

WO 2017/125627 A1



ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), euroasiática (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europea (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF,

CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publicada:

— con informe de búsqueda internacional (Art. 21(3))

Sistemas aerotransportados y métodos para la detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados y para la caracterización de la composición del subsuelo. Los sistemas comprenden al menos un módulo aéreo (1) con una unidad radar (11) que emite y/o captura señales radar y un sistema de posicionamiento y guiado (13) con una precisión igual o inferior a 3 cm, y una estación terrena (2) con un sistema de control del vuelo (21) y una unidad de procesamiento de señales radar (23) donde se aplica algoritmos de procesamiento de señal radar (25). La invención también comprende un método para la detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados y un método para la caracterización de la composición del subsuelo. De aplicación en sectores donde se necesite realizar la detección de objetos enterrados, como por ejemplo en aplicaciones civiles (detección de minas antipersona), inspección de tuberías o en arqueología.

**SISTEMAS AEROTRANSPORTADOS Y MÉTODOS PARA LA DETECCIÓN,
LOCALIZACIÓN Y OBTENCIÓN DE IMÁGENES DE OBJETOS
ENTERRADOS Y LA CARACTERIZACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL
SUBSUELO**

La presente invención se refiere a unos sistemas para la obtención de imágenes de cualquier objeto enterrado de cualquier composición y para caracterizar la composición del subsuelo. Un sistema comprende al menos un módulo aéreo emisor y receptor, una estación terrena y un sistema de comunicación entre elementos. El otro sistema es similar al anterior, pero comprende al menos un módulo aéreo emisor y otro módulo aéreo receptor. La invención también se refiere a los métodos de procesado de señal radar para la obtención de la imagen radar del subsuelo y de los posibles objetos enterrados en el subsuelo, incluyendo su detección y su localización, y para caracterizar la composición del subsuelo.

La invención resulta de aplicación en aquellos sectores en los que se necesite realizar la detección de objetos enterrados, como por ejemplo en aplicaciones civiles para detección de minas, inspección de tuberías, arqueología o detección de huecos o cavidades.

ESTADO DE LA TÉCNICA

La detección de objetos ocultos en un medio no transparente a la luz visible empleando técnicas no invasivas (*Non Destructive Techniques*, NDT) ha sido de gran interés en múltiples actividades humanas, tales como minería y geología, construcción y obra civil, y arqueología, entre otros. Las técnicas no invasivas permiten la detección, localización y, como fin último, la obtención de una imagen del objeto oculto en el medio que lo rodea, sin interactuar ni con el medio ni con el propio objeto. Las ventajas de estos sistemas son fundamentalmente la economía en recursos y tiempo, no siendo necesario realizar excavaciones a ciegas en el área de interés para poder encontrar los objetos. Asimismo, se garantiza que, en el caso de objetos de cierto valor, éstos no sufran daños derivados de la excavación.

Dentro de las aplicaciones descritas en el párrafo anterior, existen escenarios en los que es necesaria la inspección de superficies para la detección de objetos de potencial peligro ocultos bajo las mismas, tales como armas o explosivos. Bajo estas condiciones, la detección e identificación debe realizarse en condiciones de seguridad que garanticen la integridad tanto del equipo de detección como de los operarios del mismo.

Dentro de los escenarios mencionados, es de especial interés la detección de minas antipersona, las cuales son responsables cada año de 4.000 muertes y mutilaciones, 90% correspondientes a población civil, en los aproximadamente 60 países en los que parte de su territorio se encuentra sembrado de este tipo de explosivos. Se estima que actualmente hay entre 59 y 69 millones de minas antipersona enterradas en el mundo (International Campaign to ban Landmines. Why Landmines Are Still a Problem [recuperado el 2015-11-10]. Recuperado de Internet: <<http://www.icbl.org/en-gb/problem/why-landmines-are-still-a-problem.aspx>>; y Comunicaciones UNICEF. Colombia y las minas antipersonal: sembrando minas, cosechando muerte. [recuperado el 2015-11-10]. Recuperado de Internet: <<http://www.unicef.org/colombia/pdf/minas.pdf>>).

Los métodos para la detección de minas antipersona pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- Métodos invasivos, en los que se emplea un dispositivo capaz de hacer detonar las posibles minas por contacto. Se han concebido sistemas de bajo coste pero de un solo uso (el más extendido es MineKafon, (Massoud Hassani. MineKafon [recuperado el 2015-11-10]. Recuperado de Internet: <<http://minekafon.blogspot.it/>>), así como sistemas más robustos, capaces de soportar varias detonaciones, a costa de incrementar el precio y la complejidad del dispositivo (Way Industries A. S, Slovakia. Bozena Systems [recuperado el 2015-11-10]. Recuperado de Internet: <<http://www.bozena.eu/common/file.php?file=44>>; y Nicoud, J. D., & Habib, M. K. (1995, August). The pemex-b autonomous demining robot: perception and navigation strategies. *Proceedings on 1995 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction*

and Cooperative Robots', Vol. 1, pp. 419-424, IEEE). El principal inconveniente que presentan estos sistemas es su impacto en el terreno explorado, arándolo para realizar la exploración. Como ventaja, destaca su capacidad de exploración, ya que analiza 1 metro cuadrado en 0,73 segundos.

- ✱ Técnicas no invasivas, en las que a partir del adecuado procesado de un conjunto de señales recibidas es posible detectar la presencia de objetos enterrados.

Las técnicas no invasivas se pueden clasificar a su vez atendiendo al fenómeno físico en que se basa la detección (Robledo, L., Carrasco, M., & Mery, D. (2009). A survey of land mine detection technology. *International Journal of Remote Sensing*, 30(9), 2399-2410):

- ✱ Inducción electromagnética. Se basa en inducir una corriente eléctrica en los objetos metálicos enterrados empleando una bobina transmisora. Dicha corriente a su vez re-radia un campo eléctrico que es detectado en una bobina receptora. La ventaja que presenta es su bajo coste y sencillez de funcionamiento. Como inconveniente presenta una elevada tasa de falsa alarma, debido a la gran cantidad de objetos metálicos enterrados que puede haber en un escenario (restos de metralla, tornillos...).
- ✱ *Ground Penetrating Radar* (GPR). Considerada como una de las mejores técnicas para obtener imágenes del subsuelo, se basa en emitir ondas electromagnéticas capaces de penetrar en el subsuelo, de forma que a partir de las ondas reflejadas es posible realizar una detección e imagen radar del mismo, identificando posibles objetos enterrados. No obstante, es una técnica muy sensible a la composición del subsuelo y al relieve o rugosidad del suelo, requiriendo de técnicas de procesado de señal para poder eliminar falsos ecos y otros artefactos presentes en la imagen radar (*clutter*).
- ✱ *Nuclear Quadrupole Resonance* (NQR). Se basa en la observación de las señales de radiofrecuencia de ciertas sustancias características de materiales explosivos. Estos sistemas proporcionan una alta probabilidad de detección, si bien su complejidad es elevada.

- Sistemas acústicos y sísmicos. Su principio de funcionamiento es similar al GPR, basándose en la emisión de ondas acústicas a través del suelo. El adecuado procesamiento de la señal recibida permite llevar a cabo la identificación de posibles objetos enterrados. La tasa de falsa alarma es menor que en el caso de los sistemas de inducción electromagnética. Como desventaja, el tiempo de escaneado oscila entre 2 y 15 minutos por metro cuadrado.

Otras técnicas de detección no invasivas también viables, pero menos empleadas por sus elevados costes operativos y tecnológicos, son:

- Análisis de imagen en banda visible o infrarroja, que detecta patrones superficiales que se corresponden a terrenos donde se han sembrado minas.
- Radiografía, que posee una alta detección pero se limita a la detección de minas enterradas cerca de la superficie (10 cm o menos), además de presentar restricciones para la operación con rayos X.
- Sensores químicos o biológicos, para detectar componentes químicos del material explosivo que salen a la superficie a través de microfisuras del armazón de la mina.

Independientemente del principio físico, la aplicación de técnicas no invasivas para detección de minas requiere que el sistema detector guarde una distancia de seguridad con respecto a la posible localización de la mina, recomendándose unos 3-5 m de distancia, para evitar que el peso del sistema detector pueda provocar la detonación del explosivo. Para lograr este objetivo hay diferentes posibilidades:

- Emplear sistemas radar *stand-off*, con los que se ilumina el suelo con un ángulo de incidencia tal que se maximiza la cantidad de energía que penetra. En este caso, el problema surge porque, según la ley de Snell, la energía reflejada saldrá en dirección opuesta al radar, lo cual disminuye la sensibilidad del sistema. Ejemplos de estos sistemas se describen en los documentos de patente US 8193965 B2 y US 7479918 B2, donde se mejora la capacidad de procesamiento empleando técnicas polarimétricas.

- Emplear sistemas capaces de iluminar el suelo con incidencia perpendicular al suelo (o también denominada incidencia normal). Si bien no se logra acoplar la máxima energía al suelo, este hecho se compensa con la posibilidad de aproximarse más a él y de poder captar más energía reflejada. En este tipo de sistemas la dificultad radica en conseguir proporcionar iluminación perpendicular al suelo guardando la distancia de seguridad de 3-5 m en las proximidades del radar.

Dentro de las alternativas para incidencia perpendicular al suelo, existe la posibilidad de emplear robots autónomos no tripulados de dimensión y peso reducidos, que pueden llevar a cabo la detección de minas con un reducido (pero no nulo) riesgo de detonación. Por ejemplo, en la publicación de Gonzalez de Santos, P., Garcia, E., Estremera, J., & Armada, M. A. (2005). DYLEMA: Using walking robots for landmine detection and location. *International Journal of Systems Science*, 36(9), 545-558 se presenta un robot equipado con un sistema detector basado en inducción electromagnética y un sistema *Global Positioning System* (GPS) diferencial (DGPS) para monitorización y control de trayectoria. Una limitación es la velocidad de escaneo, que es de 5 cm por segundo.

De forma similar, en el documento de patente US 7511654 B1 se propone un sistema de detección de minas basado en GPR, en el que se utiliza un vehículo robótico para crear una imagen radar del subsuelo, que permite detectar objetos enterrados y, por consiguiente, minas. La invención se basa en enterrar una antena transmisora y receptora en el suelo en diferentes posiciones separadas por media longitud de onda, de forma que la combinación coherente de la señal recibida en cada posición permite crear una imagen radar bidimensional (en rango o alcance, y en cross-rango o sentido de movimiento del robot). Este sistema, por tanto, dispone de capacidad para realizar imagen radar con apertura sintética (SAR). Como inconveniente, destaca la lentitud para llevar a cabo el proceso de inspección.

Una alternativa al uso de vehículos terrestres y a las limitaciones de los mismos en cuanto a velocidad de reconocimiento del terreno (así como al potencial riesgo de detonación al estar en contacto con el suelo) lo constituyen los vehículos aéreos como sistema detector. Dentro de ellos, se pueden destacar los UAV (*Unmanned Aerial*

Vehicles) ya que la facilidad para acceder a UAV de dimensiones reducidas y su sencillez de maniobrabilidad han disparado su uso en múltiples disciplinas.

En el ámbito radar, en la publicación de Marc Lort, Albert Aguasca and Xavier Fabregas (2015). Interferometric and Polarimetric X-band SAR sensor integrated in a small UAV multicopter platform. *2015 URSI National Symposium*. Pamplona, September 2015 se embarca un radar polarimétrico para hacer imagen radar. Los radares polarimétricos presentan la ventaja de que permiten medir la respuesta de diferentes materiales a las ondas electromagnéticas, pudiendo emplear esta propiedad no sólo para obtener la imagen radar, sino la composición de los materiales. Al igual que muchos sistemas UAV, incorpora un receptor GPS con una unidad de medición inercial (IMU, *Inertial Measurement Unit*) para poder determinar la posición del UAV durante el vuelo. El ancho de banda empleado es pequeño, resultando en una resolución en rango de 1,5 m, resolución insuficiente para detectar objetos que puedan estar enterrados a menor profundidad, ya que no sería posible distinguir entre la reflexión en la interfaz aire-suelo y la reflexión en el objeto enterrado.

Otra aplicación de radar SAR embarcado en un UAV se describe en el documento de Chenchen J. Li, Hao Ling (2015) Synthetic aperture Radar imaging using a small consumer drone, *IEEE Antennas and Propagation International Symposium*, 2015, Vancouver. El radar, que opera en la banda de 3.1 a 5.3 GHz, se ha montado en un UAV de tipo dron. Para la comunicación con una estación terrena para control del vuelo y recepción de datos del radar se emplean módulos de comunicación para Wi-Fi. La ventaja de este sistema radar más módulo de comunicaciones es que es compacto y de poco peso (menos de 300 g), de forma que puede ser fácilmente embarcado en el UAV. Sin embargo, el sistema para hacer imagen SAR todavía no ha podido ser satisfactoriamente probado en vuelo para iluminación perpendicular al suelo (*downward-looking SAR*) debido a la inestabilidad en la trayectoria del vuelo del UAV. El UAV incorpora un receptor GPS y sensores inerciales, que no proporcionan la suficiente precisión de posicionamiento para una correcta combinación coherente de los datos de señal radar medidos en cada posición de vuelo del UAV.

