diferencias de tiempo y fase, significa que $\varphi_1 = \varphi_2$ y $t_1 \neq t_2$ mientras $f_1(t)$ sea igual a $f_2(t)$

La descripción anterior analiza una realización caracterizada por agrupaciones de dos fuentes. Sin embargo, en otras realizaciones, uno o más grupos pueden tener más de dos fuentes. Por ejemplo, en una realización con grupos de tres fuentes, las fases de la fuente pueden rotar, tomando, por ejemplo, valores de

$$\begin{bmatrix} 120 & 0 & 0 \\ -120 & 0 & -120 \\ 0 & 0 & 120 \end{bmatrix}$$

- 5 para tres ubicaciones de disparo consecutivas (es decir, las fases constantes están predeterminadas según las ubicaciones de disparo geográficas). En esta matriz, cada línea corresponde a una vibración sucesiva de las fuentes agrupadas.

Además, las Figuras 3 y 5 ilustran grupos que tienen el mismo número (2) de fuentes. Esta es una ilustración y no una limitación. Por ejemplo, una realización puede incluir agrupaciones que tengan diferentes números de fuentes y más de dos fuentes. Además, en una realización, las fuentes individuales agrupadas juntas en grupos pueden variar de un ciclo a otro (p. ej., en un ciclo, una fuente vibratoria se agrupa con una fuente vibratoria adyacente colocada a la izquierda con respecto a la dirección de movimiento de una fuente y, luego, en el siguiente ciclo, la fuente vibratoria se agrupa con una fuente adyacente colocada a la derecha en relación con la dirección de movimiento de la fuente).

Dado que la codificación permite separar (es decir, extraer de los datos sísmicos adquiridos) los primeros datos sísmicos correspondientes a las primeras vibraciones y los segundos datos sísmicos correspondientes a las segundas vibraciones sísmicas, cada fuente vibratoria se mueve desde un punto de vibración al siguiente punto de vibración durante cada ciclo (es decir, a diferencia de la patente de los EE. UU., N.º 7.050.356 donde se adquieren datos de múltiples barridos repetidos con diferentes parámetros para realizar tal separación).

Las fuentes agrupadas pueden seleccionarse para que estén lo más cerca posible entre sí. En relación con esta característica, en una realización, no se puede intercalar ninguna fuente vibratoria de un grupo entre fuentes vibratorias de cualquier otro grupo.

De manera similar al método descrito en la Patente de los EE. UU., N.º 8.451.686 para fuentes individuales, en cada ciclo, los grupos pueden activarse en uno de una serie de tiempos definidos con relación al comienzo del ciclo. Los intervalos de tiempo entre tiempos sucesivos de la serie pueden ser sustancialmente iguales. En una realización, los grupos se activan en el mismo orden en cada ciclo. En otra realización, los grupos se activan en un orden diferente en ciclos sucesivos (siempre que las fuentes en un grupo tengan tiempo para moverse a nuevos puntos de vibración antes de reactivarse en un nuevo ciclo).

Las realizaciones anteriores de activación simultánea de fuentes agrupadas que están físicamente cercanas pueden combinarse con el método de barrido de deslizamiento. Por tanto, en una realización, al menos uno de los grupos comienza a vibrar antes del final del tiempo de escucha de los receptores sísmicos para un grupo previamente activado. En este caso, los datos sísmicos adquiridos pueden procesarse primero para extraer datos sísmicos de grupos individuales. Por ejemplo, se puede usar un algoritmo similar al descrito en la Patente de los EE. UU., N.º 8.451.686 (HPVA) para extraer los datos sísmicos de grupos individuales. Los datos sísmicos de grupos individuales resultantes luego se procesan para separar los primeros datos y los segundos datos.

En una ejecución de prueba utilizando el plan de prospección en la Figura 3 y un tiempo de deslizamiento de 5 s, la productividad nominal de 1.440 puntos inspeccionados por hora fue teóricamente posible, y se logró una productividad de más de 1.000 puntos inspeccionados por hora.

