

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 865 474**

51 Int. Cl.:

G01V 3/16

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **21.04.2015** **PCT/IB2015/000797**

87 Fecha y número de publicación internacional: **29.10.2015** **WO15162493**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.04.2015** **E 15747527 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.02.2021** **EP 3134755**

54 Título: **Sistemas, métodos y medio legible por computadora para exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda**

30 Prioridad:

23.04.2014 US 201461983299 P

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

15.10.2021

73 Titular/es:

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

72 Inventor/es:

**SMIAROWSKI, ADAM;
BERRINGER, JASON y
MILES, PHILIP**

74 Agente/Representante:

LEHMANN NOVO, María Isabel

ES 2 865 474 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

Sistemas, métodos y medio legible por computadora para exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda

Referencia cruzada a solicitud relacionada

Esta solicitud reivindica el beneficio bajo 35 U.S.C. § 119(e) de la Solicitud Provisional de Estados Unidos N° de Serie 61/983.299 presentada el 23 de abril 2014.

Campo técnico

La presente divulgación se refiere, en general, a la exploración electromagnética geofísica y, más particularmente, a sistemas y métodos para medir las respuestas electromagnéticas para la exploración geofísica a través de una banda de frecuencias extremadamente amplia.

Antecedentes

Los métodos de exploración geofísica electromagnética (EM) miden la respuesta de las formaciones del subsuelo a la propagación de campos electromagnéticos generados de forma natural o artificial. Los campos electromagnéticos primarios se pueden generar pasando corriente alterna o pulsando una corriente a través de una "bobina del transmisor" que es un cable o tubo conductor de electricidad que puede tener un núcleo de aire o estar envuelto alrededor de un núcleo hecho de algún conductor eléctrico. El uso de una corriente alterna se denomina EM de dominio de frecuencia, mientras que el uso de una corriente pulsada, donde la corriente se aplica durante un período de encendido y se apaga durante un período de inactividad se denomina EM de dominio de tiempo o EM transitorio. En ambos casos, la variación en el tiempo de la corriente que pasa a través de la bobina del transmisor produce una respuesta en una gran vecindad alrededor de la bobina del transmisor. Una bobina del transmisor puede ser una bobina pequeña formada por muchas vueltas de cable o un bucle grande de cable con múltiples vueltas. Las formaciones del subsuelo responden a la propagación de campos electromagnéticos primarios que varían en el tiempo con la generación de corrientes eléctricas secundarias mediante el proceso de inducción electromagnética (que es la producción de un voltaje a través de un conductor cuando se expone a un campo magnético variable) dando lugar a campos electromagnéticos secundarios. Los campos electromagnéticos primarios y secundarios pueden detectarse por un "receptor". Un receptor puede medir la variación en el tiempo del campo magnético de estas corrientes (por ejemplo, un receptor de la bobina que mide dB/dt) o puede medir el campo magnético en sí mismo (un sensor de campo B). De aquí en adelante, los términos "bobina del transmisor" y "transmisor" pueden utilizarse indistintamente y los términos "bobina del receptor" y "receptor" pueden utilizarse indistintamente.

El campo electromagnético primario se desplaza desde la bobina del transmisor a la bobina del receptor a través de rutas tanto por encima como por debajo de la superficie de la tierra. En presencia de un cuerpo conductor o material terrestre tales como suelos, rocas, minerales u otro material conductor, el componente magnético del campo electromagnético que penetra en el subsuelo induce corrientes que varían en el tiempo, o corrientes parásitas, que fluyen en el cuerpo conductor. Las corrientes parásitas generan su propio campo electromagnético (denominado campo EM secundario) que viaja al receptor. Entonces, el receptor experimenta una respuesta a la resultante de los campos electromagnéticos primarios y secundarios que llegan, de modo que la respuesta difiere tanto en fase como en amplitud de la respuesta a solo el campo electromagnético primario. Las diferencias entre los campos electromagnéticos transmitidos y recibidos revelan la presencia del cuerpo conductor o material conductor y proporcionan información acerca de la geometría y las propiedades eléctricas del cuerpo conductor.

La solicitud de patente JP H04 70588 da a conocer un dispositivo para medir puntos poco profundos con un alto poder de resolución y permitir el levantamiento de puntos profundos en un escaneo de una sola vez mediante el levantamiento con múltiples transmisores de diferentes frecuencias.

La solicitud de patente US 3 936 728 da a conocer un método y medios para investigar la distribución de la conductividad eléctrica en el suelo.

La solicitud de patente WO 2004/072684 se refiere a un equipo de medición y un método para cartografiar la geología en una formación subterránea.

Nicklas Skovgaard Nyboe y Kurt Sorensen ("Noise reduction in TEM: Presenting a bandwidth- and sensitivity-optimized parallel recording setup and methods for adaptive synchronous detection", Geophysics, 2012, Vol. 77, pág. E203-E212) da a conocer un método que utiliza una configuración de registro en paralelo optimizada para el ancho de banda y la sensibilidad utilizando dos bobinas de recepción separadas optimizadas para medir la parte de tiempo temprano y tardío de la señal transitoria, respetivamente.

Debido a que los campos electromagnéticos se propagan a través del aire, no hay necesidad de contacto físico de cualquiera de la bobina del transmisor o la bobina del receptor con la superficie de la tierra. Por lo tanto, los levantamientos EM pueden realizarse mucho más rápidamente que los levantamientos por método galvánico, donde se requiere contacto con el suelo. Más importante aún, una o ambas de la bobina del transmisor y la bobina del receptor se pueden montar o remolcar detrás de la aeronave. Los métodos EM aerotransportados se utilizan en la prospección de cuerpos minerales conductores y muchos otros objetivos geológicos debido a su velocidad y rentabilidad relativa.

La respuesta electromagnética de materiales o cuerpos del subsuelo es dependiente de la conductividad eléctrica del material o del cuerpo. Los cuerpos conductores y otras estructuras, tales como las capas con baja conductividad eléctrica, presentan diferentes respuestas electromagnéticas.

Por lo tanto, en resumen, el levantamiento EM u otra exploración geofísica utiliza el principio de la inducción electromagnética para medir la conductividad eléctrica del subsuelo. En el caso de un levantamiento EM en el dominio de frecuencia, una corriente eléctrica alterna de frecuencia y magnitud conocidas pasa a través de una bobina del transmisor creando un campo EM primario en el espacio que rodea la bobina, incluso bajo tierra. Los campos electromagnéticos que varían en el tiempo inducen una corriente secundaria en los conductores o estructuras subterráneas que da como resultado un campo magnético secundario alterno que se detecta por la bobina del receptor. El campo secundario se distingue del campo primario por un retardo de fase. La relación de las magnitudes de las corrientes primaria y secundaria es proporcional a la conductividad del terreno. La profundidad de penetración del campo EM en el subsuelo se rige por la conductividad eléctrica del subsuelo y la frecuencia de excitación del transmisor y la separación y orientación de la bobina.

En el caso de un levantamiento EM transitorio, se utiliza el mismo principio de la inducción electromagnética para medir la conductividad eléctrica del subsuelo. Una corriente eléctrica pulsada de amplitud conocida y ocurrencia temporal pasa a través de una bobina del transmisor creando un campo EM primario en el espacio que rodea la bobina, incluso bajo tierra. Las corrientes parásitas generadas en el suelo, a su vez, inducen un campo magnético secundario que varía en el tiempo que se detecta por la bobina del receptor. En el tiempo de inactividad del transmisor, la magnitud de señal y la variación en el tiempo de la magnitud de señal es proporcional a la conductividad del terreno. En el tiempo de activación del transmisor, la señal recibida es proporcional a la conductividad del terreno y a la señal primaria transmitida. La profundidad de penetración del campo EM en el subsuelo se rige por la conductividad del terreno, la potencia del transmisor, la frecuencia de excitación del transmisor y la orientación de la bobina.

La profundidad de penetración de un campo EM depende de su frecuencia y la conductividad eléctrica del medio a través del cual se propaga el campo EM. Los campos EM se atenúan o debilitan durante su paso a través del subsuelo. La amplitud del campo EM disminuye exponencialmente con la profundidad. La profundidad de penetración aumenta a medida que disminuyen tanto la frecuencia del campo electromagnético como la conductividad del suelo (por ejemplo, de acuerdo con la fórmula $d(m) = 503/\sqrt{\text{conductividad} \times \text{frecuencia}}$). En consecuencia, la frecuencia utilizada en un levantamiento EM se puede sintonizar en un rango de profundidad deseado en cualquier medio particular.

En consecuencia, los sistemas de levantamiento EM se han diseñado tradicionalmente con transmisores para transmitir energía en una amplia gama de frecuencias, o ser de banda tan ancha como sea posible. De manera similar, los receptores empleados en los sistemas de levantamiento EM están diseñados para medir la respuesta EM para una amplia gama de frecuencias, sacrificando típicamente la sensibilidad de baja frecuencia por la respuesta de alta frecuencia. El extremo de alta frecuencia del espectro EM, o gama de frecuencias, se utiliza para detectar cuerpos de subsuelo con grandes valores de resistividad eléctrica (y proporcionar resolución vertical cerca de la superficie). El extremo de baja frecuencia del espectro EM se utiliza para detectar cuerpos de subsuelo con valores de resistividad eléctrica bajos (y proporcionar una exploración más profunda del subsuelo).