En el ámbito de la detección de objetos explosivos enterrados mediante sistemas GPR embarcados en UAV, ya en el documento de Goad, A., Schorer, D., Sullenberger, J., Yousuf, F., Yu, A., Donohue, G., & Hintz, K. (2008, April). Landmine detection utilizing an unmanned aerial vehicle. *Systems and Information Engineering Design Symposium, 2008. SIEDS 2008. IEEE* (pp. 231-236), se analiza la capacidad de un radar embarcado en un UAV para detectar minas, atendiendo a diferentes parámetros tales como el diámetro de la mina, la relación señal a ruido del radar y la altura de vuelo. Sin embargo, los autores del estudio concluyen que para los UAV comparados el sistema no es realizable debido a que se necesita pilotar un UAV de considerable tamaño (como por ejemplo modelos del tipo *Shadow 200*, *Shadow 600* y *Predator*) a una altura menor que su altura operacional (para poder detectar las minas), lo que puede poner en riesgo al UAV por peligro de colisión con el suelo.

Posteriormente, en el documento de Rodriguez, J., Castiblanco, C., Mondragon, I., & Colorado, J. (2014, May). Low-cost quadrotor applied for visual detection of landmine-like objects. *IEEE 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)* pp. 83-88, se propone el empleo de un UAV de reducidas dimensiones y peso para detección de minas que no estén enterradas a partir del análisis de fotografías. Como características destacables de este sistema se cita el hecho de emplear una conexión Wi-Fi para la comunicación entre el UAV y una estación terrena fija, así como de disponer de una unidad de posicionamiento del UAV formada por diferentes sensores (IMU, magnetómetro, altímetro) que permite al sistema trazar trayectorias de exploración.

En el documento de patente US 2007/0035304 se propone un sistema de detección formado por una unidad aérea donde está embarcado el transmisor y un remolque aéreo donde está el receptor, configurando de esta forma un sistema biestático que trabaja en el rango de frecuencias de 80 kHz a 1 MHz. En este caso, el sistema se basa en inducción electromagnética, determinando la posición de los objetos detectados a partir del tiempo de vuelo entre la señal transmitida y el eco detectado. En un sistema biestático, la posición relativa entre el transmisor y el receptor es siempre la misma, de forma que el suelo se ilumina siempre bajo un mismo ángulo. Para determinadas aplicaciones puede proporcionar algo más de información que un sistema

monoestático (aquel en el que se emite la señal radar desde el mismo punto en que se recibe), pero es más limitado que un sistema multiestático, donde se puede modificar la separación entre transmisor y receptor para disponer de más diversidad espacial.

Las técnicas polarimétricas también han sido de aplicación en sistemas UAV embarcados para aplicaciones GPR, como se describe en el documento de patente US 7528762 B2, donde el sistema, concebido para trabajar en la banda de 1 MHz a 1 GHz, emplea una técnica de procesamiento de señal basada en polarimetría que permite eliminar el *clutter* aire-suelo. Esta técnica se basa en seleccionar, en primer lugar, la frecuencia y el ángulo de incidencia adecuados para maximizar la penetración en el suelo teniendo en cuenta las características del suelo y la profundidad de penetración. A continuación, se adquiere el campo dispersado para las dos polarizaciones, típicamente ortogonales entre sí, y se calcula la diferencia coherente entre ambas señales. Los ecos que no se cancelen corresponden a reflexiones en objetos enterrados, debido a que el subsuelo cambia la polarización del campo de forma diferente al objeto a detectar (dado que en general el subsuelo y el objeto tendrán diferente composición). Con respecto al hardware, se contempla un sistema embarcado, colocando las antenas en las palas de un helicóptero. La principal limitación de esta técnica de procesamiento es que es apta solamente para sistemas *stand-off* (el radar se encuentra a una distancia de varios metros de la superficie a escanear).

La invención descrita en el documento de patente US 2014/0062754 A1 se basa en un sistema GPR embarcado en un UAV, que es capaz de posicionarse autónomamente siguiendo una trayectoria previamente definida (por ejemplo, en zigzag), empleando la información proporcionada por un sistema GPS diferencial. Además, en caso de pérdida de la señal de GPS, el documento mencionado contempla que es posible emplear la información de sensores inerciales para mantener la trayectoria, tales como magnetómetros y giróscopos. Se define una altura de vuelo de 66 a 330 cm, con una precisión de posicionamiento de 16,5 cm. El rango de frecuencias de trabajo es de 4 a 6 GHz. El procesamiento de la señal radar se realiza en el sistema embarcado en el UAV, enviándose la imagen radar resultante a una estación terrena vía un enlace inalámbrico. Este sistema presenta una velocidad de escaneado de 24 segundos por metro cuadrado (25 metros cuadrados en 10 minutos). Además de las características

mencionadas, este sistema también incorpora contramedidas para poder desactivar la mina, aterrizando el UAV sobre la zona donde se ha detectado la mina y empleando elementos químicos capaces de anular el explosivo.

Una invención similar a la anterior se describe en el documento de patente US 2014/0062758 A1. En este caso, el sistema es capaz de identificar patrones de suelo irregular con una cámara óptica y una térmica. Una vez detectados, se emplea un radar GPR para detectar posibles objetos enterrados. En caso positivo, es capaz de aplicar las contramedidas mencionadas en la anterior invención para anular la capacidad explosiva. Además, contempla el empleo de un radar de baja resolución para detección de objetos enterrados. Si la detección es positiva, se conmuta a un radar de alta resolución para una mejor identificación del objeto enterrado.

En las invenciones listadas anteriormente donde se emplea un radar GPR embarcado en un UAV para detección de minas (US 7528762 B2, US 2014/0062754 A1, US 2014/0062758 A1) no existe la posibilidad de obtener una imagen radar basada en apertura sintética, es decir, combinando coherentemente las medidas radar tomadas en las diferentes posiciones del vuelo del UAV. Ello es debido a que la precisión de posicionamiento es de 16,5 cm (en el mejor de los casos), 6,6 veces mayor que la longitud de onda de trabajo del sistema radar (6 GHz a la frecuencia más alta). Para poder emplear técnicas de apertura sintética es necesario que las posiciones de adquisición de datos estén separadas media longitud de onda a la frecuencia de trabajo. La representación punto a punto de la señal radar procesada en rango o alcance supone una pérdida de resolución espacial (cross-rango) con respecto al procesado SAR (Fig. 1).

La posibilidad de emplear un conjunto de UAV se describe en el documento de patente US 6653970 B1. En la misma, un UAV emite una señal que es recibida en uno o varios UAV, siendo la posición de todos ellos conocida. El sistema se emplea para la detección de blancos en entornos con elevado multicamino (como pueden ser zonas montañosas o con numerosas construcciones donde la señal transmitida sufre múltiples reflexiones), empleando medida de retardos como método para detectar las posiciones de los blancos. El empleo de sistemas multiestáticos (esto es, el transmisor y el receptor están en posiciones diferentes entre sí) permite aumentar la información

recabada del escenario bajo estudio al disponer de más ángulos de iluminación (Alvarez, Y., Rodriguez-Vaqueiro, Y., Gonzalez-Valdes, B., Mantzavinos, S., Rappaport, C. M., Las-Heras, F., & Martinez-Lorenzo, J. A. (2014). Fourier-based imaging for multistatic radar systems. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 62(8), 1798-1810); Gonzalez-Valdes, B., Rappaport, C., Lorenzo, M., Jose, A., Alvarez, Y., & Las-Heras, F. (2015, July). Imaging effectiveness of multistatic radar for human body imaging. *Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2015 IEEE International Symposium on* (pp. 681-682). IEEE.). Si bien la invención descrita en el documento de patente US 6653970 B1 indica que se emplea procesado SAR, la medida de la posición del UAV transmisor y de los receptores se basa en receptores GPS, con lo que la precisión obtenida en la posición no podrá ser inferior a 1 m (que es la precisión del GPS en uso civil en las mejores condiciones de operación), lo cual hace que la detección de blancos sea inexacta, con errores de posición que en muchas aplicaciones superan el umbral de lo admisible.

Si bien la mayoría de minas son de carácter metálico, fáciles de detectar por la mayoría de los sistemas, recientemente se han desarrollado explosivos plásticos, cuyo bajo contraste dieléctrico con respecto al subsuelo en el que están enterrados dificulta su detección. En este sentido, una solución posible es la determinación de la composición del subsuelo para poder utilizarla como contraste respecto al material que se pretende detectar.

Así, por ejemplo, la invención recogida en el documento de patente US 8849523 B1 describe un sistema con capacidad para determinar la composición del subsuelo empleando un radar GPR, aunque está embarcado en un vehículo terrestre de tipo tractor empleado para la siembra de semillas, lo cual penaliza enormemente la velocidad de análisis. Por otro lado, en esta patente no se especifica en qué consiste el método para determinar la composición del subsuelo, desconociéndose por tanto los parámetros de precisión, si estima tanto la permitividad como la conductividad, o qué algoritmo de procesado se emplea.

Existen diversas técnicas para determinar los parámetros constitutivos del subsuelo. Por ejemplo, en la publicación de Ramirez, A., Daily, W., LaBrecque, D.,

Owen, E., & Chesnut, D. Monitoring an underground steam injection process using electrical resistance tomography, *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 1, pp. 73-87, 1993 y en el de Zhou, Q. Y., Shimada, J., & Sato, A., Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography, *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 2, pp. 273-285, 2001 se emplea *low-frequency electrical resistivity tomography* (ERT) e inducción electromagnética (EMI) para determinar el contenido en agua del subsuelo. En la publicación de Hendrickx, J. M. H., Borchers, B., Corwin, D. L., Lesch, S. M., Hilgendorf, A. C., & Schlue, J., Inversion of soil conductivity profiles from electromagnetic induction measurements, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 66, No. 3, pp. 673-685, 2002 también se emplean estas técnicas para determinar la conductividad del subsuelo. Si bien estas técnicas permiten realizar la caracterización del subsuelo y detección de posibles objetos enterrados, la naturaleza de las señales empleadas no permite obtener imágenes de alta resolución del subsuelo que faciliten la identificación de, entre otros, los objetos enterrados que se intentan localizar.

Con respecto al empleo de sistemas GPR, en el documento de Busch, S., Van der Kruk, J., & Vereecken, H., Improved characterization of fine-texture soils using on-ground GPR full-waveform inversion, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 7, pp. 3947-3958, July 2014 se propone un modelo electromagnético que caracterice el subsuelo, planteándose una función de coste que minimice la diferencia entre el campo electromagnético medido y el campo electromagnético radiado por el modelo electromagnético que caracteriza el subsuelo. Cuando dicha diferencia es mínima, se considera que se han hallado los parámetros constitutivos del subsuelo. La limitación de este método es el establecimiento de un modelo electromagnético que incrementa la complejidad del sistema. Especialmente crítico es el hecho de estar basado en técnicas de optimización global y local, que son bastante sensibles a incertidumbres en las medidas, pudiendo dar lugar a una estimación errónea de los parámetros constitutivos del subsuelo.

En la publicación de C. R., Morton Jr, K. D., Collins, L. M., & Torrione, P. A., Analysis of linear prediction for soil characterization in GPR data for countermining Applications, *Sensing and Imaging*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-20, 2014 se menciona la

importancia de la correcta caracterización del subsuelo en aplicaciones para GPR y, en concreto, aplicadas a la detección de minas:

“Aunque la fenomenología detrás de GPR es esencialmente la misma que en radares aerotransportados o terrestres el hecho de transmitir y recibir señales que se propagan a través del subsuelo genera numerosos retos de procesamiento de señal intrínsecos a sistemas GPR. A diferencia de los radares convencionales, el canal de propagación en un GPR es de naturaleza heterogénea — la presencia de *clutter* en el subsuelo es bastante habitual, y las diferencias en la densidad y humedad del suelo pueden afectar las propiedades dieléctricas que determinan la velocidad de propagación y la intensidad de la firma radar de los blancos. Las señales GPR también interactúan con la superficie del suelo (así como otras interfaces del subsuelo, como el lecho de un camino o una carretera), la cual es en general rugosa y contribuye a general *clutter* adicional.” (trad. a.).

La estimación de los parámetros constitutivos típicamente se realiza mediante modelos de predicción lineal (LP) basados en procesos autorregresivos (AR) que emplean patrones de señales conocidas como base de datos (o *training set*) para realizar posteriormente la clasificación de la señal medida, asociándola a un determinado tipo de subsuelo. Si bien la precisión obtenida en la reconstrucción de los parámetros del subsuelo es elevada incluso en el caso de suelos altamente no homogéneos, el principal inconveniente es la necesidad de entrenar el algoritmo de caracterización, que requiere disponer de un elevado número de medidas de entrenamiento realizadas en condiciones reales que contemplen multitud de casos diferentes, además de restringir el algoritmo para un sistema GPR concreto (aplicar el algoritmo en otro sistema GPR requeriría realizar una nueva base de datos).