Por último, extender el espectro de frecuencia de barrido hacia bajas frecuencias (inferiores a 10 Hz) se ha considerado ventajoso. Sin embargo, para poder separar esas bajas frecuencias, los métodos se limitan al uso de grandes desplazamientos de tiempo estático, que pueden ser contraproducentes. A esas frecuencias, dos fuentes vibratorias ubicadas cerca (es decir, a una distancia menor que, por ejemplo, ¼ de la longitud de onda de las vibraciones de baja frecuencia) pueden emitir simultáneamente y en fase de manera que tengan el efecto de una sola fuente.

Según otra realización, un barrido de las fuentes vibratorias agrupadas incluye (A) un primer período durante el cual la primera fuente vibratoria y la segunda fuente vibratoria en el mismo grupo tienen la misma fase y vibran con bajas frecuencias menores o iguales a una frecuencia umbral, y (B) un segundo período durante el cual la primera fuente vibratoria y la segunda fuente vibratoria tienen diferentes fases y vibran con frecuencias superiores a la frecuencia umbral. Las vibraciones sísmicas producidas por diferentes fuentes sísmicas agrupadas (que emiten simultáneamente) se codifican luego para permitir la separación de los datos sísmicos correspondientes a vibraciones sísmicas individuales a frecuencias superiores a la frecuencia umbral. La ventaja de esta realización es que se recupera más señal de baja frecuencia. La relación señal a ruido de las frecuencias por debajo del umbral aumentará en un factor igual a la raíz cuadrada del número de fuentes en el grupo, en comparación con las realizaciones anteriores donde la fase y los desplazamientos no son iguales para todo el barrido.

Durante el segundo período, las vibraciones sísmicas emitidas por diferentes fuentes agrupadas pueden estar codificadas por una de entre diferencias estáticas de corto período, diferentes fases constantes y una combinación de diferencias de tiempo y fase. En una realización, durante el segundo período, las vibraciones sísmicas emitidas por diferentes fuentes

agrupadas tienen diferentes fases constantes, pero las diferencias de fase pueden cambiar aleatoriamente en cada ciclo de disparo.

La Figura 6 ilustra un método 600 para la exploración sísmica de una formación subterránea según otra realización. El método 600 incluye la activación simultánea de fuentes vibratorias colocadas a menos de 30 m entre sí, en 610. Las vibraciones sísmicas individuales producidas por cada una de las fuentes vibratorias se codifican para permitir la separación de los datos sísmicos individuales correspondientes a las vibraciones sísmicas individuales. Las vibraciones sísmicas individuales son codificadas por una de entre diferencias estáticas de corto período, diferentes fases constantes y una combinación de diferencias de tiempo y fase. El método 600 incluye además la adquisición de datos sísmicos en 620.

Volviendo ahora a la Figura 3, el controlador 370, que está configurado para agrupar las fuentes vibratorias y activarlas, puede ser una combinación de software y hardware como se ilustra en la Figura 7. Se puede utilizar hardware, firmware, software o una combinación de los mismos para realizar las diversas etapas y operaciones. El controlador 700, que también puede ser transportado por un camión, puede incluir un servidor 701 que tiene una unidad central de procesamiento (CPU) 702 acoplada a una memoria de acceso aleatorio (RAM) 704 y a una memoria de sólo lectura (ROM) 706. La ROM 706 también puede ser otro tipo de medio de almacenamiento para almacenar programas, tal como ROM programable (PROM), PROM borrable (EPROM), etc. Los métodos para agrupar y activar fuentes vibratorias de acuerdo con varias realizaciones descritas en esta sección pueden implementarse como programas de ordenador (es decir, códigos ejecutables) almacenados de manera no transitoria en la RAM 704 o en la ROM 706.