Sin embargo, con un único sistema es imposible medir bien todas las frecuencias del espectro. Para generar energía a altas frecuencias, es necesario emplear en el dominio del tiempo un transmisor con un apagado de corriente muy rápido, lo que requiere una baja inductancia del bucle del transmisor que se puede obtener disminuyendo el área y el número de vueltas de la antena de bucle, lo que también da como resultado un momento dipolar de transmisor suprimido. El pequeño momento también sirve para reducir el ruido de alta frecuencia al disminuir los transitorios causados por la inducción de corrientes parásitas dentro de los componentes del sistema de levantamiento conductivo y en la aeronave. Para reducir aún más el ruido en estos transitorios del sistema, otras estrategias incluyen conectar rígidamente el transmisor y el receptor, o ubicar el receptor de manera que esté acoplado al mínimo al transmisor. Para realizar una medición precisa de las respuestas de alta frecuencia, es necesario medir las respuestas EM de muy corta duración, lo que requiere una bobina del receptor con una respuesta automática corta que requiere un área pequeña de vueltas de la bobina del receptor. Estos requisitos de diseño contrastan con los de transmisión y medición de respuestas de baja frecuencia.

Para generar energía de baja frecuencia, es deseable maximizar el momento dipolar del transmisor aumentando el área de vueltas del transmisor y la corriente que pasa a través de la antena de bucle. Sin embargo, estos parámetros de diseño aumentan la inductancia del bucle del transmisor y aumentan el tiempo de apagado de la corriente (y aumentan el ruido transitorio del sistema) y, por lo tanto, son perjudiciales para la transmisión y medición de señales de alta frecuencia. Las consideraciones de resonancia muestran que una forma de onda semisinusoidal es la opción más eficiente de forma de onda para convertir la energía potencial eléctrica en corriente transmitida. Sin embargo, esto da como resultado un apagado de corriente lento, lo que es perjudicial para generar señales de alta frecuencia. Para medir señales de baja frecuencia, es deseable aumentar el voltaje generado en la bobina del receptor al tener un área grande de vueltas de bobina del receptor. Sin embargo, esto aumenta la respuesta automática de la bobina y, por lo tanto, disminuye la capacidad de medir señales de alta frecuencia. Además, para medir señales de baja frecuencia es necesario disminuir el efecto del movimiento del receptor en el campo magnético estático de la Tierra. Generalmente es deseable emplear sistemas de suspensión blanda para reducir este efecto en detrimento de la medición de señales de alta frecuencia. Estas consideraciones de diseño muestran que es imposible diseñar un solo sistema que transmita y mida bien la energía de alta y baja frecuencia. Por lo tanto, ha surgido la necesidad de un sistema que sea capaz de operar en anchos de banda de baja y alta frecuencia para el levantamiento preciso de las propiedades del subsuelo tanto a profundidades menores (por ejemplo, profundidades cercanas a la superficie) como a profundidades más profundas y para detectar objetivos de un rango de conductividad más amplio.

Resumen

De acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación, se proporciona un sistema para la exploración geofísica electromagnética de acuerdo con la reivindicación 1.

De acuerdo con otra realización de la presente divulgación, se proporciona un método de exploración geofísica electromagnética de acuerdo con la reivindicación 8.

De acuerdo con otra realización de la presente divulgación, se proporciona un medio legible por computadora no transitorio de acuerdo con la reivindicación 13.

Breve descripción de los dibujos

Para una comprensión más completa de la presente divulgación y sus características y ventajas, ahora se hace referencia a la siguiente descripción, tomada en conjunción con los dibujos adjuntos, que pueden incluir dibujos que no están a escala y en los que los números de referencia iguales indican características iguales, en los que:

la FIGURA 1 ilustra un sistema de exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda con un avión de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación;

la FIGURA 2 ilustra un sistema de exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda con un helicóptero de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación;

las FIGURAS 3 y 4 ilustran gráficos de formas de onda ejemplares para ciclos de levantamiento de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación;

la FIGURA 5 ilustra un diagrama de flujo de un método de ejemplo para la exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación; y

la FIGURA 6 ilustra un diagrama esquemático de un sistema de ejemplo que puede utilizarse para la exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación.

Descripción detallada

La siguiente descripción de los ejemplos de realización se refiere a los dibujos adjuntos. Los mismos números de referencia en diferentes dibujos identifican elementos iguales o similares.

Las limitaciones de los sistemas y métodos de levantamiento o de exploración geofísica descritos anteriormente han conducido a la presente divulgación de los sistemas y métodos que emplean sistemas de banda ancha múltiple (combinados de una manera que no interfieran) en un intento de proporcionar diferentes gamas de frecuencia, además de proporcionar algo de enfoque del espectro electromagnético (EM) en las gamas de frecuencia particulares, con una parte del sistema transmitiendo energía de baja frecuencia y midiendo señales de baja frecuencia y otra parte del sistema transmitiendo y midiendo señales de alta frecuencia. Una consideración para esta diferenciación en múltiples sistemas son las compensaciones de diseño descritas anteriormente: la geometría física y la electrónica necesarias para optimizar las mediciones en un extremo del espectro EM (por ejemplo, baja frecuencia) degrada el rendimiento

en el otro extremo del espectro (por ejemplo, alta frecuencia). Es concebible que los sistemas de anchos de banda de baja y alta frecuencia se puedan diseñar para volar de forma independiente, sin embargo, este enfoque conduce a errores relacionados con inconsistencias en la posición, altura y fase que conducen a una interpretación subóptima de la geología subyacente y costos adicionales. Por tanto, la presente divulgación emplea ambos sistemas en una única plataforma de levantamiento geofísico.

Como se describió anteriormente, un sistema de levantamiento EM que utiliza sistemas de banda ancha múltiple para detectar tanto las bajas frecuencias y altas frecuencias en el espectro EM es costoso y puede causar un rendimiento degradado en cada extremo del espectro EM. Por lo tanto, de acuerdo con las realizaciones de la presente divulgación, se presentan sistemas y métodos que proporcionan levantamiento EM de múltiples anchos de banda. Un sistema de levantamiento EM de la presente divulgación es capaz de medir tanto las porciones de baja frecuencia como las de alta frecuencia del espectro EM con una calidad de datos mejorada, por ejemplo, los datos pueden tener una relación de señal a ruido más alta. Las mediciones se pueden realizar utilizando dos o más pares de transmisor-receptor distintos. Cada uno de los pares puede optimizarse para una banda de frecuencia particular de interés, proporcionando así un conjunto de datos mejorado en todas las frecuencias.

Los datos de EM de alta frecuencia se pueden utilizar para detectar y caracterizar objetivos de subsuelo con alta resistividad eléctrica, y/o para caracterizar estratificaciones cercanas a la superficie, capas dentro de, por ejemplo, aproximadamente 165 pies o 50 metros de superficie de la Tierra, mientras que también se discriminan capas delgadas dentro de esa profundidad. En algunas realizaciones, para generar energía EM de alta frecuencia, en el transmisor se puede utilizar una señal con un apagado rápido. Para lograr un apagado rápido, el transmisor puede ser pequeño con pocas vueltas, las cuales limitan el momento dipolar (tal como la intensidad de la señal transmitida) y la profundidad de exploración. La energía EM emitida por un transmisor también puede denominarse "señal EM" u "onda EM". Además, se pueden realizar mediciones de tiempo durante el tiempo de funcionamiento del transmisor para mejorar la energía de alta frecuencia. Por ejemplo, cuando el transmisor está transmitiendo una forma de onda, un receptor puede configurarse para detectar señales de retorno aproximadamente de forma simultánea.

Para detectar objetivos eléctricamente conductores o caracterizar el subsuelo más allá cerca de la superficie, se puede utilizar una excitación EM de baja frecuencia. En algunas realizaciones, para generar energía EM de baja frecuencia, se puede operar un transmisor con un gran momento dipolar. Como tal, para caracterizar el subsuelo a profundidades más allá de la superficie cercana y maximizar el momento dipolar, se puede utilizar un transmisor con un área grande (por ejemplo, área física o numerosas vueltas). Además, se pueden realizar muchas mediciones de tiempo durante la aceleración o desaceleración de la forma de onda del transmisor para ampliar el ancho de banda general del sistema.