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a unos sistemas para la obtención de imágenes de cualquier objeto enterrado de cualquier composición y para caracterizar la composición del suelo y del subsuelo, que comprenden uno o varios módulos aéreos, una estación terrena y un sistema de comunicación entre elementos. La invención

también se refiere a los métodos de procesado de señal radar para la obtención de la imagen radar del subsuelo y de los posibles objetos enterrados en el subsuelo, incluyendo su detección y su localización, y para caracterizar la composición del subsuelo.

A los efectos de esta invención y su descripción, suelo se refiere a la superficie que separa el aire del subsuelo, y subsuelo al medio material donde están enterrados los potenciales objetos a localizar. La invención se refiere preferiblemente a suelo y subsuelo, como por ejemplo una superficie terrestre y el medio material situado bajo ella, aunque podría también aplicarse de forma más genérica a otro tipo de superficies y medios materiales, como, por ejemplo, una superficie de agua y el medio material donde están sumergidos los potenciales objetos a localizar.

A los efectos de esta invención y su descripción, operador se refiere a la persona que se encarga de la supervisión de los diferentes sistemas y métodos que componen la invención, así como de interactuar con los diferentes procesos que requieren de comunicación persona-máquina.

A los efectos de esta invención y su descripción, zona bajo estudio se refiere al suelo y subsuelo que se quiere inspeccionar, en busca de posibles objetos enterrados.

Un aspecto de la presente invención es un sistema aerotransportado para detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados. De ahora en adelante se podrá hacer referencia a este aspecto de la invención como "sistema monoestático". El sistema monoestático comprende:

- Al menos un módulo aéreo que a su vez comprende una unidad radar que emite y captura señales radar dirigidas y reflejadas en el suelo, un sistema de posicionamiento y guiado del módulo aéreo, y una unidad de control aérea que recolecta información de la unidad radar y del sistema de posicionamiento y guiado, controla parámetros de vuelo del módulo aéreo e intercambia información con una estación terrena.

- Una estación terrena que a su vez comprende un sistema de control de vuelo del módulo aéreo, una unidad de procesado de señales radar recibidas de la unidad radar que procesa las señales radar mediante un conjunto de algoritmos de procesado de

señal radar, y una aplicación informática para la representación de la imagen radar del subsuelo obtenida a partir de la unidad de procesado de señales radar.

- Unos medios de comunicación para emitir y recibir señales inalámbricas entre el módulo aéreo y la estación terrena.

El sistema de posicionamiento y guiado del módulo aéreo comprende un sistema de posicionamiento global, un sistema de posicionamiento basado en sensores inerciales, un sistema de posicionamiento basado en navegación cinética satelital en tiempo real o RTK (del inglés *Real Time Kinematik*), que intercambia información con una estación base de navegación cinética satelital en tiempo real situada en la estación terrena, y un sistema de posicionamiento basado en fotogrametría. El sistema de posicionamiento y guiado envía información a la unidad de control aérea, proporcionando la localización tridimensional precisa del módulo aéreo y la georreferenciación de los datos obtenidos con la unidad radar, con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros.

La detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados se realiza a partir de la información que el módulo aéreo intercambia con la estación terrena, donde se procesa en la unidad de procesado de la señal radar mediante un conjunto de algoritmos de procesado de la señal radar. Uno de estos algoritmos es un algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar y otro es un algoritmo de eliminación de *clutter* de la imagen radar. Los algoritmos citados requieren la localización tridimensional precisa, de valor igual o inferior a media longitud de onda para la máxima frecuencia de trabajo, del módulo aéreo y la georreferenciación de los datos obtenidos con la unidad radar para poder llevar a cabo el procesado coherente (es decir, empleando información de amplitud y fase de la señal radar medida) de la señal radar medida en diferentes posiciones, creándose de esta forma una apertura radar sintética. Una forma de tratar las señales radar digitalizadas recibidas mediante un algoritmo de procesado SAR y un algoritmo de eliminación de *clutter* es almacenarlas en forma de matriz y asociarlas a una matriz de coordenadas, tal como se explicará más adelante en esta descripción.

Otro aspecto de la presente invención es otro sistema aerotransportado para detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados. De ahora en adelante se podrá hacer referencia a este otro aspecto de la invención como “sistema multiestático”. El sistema multiestático comprende:

- Al menos un módulo aéreo, que es un módulo aéreo emisor, que a su vez comprende una unidad radar que emite señales radar, un sistema de posicionamiento y guiado del módulo aéreo emisor, y una unidad de control aérea que recolecta información de la unidad radar y del sistema de posicionamiento y guiado, controla parámetros de vuelo del módulo aéreo emisor e intercambia información con una estación terrena.

- Al menos un módulo aéreo, que es un módulo aéreo receptor, que a su vez comprende una unidad radar que captura la señal radar, un sistema de posicionamiento y guiado del módulo aéreo receptor, y una unidad de control aérea que recolecta información de la unidad radar y del sistema de posicionamiento y guiado, controla parámetros de vuelo del módulo aéreo receptor e intercambia información con una estación terrena.

- Una estación terrena que a su vez comprende un sistema de control de vuelo del módulo aéreo emisor y del módulo aéreo receptor, una unidad de procesamiento de señales radar recibidas de la unidad radar que procesa las señales radar mediante un conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar, y una aplicación informática para la representación de la imagen radar del subsuelo obtenida a partir de la unidad de procesamiento de señales radar.

- Unos medios de comunicación para emitir y recibir señales inalámbricas entre el módulo aéreo emisor y la estación terrena, entre el módulo aéreo receptor y la estación terrena, y entre el módulo aéreo emisor y el módulo aéreo receptor.

El sistema de posicionamiento y guiado del módulo aéreo emisor y del módulo aéreo receptor comprende un sistema de posicionamiento global, un sistema de posicionamiento basado en sensores inerciales, un sistema de posicionamiento basado en navegación cinética satelital en tiempo real o RTK, que intercambia información con una estación base de navegación cinética satelital en tiempo real situada en la

estación terrena, y un sistema de posicionamiento basado en fotogrametría. El sistema de posicionamiento y guiado envía información a la unidad de control aérea proporcionando la localización tridimensional precisa del módulo aéreo emisor y del módulo aéreo receptor y la georreferenciación de los datos obtenidos con la unidad radar con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros. Un algoritmo de procesamiento de señal radar de la unidad de procesamiento de señales radar es un algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de la imagen radar y otro es un algoritmo de eliminación de clutter de la imagen radar.

En una realización preferida de cualquiera de los dos sistemas, monoestático o multiestático, el módulo aéreo es un vehículo aéreo no tripulado. En una realización más preferida, el vehículo aéreo no tripulado es de tipo multirrotor.

En otra realización preferida del sistema monoestático, los medios de comunicación comprenden un sistema de comunicación bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo y la estación terrena, como por ejemplo dos transceptores a baja frecuencia, uno emplazado en la estación terrena y el otro en el módulo aéreo.

En otra realización preferida del sistema multiestático, los medios de comunicación comprenden un sistema de comunicación bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo emisor y la estación terrena, un sistema de comunicación bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo receptor y la estación terrena, y un sistema de comunicación radar bidireccional y en tiempo real entre la unidad radar embarcada en el módulo aéreo emisor y la unidad radar embarcada en el módulo aéreo receptor.

En otra realización más preferida del sistema de comunicación entre el módulo aéreo y la estación terrena del sistema monoestático o del sistema de comunicación radar entre las unidades radar de los vehículos aéreos emisor y receptor del sistema multiestático, dichos sistemas comprenden uno o varios módulos de comunicación 3G/4G o uno o varios transceptores a baja frecuencia o una interfaz IEEE 802.11 (Wi-Fi) o uno o varios módulos *Zigbee* o uno o varios módulos *Bluetooth*, o una combinación de cualquiera de los anteriores medios de comunicación. Un ejemplo de esta realización es un sistema de comunicación formado por dos módulos *ZigBee* o

Bluetooth, uno emplazado en la estación terrena y el otro en un módulo aéreo. Otro ejemplo de esta realización es un sistema de comunicación formado por dos módulos de comunicación 3G/4G, uno emplazado en la estación terrena y el otro en un módulo aéreo. Otro ejemplo de esta realización es un sistema de comunicación formado por dos interfaces de comunicación IEEE 802.11 (Wi-Fi), una emplazada en la estación terrena y la otra en un módulo aéreo. Otro ejemplo de esta realización es un sistema formado por dos transceptores a baja frecuencia, uno emplazado en la estación terrena y el otro en un módulo aéreo. Otro ejemplo de esta realización es un sistema de comunicación radar entre los dos módulos radar embarcados en los dos módulos aéreos, formado por dos transceptores a baja frecuencia, cada uno embarcado en un módulo aéreo.

En una realización específica del sistema monoestático, la unidad radar del módulo aéreo comprende:

- Una antena transmisora y una antena receptora.
- Un módulo radar para la generación de una señal electromagnética en una banda de frecuencia cuya frecuencia superior es igual o inferior a 5 GHz, y para la recepción de la señal electromagnética dispersada.

En una realización específica del sistema multiestático, la unidad radar del módulo aéreo emisor comprende:

- Una antena transmisora.
- Un módulo radar para la generación de una señal electromagnética en una banda de frecuencia cuya frecuencia superior es igual o inferior a 5 GHz.

En otra realización específica del sistema multiestático, la unidad radar del módulo aéreo receptor comprende:

- Una antena receptora.
- Un módulo radar para la recepción de la señal electromagnética dispersada.

En una realización preferida, las antenas emisora y receptora tendrán polarización circular, siendo la polarización circular de la antena emisora ortogonal a la

polarización circular de la antena receptora. En una realización aún más preferida, las antenas emisora y receptora son antenas de tipo helicoidal, con un parámetro S_{11} inferior a -15 dB en la banda de frecuencia en la que funciona el módulo radar, y una ganancia superior a 10 dB. En otra realización preferida, la antena receptora está formada por un *array* de dos elementos, siendo la polarización circular de cada elemento ortogonal a la polarización circular del otro elemento. El elemento del que se desea recibir la señal radar se selecciona mediante un conmutador o *switch* que conecta el elemento a la unidad radar. La conmutación entre los dos elementos permite obtener información polarimétrica.

En otra realización específica del sistema monoestático o del sistema multiestático, el sistema de control de vuelo del módulo o de los módulos aéreos comprende un sistema de control de vuelo manual y un sistema para la generación de trayectorias y control automático de vuelo. Mediante estos sistemas, es posible planificar con antelación la exploración del área de interés, la predeterminación del movimiento del módulo aéreo o la posición relativa entre varios módulos aéreos. También es posible implementar un sistema adaptativo que, en tiempo real, determine trayectorias eficientes de acuerdo a una serie de parámetros de contorno (orografía, lindes, condiciones atmosféricas, etc.). Mediante el sistema de control de vuelo manual, un operador puede supervisar el desarrollo de la exploración y en cualquier momento tomar el control para hacer correcciones o evitar accidentes.

De esta forma, la trayectoria de escaneo que sigue el módulo aéreo para explorar una determinada zona bajo estudio se puede introducir mediante el sistema para generación de trayectorias y control automático del vuelo a través de, por ejemplo, un fichero de coordenadas georreferenciadas. Una vez introducido, el operador de la invención podrá indicar al sistema que comience a realizar el escaneo. El sistema de control de vuelo manual permitirá al operador de la invención tomar inmediatamente el control del vuelo del módulo aéreo en caso de que existiera peligro de colisión, presencia de viento fuerte que alterara la trayectoria automática o similar, aterrizándolo en un lugar seguro.

En otra realización específica del sistema monoestático o del sistema multiestático, el algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de la imagen radar

emplea información polarimétrica. En una realización más específica, la información polarimétrica es obtenida a partir de la adquisición de la señal radar para dos polarizaciones ortogonales del campo eléctrico dispersado. De esta forma se consigue incrementar la diversidad de información, reconstruyéndose una imagen radar tridimensional para cada polarización. Estas imágenes tridimensionales se combinan, permitiendo llevar a cabo una mejor eliminación de falsos ecos radar y del *clutter*, ya que típicamente el suelo, subsuelo y posibles objetos enterrados presentan diferente tipo de respuesta para polarizaciones diferentes.

En otra realización específica del sistema monoestático o del sistema multiestático, el conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar además comprende un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar debido a la incertidumbre asociada al sistema de posicionamiento y guiado del módulo aéreo y un algoritmo para la detección de objetos enterrados.

En otra realización específica del sistema monoestático o del sistema multiestático con un conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar que son un algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de la imagen radar y un algoritmo de eliminación de *clutter* de la imagen radar, además comprende un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo.