El procesador 702 puede comunicarse con otros componentes internos y externos a través de la circuitería de entrada/salida (E/S) 708 y los bus 710, para proporcionar señales de control y similares. Por ejemplo, el procesador 702 puede comunicarse con los sensores, el sistema de activador electromagnético y/o el mecanismo de presión de cada elemento fuente. El procesador 702 lleva a cabo una variedad de funciones conocidas en la técnica, según lo dictan las instrucciones de software y/o firmware. El servidor 701 también puede incluir uno o más dispositivos de almacenamiento de datos, incluidas las unidades de disco 712, las unidades de CD-ROM 714 y otro hardware capaz de leer y/o almacenar información, tal como un DVD, etc. En una realización, el software para llevar a cabo las etapas anteriormente expuestas puede almacenarse y distribuirse en un CD-ROM 716, medio extraíble 718 u otra forma de medio capaz de almacenar información. El medio de almacenamiento se puede insertar y leer en dispositivos tales como la unidad de CD-ROM 714, la unidad de disco 712, etc. El servidor 701 puede estar acoplado a un dispositivo de visualización 720, que puede ser cualquier tipo de dispositivo de visualización o pantalla de presentación conocido, tal como LCD, dispositivos de visualización de plasma, tubos de rayos catódicos (CRT), etc. El servidor 701 puede controlar el dispositivo de visualización 720 para exhibir imágenes basadas en los datos sísmicos adquiridos. Se proporciona una interfaz 722 de entrada de usuario y puede incluir uno o más mecanismos de interfaz de usuario tales como un ratón, teclado, micrófono, panel táctil, pantalla táctil, sistema de reconocimiento de voz, etc.

El servidor 701 puede acoplarse a otros dispositivos informáticos a través de una red. El servidor puede ser parte de una configuración de red más grande como en una red de área global (GAN) tal como Internet 728, que permite una conexión definitiva a las fuentes, receptores, unidad de almacenamiento de datos, etc.

Las realizaciones descritas proporcionan métodos de adquisición de datos sísmicos según los cuales se activan simultáneamente fuentes agrupadas (es decir, físicamente cercanas). Debe entenderse que esta descripción no pretende limitar la invención. Por el contrario, las realizaciones ejemplares están destinadas a cubrir alternativas, y modificaciones que están incluidas en el espíritu y alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas. Además, en la descripción detallada de realizaciones ejemplares, se establecen numerosos detalles específicos para proporcionar una comprensión completa de la invención reivindicada. Sin embargo, un experto en la técnica comprenderá que se pueden poner en práctica varias realizaciones sin tales detalles específicos.

La descripción escrita usa ejemplos del tema expuesto para permitir que cualquier persona experta en la técnica ponga en práctica el mismo, incluyendo la fabricación y uso de los dispositivos o sistemas descritos y la realización de cualquiera de los métodos descritos. El alcance patentable del tema está definido por las reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