En algunas realizaciones, el transmisor que transmite la energía de baja frecuencia puede estar construido como un bucle de gran diámetro, por ejemplo, del orden de aproximadamente 25 a 50 metros y puede comprender una o más vueltas de cable, por ejemplo, aproximadamente una a diez vueltas, o cualquier otro tamaño o número de vueltas adecuado según convenga para la implementación. El bucle del transmisor puede remolcarse debajo de un helicóptero u otra aeronave o colgarse alrededor de una aeronave de alas fijas o algún otro vehículo aerotransportado. El helicóptero, aeronave de alas fijas u otro vehículo aerotransportado puede estar tripulado o no. En algunas realizaciones, el transmisor de baja frecuencia puede transmitir una forma de onda semisinusoidal con una frecuencia base baja, por ejemplo, del orden de aproximadamente tres a treinta hercios (Hz) con una amplitud entre aproximadamente 500 y 2.000 amperios y un ancho de banda transmitido utilizable de aproximadamente tres a 10.000 Hz. En algunas realizaciones, el receptor de baja frecuencia puede tener un mayor diámetro de bobina y un mayor número de vueltas, lo que proporciona una mayor sensibilidad a bajas frecuencias. Por ejemplo, una bobina de baja frecuencia puede incluir aproximadamente 100 vueltas enrolladas en un formador de aproximadamente un metro de diámetro, lo que da como resultado un producto de área de vueltas de aproximadamente 79 metros cuadrados (m^2) con niveles de ruido que se acercan a aproximadamente 0,01 nanovoltios por metro cuadrado (nV/m^2) y un ancho de banda del receptor de aproximadamente uno a 10.000 Hz. El receptor puede colocarse concéntricamente al transmisor o colocarse a cierta distancia del transmisor, por ejemplo, del orden de aproximadamente diez a 200 metros; sin embargo, en algunas realizaciones, la separación entre el receptor y el transmisor puede ser superior a aproximadamente 200 metros. Las bobinas del receptor se pueden unir con algún tipo de sistema de suspensión blanda que sirve para traducir cualquier vibración o movimiento de alta frecuencia en un movimiento lento de baja frecuencia por debajo de aproximadamente cinco Hz, o preferiblemente por debajo de aproximadamente un Hz.

En algunas realizaciones, el transmisor que transmite la energía de alta frecuencia se construye como un bucle de diámetro más pequeño del orden de aproximadamente uno a metros diez y puede comprender sólo unas pocas vueltas de cable, por ejemplo, aproximadamente una o dos vueltas. En algunas realizaciones, el transmisor de alta frecuencia puede transmitir una forma de onda cuadrada o una forma de onda trapezoidal con una rampa de salida empinada de modo que la forma de onda sea una aproximación cercana a una forma de onda cuadrada que da como resultado una energía significativa a altas frecuencias. La amplitud de corriente de esta forma de onda puede ser, por ejemplo, del orden de aproximadamente diez a 400 amperios, lo que permite tiempos de rampa de aproximadamente dos a cuarenta microsegundos (μs) y un ancho de banda de transmisión utilizable de aproximadamente 1.000 a 100.000 Hz. Existe una compensación implícita entre minimizar el tiempo de rampa y maximizar la corriente máxima. El receptor

de alta frecuencia puede fijarse rígidamente de alguna manera al transmisor de alta frecuencia, de manera que el acoplamiento electromagnético se mantenga constante o tan cerca de constante como sea posible, y el receptor de alta frecuencia puede estar acoplado nulo al transmisor, ya sea colocando el receptor en una ubicación geométrica adecuada o acoplado mínimo enrollando el receptor de alta frecuencia alrededor de los cables del transmisor de alta frecuencia. Hay muchas formas de lograr un acoplamiento mínimo que se pueden implementar. Ya que una conexión rígida puede mantener un acoplamiento constante o casi constante, es posible que el receptor no utilice un sistema de suspensión.

Una bobina de alta frecuencia para un receptor de alta frecuencia puede incluir, por ejemplo, aproximadamente diez vueltas enrolladas en un formador de aproximadamente un metro de diámetro resultando en un producto de vueltas por área de $7,9 \text{ m}^2$ con niveles de ruido que se aproximan aproximadamente un nV/m^2 y un ancho de banda utilizable de aproximadamente 1.000 a 300.000 Hz. Además, el transmisor de alta frecuencia puede separarse de los vehículos aéreos cercanos para reducir el ruido del acoplamiento entre el sistema y el vehículo. En algunas realizaciones, el par de transmisor-receptor puede remolcarse debajo o detrás de un avión de alas fijas o globo u otro vehículo aéreo, de manera que esté separado por cierta distancia del avión y del transmisor de baja frecuencia. En una realización con un helicóptero, el transmisor y el receptor de alta frecuencia pueden colocarse concéntricos al transmisor de baja frecuencia y ambos pueden remolcarse debajo del helicóptero. El receptor de baja frecuencia puede colocarse entonces concéntrico al transmisor de alta frecuencia o en un lugar acoplado nulo al transmisor de baja frecuencia o en alguna otra posición a lo largo del mecanismo de remolque del transmisor de baja frecuencia.

Por lo tanto, la porción de baja frecuencia del sistema puede comprender un transmisor de área grande con múltiples vueltas y corriente del transmisor grande para maximizar momento del transmisor con una frecuencia base baja; y una forma de onda semisinusoidal medida con un receptor de área de vueltas grande con una suspensión blanda a cierta distancia del transmisor y del vehículo aéreo. La porción de alta frecuencia del sistema puede comprender un transmisor de área pequeña con solo una o dos vueltas y una pequeña corriente del transmisor para minimizar el tiempo de apagado de corriente y los transitorios del sistema; y emplear una forma de onda trapezoidal o cuadrada que puede tener una frecuencia base más alta. La respuesta de alta frecuencia puede medirse utilizando un receptor de área de vueltas pequeña con un receptor conectado rígidamente (por ejemplo, uno que esté acoplado al mínimo o nulo). Además, puede haber un solapamiento significativo de ancho de banda entre las capacidades del sistema de baja y alta frecuencia para una cobertura eficaz.

De acuerdo con algunas realizaciones, se emplea un sistema de levantamiento EM que consiste en al menos dos conjuntos de transmisor y de receptor distintos. Cada uno de los conjuntos de transmisor-receptor puede disponerse para transmitir y recibir un ancho de banda diferente del espectro EM. En algunas realizaciones, los pares de transmisor-receptor pueden disponerse para medir un ancho de banda que se solapa parcialmente del espectro EM. Por ejemplo, un conjunto de transmisor-receptor puede optimizarse para transmitir y recibir señales EM de frecuencia relativamente alta, mientras que otro conjunto de transmisor-receptor puede optimizarse para transmitir y recibir señales de frecuencia relativamente baja. El ancho de banda de cada uno de los pares de transmisor-receptor puede optimizarse de manera que exista cierto grado de solapamiento de frecuencias de modo que cuando se combinan, el conjunto de datos es continuo. El solapamiento entre el ancho de banda de frecuencia de cada uno de los pares de transmisor-receptor puede ayudar a adquirir datos EM que cubren el rango de formaciones de subsuelo poco a medio profundas y profundas. Por lo tanto, al menos dos conjuntos de transmisor y de receptor distintos permiten la optimización de cada uno de los conjuntos para transmitir y recibir una banda de frecuencia deseada de energía EM.

En algunas realizaciones, se puede emplear una variedad de métodos para adaptar el ancho de banda de cada uno de los conjuntos de transmisor-receptor. Por ejemplo, para optimizar la medición de información de baja frecuencia, la geometría del cable del transmisor puede diseñarse para que consista en un área grande o un gran número de vueltas o para permitir la conducción de una gran cantidad de corriente. A la inversa, para optimizar la medición de la energía de alta frecuencia, el cable del transmisor puede diseñarse para que consista en menos vueltas o un área menos efectiva.

La información de baja frecuencia de medición del receptor puede diseñarse para consistir en una gran área efectiva o gran número de vueltas o emplear un núcleo magnético. A la inversa, el receptor que mide la información de alta frecuencia puede consistir en un área efectiva más pequeña o menos vueltas. La construcción geométrica del receptor que mide la información de alta frecuencia también puede optimizarse para la medición de señales de alta frecuencia.

Por lo tanto, el transmisor de baja frecuencia puede tener una geometría predeterminada y un número predeterminado de vueltas para operar en el espectro de baja frecuencia particular. De manera similar, el transmisor de alta frecuencia puede tener una geometría predeterminada y un número predeterminado de vueltas para operar en el espectro de alta frecuencia particular. Además, cada uno del receptor de baja frecuencia y del receptor de alta frecuencia puede tener una geometría particular que está optimizada para realizar mediciones para los respectivos espectros de frecuencia particulares en los que operan el transmisor de baja frecuencia y el transmisor de alta frecuencia.

Además, el receptor para la medición de señales de alta frecuencia puede estar dispuesto en una ubicación nula electromagnética del transmisor diseñado para la excitación de energía de alta frecuencia. Una ubicación nula electromagnética puede ser una ubicación en la que la respuesta del receptor se anula al campo EM primario del transmisor. Se puede lograr un nulo electromagnético, por ejemplo, minimizando el acoplamiento entre el transmisor y el receptor. Por ejemplo, se puede minimizar el acoplamiento entre el transmisor y el receptor colocando el receptor mitad dentro y mitad fuera del bucle del transmisor o colocando el receptor en el ángulo apropiado lejos del bucle del transmisor.

La FIGURA 1 ilustra un sistema 150 de exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda con el avión 100 de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación. La FIGURA 1 representa una realización física ejemplar de un sistema 150 de exploración geofísica EM de múltiples anchos de banda, también denominado "sistema" 150. En algunas realizaciones, el sistema 150 puede incluir un avión 100 que remolca dos o más transmisores y receptores. Aunque se ilustra con un avión 100, se pueden utilizar múltiples aviones 100 en el sistema 150 o se pueden utilizar una multitud de receptores 112 con diferentes anchos de banda y/o áreas efectivas.