En una realización más específica de la anterior, el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo a partir de la determinación de la distancia entre el eco en el suelo y el eco en un objeto metálico de calibración, observables ambos en la imagen radar. En otra realización más específica, el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo a partir de la medida de la diferencia de amplitud entre el eco en el suelo y el eco en un objeto metálico de calibración. En otra realización más específica, el algoritmo de eliminación del *clutter* de la imagen radar se basa en un proceso iterativo de cálculo en el que el efecto del suelo en la imagen radar es identificado en base a la altitud del módulo aéreo y a la estimación de la composición del subsuelo que proporciona el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo y posteriormente

eliminado de la imagen utilizando un algoritmo basado en máscaras y un algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar.

A los efectos de esta invención y su descripción, eco es la reflexión que se observa en la imagen radar (o bien en una señal radar) cuando hay un cambio en el medio de propagación. De esta forma, eco en el suelo es la reflexión de la señal al impactar en el suelo. Parte de la energía se refleja (el eco) y parte de la energía se transmite al subsuelo. En el eco en un objeto metálico de calibración, toda la energía se refleja porque es un objeto metálico que no permite que una onda electromagnética lo atraviese.

En una realización preferida del sistema monoestático, el módulo aéreo emite y captura señales radar estableciendo su posición a diferentes alturas relativas al suelo.

En una realización preferida del sistema multiestático, el módulo aéreo emisor emite señales radar estableciendo su posición a diferentes alturas relativas al suelo y el módulo aéreo receptor captura señales radar estableciendo su posición a diferentes alturas relativas al suelo.

En una realización más preferida del sistema monoestático o del sistema multiestático anterior en la que se emite y/o captura señales radar estableciendo la posición a diferentes alturas relativas al suelo, la imagen radar creada con las señales radar obtenidas a diferentes alturas se combinan para detectar, localizar y obtener la imagen del suelo y de los objetos enterrados en el subsuelo.

En otra realización más preferida del sistema monoestático o del sistema multiestático en la que se emite y/o captura señales radar estableciendo la posición a diferentes alturas relativas al suelo, el algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar se basa en la suma coherente de la señal radar medida en dos o más posiciones del módulo aéreo, siempre que la separación entre dos posiciones consecutivas sea igual o menor a media longitud de onda a la frecuencia de trabajo más elevada.

Otro objeto de la presente invención es un método para la detección, localización, y obtención de imágenes de objetos enterrados que comprende las siguientes etapas:

a) Emitir una señal radar generada por una unidad radar hacia el suelo que se quiere inspeccionar.

b) Capturar la señal radar reflejada en el suelo, subsuelo y posibles objetos enterrados a través de una unidad radar y determinar la localización tridimensional precisa del módulo aéreo con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros.

c) Enviar la señal radar y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo a la estación terrena empleando el sistema de comunicación.

d) Procesar la señal radar en la unidad de procesamiento de señales radar para obtener una imagen tridimensional del subsuelo y detectar y localizar posibles objetos enterrados mediante un conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar que comprenden un algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de la imagen radar y un algoritmo de eliminación de *clutter* de la imagen radar.

En una realización preferente del método, la señal radar generada por la unidad radar se emite desde el módulo aéreo emisor, y la recepción de la señal radar reflejada en el suelo, subsuelo y posibles objetos enterrados se realiza en la unidad radar embarcada en el módulo aéreo receptor. La emisión y la recepción se sincronizan mediante un sistema de comunicación radar embarcado en cada módulo aéreo.

En una realización preferente del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos, la unidad radar además procesa la señal radar recibida en la etapa b) para convertirla a una secuencia digital, y en la etapa d) la unidad de procesamiento de señales radar procesa la señal radar digitalizada. De esta forma, la señal radar convertida a secuencia digital se envía a la estación terrena donde la unidad de procesamiento de señales radar procesa la señal radar digitalizada empleando el conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar.

En otra realización preferida del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos, la señal radar es un tren de pulsos electromagnéticos.

Para llevar a cabo la detección y localización de objetos enterrados, el procedimiento descrito en el método [etapas a) a d)] se repite para cada una de las posiciones de la trayectoria de escaneo que describe el módulo o módulos aéreos para

explorar una determinada zona bajo estudio, lo cual permite la obtención una imagen o una composición de imágenes del área de interés.

En otra realización preferida del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos, además se varía la posición del módulo aéreo y se repiten las etapas a), b) y c) previamente a la etapa d). En una realización más preferida, la imagen radar creada con las señales radar obtenidas a diferentes alturas se combinan para detectar, localizar y obtener la imagen del suelo y de los objetos enterrados en el subsuelo.

En otra realización preferida del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos o del método el que se emplea uno o varios módulos aéreos y se varía su posición, el algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar se basa en la suma coherente de la señal radar medida en dos o más posiciones del módulo aéreo, siempre que la separación entre dos posiciones consecutivas sea igual o menor a media longitud de onda a la frecuencia de trabajo más elevada.

Una forma de tratar las señales radar digitalizadas recibidas para cada posición es almacenándolas en una matriz, donde cada fila de la matriz corresponde a una posición. Las coordenadas de cada posición del módulo aéreo se almacenan en una matriz de coordenadas. Empleando la información de las posiciones del módulo aéreo, y conocido el tamaño del subsuelo que se quiere inspeccionar, se construye una matriz de transformación que relaciona los puntos del subsuelo con las posiciones del módulo aéreo. El procesado SAR realiza operaciones matemáticas con la matriz de transformación y la matriz de las señales radar digitalizadas para calcular la reflectividad del suelo y subsuelo. Esta reflectividad se procesa empleando el algoritmo de eliminación del *clutter* para resaltar la posible presencia de objetos enterrados y eliminar la reflexión del suelo. El procedimiento de eliminación del *clutter* es iterativo: i) conocidas las señales radar y la posiciones donde se han medido, se aplica el procesado SAR para calcular la reflectividad en la zona bajo estudio; ii) a partir de la reflectividad en la zona bajo estudio es posible identificar la reflexión de la señal radar en el suelo; ii) se aplica una máscara que englobe la región de la zona bajo estudio correspondiente a la reflexión de la señal radar en el suelo; iii) se calcula la señal radar que refleja la región enmascarada; iv) se crea una nueva matriz de señales radar igual a la matriz de señales radar inicial menos la señal radar que refleja la

región enmascarada; y v) se aplica el procesado SAR a la matriz resultante de la resta, obteniendo la reflectividad en la zona bajo estudio. Los pasos i) a v) se repiten un cierto número de veces, de forma que en cada iteración la contribución debida a la reflexión en el suelo (región enmascarada) se va atenuando. Finalmente, la reflectividad procesada se muestra como una imagen tridimensional del subsuelo en la aplicación informática desarrollada para la representación de la imagen radar del subsuelo.

A los efectos de esta invención y su descripción, reflectividad es una magnitud adimensional relativa a la intensidad del cociente entre la señal radar reflejada y la señal radar incidente en cada punto del espacio.

En otra realización preferida del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos o del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos y se varía su posición, el algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar emplea información polarimétrica, obtenida a partir de la adquisición de la señal radar para dos polarizaciones ortogonales del campo eléctrico dispersado.

En otra realización preferida del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos o del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos y se varía su posición, en la etapa d) la señal radar se procesa en la unidad de procesado de señales radar mediante un conjunto de algoritmos de procesado de señal radar que además comprenden un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar, y un algoritmo para la detección de objetos enterrados. De este modo, el algoritmo de procesado SAR y el algoritmo de eliminación del *clutter*, se combinan con un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar debido a la incertidumbre asociada al sistema de posicionamiento y guiado. El viento, cambios en la presión del aire o situaciones similares pueden introducir pequeñas alteraciones en la trayectoria a seguir por el módulo aéreo. Para llevarlo a cabo se puede emplear el método denominado *Phase Gradient Autofocus* (PGA), consistente en identificar puntos característicos en diferentes imágenes radar, y corregir el desenfoque aplicando operaciones de enventanado y desfase.

Por otro lado, la imagen tridimensional del subsuelo se procesa mediante un algoritmo para la detección de objetos enterrados. Este algoritmo procesa la imagen tridimensional del subsuelo en busca de agrupaciones de puntos con elevada reflectividad, que se pueden corresponder a objetos enterrados. El algoritmo analiza la forma del área o volumen con elevada reflectividad y, en base a patrones de entrenamiento almacenados en una base de datos, decide si se corresponde a un potencial objeto enterrado o no. Estos patrones de entrenamiento se obtienen a partir de fotografías de diferentes tipos de objetos enterrados (minas antipersona, restos arqueológicos, tuberías, etc.) y se pueden calcular previamente al escaneo de la zona bajo estudio.

En una realización específica del método en el que se emplea uno o varios módulos aéreos o del método el que se emplea uno o varios módulos aéreos y se varía su posición, el algoritmo de procesado SAR y el algoritmo de eliminación del *clutter* se combinan con un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo. Para ello, previamente a la etapa a), el método además comprende las siguientes etapas:

- e) Enterrar un objeto metálico de calibración en el subsuelo.
- f) Emitir una señal radar generada por una unidad radar hacia el suelo donde está enterrado el objeto metálico de calibración.
- g) Capturar la señal radar reflejada en el suelo, subsuelo y en el objeto metálico de calibración a través de una unidad radar, y determinar la localización tridimensional precisa del módulo aéreo con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros.
- h) Enviar la señal radar y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo emisor y del módulo aéreo receptor a la estación terrena empleando el sistema de comunicación.
- i) Procesar la señal radar en la unidad de procesado de señales radar para caracterizar la composición del subsuelo mediante un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo en el que se considera el eco en el suelo y el eco en un objeto metálico de calibración.

En una realización más específica de la anterior, las etapas e), f), g), h) e i) para caracterizar la composición del subsuelo se ejecutan una sola vez, previamente a la etapa a). De esta forma, se entierra el objeto metálico de calibración en un lugar y se procede a determinar una única vez el efecto suelo. Tras ello, se inicia la exploración del área de interés con el objeto de localizar e identificar los posibles objetos enterrados, pero con la información de la composición del suelo ya conocida.

En otra realización más específica del método, el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo a partir de la determinación de la distancia entre el eco en el suelo y el eco en un objeto metálico de calibración.

En otra realización más específica del método, el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo a partir de la medida de la diferencia de amplitud entre el eco en el suelo y el eco en un objeto metálico de calibración.

El algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo permite calcular el valor de permitividad del subsuelo y, en consecuencia, la velocidad de propagación de la señal radar en el subsuelo, de forma que la matriz de transformación empleada en el procesado SAR se puede construir teniendo en cuenta la velocidad de propagación de la señal tanto en el medio aéreo como en el subsuelo.

En otra realización más específica del método en el que previamente se caracteriza la composición del subsuelo mediante un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo, el algoritmo de eliminación del *clutter* de la imagen radar se basa en un proceso iterativo de cálculo en el que el efecto del suelo en la imagen radar es identificado en base a la altitud del módulo aéreo y a la estimación de la composición del subsuelo que proporciona el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo. Posteriormente el *clutter* es eliminado de la imagen utilizando un algoritmo basado en máscaras y un algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar.

Otro objeto de la presente invención es un método para caracterizar la composición del suelo y del subsuelo que comprende las siguientes etapas:

- a) Enterrar un objeto metálico de calibración en el subsuelo.
- b) Emitir una señal radar generada por una unidad radar hacia el suelo donde está enterrado el objeto metálico de calibración.
- c) Capturar la señal radar reflejada en el suelo, subsuelo y en el objeto metálico de calibración a través de una unidad radar, y determinar la localización tridimensional precisa del módulo aéreo con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros.
- d) Enviar la señal radar y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo a la estación terrena empleando el sistema de comunicación.
- e) Procesar la señal radar en la unidad de procesado de señales radar para caracterizar la composición del suelo y el subsuelo mediante un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo en el que se considera el eco en el suelo y el eco en un objeto metálico de calibración.

En una realización preferente, el método para caracterizar la composición del subsuelo se realiza antes de proceder con el método para la detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados en el que se realiza el escaneo de la zona bajo estudio, con el propósito de obtener el valor de permitividad del subsuelo que permite calcular la velocidad de propagación de la señal radar en el subsuelo.

En una realización específica, la emisión en la etapa b) se realiza desde un módulo aéreo emisor con una unidad de radar que transmite una señal radar, y la recepción de la etapa c) se realiza mediante un módulo aéreo receptor con otra unidad de radar que captura la señal radar, situados en dos posiciones distintas. En esta realización, la emisión y la recepción se sincronizan mediante un sistema de comunicación radar.

En una realización preferida del método en el que se usan uno o dos módulos aéreos, el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo a partir de la determinación de la distancia entre el eco en el suelo y el eco en un objeto metálico de calibración.