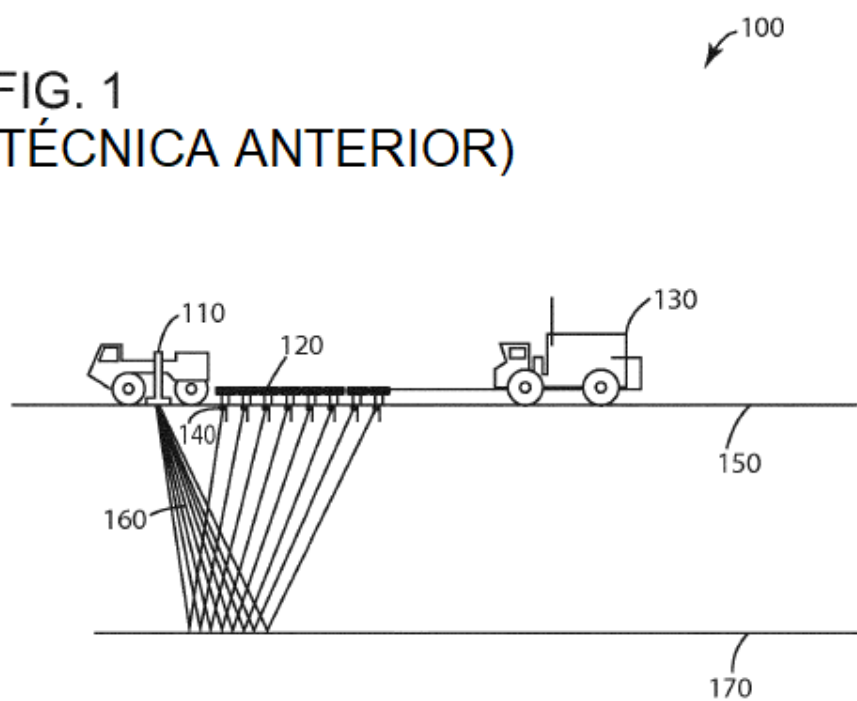
1. Un método (400) para la exploración sísmica de una formación subterránea, comprendiendo el método:
desplegar (410) receptores sísmicos (320) a lo largo de líneas (322, 324, 326) de receptores sobre la formación subterránea explorada;
- 5 agrupar (420) fuentes vibratorias (330-341) en grupos (350-360); y
activar (430) los grupos cíclicamente, de modo que, en cada ciclo, las fuentes vibratorias dentro de uno de los grupos vibren durante un tiempo de barrido sustancialmente igual
caracterizado por que:
las líneas de receptores son adyacentes y están separadas por una distancia media,
- 10 al menos uno de los grupos incluye varias fuentes vibratorias que están colocadas a menos de una distancia predeterminada entre sí mientras vibran, siendo dicha distancia predeterminada menor que dicha distancia media,
y porque las vibraciones generadas por las fuentes vibratorias pertenecientes a dicho al menos uno de los grupos se codifican para permitir la separación de datos sísmicos registrados en subconjuntos correspondientes a cada una de las fuentes vibratorias pertenecientes a dicho al menos uno de los grupos.
- 15 2. El método de la reivindicación 1, en el que cada una de las fuentes vibratorias se mueve desde un punto de vibración a un siguiente punto de vibración durante cada ciclo.
3. El método de la reivindicación 1, en el que las vibraciones de las fuentes vibratorias pertenecientes a dicho al menos uno de los grupos están codificadas por una de entre diferencias estáticas de corto período, diferentes fases constantes y una combinación de diferencias de tiempo y fase.
- 20 4. El método de la reivindicación 1, en el que las vibraciones de las fuentes vibratorias pertenecientes a dicho al menos uno de los grupos tienen fases constantes predeterminadas según las ubicaciones geográficas de disparo.
5. El método de la reivindicación 1, en el que las fuentes vibratorias pertenecientes a dicho al menos uno de los grupos vibran de acuerdo con un mismo patrón de barrido.
- 25 6. El método de la reivindicación 1, en el que ninguna fuente vibratoria perteneciente a dicho al menos uno de los grupos está intercalada entre fuentes vibratorias de cualquier otro de los grupos.
7. El método de la reivindicación 1, que además comprende:
adquirir los datos sísmicos registrados utilizando los receptores sísmicos; y
separar los datos sísmicos registrados en subconjuntos de modo que cada subconjunto corresponda a una de las fuentes vibratorias.
- 30 8. El método de la reivindicación 1, en el que los grupos se activan en el mismo orden en cada ciclo.
9. El método de la reivindicación 1, en el que al menos uno de los grupos comienza a vibrar antes de que finalice un tiempo de escucha correspondiente a un grupo previamente activado.
10. El método de la reivindicación 1 en el que los grupos son activados cíclicamente para producir vibraciones sísmicas que se propagan en la formación subterránea, de manera que, en cada ciclo, las múltiples fuentes vibratorias en el al menos uno de los grupos vibran durante sustancialmente un mismo tiempo de barrido, para generar vibraciones sísmicas codificadas para permitir, para frecuencias de vibración más elevadas que una frecuencia umbral, la separación de datos sísmicos registrados en subconjuntos correspondientes a cada una de las fuentes vibratorias.
- 35 11. El método de la reivindicación 10, en el que el tiempo de barrido incluye (A) un primer período durante el cual las diversas fuentes vibratorias vibran simultáneamente con una o más frecuencias bajas que son menores o iguales a la frecuencia umbral, y (B) un segundo período durante el cual las diversas fuentes vibratorias están codificadas y vibran con frecuencias de vibración superiores a la frecuencia umbral, y
la frecuencia umbral corresponde a una longitud de onda que excede la distancia predeterminada.
- 40 12. El método de la reivindicación 11, en el que, durante el segundo período, las diversas vibraciones sísmicas están codificadas por una de entre diferencias estáticas de corto período, diferentes fases constantes y una combinación de diferencias de tiempo y fase.
- 45