En algunas realizaciones, uno o múltiples pares de transmisor-receptor pueden diseñarse para medir señales de baja frecuencia. Por ejemplo, el transmisor 110 de baja frecuencia se coloca alrededor del avión 100 y consiste de un área grande. El transmisor 110 de baja frecuencia puede incluir una bobina que rodea el avión 100 y se fija a una pluralidad de puntos diferentes en el cuerpo del avión 100.

El receptor 112 de baja frecuencia se puede optimizar para la energía de baja frecuencia. El receptor 112 de baja frecuencia puede remolcarse detrás o debajo del transmisor 110 de baja frecuencia. El receptor 112 de baja frecuencia puede remolcarse por el mismo avión 100 que remolca el transmisor 110 de baja frecuencia. Alternativamente, el receptor 112 de baja frecuencia puede remolcarse por un avión diferente. El receptor 112 de baja frecuencia puede diseñarse para medir señales de baja frecuencia aumentando el área de vueltas (por ejemplo, un área más grande para las vueltas de cable en la bobina) y aumentando la ganancia electrónica.

En algunas realizaciones, un par de transmisor-receptor puede estar diseñado para medir señales de alta frecuencia. Por ejemplo, el transmisor 120 de alta frecuencia puede tener un área pequeña, lo que permite un apagado rápido de la corriente del transmisor. El receptor 122 de alta frecuencia puede estar acoplado nulo al transmisor 120 de alta frecuencia, lo que reduce los transitorios del transmisor y permite la medición en tiempos de apagado muy tempranos. De manera similar, el receptor 122 de alta frecuencia puede optimizarse para medir señales de alta frecuencia.

Tal como se representa en la FIGURA 1, el transmisor 120 de alta frecuencia puede ser más pequeño que el transmisor 110 de baja frecuencia y puede disponerse debajo y a una distancia especificada alejado del transmisor 110 de baja frecuencia. El receptor 122 de alta frecuencia puede estar dispuesto de una manera, como se describió anteriormente, para acoplarse nulo al transmisor 120 de alta frecuencia.

Para aumentar la cantidad de información adquirida en el levantamiento, se puede utilizar una pluralidad de receptores 112 de baja frecuencia. Por ejemplo, la FIGURA 1 representa un segundo receptor 112 de baja frecuencia remolcado desde el avión 100. Además, aunque se representa y describe una realización con el avión 100, los sistemas y métodos de la presente divulgación también podrían aplicarse a sistemas terrestres o marinos.

El par de transmisor-receptor de baja frecuencia, el transmisor 110 de baja frecuencia y el o los receptores 112 de baja frecuencia, pueden estar diseñados para el funcionamiento de momento alto a frecuencia base baja. El par de transmisor-receptor de baja frecuencia puede configurarse para optimizar el rendimiento a bajas frecuencias, por ejemplo, aumentando la ganancia de la bobina electrónicamente o por área de vueltas o por un núcleo magnético, y puede incluir más suspensión y una conexión no rígida para reducir frecuencia de resonancia del movimiento del sistema.

Por el contrario, el par de transmisor-receptor de alta frecuencia puede tener una conexión rígida sin sistema de suspensión. En el par de transmisor-receptor de alta frecuencia, la medición en tiempos de retardo tempranos (por ejemplo, momentos poco después del apagado) es importante obtener información de la superficie cercana y, por lo tanto, el tiempo de respuesta automática del receptor de alta frecuencia y la duración del apagado de señal deben ser cortos. El diseño y la configuración del receptor de alta frecuencia pueden minimizar su tiempo de respuesta automática, por ejemplo, al tener un área de vueltas pequeña. Además, al tener menos vueltas, la corriente del transmisor se puede apagar rápidamente, de modo que la energía de frecuencia más alta se excita en el suelo. Además, mediante el acoplamiento nulo del par de transmisor-receptor de alta frecuencia (por ejemplo, colocando el receptor en una posición "nula" con respecto al transmisor), los transitorios del transmisor (por ejemplo, energía transitoria) pueden minimizarse para reducir su efecto sobre los datos medidos.

Las señales detectadas por los receptores 112 de baja frecuencia y las señales detectadas por el receptor 122 de alta frecuencia se pueden recibir, por ejemplo, en una porción 160 de procesamiento o de control, como se representa en la FIGURA 1. Una porción 160 de procesamiento o de control de este tipo puede disponerse a bordo de una aeronave

(por ejemplo, el avión 100 o el helicóptero 200, discutido con referencia a la FIGURA 2) u otro vehículo o máquina utilizada para el levantamiento o remolcada por la aeronave. Alternativamente, una porción 160 de procesamiento o de control de este tipo puede disponerse de forma remota.

La FIGURA 2 ilustra un sistema 250 de exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda con un helicóptero 200 de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación. Como se muestra en la FIGURA 2, se puede disponer un bucle 210 de transmisor de baja frecuencia alrededor de una unidad de transmisor-receptor que puede remolcarse por el helicóptero 200. El transmisor 210 de baja frecuencia puede ser una bobina sustancialmente circular, formando un bucle alrededor de la unidad de transmisor-receptor que puede estar suspendida del helicóptero 200. Alternativamente, el transmisor 210 de baja frecuencia puede ser un cuadrado, diamante, rectángulo u otra forma poligonal. Un receptor 212 de baja frecuencia está dispuesto sustancialmente en el centro del bucle formado por el transmisor 210 de baja frecuencia. Otra realización puede ser colocar el receptor de baja frecuencia en el vértice del conjunto de cables que soportan el bucle 210 del transmisor de baja frecuencia o conjunto de cables que soportan los bucles de alta frecuencia. De manera similar al par de transmisor-receptor de baja frecuencia descrito anteriormente para el avión 100 representado en la FIGURA 1, el transmisor 210 de baja frecuencia y el receptor 212 de baja frecuencia están configurados para estar optimizados para operar en un ancho de banda de baja frecuencia.

Un transmisor 220 de alta frecuencia y un receptor 222 de alta frecuencia están acoplados al mínimo. Por ejemplo, como se describió anteriormente, el receptor de alta frecuencia puede disponerse con respecto al transmisor 220 de alta frecuencia para que esté próximo a una ubicación "nula". Además, el transmisor 220 de alta frecuencia y el receptor 222 de alta frecuencia pueden formar una bobina sustancialmente circular y pueden estar dispuestos para formar un bucle que rodea al receptor 212 de baja frecuencia, pero con un diámetro más pequeño que el transmisor 210 de baja frecuencia. Por ejemplo, el par de transmisor-receptor de alta frecuencia acoplado nulo puede disponerse de manera que una bobina del transmisor para el transmisor 220 de alta frecuencia esté dispuesta de manera que una bobina del receptor interna y una bobina del receptor externa para el receptor 222 de alta frecuencia rodeen la bobina del transmisor para el transmisor 220 de frecuencia alta frecuencia. En otras palabras, de acuerdo con la invención, la bobina del transmisor para el transmisor 220 de alta frecuencia está dispuesta entre una bobina del receptor interna y una bobina del receptor externa para el receptor 222 de alta frecuencia, siendo cada una de las bobinas sustancialmente circular. En algunas realizaciones, cualquiera del transmisor 210 de baja frecuencia, del receptor 212 de baja frecuencia, del transmisor 220 de alta frecuencia y del receptor 222 de alta frecuencia puede ser poligonal, o cualquier otra forma adecuada en base a la implementación.

En funcionamiento, cada uno de los transmisores puede generar una excitación electromagnética. La excitación de cada uno de los bucles del transmisor puede producirse simultáneamente o permitir un retraso de tiempo especificado entre excitaciones. La excitación de cada uno de los transmisores se puede realizar en ubicaciones cercanas de modo que se obtenga información de alta y baja frecuencia para la misma área. El ancho de banda o espectro de frecuencia para el par de transmisor-receptor de alta frecuencia incluye frecuencias mayores que el par de transmisor-receptor de baja frecuencia, pero los anchos de banda pueden solaparse entre sí para permitir implementar un ancho de banda continuo desde baja frecuencia a alta frecuencia. Por lo tanto, por ejemplo, el par de transmisor-receptor de alta frecuencia puede configurarse para detectar las propiedades de la tierra desde la superficie hasta aproximadamente 100-200 metros de profundidad, mientras que el par de transmisor-receptor de baja frecuencia puede configurarse para detectar las propiedades de la tierra desde aproximadamente 50 metros debajo de la superficie hasta aproximadamente 600-800 metros o más debajo de la superficie.

Las FIGURAS 3 y 4 ilustran los gráficos 300 y 400 de las formas 310 y 410 de onda de corriente ejemplares para un ciclo transmitido de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación. La forma de onda de excitación para los dos transmisores 110 y 120 diferentes puede ser de diferente forma, amplitud o frecuencia de repetición, o una combinación de las mismas. Por ejemplo, los transmisores 110 y 210 de baja frecuencia, discutidos con referencia a las FIGURAS 1 y 2, respectivamente, pueden emitir una forma de onda con pulsos semisinusoidal. Por otro ejemplo, los transmisores 120 y 220 de alta frecuencia pueden emitir una forma de onda con pulsos sustancialmente cuadrados o pulsos trapezoidales. Como se muestra en la FIGURA 3, un solo ciclo puede incluir, por ejemplo, pulsos semisinusoidales positivos y pulsos cuadrados positivos, separados por un tiempo de inactividad y pulsos semisinusoidales negativos y pulsos cuadrados negativos. Igualmente, válido sería una serie de pulsos semisinusoidales positivos y negativos seguidos de una serie de pulsos cuadrados o trapezoidales positivos y negativos. Como se muestra en la FIGURA 4, un solo ciclo puede incluir, por ejemplo, pulsos semisinusoidales positivos y pulsos trapezoidales positivos, separados por un tiempo de inactividad y pulsos semisinusoidales negativos y pulsos trapezoidales negativos.