En otra realización preferida del método en el que se usan uno o dos módulos aéreos, el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo lleva a

cabo la estimación de la permitividad del subsuelo mediante un algoritmo que analiza la diferencia de amplitud entre el eco en el suelo y el eco en un objeto metálico de calibración.

La invención proporciona unos sistemas para detectar, localizar y obtener una imagen tridimensional del subsuelo así como de posibles elementos enterrados en él.

Los sistemas de la invención permiten obtener imágenes con una resolución superior respecto a los sistemas conocidos. La capacidad para obtener imágenes con precisión centimétrica en tres dimensiones se consigue gracias a que los sistemas proporcionan la localización tridimensional precisa del módulo o módulos aéreos y la georreferenciación de los datos obtenidos con la unidad radar. Para poder emplear técnicas de procesamiento de radar de apertura sintética o SAR (*Synthetic Aperture Radar*) es necesario que las posiciones de adquisición de datos estén separadas como máximo media longitud de onda a la frecuencia de trabajo lo cual, considerando las frecuencias de trabajo del sistema radar (5 GHz a la frecuencia más alta) supone una limitación de diseño para los sistemas tradicionales que los sistemas de la invención superan de forma innovadora.

Considerando incluso un escenario en el que el margen de localización tridimensional del módulo o módulos aéreos sea de 3 cm, los sistemas pueden trabajar en una banda de frecuencia cuya frecuencia máxima es de 5 GHz (precisión de posicionamiento de media longitud de onda, que a 5 GHz son 3 cm). Aún con esta frecuencia de trabajo se logra una detección de objetos superior, manteniendo de forma eficiente un compromiso entre resolución en rango o profundidad (con un ancho de banda máximo de 5 GHz se tiene una resolución en profundidad de 3 cm) y la capacidad de la onda electromagnética para penetrar en el subsuelo (la profundidad de penetración disminuye al aumentar la frecuencia, ya que hay más atenuación).

Gracias a su configuración, el módulo o módulos aéreos de la presente invención son capaces de posicionarse con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros lo que, a las frecuencias de trabajo consideradas, permite aplicar técnicas de procesamiento SAR mediante la combinación coherente de las medidas de señal radar tomadas en diferentes posiciones.

El procesado SAR permite crear, como su propio nombre indica, una apertura sintética que aumenta la resolución en cross-rango (dirección de movimiento paralela al suelo) del sistema radar. Por el contrario, la representación punto a punto de la señal radar procesada únicamente en rango o alcance supone una pérdida de resolución en cross-rango con respecto al procesado SAR (Fig. 1).

La posibilidad de obtener imágenes tridimensionales con mayor resolución que otros sistemas GPR, permite detectar y localizar objetos de menor tamaño incluso cuando están enterrados a poca profundidad, siendo posible aún en estos casos distinguir entre la reflexión en la interfaz aire-suelo (eco en el suelo) y la reflexión en el objeto enterrado (eco en el objeto enterrado).

El hecho de emplear cualquiera de los sistemas de la invención, con al menos un módulo aéreo, permite realizar la exploración de la zona bajo estudio en tiempo suficientemente rápido: hasta 25 metros cuadrados en 10 segundos, al igual que otros sistemas de exploración embarcados en UAV. Este tiempo es significativamente menor que el de los sistemas de detección embarcados en robots autónomos que se mueven sobre el suelo (medio metro en 10 segundos).

Una de las realizaciones de la invención contempla el empleo de un sistema formado por dos módulos aéreos, como por ejemplo dos UAV: en uno está embarcado el módulo radar transmisor, y en el otro el módulo radar receptor. Esta configuración, denominada multiestática, permite aumentar la diversidad espacial de la señal radar, consiguiendo iluminar el suelo y el subsuelo desde diferentes ángulos, incrementando de esta forma la información disponible con respecto a una configuración monoestática, que es la empleada por la mayoría de sistemas embarcados para fotogrametría, radar SAR y GPR. Disponer de más información permite incrementar la capacidad de detección, posibilitando resolver falsos ecos.

Uno de los algoritmos de procesado de señal radar de la invención es un algoritmo de eliminación de *clutter* de la imagen radar, que se emplea en combinación con un algoritmo de procesado SAR. El algoritmo de eliminación de *clutter* permite eliminar aquella parte de la señal radar recibida que se debe a la reflexión en el suelo y que enmascara parcialmente los ecos de los objetos enterrados en el subsuelo. La

combinación del procesado SAR y el algoritmo de eliminación de *clutter* permite por tanto aumentar el contraste entre el ruido o *clutter* y los objetos presentes en la imagen del subsuelo reconstruida, incrementando la capacidad de detección de la invención.

En una realización preferida de la invención, el conjunto de los algoritmos de procesado de señal radar además comprenden un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar debido a la incertidumbre asociada al sistema de posicionamiento y guiado del módulo aéreo, y un algoritmo para la detección de objetos enterrados. La corrección del desenfoque de la imagen radar aumenta la nitidez, facilitando que el algoritmo para la detección de objetos enterrados incremente su probabilidad de detección y reduzca la de falsa alarma o falsa detección.

En una realización preferida de la invención, la señal radar se recibe a través de dos antenas con polarizaciones ortogonales, para disponer de diversidad de polarización o información polarimétrica.

Una de las realizaciones del método de procesado de la señal radar permite obtener una imagen nítida del subsuelo y de los posibles elementos enterrados en él, gracias al empleo del algoritmo de procesado SAR combinado con un algoritmo para eliminación del *clutter* y un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar. Dicho desenfoque se debe a las oscilaciones del UAV (provocadas por el viento, pequeños cambios de presión del aire...).

En un modo de funcionamiento de cualquiera de los sistemas de la invención, el módulo aéreo emite y/o captura señales radar estableciendo su posición a diferentes alturas relativas al suelo. De esta forma se dispone de mayor diversidad de información espacial, ventajoso en la aplicación del algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar, al disponer de una mayor cantidad de imágenes tridimensionales del subsuelo tomadas en diferentes posiciones, siendo más sencillo calcular el desplazamiento y desfase necesarios para compensar el desenfoque.

Un método de la presente invención consiste en un proceso para caracterizar la composición del subsuelo, empleando cualquiera de los sistemas de la invención. De esta forma, un mismo sistema se puede utilizar simultáneamente para caracterizar un

terreno o para detectar elementos enterrados en él. El mismo sistema también se puede emplear solamente para realizar una caracterización de un subsuelo, por ejemplo para aplicaciones agrarias. Esta característica dota al sistema de un espectro funcional superior al de otros sistemas conocidos. Por otro lado, la determinación de la composición del subsuelo, y en concreto del valor de permitividad, se emplea en el post-procesado de la señal radar para recuperar correctamente la posición de los objetos enterrados en el subsuelo. Así, conocido el valor de permitividad es posible calcular la velocidad de propagación de la señal radar en el subsuelo que, junto con otras variables como la velocidad de propagación en otros medios de transición, hacen que la determinación de la localización de los objetos enterrados sea precisa. La correcta determinación de la posición de los objetos enterrados en el subsuelo ayuda también a una mejor eliminación del *clutter*.

El método de caracterización de la composición del subsuelo no está ligado a un sistema GPR en concreto, es decir, que el método de caracterización del subsuelo sirve para cualquier sistema GPR, bien embarcado en un vehículo aéreo, bien para un *forward looking* GPR, etc. Incluso si en el GPR es necesario cambiar alguna característica del mismo (módulo radar, antenas...) no es necesario recalibrar el método de caracterización del subsuelo, ya que el algoritmo de procesado es independiente del sistema.

El método de caracterización de la composición del subsuelo es sencillo y rápido de implementar por cualquier operador de la invención. Únicamente requiere enterrar en el subsuelo a caracterizar un objeto metálico de referencia, ubicar el módulo aéreo encima del mismo y lanzar una medida (no se necesita realizar un conjunto de medidas). El algoritmo de caracterización del subsuelo realiza de forma automática la determinación de los parámetros constitutivos, que se emplearán para el posterior procesado de las medidas de radar.

El método de caracterización de la composición del subsuelo se basa en la medida de distancias entre reflexiones en objetos o superficies conocidas, evitando tanto el empleo de modelos electromagnéticos que caractericen el subsuelo como el uso de técnicas de minimización o resolución de problemas electromagnéticos inversos, que aumentan la complejidad computacional del sistema.

La invención resulta de aplicación en aquellos sectores en los que se necesite realizar la detección de objetos enterrados, como por ejemplo en aplicaciones civiles para detección de minas, inspección de tuberías, arqueología y detección de huecos o cavidades.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La **Fig. 1** corresponde al Estado de la Técnica (E.T.) y representa una comparativa entre imágenes radar calculadas. En el gráfico de la izquierda, la imagen se obtiene empleando un algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de imagen radar. En el gráfico de la derecha, la imagen se obtiene directamente representando la señal radar medida en cada punto (migrando el eje temporal a eje de distancias). La magnitud representada en cada gráfico corresponde a la reflectividad radar normalizada en unidades de decibelios, cuya escala se representa en la regla de la derecha con valores desde -20 a 0. Las unidades de los ejes 'x' e 'y' de los gráficos vienen en metros [m]. Los resultados representados corresponden a dos objetos metálicos circulares emplazados en $(x ; y) = (0,1 ; -0,15)$ m, y $(x ; y) = (-0,1 ; 0,18)$ m, enterrados 12 y 8 cm bajo la superficie en un recipiente de dimensiones 0,35 x 0,45 x 0,2 m, relleno de arena. El radar GPR realizó el escaneo en un plano de 1 m x 1 m a una altura de 50 cm sobre la superficie de la arena. Tal como se puede observar, en el gráfico de la izquierda, donde se ha empleado el algoritmo de procesamiento SAR, se pueden distinguir perfectamente los dos objetos metálicos circulares enterrados en la arena, correspondientes a los valores máximos de reflectividad representados. Por el contrario, en el gráfico de la derecha, donde se ha representado la señal radar medida en cada punto, no es posible identificar dichos objetos.

La **Fig. 2** muestra un esquema general del sistema monoestático en la que se identifican los elementos que lo componen. En la figura se puede ver un módulo aéreo (1) formado por una unidad radar (11), un sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo (1) y una unidad de control aérea (15). En la figura además se puede ver un sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo (1) y una estación terrena (2).

La unidad de control aérea (15) está conectada con el sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo (1), con la unidad radar (11) y con el módulo bidireccional de comunicación (31).

El sistema de posicionamiento y guiado (13) comprende un sistema de posicionamiento global (131), un sistema de posicionamiento basado en sensores inerciales (132), un sistema de posicionamiento basado en navegación cinética satelital en tiempo real (133) que intercambia información con una estación base de navegación cinética satelital en tiempo real (22) situada en la estación terrena (2) y un sistema de posicionamiento basado en fotogrametría (134).

La unidad radar (11) comprende una antena transmisora (111), una antena receptora (112) y un módulo radar (113).

La estación terrena (2) comprende una estación base de navegación cinética satelital en tiempo real (22), un sistema de control de vuelo del módulo aéreo (21), una unidad de procesamiento de señales radar (23), una aplicación informática para la representación de la imagen radar del subsuelo (24) a partir de la información que devuelve la unidad de procesamiento de señales radar (23), y un sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo (1) y la estación terrena (2).

El sistema de control de vuelo del módulo aéreo (21) comprende un sistema de control de vuelo manual (211) y un sistema para la generación de trayectorias y control automático de vuelo (212).

La unidad de procesamiento de señales radar (23) comprende un conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar (25), que al menos consiste en un algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de la imagen radar (41) y un algoritmo de eliminación del *clutter* de la imagen radar (42). El conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar (25) además comprende un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar (43), y un algoritmo para la detección de objetos enterrados (45). El conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar (25) además comprende un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44).

En esta figura también se muestra una representación del suelo (50), subsuelo (51) y de un objeto metálico de calibración (61) empleado para la caracterización de la composición del subsuelo.

La **Fig. 3** muestra una realización del sistema multiestático en la que se emplean dos módulos aéreos para disponer de una configuración radar multiestática. En esta figura se representan los elementos que componen la estación terrena (2) mostrados en la figura anterior, y los elementos que componen los módulos aéreos, que también son similares a los de la figura anterior. En un módulo aéreo emisor (101) se encuentra embarcada una unidad radar (11) que comprende un módulo radar (113) que genera la señal radar a transmitir a través de la antena transmisora (111), y en el módulo aéreo receptor (102) se encuentra embarcada otra unidad radar (11) que comprende un módulo radar (113) que recibe la señal radar reflejada en el suelo (50), subsuelo (51) y posibles objetos enterrados a través de la antena receptora (112). En esta figura se muestra un sistema de comunicación radar bidireccional y en tiempo real (120) entre la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo emisor (101) y la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo receptor (102).

Se representa también el sistema de comunicación bidireccional y en tiempo real (3) entre el módulo aéreo emisor (101) y el módulo aéreo receptor (102) y la estación terrena (2).