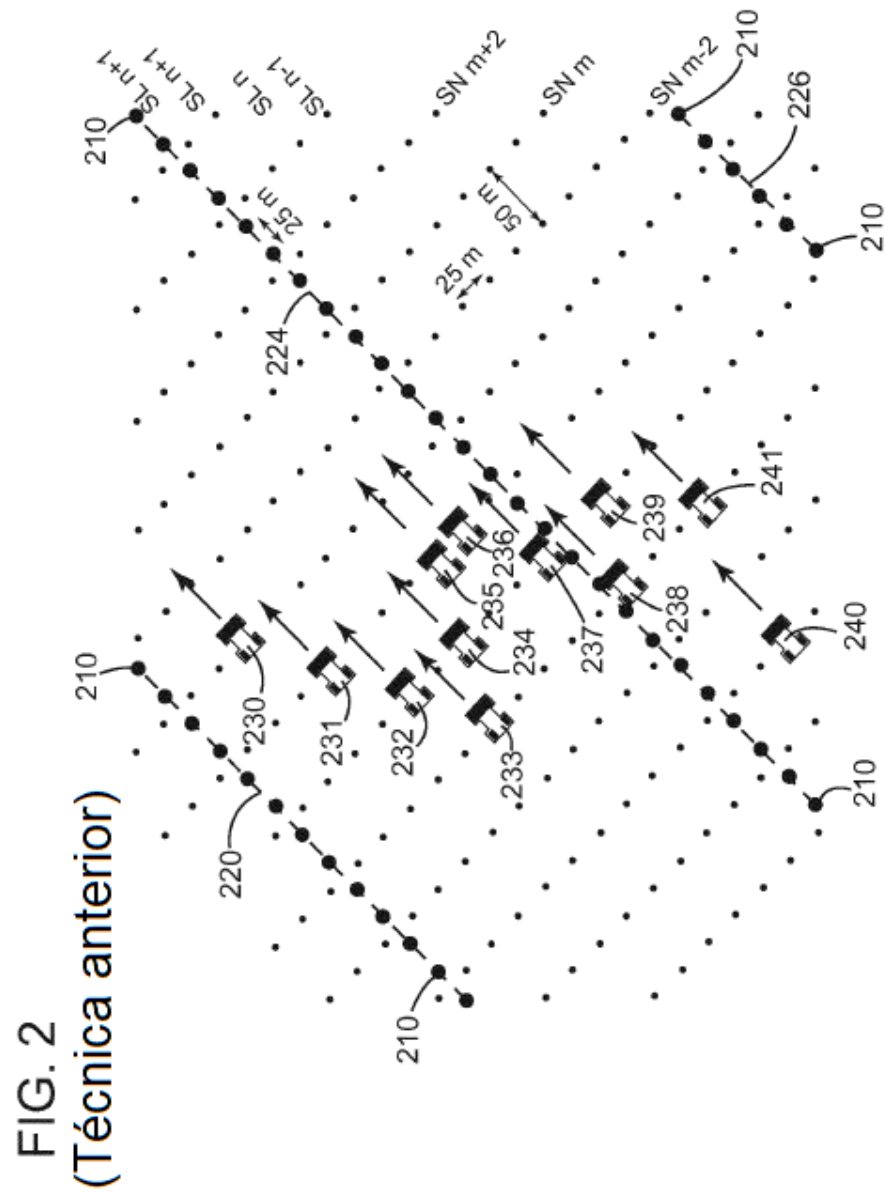
13. El método de la reivindicación 11, en el que, durante el segundo período, las vibraciones sísmicas tienen fases constantes predeterminadas según las ubicaciones geográficas de disparo.

14. El método de la reivindicación 10, en el que al menos uno de los grupos comienza a vibrar antes de un tiempo de escucha durante el cual los receptores sísmicos escuchan las reflexiones sísmicas debido a que un grupo previamente activado ha terminado.