Los datos de cada uno de los levantamientos se pueden utilizar de forma independiente para procesar, interpretar, modelar o transformar desde datos en propiedades eléctricas o en geología. Al utilizar al menos dos pares de transmisor-receptor, un sistema con dos anchos de banda solapados separados puede medir mejor una gama más amplia de frecuencias. En algunas realizaciones, los dos pares de transmisor-receptor pueden basarse en un solo transmisor habilitado para emitir señales de baja y alta frecuencia que pueden emparejarse por separado con dos receptores diferentes. En consecuencia, se puede obtener información más precisa y sólida sobre las propiedades de

la tierra combinando los datos de los dos pares de transmisor-receptor y realizando un procesamiento, modelado o transformación simultáneos de los datos en propiedades eléctricas o geológicas. Además, modelar o interpretar datos de uno de los pares de transmisor-receptor y modelar o interpretar posteriormente los datos del otro conjunto de transmisor-receptor en base a los resultados del primer conjunto también puede mejorar la interpretación, el modelo o el producto. Por ejemplo, los datos de cada uno de los pares de transmisor-receptor de baja y alta frecuencia pueden correlacionarse de forma cruzada para mejorar la reducción de señal a ruido. Además, los anchos de banda solapados podrían utilizarse para calibrar la respuesta general del sistema.

La FIGURA 5 ilustra un diagrama de flujo de un método 500 de ejemplo para exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación. Los pasos del método 500 se realizan por un usuario, diversos programas informáticos, modelos configurados para procesar o analizar datos geofísicos y combinaciones de los mismos. Los programas y modelos incluyen instrucciones almacenadas en un medio legible por computadora y son operables para realizar, cuando se ejecutan, uno o más de los pasos descritos a continuación. Los medios legibles por computadora incluyen cualquier sistema, aparato o dispositivo configurado para almacenar y recuperar programas o instrucciones, tales como una unidad de disco duro, un disco compacto, memoria flash o cualquier otro dispositivo adecuado. Los programas y modelos están configurados para dirigir un procesador u otra unidad adecuada para recuperar y ejecutar las instrucciones de los medios legibles por computadora. En conjunto, el usuario o los programas informáticos y modelos utilizados para procesar y analizar datos geofísicos pueden denominarse "sistema informático". Con fines ilustrativos, el método 500 se describe con respecto a los datos en base a la porción 160 de control de las FIGURAS 1 y 2. Un levantamiento particular puede incluir muchos ciclos de transmisión y recepción de señales electromagnéticas y no se limita a cualquier orden de procesos descrito en el presente documento.

En el paso 510, una porción de control puede controlar un transmisor de baja frecuencia para transmitir una forma de onda de baja frecuencia en un espectro de frecuencia más baja. En el paso 520, la porción de control puede controlar un transmisor de alta frecuencia para transmitir una forma de onda en un espectro de frecuencia más alta después de un tiempo especificado. El espectro de frecuencia emitido por el transmisor de alta frecuencia puede ser más alto que el espectro de frecuencia emitido por el transmisor de baja frecuencia, o puede solapar al espectro de frecuencia emitido por el transmisor de baja frecuencia. En otras palabras, al menos una porción del espectro de frecuencia más alta es mayor que el espectro de frecuencia más baja. Además, en algunas realizaciones, se puede utilizar un transmisor para transmitir tanto las señales de alta frecuencia como las de baja frecuencia. En el paso 530, la porción de control recibe señales que se detectan por un receptor de baja frecuencia y un receptor de alta frecuencia. En algunas realizaciones, los receptores pueden recibir señales durante el tiempo que el transmisor está transmitiendo una forma de onda, por ejemplo, durante el tiempo de activación de los transmisores. En el paso 540, la porción de control puede almacenar y/o procesar las señales recibidas. Alternativamente, los datos en bruto de las señales recibidas pueden almacenarse para su procesamiento en un momento posterior. En el paso 550, la porción de control puede analizar los datos recibidos y detectar las propiedades de la tierra desde la superficie hasta diferentes profundidades debajo de la superficie. En el método 500, los pasos se pueden realizar en cualquier orden apropiado. Por ejemplo, el paso 530 puede realizarse concurrentemente con los pasos 510 y 520. Por dar otro ejemplo, el paso 520 puede producirse antes o al mismo tiempo que el paso 510.

Como se describió anteriormente, los requisitos de diseño para la transmisión y medición eficientes de energía y señales de baja y alta frecuencia requiere compensaciones y la presente divulgación representa un método ventajoso para llevar a cabo ambos al mismo tiempo. Las realizaciones de la presente divulgación permiten dos sistemas independientes en el dominio del tiempo con diferentes anchos de banda, de manera que se pueden implementar múltiples transmisores y múltiples receptores en un solo sistema para lograr un levantamiento electromagnético optimizado de múltiples anchos de banda en el único sistema. La forma de onda transmitida por el transmisor de baja frecuencia y la forma de onda transmitida por el transmisor de alta frecuencia pueden sincronizarse en el tiempo para medir con precisión tanto en el espectro de baja frecuencia como en el espectro de alta frecuencia.

Una ventaja de la presente divulgación es superar ciertas deficiencias de los sistemas geofísicos que son bien de banda ancha u optimizados para una de exploración profunda o superficial. La presente divulgación logra eficazmente dos sistemas optimizados; uno para resolución de la superficie cercana y el otro para exploración profunda; en un único sistema. La presente divulgación logra una ventaja comercial al capturar toda la información relevante sobre las propiedades de la tierra del terreno prospectivo sin la necesidad de realizar múltiples levantamientos o las limitaciones de diferentes sistemas optimizados para diferentes profundidades y objetivos. Otra ventaja de la presente divulgación es que proporciona una mayor sensibilidad con respecto a la resolución vertical o la resolución espacial y la profundidad de exploración. Una ventaja de los distintos conjuntos de transmisor-receptor de la presente divulgación puede realizarse porque los componentes eléctricos para la medición de energía de alta y baja frecuencia pueden ser diferentes. Una ventaja adicional de los distintos conjuntos de transmisor-receptor de la presente divulgación puede realizarse mediante la separación física en el espacio de los dos pares de transmisor-receptor y mediante una separación en el tiempo de la excitación de cada uno de los transmisores.

La FIGURA 6 ilustra un diagrama esquemático de un sistema 600 de ejemplo que puede utilizarse para la exploración geofísica electromagnética de múltiples anchos de banda de acuerdo con algunas realizaciones de la presente divulgación. El sistema 600 incluye uno o más transmisores 602, uno o más receptores 604 y un sistema 606 informático, que están acoplados comunicativamente a través de la red 608. El sistema 606 informático puede incluir algunos o todos los componentes de la porción 160 de control discutidos con referencia a las FIGURAS 1 y 2.

El sistema 606 informático puede funcionar junto con los transmisores 602 y los receptores 604 que tienen cualquier estructura, configuración o función. Los transmisores 602 pueden incluir transmisores de baja frecuencia y transmisores de alta frecuencia, y los receptores 604 pueden incluir receptores de baja frecuencia y receptores de alta frecuencia. Además, se puede utilizar un sistema de posicionamiento, tal como un sistema de posicionamiento global (GPS, GLONASS, etc.), para ubicar o correlacionar en el tiempo los transmisores 602 y los receptores 604.

El sistema 606 informático puede incluir cualquier instrumentalidad o agregación de instrumentalidades operables para calcular, clasificar, procesar, transmitir, recibir, almacenar, visualizar, registrar o utilizar cualquier forma de información, inteligencia o datos. Por ejemplo, el sistema 606 informático puede ser uno o más de servidores centrales, computadoras de sobremesa, computadoras portátiles, sistemas informáticos en la nube, dispositivos de almacenamiento o cualquier otro dispositivo adecuado y puede variar en tamaño, forma, rendimiento, funcionalidad y precio. El sistema 606 informático puede incluir memoria de acceso aleatorio (RAM), uno o más recursos de procesamiento tales como una unidad central de procesamiento (CPU) o lógica de control de hardware o software, u otros tipos de memoria volátil o no volátil. Los componentes adicionales del sistema 606 informático pueden incluir una o más unidades de disco, uno o más puertos de red para comunicarse con dispositivos externos, diversos dispositivos de entrada y salida (E/S), tales como un teclado, un ratón y una pantalla de video. El sistema 606 informático puede configurarse para permitir la comunicación a través de cualquier tipo de red 608. La red 608 puede ser una red inalámbrica, una red de área local (LAN), una red de área amplia (WAN), tal como Internet o cualquier otro tipo de red adecuado.