El sistema de posicionamiento basado en navegación cinética satelital en tiempo real (133) del sistema de posicionamiento y guiado (13) de cada módulo aéreo intercambia información con una estación base de navegación cinética satelital en tiempo real (22) ubicado en la estación terrena (2).

La **Fig. 4** se corresponde con el Ejemplo 4 que se describe a continuación y representa una comparativa entre imágenes radar calculadas empleando tanto el método como el escenario de medida descritos en dicho ejemplo. En el gráfico de la izquierda se representa la reflectividad del suelo (50) y subsuelo (51) para el caso en el que no se ha enterrado ningún objeto en el subsuelo (51), y en la gráfica de la derecha se representa la reflectividad del suelo (50) y subsuelo (51) para el caso en el que se ha enterrado el objeto metálico a una profundidad de 15 cm.

La magnitud representada en cada gráfico corresponde a la reflectividad radar normalizada en unidades de decibelios, cuya escala se representa en la regla de la derecha con valores desde -20 a 0. Las unidades de los ejes 'x' y 'z' de los gráficos vienen en metros [m]. La línea de trazo discontinuo representa la posición conocida donde está enterrado el objeto metálico.

En ambas gráficas se puede observar la reflectividad del suelo (50), identificada como una banda de color negro en la posición $z = 0$ m, que ocupa todo el ancho de las gráficas. En el caso de la gráfica de la derecha, el objeto metálico corresponde a la región de color negro centrada en $x = 0.5$ m, $z = -0.17$ m.

EXPLICACIÓN DE UNA FORMA DE REALIZACIÓN PREFERENTE

Para una mejor comprensión de la presente invención, se exponen los siguientes ejemplos de realización preferente, descritos en detalle, que deben entenderse sin carácter limitativo del alcance de la invención.

EJEMPLO 1

Un primer ejemplo de realización de la invención se basó en el empleo de un único módulo aéreo (1), consistente en un vehículo aéreo no tripulado de tipo multirrotor, y más en concreto, de un octacóptero con su correspondiente controladora y juego de baterías. El octacóptero empleado, junto con la controladora y las baterías, tenía un peso máximo al despegue de 6 kg, con una capacidad de carga útil de 1,5 kg. Dicha capacidad de carga útil se empleó para embarcar e integrar en el octacóptero los siguientes elementos:

- Una unidad de control aérea (15), que se implementó mediante un microcontrolador (de tipo Raspberry Pi) y se programó para recolectar información de la unidad radar (11) y del sistema de posicionamiento y guiado (13), controlar parámetros de vuelo del módulo aéreo (1), y que intercambiaba información con una estación terrena (2). El octacóptero incorporaba un sistema estabilizador de tres ejes sobre el que iba montada la unidad radar (11) para compensar parcialmente las oscilaciones producidas durante el vuelo.

- Una interfaz IEEE 802.11 (Wi-Fi) que pertenecía al sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo (1) y la estación terrena (2). Esta interfaz se conectó a la unidad de control aérea (15).

- Un sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo. Este sistema estaba formado por cuatro subsistemas, descritos a continuación: i) sistema de posicionamiento basado en sensores inerciales (132) que venían incorporados en la controladora del octacóptero; ii) sistema de posicionamiento global (131): se aprovechó el receptor GPS incluido en la controladora del octacóptero; iii) sistema de posicionamiento basado en navegación cinética satelital en tiempo real (133) para intercambiar información con una estación base de navegación cinética satelital en tiempo real (22) situada en la estación terrena (2): se adquirieron dos unidades RTK, una de las cuales se situó en la estación terrena, y la otra en el módulo aéreo (1). Estas unidades RTK empleaban un radioenlace Wi-Fi, *Bluetooth* o transceptor a 433 MHz para enviar la información de corrección de las coordenadas GPS al receptor de la estación base de RTK a la unidad GPS con funcionalidad de RTK embarcada en el módulo aéreo (1). Por tanto, la información proporcionada por la unidad RTK y la información proporcionada por el GPS se combinaron para obtener las coordenadas georreferenciadas del módulo aéreo (1); iv) sistema de posicionamiento basado en fotogrametría (134): se implementó embarcando en el octacóptero una cámara web, que permite enviar fotografías cada vez que se lanza una medida de la unidad radar (11). A partir del procesado digital de dos o más imágenes tomadas en diferentes intervalos de tiempo se pudo determinar el desplazamiento del octacóptero de una posición a otra, indicándose como desplazamientos relativos en el plano paralelo al suelo (50) (plano horizontal).

La información espacial proporcionada por los cuatro subsistemas de posicionamiento (131) a (134) se procesó mediante una técnica de fusión de datos implementada en un microcontrolador (de tipo Raspberry Pi) que devuelve un único conjunto de coordenadas espaciales georreferenciadas del módulo aéreo (1).

- Con respecto a la unidad radar (11), el módulo radar (113) se implementó mediante un módulo radar de banda ancha (de tipo PulsOn P410), que operaba en la banda de 3 a 5 GHz. Este módulo se puede controlar de manera remota, de forma que

se le podía enviar la orden de disparo (generación de la señal radar) y la petición de envío de datos (señal radar recibida y digitalizada). Como antena transmisora (111) se empleó una antena de tipo hélice (polarización circular a izquierdas) de 12 dB de ganancia, con parámetro S11 en la banda de 3 a 5 GHz inferior a -12 dB. La antena receptora (112) que se empleó era prácticamente igual a la transmisora, pero con polarización circular a derechas.

La estación terrena (2) y los elementos que la componen se implementaron e integraron de la siguiente forma:

- Sistema de control de vuelo (21) del módulo aéreo (1). Para el sistema de control de vuelo manual (211) se aprovechó el mando de telecontrol que venía de serie con el octacóptero. Con respecto al sistema para generación de trayectorias y control automático de vuelo (212), se desarrolló una aplicación informática que permite al usuario especificar las coordenadas de la trayectoria que ha de seguir el módulo aéreo (1) sobre la zona bajo estudio. El sistema se configuró para operar empleando las coordenadas proporcionadas por el sistema para generación de trayectorias y control automático de vuelo (212), dando prioridad al sistema de control de vuelo manual (211) para poder retomar el control sobre el módulo aéreo (1) en caso de que fuera necesario.

- Unidad de procesamiento de señales radar (23). Se implementó en un ordenador portátil, que ejecutaba los algoritmos de procesamiento de señal radar (25). Estos algoritmos se programaron empleando un lenguaje de programación de alto nivel (el proporcionado por la compañía Matlab).

- Aplicación informática para la representación de la imagen radar del subsuelo (24). Se desarrolló una aplicación informática gráfica que permite al operador del sistema visualizar la reflectividad del suelo (50), subsuelo (51), y posibles objetos enterrados. La aplicación informática se desarrolló de forma que el usuario dispone de diferentes opciones de visualización (volumétrica, representación en cortes según planos horizontal, vertical o combinación de ambos). Asimismo, la aplicación informática resalta los objetos encontrados en función de la información suministrada

por el algoritmo para la detección de objetos enterrados (45) que se ejecutaba en la unidad de procesamiento de señales radar (23).

- Estación base de navegación cinética satelital en tiempo real (22): consistió en una de las dos unidades RTK mencionadas anteriormente. La otra unidad RTK se embarcó en el módulo aéreo (1).

- Una interfaz IEEE 802.11 (Wi-Fi) que pertenecía al sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo (1) y la estación terrena (2). Esta interfaz se conectó al ordenador portátil que implementó la unidad de procesamiento de señales radar (23) y el sistema para la generación de trayectorias y control automático de vuelo (212), y también al mando de control que implementó el sistema de control de vuelo manual (211) del módulo aéreo.

EJEMPLO 2

Para esta realización se empleó el sistema descrito en el ejemplo 1, aunque cambiando la antena receptora (112) de tipo hélice por una antena receptora (112) *array* de dos elementos: un elemento consistió en una antena de tipo hélice con polarización circular a derechas, y el otro elemento consistió en una antena de tipo hélice con polarización circular a izquierdas, ambas con ganancia y S11 similares a la antena transmisora. Cada uno de los elementos del *array* se conectó a un conmutador o *switch* que permitía adquirir la señal radar recibida en un elemento del *array* o en el otro elemento del *array*.

EJEMPLO 3

Para esta realización se empleó un sistema similar al descrito en el ejemplo 1 aunque empleando dos módulos aéreos de tipo octacóptero: un módulo aéreo (1) que era un módulo aéreo emisor (101) con una unidad radar (11) que transmitía una señal radar, y otro módulo aéreo (1) que era un módulo aéreo receptor (102) con una unidad radar (11) que capturaba la señal radar.

La sincronización entre el módulo aéreo emisor (101) y el módulo aéreo receptor (102) se consiguió mediante unos medios de comunicación que comprendían un sistema de comunicación radar (120) bidireccional y en tiempo real entre el módulo

radar (113) embarcado en el módulo aéreo emisor (101) y el módulo radar (113) embarcado en el módulo aéreo receptor (102). Este sistema de comunicación venía integrado dentro de la funcionalidad del módulo radar (113) (de tipo PulsOn P410), de forma que se pudo aprovechar esta funcionalidad existente para la extensión del sistema al modo multiestático.

La determinación de la posición tanto del módulo aéreo emisor (101) como del módulo aéreo receptor (102) se realizó de idéntica forma a como se describió en el ejemplo 1, de forma que en la estación terrena (2) se disponía de la información de la localización tridimensional del módulo aéreo emisor (101) y del módulo aéreo receptor (102) con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros.

EJEMPLO 4

Para aplicar el método para la detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados se utilizó el sistema descrito en el ejemplo 1 con un módulo aéreo (1). El método comprendía las siguientes etapas:

- a) En una primera etapa se emitió una señal radar generada por la unidad radar (11) hacia el suelo (50) que se quería inspeccionar.
- b) La señal se reflejó en el suelo (50), subsuelo (51) y posibles objetos enterrados en él, y se capturó a través de la unidad radar (11). La señal radar recibida se procesó en el módulo radar (113) para convertirla en una secuencia digital que se podía enviar empleando el sistema de comunicación entre el módulo aéreo (1) y la estación terrena (2). Además, se determinó la localización tridimensional del módulo aéreo (1) con una precisión de valor igual o inferior a 3 cm para las posiciones de la trayectoria considerada.
- c) La secuencia digital correspondiente a la señal radar recibida que se procesó en el módulo radar (113) y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) se enviaron a la estación terrena (2) empleando el sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real.
- d) La señal radar se recibió en la estación terrena (2) y se procesó en la unidad de procesamiento de señales radar (23) para obtener una imagen tridimensional del

subsuelo (51) y detectar y localizar posibles objetos enterrados mediante un conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar (25) que comprendían un algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de la imagen radar (41) y un algoritmo de eliminación de *clutter* de la imagen radar (42).

Una vez recibidos los datos de señal radar y localización tridimensional del módulo aéreo (1) en la estación terrena (2), se varió la posición del módulo aéreo (1) y se repitieron las etapas a), b) y c) previamente a la etapa d).

Las posiciones de la trayectoria que describió el módulo aéreo (1) se crearon empleando el sistema para la generación de trayectorias y control automático de vuelo (212). Se consideraron posiciones situadas a diferentes alturas sobre un mismo punto sobre el suelo (50), con lo que se incrementó la diversidad de información que permitió mejorar la capacidad para detectar, localizar y obtener la imagen del suelo (50) y de los objetos enterrados en el subsuelo (51).

Los datos de señal radar recibidos en la estación terrena (2) para cada posición del módulo aéreo (1) se almacenaron en una matriz, donde cada fila de la matriz correspondía a una posición del módulo aéreo (1). Asimismo, los datos de localización tridimensional del módulo aéreo (1) se almacenaron en una matriz de coordenadas. Empleando la información de las posiciones del módulo aéreo, y conocido el tamaño del subsuelo (51) a inspeccionar, se construyó una matriz de transformación que relacionaba los puntos del subsuelo (51) con las posiciones del módulo aéreo (1). El algoritmo de procesamiento SAR (41) realizó operaciones matemáticas con la matriz de transformación y la matriz de las señales radar digitalizadas y se calculó la reflectividad del suelo (50) y subsuelo (51). Esta reflectividad se procesó además empleando el algoritmo de eliminación del *clutter* de la imagen radar (42) para resaltar la posible presencia de objetos enterrados y eliminar la reflexión del suelo (50).

Para compensar el desenfoque de la imagen radar debido a la incertidumbre asociada al sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo (1), el algoritmo de procesamiento SAR (41) y el algoritmo de eliminación del *clutter* (42) se combinaron con un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar (43)

debido a la incertidumbre asociada al sistema de posicionamiento y guiado (13). El algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar (43) implementó el método denominado *Phase Gradient Autofocus* (PGA), que consistía en identificar puntos característicos en diferentes imágenes radar, de forma que corregía el desenfoque aplicando operaciones de inventanado y desfase.