5

FIG. 1
(TÉCNICA ANTERIOR)





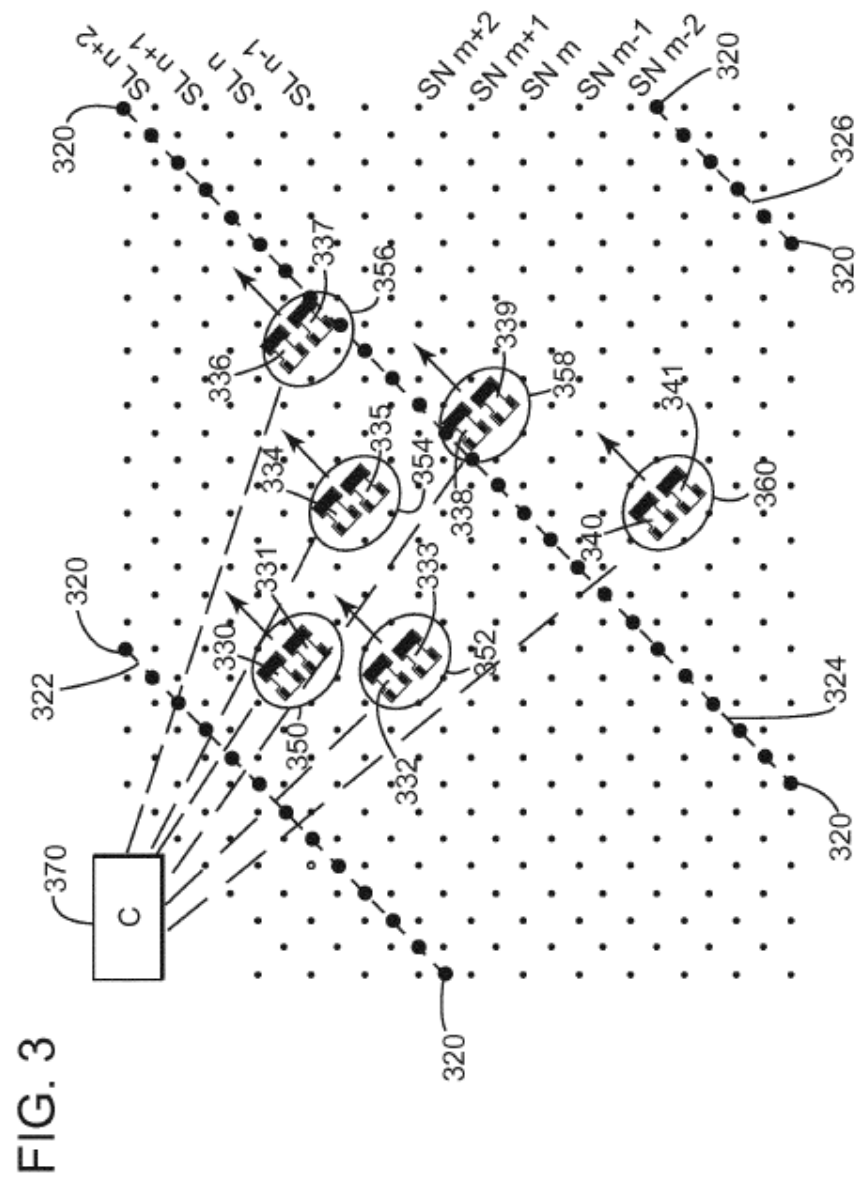


FIG. 4