La interfaz 610 de red representa cualquier dispositivo adecuado operable para recibir información de la red 608, transmitir información a través de la red 608, realizar un procesamiento adecuado de la información, comunicarse con otros dispositivos, o cualquier combinación de los mismos. La interfaz 610 de red puede ser cualquier puerto o conexión, real o virtual, incluido cualquier hardware y/o software adecuados (incluidas las capacidades de conversión de protocolo y procesamiento de datos) que se comunica a través de una LAN, WAN u otro sistema de comunicaciones. Estas comunicaciones permiten que el sistema 606 informático intercambie información con la red 608, otros sistemas 606 informáticos, transmisores 602, receptores 604 u otros componentes del sistema 600. El sistema 606 informático puede tener cualquier número, tipo y/o configuración adecuados de la interfaz 610 de red.

El procesador 612 se acopla comunicativamente a la interfaz 610 de red y a la memoria 614 y controla la operación y administración del sistema 606 informático procesando la información recibida desde la interfaz 610 de red y la memoria 614. El procesador 612 incluye cualquier hardware y/o software que opera para controlar y procesar información. En algunas realizaciones, el procesador 612 puede ser un dispositivo lógico programable, un microcontrolador, un microprocesador, cualquier dispositivo de procesamiento adecuado o cualquier combinación adecuada de los anteriores. El sistema 606 informático puede tener cualquier número, tipo y/o configuración adecuados del procesador 612. El procesador 612 puede ejecutar uno o más conjuntos de instrucciones para implementar el levantamiento electromagnético de múltiples anchos de banda, que incluye los pasos descritos anteriormente con respecto a la FIGURA 5. El procesador 612 puede también ejecutar cualquier otro programa adecuado para facilitar la generación de imágenes compuestas de banda ancha tal como, por ejemplo, software de interfaz de usuario para presentar una o más GUI a un usuario.

La memoria 614 almacena, de forma permanente o temporal, datos, software operativo u otra información para el procesador 612, otros componentes del sistema 606 informático u otros componentes del sistema 600. La memoria 614 incluye cualquiera o una combinación de dispositivos locales o remotos, volátiles o no volátiles adecuados para almacenar información. Por ejemplo, la memoria 614 puede incluir memoria de acceso aleatorio (RAM), memoria de solo lectura (ROM), memoria flash, dispositivos de almacenamiento magnético, dispositivos de almacenamiento óptico, dispositivos de almacenamiento en red, dispositivos de almacenamiento en la nube, dispositivos de estado sólido, dispositivos de almacenamiento externos, cualquier otro dispositivo de almacenamiento de información adecuado, o una combinación de estos dispositivos. La memoria 614 puede almacenar información en una o más bases de datos, sistemas de archivos, estructuras de árbol, cualquier otro sistema de almacenamiento adecuado o cualquier combinación de los mismos. Además, diferentes tipos de información almacenada en la memoria 614 pueden utilizar cualquiera de estos sistemas de almacenamiento. Además, cualquier información almacenada en la memoria puede estar cifrada o no cifrada, comprimida o descomprimida y ser estática o editable. El sistema 606 informático puede tener cualquier número, tipo y/o configuración adecuados de la memoria 614. La memoria 614 puede incluir cualquier información adecuada para su uso en el funcionamiento del sistema 606 informático. Por ejemplo, la memoria 614 puede almacenar instrucciones ejecutables por computadora operables para realizar los pasos discutidos anteriormente con respecto a la FIGURA 5 cuando se ejecutan por el procesador 612. La memoria 614 también puede

almacenar datos sísmicos cualesquiera o datos relacionados, tales como, por ejemplo, datos sísmicos en bruto, señales reconstruidas, modelos de velocidad, imágenes sísmicas o cualquier otra información adecuada.

5 La descripción detallada anterior no limita la divulgación. En cambio, el alcance de la divulgación está definido por las reivindicaciones adjuntas. Las realizaciones descritas no se limitan a las configuraciones descritas y pueden extenderse a otras disposiciones.

10 La referencia a lo largo de la memoria descriptiva a "una sola realización" o "una realización" significa que una característica, estructura o característica particular descrita en relación con una realización se incluye en al menos una realización de la materia objeto divulgada. Por tanto, la aparición de las frases "en una sola realización" o "en una realización" en diversos lugares a lo largo de la memoria descriptiva no se refiere necesariamente a la misma realización. Además, las particularidades, estructuras o características particulares pueden combinarse de cualquier manera adecuada en una o más realizaciones.

15 En el presente documento, "o" es inclusivo y no exclusivo, salvo que se indique expresamente lo contrario o se indique lo contrario por el contexto. Por lo tanto, en el presente documento, "A o B" significa "A, B o ambos", a menos que se indique expresamente lo contrario o que el contexto indique lo contrario. Además, "y" es tanto unión como varios, a menos que se indique expresamente lo contrario o que el contexto indique lo contrario. Por lo tanto, en el presente documento, "A y B" significa "A y B, conjunta o individualmente", a menos que se indique expresamente lo contrario o se indique lo contrario en el contexto.

20 Esta divulgación abarca todos los cambios, sustituciones, variaciones, alteraciones y modificaciones a las realizaciones de ejemplo del presente documento que comprendería una persona con experiencia ordinaria en la técnica. De manera similar, cuando sea apropiado, las reivindicaciones adjuntas abarcan todos los cambios, sustituciones, variaciones, alteraciones y modificaciones de las realizaciones de ejemplo del presente documento que comprendería una persona con experiencia ordinaria en la técnica. Además, la referencia en las reivindicaciones adjuntas a un aparato o sistema o un componente de un aparato o sistema que está adaptado, dispuesto, capacitado, configurado, habilitado, operable u operativo para realizar una función particular abarca ese aparato, sistema, componente, esté o no activada, encendida o desbloqueada esa función particular, siempre que ese aparato, sistema o componente esté adaptado, dispuesto, capacitado, configurado, habilitado, operable u operativo. Por ejemplo, no es necesario encender un receptor, pero debe configurarse para recibir energía reflejada.

35 Cualquiera de los pasos, operaciones o procesos descritos en el presente documento puede realizarse o implementarse con uno o más módulos de hardware o software, solos o en combinación con otros dispositivos. En una realización, un módulo de software se implementa con un producto de programa informático que comprende un medio legible por computadora que contiene código de programa informático, que puede ejecutarse por un procesador de computadora para realizar cualquiera o todos los pasos, operaciones o procesos descritos. Por ejemplo, los procesos de transmisión de forma de onda, recepción de señales detectadas y procesamiento de señales recibidas pueden realizarse mediante la ejecución de un código de programa informático en un medio legible por computadora.

40 Las realizaciones de la presente divulgación también pueden referirse a un aparato para realizar las operaciones del presente documento. Este aparato puede construirse especialmente para los fines requeridos y/o puede comprender un dispositivo informático de uso general activado selectivamente o reconfigurado por un programa informático almacenado en la computadora. Un programa informático de este tipo puede almacenarse en un medio de almacenamiento tangible legible por computadora o cualquier tipo de medio adecuado para almacenar instrucciones electrónicas y acoplarse a un bus del sistema informático. Además, cualquier sistema informático al que se hace referencia en la memoria descriptiva puede incluir un solo procesador o puede ser arquitecturas que empleen diseños de múltiples procesadores para aumentar la capacidad de computación.

50 Aunque la presente divulgación se ha descrito con varias realizaciones, debe entenderse que se pueden hacer mejoras y modificaciones a la presente invención descrita en detalle anteriormente sin apartarse del alcance de la invención como se expone en las reivindicaciones adjuntas.