Mediante un algoritmo para la detección de objetos enterrados (45) se procesó la imagen tridimensional en busca de agrupaciones de puntos con elevada reflectividad, que se pudieran corresponder a objetos enterrados. El algoritmo para la detección de objetos enterrados (45) analizó la forma del área o volumen con elevada reflectividad y, en base a patrones de entrenamiento almacenados en una base de datos, decidió si se correspondía a un potencial objeto enterrado o no. Estos patrones de entrenamiento se obtuvieron a partir de fotografías de diferentes tipos de objetos enterrados (minas antipersona, restos arqueológicos, tuberías, etc.) y se pudieron calcular previamente al escaneo de la zona bajo estudio.

Finalmente, la reflectividad del suelo (50), subsuelo (51) y posibles objetos enterrados en él se mostró como una imagen tridimensional del subsuelo (51) en la aplicación informática para la representación de la imagen radar del subsuelo (24), donde también se resaltaban los objetos que habían sido detectados por el algoritmo para la detección de objetos enterrados (45).

El método descrito en este ejemplo se aplicó haciendo volar el módulo aéreo (1) sobre un subsuelo (51) arenoso de composición homogénea (ubicación geográfica: playa de la Ñora, Gijón, Asturias). La trayectoria consistió en un desplazamiento horizontal de 1 m según un eje de referencia 'x', a una altura de 0.5 m sobre el suelo (50) que presentaba una irregularidad de unos 5 cm aproximadamente (microdunas). Se enterró un objeto metálico de 15 cm de diámetro y 2 cm de grosor a una profundidad de 15 cm en el subsuelo arenoso (51).

Se representó la reflectividad del subsuelo en el plano 'x-z', donde 'z' correspondía al eje de altura con respecto a la altura media del suelo (50) (ver Figura 4). En la gráfica de la izquierda se representa la reflectividad del suelo (50) y subsuelo (51) para el caso en el que no se enterró ningún objeto en el subsuelo (51), y en la

gráfica de la derecha se representa la reflectividad del suelo (50) y subsuelo (51) para el caso en el que se enterró el objeto metálico descrito en el subsuelo (51). Se pudo comprobar la capacidad del método descrito para realizar la detección del objeto metálico enterrado en el subsuelo (51), denotado con una línea de trazo discontinuo. En ambas gráficas se pudo observar la reflectividad del suelo (50), identificada como una banda de color negro en la posición $z = 0$ m, que ocupaba todo el ancho de la gráfica. En el caso de la gráfica de la derecha, el objeto metálico correspondía con una región de color negro centrada en $x = 0.5$ m, $z = -0.17$ m.

EJEMPLO 5

Para esta realización se empleó el método descrito en el ejemplo 4, pero se consideró el sistema multiestático descrito en el ejemplo 3, con un módulo aéreo emisor (101) y un módulo aéreo receptor (102).

En este ejemplo, las etapas a), b) y c) previamente a la etapa d), descritas en el ejemplo 4, se modificaron de la siguiente forma:

- a) En una primera etapa se emitió una señal radar generada por la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo emisor (101) hacia el suelo (50) que se quería inspeccionar.
- b) La señal se reflejó en el suelo (50), subsuelo (51) y posibles objetos enterrados en él, y se capturó a través de la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo receptor (102). La sincronización entre la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo emisor (101) y la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo receptor (102) se realizó empleando el sistema de comunicación radar bidireccional y en tiempo real (120). La señal radar recibida se procesó en el módulo radar (113) de la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo receptor (102). Además, se determinó la localización tridimensional del módulo aéreo emisor (101) y del módulo aéreo receptor (102) con una precisión de valor igual o inferior a 3 cm para las posiciones de la trayectoria considerada.
- c) La secuencia digital correspondiente a la señal radar recibida que se procesó en el módulo radar (113) de la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo

receptor (102) y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo emisor (101) y del módulo aéreo receptor (102) se enviaron a la estación terrena (2) empleando el sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real.

La etapa d) no se modificó con respecto a como se describió en el ejemplo 4.

Una vez recibidos los datos de señal radar y localización tridimensional del módulo aéreo emisor (101) y del módulo aéreo receptor (102) en la estación terrena (2), se varió la posición del módulo aéreo receptor (102) y se repitieron las etapas a), b) y c) previamente a la etapa d). La posición del módulo aéreo emisor (101) no se cambió, obteniéndose de este modo un sistema de medida multiestático. En este ejemplo, por simplicidad, no se consideraron posiciones situadas a diferentes alturas. Todas las posiciones de la trayectoria descrita por el módulo aéreo receptor (102) estaban a la misma altura con respecto al suelo (50) que el módulo aéreo emisor (101).

El procesado de los datos de señal radar recibidos en la estación terrena (2) para cada posición del módulo aéreo receptor (102) se realizó de forma a como se describió en el ejemplo 4, excepto por que en la matriz de coordenadas se añadió una fila más correspondiente a la posición del módulo aéreo emisor (101), rellenándose el resto de filas de dicha matriz con las posiciones del módulo aéreo receptor (102).

EJEMPLO 6

Para esta realización se empleó el método descrito en el ejemplo 4, pero se consideró la información polarimétrica obtenida mediante el sistema que se describió en el ejemplo 2.

En este ejemplo, para cada posición del módulo aéreo (1), se realizaron las etapas a), b) y c) previamente a la etapa d), descritas en el ejemplo 4.

En la etapa b), la señal se reflejó en el suelo (50), subsuelo (51) y posibles objetos enterrados en él. La señal reflejada se recibió capturada en la unidad radar (11) a través de los dos elementos del *array* de la antena receptora (112) que se describió en el ejemplo 2. En primer lugar, el *switch* conmutó al elemento del *array* que consistía en una antena de tipo hélice con polarización circular a derechas, y en segundo lugar,

el *switch* conmutó al elemento del *array* que consistía en una antena de tipo hélice con polarización circular a izquierdas.

Los datos de señal radar recibidos en la estación terrena (2) para cada posición del módulo aéreo (1) y para cada elemento del *array* de la antena receptora (112) se almacenaron en una matriz. El algoritmo de procesado SAR (41) realizó operaciones matemáticas con la matriz de transformación y la matriz de las señales radar digitalizadas y calculaba la reflectividad del suelo (50) y subsuelo (51) para cada polarización, combinándolas en amplitud. Una vez combinadas, la reflectividad resultante se procesó de la misma forma a la descrita en el método del ejemplo 4.

EJEMPLO 7

Para aplicar el método para la caracterización del subsuelo (51) se utilizó el sistema descrito en el ejemplo 1. El método comprendía las siguientes etapas:

- a) se enterró un objeto metálico de calibración (61) en el subsuelo (51);
- b) se emitió una señal radar generada por una unidad radar (11) hacia el suelo (50) donde estaba enterrado el objeto metálico de calibración (61);
- c) se capturó la señal radar reflejada en el suelo (50), subsuelo (51) y en el objeto metálico de calibración (61), a través de una unidad radar (11) y se determinó la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros;
- d) se envió la señal radar y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) a la estación terrena (2) empleando el sistema de comunicación (3);
- e) se procesó la señal radar en la unidad de procesado de señales radar (23) para caracterizar la composición del subsuelo (51) mediante un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) en el que se consideraba el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).

El algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) llevó a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo (51) a partir de la determinación de la distancia y/o de la diferencia de amplitud entre el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).

El valor de permitividad calculado se empleó como valor de entrada para la aplicación del algoritmo de procesado SAR (41) y el algoritmo de eliminación del *clutter* (42).

El método descrito en este ejemplo se aplicó haciendo volar el módulo aéreo (1) sobre un subsuelo (51) arenoso de composición homogénea (ubicación geográfica: playa de la Ñora, Gijón, Asturias). A partir de la recomendación publicada en (Cálculo de la humedad del suelo [recuperado el 2016-15-1]. Recuperado de Internet: <<http://maizedoctor.org/es/estimacion-de-la-humedad-del-suelo/>>), se estimó que el contenido de humedad del subsuelo (51) arenoso estaba comprendido entre el 6 y 8 %. El objeto metálico de calibración (61) se enterró a 15 cm. Tras aplicar el método descrito en este ejemplo, se obtuvo un rango de permitividad del subsuelo (51) arenoso estimado entre 5.4 y 6.2.

La permitividad estimada con el método descrito en este ejemplo se comparó con el valor de referencia publicado en el artículo de Fratticcioli, E., Dionigi, M., & Sorrentino, R. (2003, October). A new permittivity model for the microwave moisture measurement of wet sand. *Proceedings of 33rd European Microwave Conference*, 2003. (pp. 539-542). En dicho artículo, para un subsuelo (51) arenoso con un contenido de humedad entre el 6 y 8 % se proporcionaba un rango de permitividad entre 5 y 7, en concordancia con el rango obtenido tras aplicar el método (5.2 a 6.4).

REIVINDICACIONES

1. Sistema aerotransportado para detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados que comprende:

- un módulo aéreo (1) que a su vez comprende una unidad radar (11) que emite y captura señales radar, un sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo (1), y una unidad de control aérea (15) que recolecta información de la unidad radar (11) y del sistema de posicionamiento y guiado (13), controla parámetros de vuelo del módulo aéreo (1) e intercambia información con una estación terrena (2);

- una estación terrena (2) que a su vez comprende un sistema de control de vuelo (21) del módulo aéreo (1), una unidad de procesamiento de señales radar (23) recibidas de la unidad radar (11) que procesa las señales radar mediante un conjunto de algoritmos de procesamiento de señal radar (25), y una aplicación informática para la representación de la imagen radar del subsuelo (24) obtenida a partir de la unidad de procesamiento de señales radar (23) y;

- unos medios de comunicación para emitir y recibir señales inalámbricas entre el módulo aéreo (1) y la estación terrena (2);

caracterizado por que el sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo (1) comprende un sistema de posicionamiento global (131), un sistema de posicionamiento basado en sensores inerciales (132), un sistema de posicionamiento basado en navegación cinética satelital en tiempo real (133) que intercambia información con una estación base de navegación cinética satelital en tiempo real (22) situada en la estación terrena (2) y un sistema de posicionamiento basado en fotogrametría (134), que envían información a la unidad de control aérea (15) proporcionando la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) y la georreferenciación de los datos obtenidos con la unidad radar (11) con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros, y por que un algoritmo de procesamiento de señal radar (25) de la unidad de procesamiento de señales radar (23) es un algoritmo de procesamiento SAR

para la obtención de la imagen radar (41) y otro es un algoritmo de eliminación de *clutter* de la imagen radar (42).

2. Sistema aerotransportado para detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados que comprende:

- un módulo aéreo (1), que es un módulo aéreo emisor (101), que a su vez comprende una unidad radar (11) que emite señales radar, un sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo emisor (101), y una unidad de control aérea (15) que recolecta información de la unidad radar (11) y del sistema de posicionamiento y guiado (13), controla parámetros de vuelo del módulo aéreo emisor (101) e intercambia información con una estación terrena (2);
- un módulo aéreo (1), que es un módulo aéreo receptor (102), que a su vez comprende una unidad radar (11) que captura la señal radar, un sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo receptor (102), y una unidad de control aérea (15) que recolecta información de la unidad radar (11) y del sistema de posicionamiento y guiado (13), controla parámetros de vuelo del módulo aéreo receptor (102) e intercambia información con una estación terrena (2);
- una estación terrena (2) que a su vez comprende un sistema de control de vuelo (21) del módulo aéreo emisor (101) y del módulo aéreo receptor (102), una unidad de procesado de señales radar (23) recibidas de la unidad radar (11) que procesa las señales radar mediante un conjunto de algoritmos de procesado de señal radar (25), y una aplicación informática para la representación de la imagen radar del subsuelo (24) obtenida a partir de la unidad de procesado de señales radar (23); y
- unos medios de comunicación para emitir y recibir señales inalámbricas entre el módulo aéreo emisor (101) y la estación terrena (2), entre el módulo aéreo receptor (102) y la estación terrena (2), y entre el módulo aéreo emisor (101) y el módulo aéreo receptor (102);

caracterizado por que el sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo emisor (101) y del módulo aéreo receptor (102) comprende un sistema de posicionamiento global (131), un sistema de posicionamiento basado en sensores inerciales (132), un sistema de posicionamiento basado en navegación cinética satelital en tiempo real (133) que intercambia información con una estación base de navegación cinética satelital en tiempo real (22) situada en la estación terrena (2) y un sistema de posicionamiento basado en fotogrametría (134), que envían información a la unidad de control aérea (15) proporcionando la localización tridimensional precisa del módulo aéreo emisor (101) y del módulo aéreo receptor (102) y la georreferenciación de los datos obtenidos con la unidad radar (11) con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros, y por que un algoritmo de procesamiento de señal radar (25) de la unidad de procesamiento de señales radar (23) es un algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de la imagen radar (41) y otro es un algoritmo de eliminación de *clutter* de la imagen radar (42).