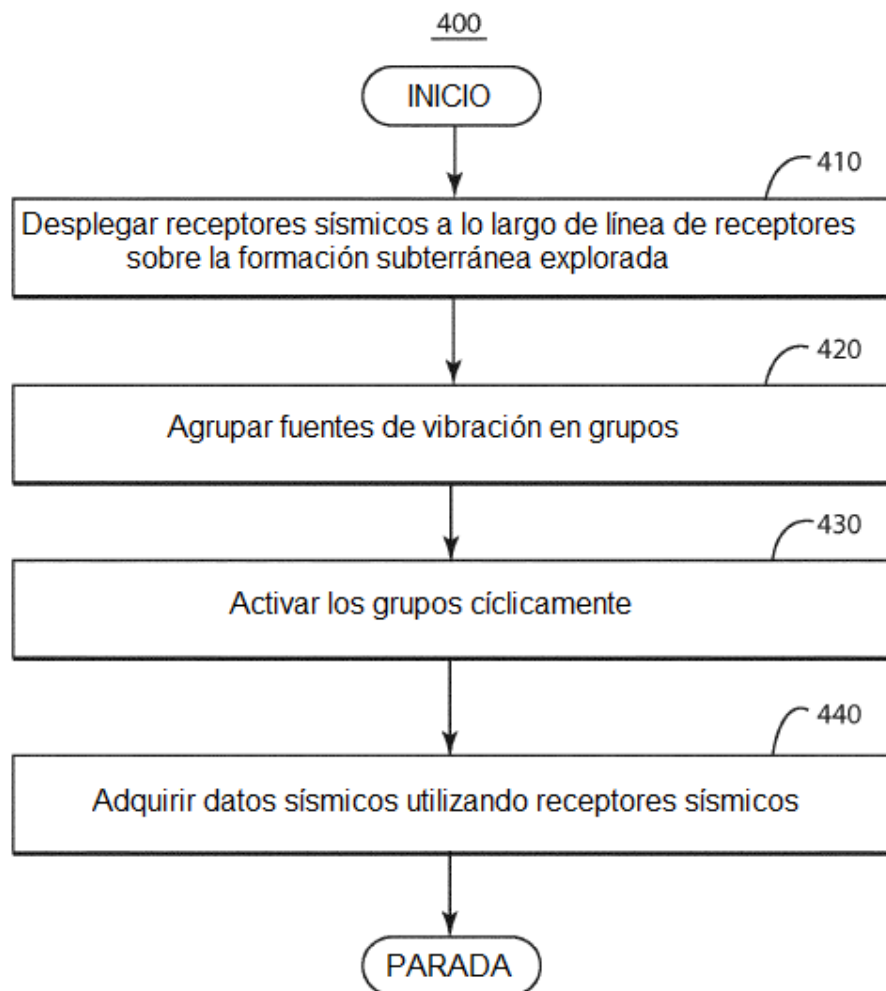


FIG. 5

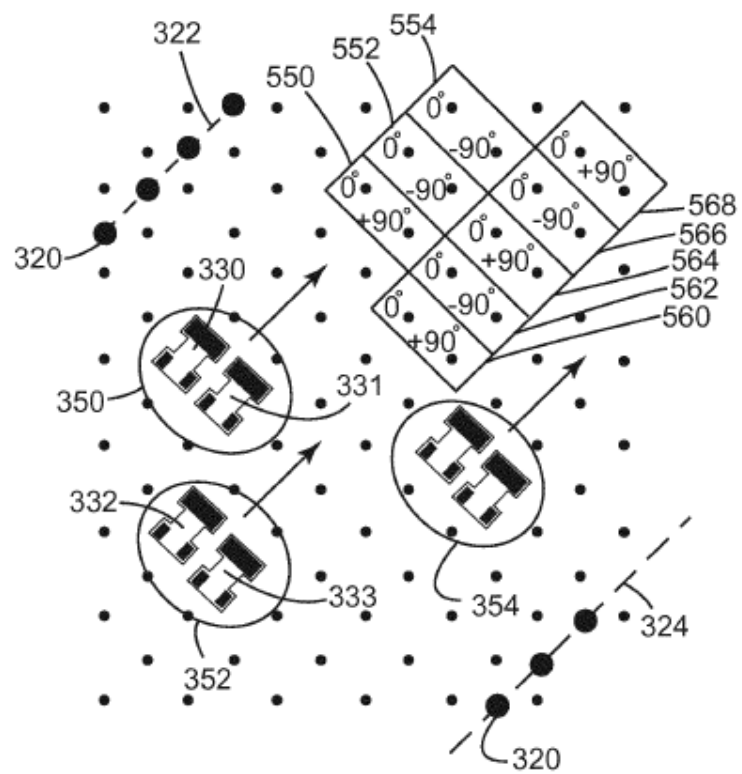


FIG. 6