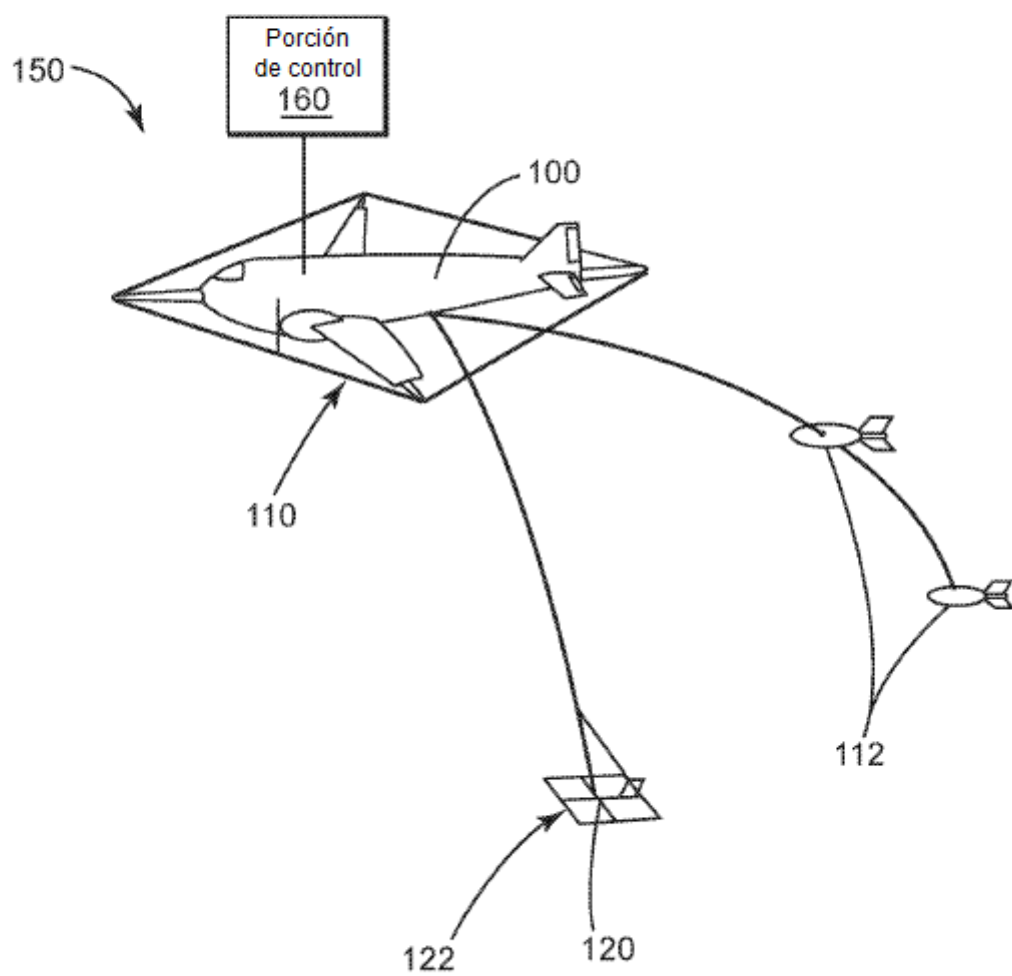
REIVINDICACIONES

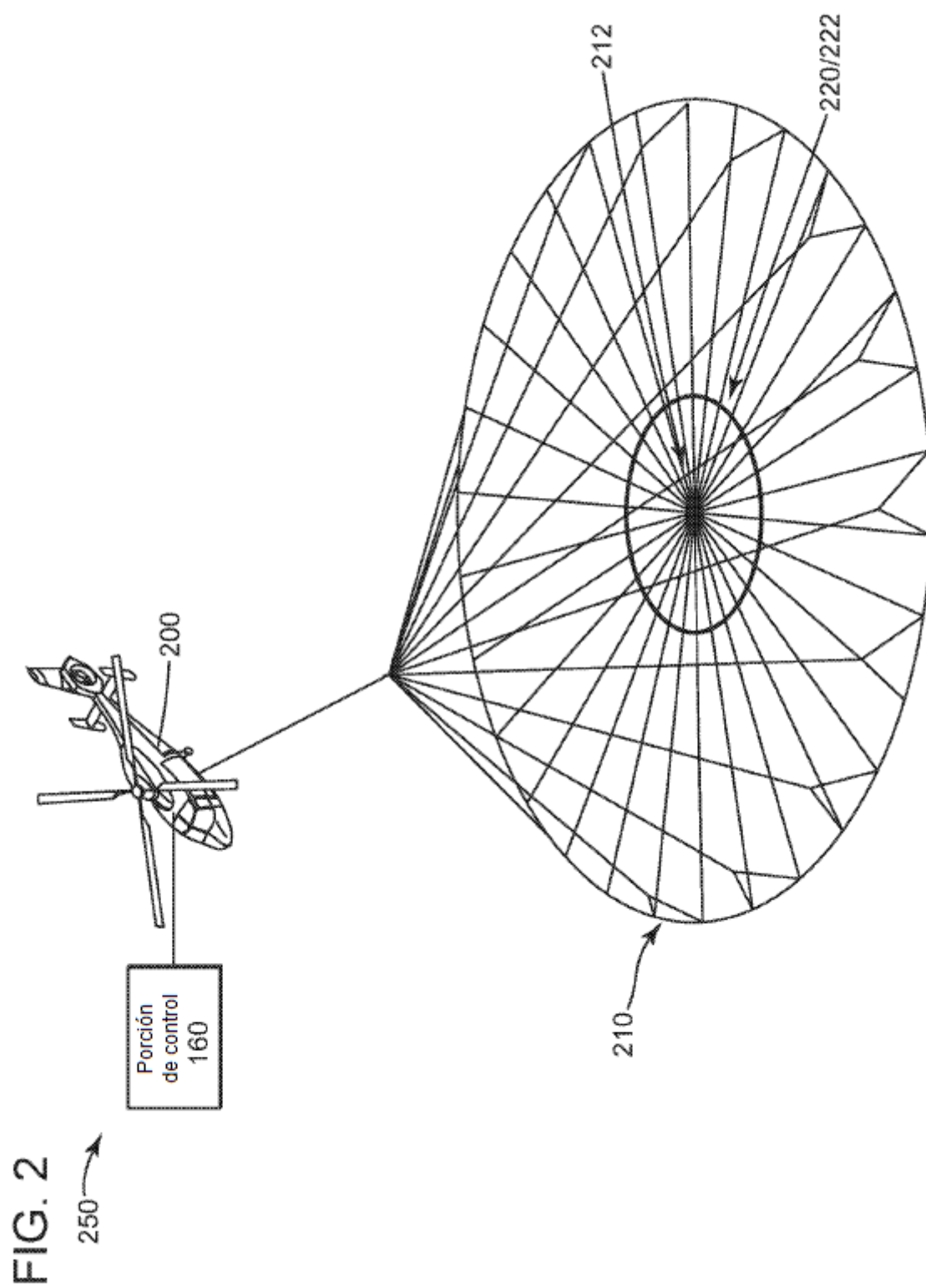
1. Un sistema de exploración geofísica electromagnética que comprende:
un primer transmisor (110, 210) electromagnético configurado para transmitir una primera forma de onda en
5 un primer espectro;
un primer receptor (112, 212) configurado para detectar señales en el primer espectro;
un segundo transmisor (120, 220) electromagnético que comprende una bobina del transmisor configurada
para transmitir una segunda forma de onda en un segundo espectro, el segundo espectro tiene una frecuencia más
alta que una frecuencia del primer espectro; caracterizado por que comprende, además:
10 un segundo receptor (122, 222) que comprende una bobina del receptor interna y una bobina del receptor
externa configurada para detectar señales en el segundo espectro, el segundo receptor configurado para estar
acoplado al mínimo al segundo transmisor electromagnético, en donde la bobina del transmisor del segundo transmisor
(120, 220) electromagnético está dispuesta entre la bobina del receptor interna y la bobina del receptor externa del
segundo receptor (122, 222); y
15 una porción (160) de control configurada para:
controlar el primer transmisor electromagnético para transmitir la primera forma de onda en el primer espectro;
controlar el segundo transmisor electromagnético para transmitir la segunda forma de onda en el segundo
espectro después de un retardo de tiempo especificado;
recibir señales detectadas por el primer receptor en el primer espectro; y
20 recibir señales detectadas por el segundo receptor en el segundo espectro,
en donde el sistema de exploración geofísica electromagnética está configurado para aerotransportado.
2. El sistema de la reivindicación 1, en donde la porción (160) de control está configurada además para almacenar las
señales recibidas.
25
3. El sistema de la reivindicación 2, en donde el sistema de control está configurado además para procesar las señales
almacenadas para analizar una formación del subsuelo.
4. El sistema de la reivindicación 1, en donde la primera forma de onda incluye una forma de onda diferente de la
segunda forma de onda.
30
5. El sistema de la reivindicación 1, en donde el primer espectro y el segundo espectro incluyen una porción de ancho
de banda solapada.
6. El sistema de la reivindicación 1, en donde el segundo transmisor (120, 220) electromagnético está configurado
para minimizar el tiempo de apagado de la segunda forma de onda.
35
7. El sistema de la reivindicación 1, en donde las señales detectadas por el primer receptor en el primer espectro se
detectan durante la transmisión de la primera forma de onda por el primer transmisor electromagnético.
40
8. Un método de exploración geofísica electromagnética, que comprende:
controlar un primer transmisor (110, 210) electromagnético para transmitir una primera forma de onda en un
primer espectro;
45 controlar un segundo transmisor (120, 220) electromagnético para transmitir una segunda forma de onda en
un segundo espectro después de un retardo de tiempo especificado, el segundo espectro tiene una frecuencia más
alta que una frecuencia del primer espectro;
recibir señales detectadas por un primer receptor (112, 212) en el primer espectro; y caracterizado por que
comprende además los pasos de:
50 recibir señales detectadas por un segundo receptor (122, 222) en el segundo espectro, el segundo receptor
comprende una bobina del receptor interna y una bobina del receptor externa y está configurado para acoplarse al
mínimo al segundo transmisor electromagnético,
en donde una bobina del transmisor del segundo transmisor (120, 220) electromagnético está dispuesta entre
la bobina del receptor interna y la bobina del receptor externa del segundo receptor (122, 222), y
55 en donde el primer transmisor electromagnético, el segundo transmisor electromagnético, el primer receptor
y el segundo receptor están configurados para ser aerotransportados.
9. El método de la reivindicación 8, que comprende además almacenar las señales recibidas.
10. El método de la reivindicación 9, que comprende además procesar las señales almacenadas para analizar una
formación del subsuelo.
60
11. El método de la reivindicación 8, en donde la primera forma de onda incluye una forma de onda diferente de la
segunda forma de onda.

12. El método de la reivindicación 8, en donde el primer espectro y el segundo espectro incluyen una porción de ancho de banda que se solapa.

5 13. Un medio legible por computadora no transitorio, que comprende instrucciones ejecutables por computadora transportadas en el medio legible por computadora, las instrucciones, cuando se ejecutan en un procesador, hacen que la porción de control opere el sistema de cualquiera de las reivindicaciones 1-7.

FIG. 1





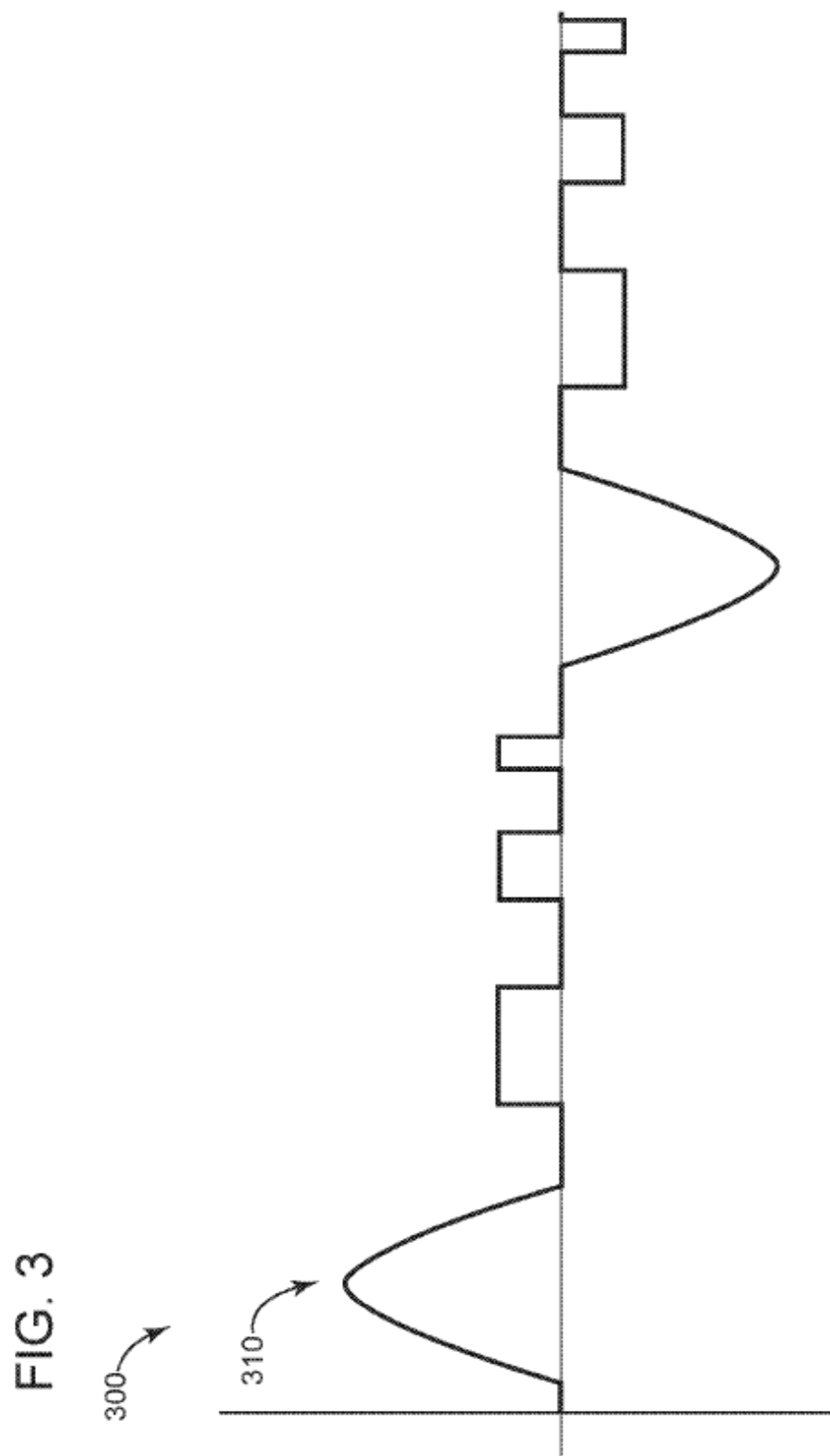


FIG. 4

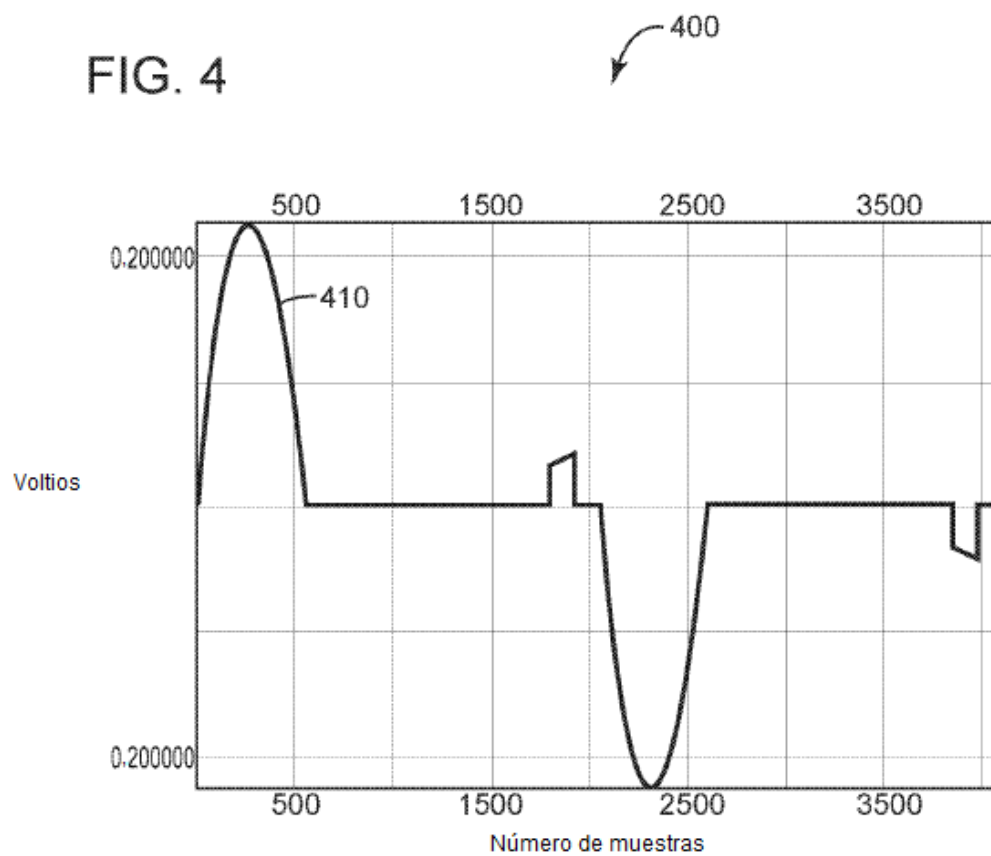


FIG. 5

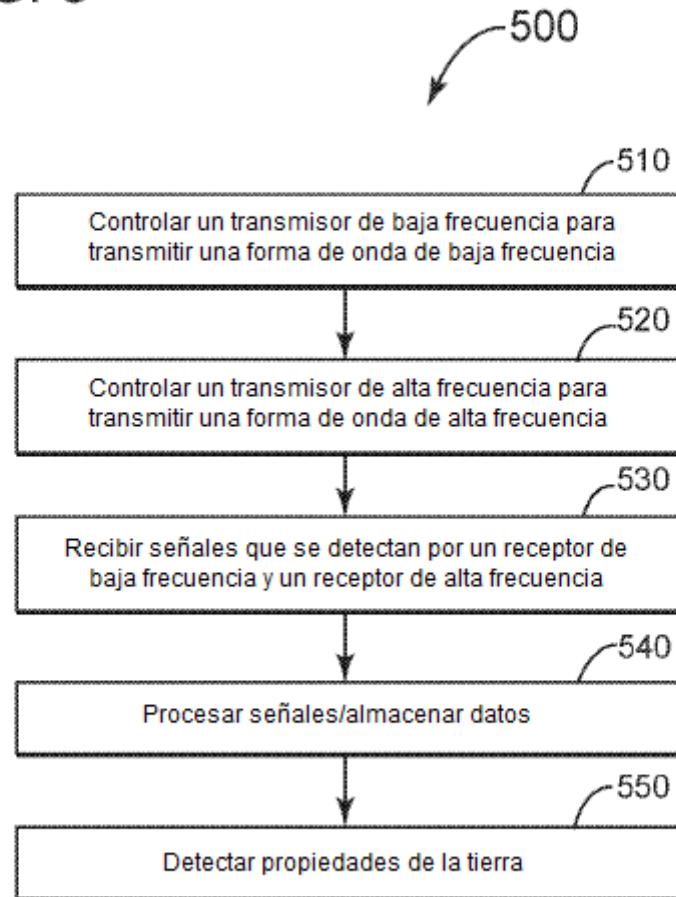


Fig. 6