3. Sistema según las reivindicaciones 1 o 2 caracterizado por que el módulo aéreo (1) es un vehículo aéreo no tripulado.
4. Sistema según la reivindicación 3 caracterizado por que el vehículo aéreo no tripulado es un multirrotor.
5. Sistema según la reivindicación 1 caracterizado por que los medios de comunicación comprenden un sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo (1) y la estación terrena (2).
6. Sistema según la reivindicación 2 caracterizado por que los medios de comunicación comprenden un sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo emisor (101) y la estación terrena (2), un sistema de comunicación (3) bidireccional y en tiempo real entre el módulo aéreo receptor (102) y la estación terrena (2), y un sistema de comunicación radar (120) bidireccional y en tiempo real entre la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo emisor (101) y la unidad radar (11) embarcado en el módulo aéreo receptor (102).

7. Sistema según la reivindicación 5 o 6 caracterizado por que el sistema de comunicación (3) o el sistema de comunicación radar (120) comprenden uno o varios módulos de comunicación 3G/4G o uno o varios transceptores a baja frecuencia o una interfaz IEEE 802.11 (Wi-Fi) o uno o varios módulos *Zigbee* o uno o varios módulos *Bluetooth*, o una combinación de los anteriores.
8. Sistema según la reivindicación 1 caracterizado por que la unidad radar (11) comprende:
 - una antena transmisora (111) y una antena receptora (112);
 - un módulo radar (113) para la generación de una señal electromagnética en la banda de frecuencia de trabajo cuya frecuencia superior es igual o inferior a 5 GHz, y para la recepción de la señal electromagnética dispersada.
9. Sistema según la reivindicación 2 caracterizado por que la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo emisor (101) comprende:
 - una antena transmisora (111);
 - un módulo radar (113) para la generación de una señal electromagnética en la banda de frecuencia de trabajo cuya frecuencia superior es igual o inferior a 5 GHz.
10. Sistema según la reivindicación 2 caracterizado por que la unidad radar (11) embarcada en el módulo aéreo receptor (102) comprende:
 - una antena receptora (112);
 - un módulo radar (113) para la recepción de la señal electromagnética dispersada.
11. Sistema según la reivindicación 1 o 2 caracterizado por que el sistema de control de vuelo (21) del módulo aéreo (1) comprende:
 - un sistema de control de vuelo manual (211); y
 - un sistema para la generación de trayectorias y control automático de vuelo (212).

12. Sistema según la reivindicación 1 o 2 caracterizado por que el algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar (41) emplea información polarimétrica.
13. Sistema según la reivindicación 12 caracterizado por que la información polarimétrica se basa en la medida de la señal radar correspondiente a dos polarizaciones ortogonales del campo eléctrico dispersado.
14. Sistema según la reivindicación 1 o 2 caracterizado por que el conjunto de algoritmos de procesado de señal radar (25) además comprenden:
 - un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar (43) debido a la incertidumbre asociada al sistema de posicionamiento y guiado (13) del módulo aéreo (1); y
 - un algoritmo para la detección de objetos enterrados (45).
15. Sistema según la reivindicación 1 o 2 caracterizado por que el conjunto de los algoritmos de procesado de señal radar (25) además comprende un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44).
16. Sistema según la reivindicación 15 caracterizado por que el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo (51) a partir de la determinación de la distancia entre el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61), observables ambos en la imagen radar.
17. Sistema según la reivindicación 15 caracterizado por que el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo (51) a partir de la medida de la diferencia de amplitud entre el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).
18. Sistema según la reivindicación 15 caracterizado por que el algoritmo de eliminación del *clutter* de la imagen radar (42) se basa en un proceso iterativo de cálculo en el que el efecto del suelo (50) en la imagen radar es identificado en base a la altitud del módulo aéreo (1) y a la estimación de la composición del

subsuelo (51) que proporciona el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) y posteriormente eliminado de la imagen utilizando un algoritmo basado en máscaras y un algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar (41).

19. Sistema según la reivindicación 1 caracterizado por que el módulo aéreo (1) emite y captura señales radar estableciendo su posición a diferentes alturas relativas al suelo (50).

20. Sistema según la reivindicación 2 caracterizado por que el módulo aéreo emisor (101) emite señales radar estableciendo su posición a diferentes alturas relativas al suelo (50) y el módulo aéreo receptor (102) captura señales radar estableciendo su posición a diferentes alturas relativas al suelo (50).

21. Sistema según la reivindicación 19 o 20 caracterizado por que la imagen radar creada con las señales radar obtenidas a diferentes alturas se combinan para detectar, localizar y obtener la imagen del suelo (50) y de los objetos enterrados en el subsuelo (51).

22. Sistema según la reivindicación 1, 2, 19 o 20 caracterizado por que el algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar (41) se basa en la suma coherente de la señal radar medida en dos o más posiciones del módulo aéreo (1), siempre que la separación entre dos posiciones consecutivas sea igual o menor a media longitud de onda a la frecuencia de trabajo más elevada.

23. Método para la detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados mediante el sistema de la reivindicación 1, o mediante el sistema de la reivindicación 2, que comprende las siguientes etapas:

- a) emitir una señal radar generada por una unidad radar (11) hacia el suelo (50) que se quiere inspeccionar;
- b) capturar la señal radar reflejada en el suelo (50), subsuelo (51) y posibles objetos enterrados, a través de una unidad radar (11) y determinar la

localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros;

c) enviar la señal radar y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) a la estación terrena (2) empleando el sistema de comunicación (3);

d) procesar la señal radar en la unidad de procesado de señales radar (23) para obtener una imagen tridimensional del subsuelo (51) y detectar y localizar posibles objetos enterrados mediante un conjunto de algoritmos de procesado de señal radar (25) que comprenden un algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar (41) y un algoritmo de eliminación de *clutter* de la imagen radar (42).

24. Método según la reivindicación 23 caracterizado por que la emisión de la etapa a) se realiza desde un módulo aéreo emisor (101) con una unidad de radar (11) que transmite una señal radar y la recepción de la etapa b) se realiza mediante un módulo aéreo receptor (102) con otra unidad de radar (11) que captura la señal radar, situados en dos posiciones distintas, y por que la emisión y la recepción se sincronizan mediante un sistema de comunicación radar (120).

25. Método según la reivindicación 23 o 24 caracterizado por que la unidad radar (11) además procesa la señal radar recibida en la etapa b) para convertirla a una secuencia digital, y en la etapa d) la unidad de procesado de señales radar (23) procesa la señal radar digitalizada.

26. Método según la reivindicación 23 o 24 caracterizado por que la señal radar es un tren de pulsos electromagnéticos.

27. Método según la reivindicación 23 o 24 caracterizado por que además comprende variar la posición del módulo aéreo (1) y repetir las etapas a), b) y c) previamente a la etapa d).

28. Método según la reivindicación 27 caracterizado por que la imagen radar creada con las señales radar obtenidas en diferentes posiciones se combinan para

detectar, localizar y obtener la imagen del suelo (50) y de los objetos enterrados en el subsuelo (51).

29. Método según la reivindicación 23, 24 o 27 caracterizado por que el algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar (41) se basa en la suma coherente de la señal radar medida en dos o más posiciones del módulo aéreo (1), siempre que la separación entre dos posiciones consecutivas sea igual o menor a media longitud de onda a la frecuencia de trabajo más elevada.
30. Método según la reivindicación 23, 24 o 27 caracterizado por que el algoritmo de procesado SAR para la obtención de la imagen radar (41) emplea información polarimétrica.
31. Método según la reivindicación 30 caracterizado por que la información polarimétrica se basa en la medida de la señal radar correspondiente a dos polarizaciones ortogonales del campo eléctrico dispersado.
32. Método según la reivindicación 23, 24 o 27 caracterizado por que en la etapa d) la señal radar se procesa en la unidad de procesado de señales radar (23) mediante un conjunto de algoritmos de procesado de señal radar (25) que además comprende un algoritmo para corregir el desenfoque de la imagen radar (43) y un algoritmo para la detección de objetos enterrados (45).
33. Método según la reivindicación 23, 24 o 27 caracterizado por que, previamente a la etapa a), además comprende las siguientes etapas:
 - e) enterrar un objeto metálico de calibración (61) en el subsuelo (51);
 - f) emitir una señal radar generada por una unidad radar (11) hacia el suelo (50) donde está enterrado el objeto metálico de calibración (61);
 - g) capturar la señal radar reflejada en el suelo (50), subsuelo (51) y en el objeto metálico de calibración (61), a través de una unidad radar (11) y determinar la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros;

- h) enviar la señal radar y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) a la estación terrena (2) empleando el sistema de comunicación (3);
- i) procesar la señal radar en la unidad de procesamiento de señales radar (23) para caracterizar la composición del subsuelo (51) mediante un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) en el que se considera el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).

- 34. Método según la reivindicación 33 caracterizado por que las etapas e), f), g), h) e i) para caracterizar la composición del subsuelo (51), se ejecutan una sola vez, previamente a la etapa a).
- 35. Método según la reivindicación 33 caracterizado por que el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo (51) a partir de la determinación de la distancia entre el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).
- 36. Método según la reivindicación 33 caracterizado por que el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo (51) a partir de la medida de la diferencia de amplitud entre el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).
- 37. Método según la reivindicación 33 caracterizado por que el algoritmo de eliminación del *clutter* de la imagen radar (42) se basa en un proceso iterativo de cálculo en el que el efecto del suelo (50) en la imagen radar es identificado en base a la altitud del módulo aéreo (1) y a la estimación de la composición del subsuelo (51) que proporciona el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44), y posteriormente es eliminado de la imagen utilizando un algoritmo basado en máscaras y un algoritmo de procesamiento SAR para la obtención de la imagen radar (41).

38. Método para caracterizar la composición del subsuelo (51) mediante el sistema de la reivindicación 1 o mediante el sistema de la reivindicación 2 que comprende las siguientes etapas:

- a) enterrar un objeto metálico de calibración (61) en el subsuelo (51);
- b) emitir una señal radar generada por una unidad radar (11) hacia el suelo (50) donde está enterrado el objeto metálico de calibración (61);
- c) capturar la señal radar reflejada en el suelo (50), subsuelo (51) y en el objeto metálico de calibración (61), a través de una unidad radar (11) y determinar la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) con una precisión de valor igual o inferior a tres centímetros;
- d) enviar la señal radar y la localización tridimensional precisa del módulo aéreo (1) a la estación terrena (2) empleando el sistema de comunicación (3);
- e) procesar la señal radar en la unidad de procesado de señales radar (23) para caracterizar la composición del subsuelo (51) mediante un algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) en el que se considera el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).

39. Método según la reivindicación 38 caracterizado por que la emisión en etapa b) se realiza desde un módulo aéreo emisor (101) con una unidad de radar (11) que transmite una señal radar, y la recepción de la etapa c) se realiza mediante un módulo aéreo receptor (102) con otra unidad de radar (11) que captura la señal radar, situados en dos posiciones distintas, y por que la emisión y la recepción se sincronizan mediante un sistema de comunicación radar (120).

40. Método según la reivindicación 38 o 39 caracterizado por que el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo (51) a partir de la determinación de la distancia entre el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).

41. Método según la reivindicación 38 o 39 caracterizado por que el algoritmo para la caracterización de la composición del subsuelo (44) lleva a cabo la estimación de la permitividad del subsuelo (51) a partir de la medida de la diferencia de amplitud entre el eco en el suelo (50) y el eco en un objeto metálico de calibración (61).

FIG. 1

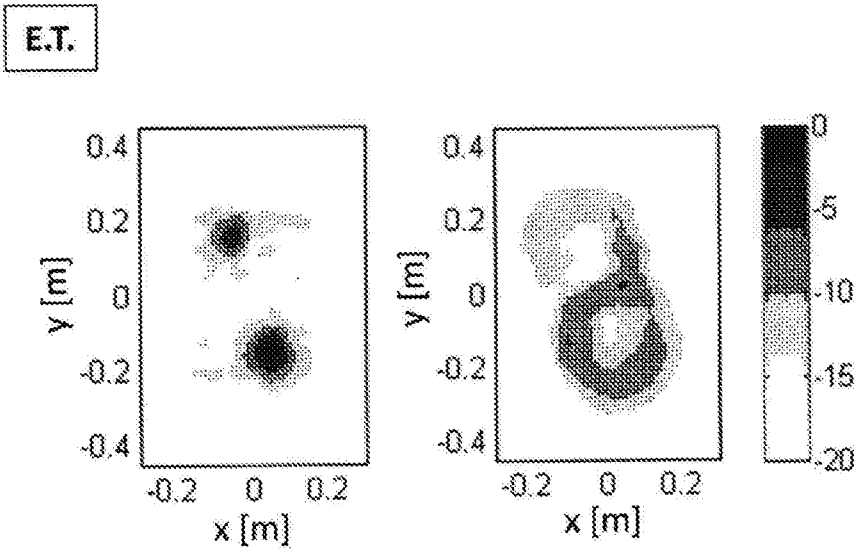
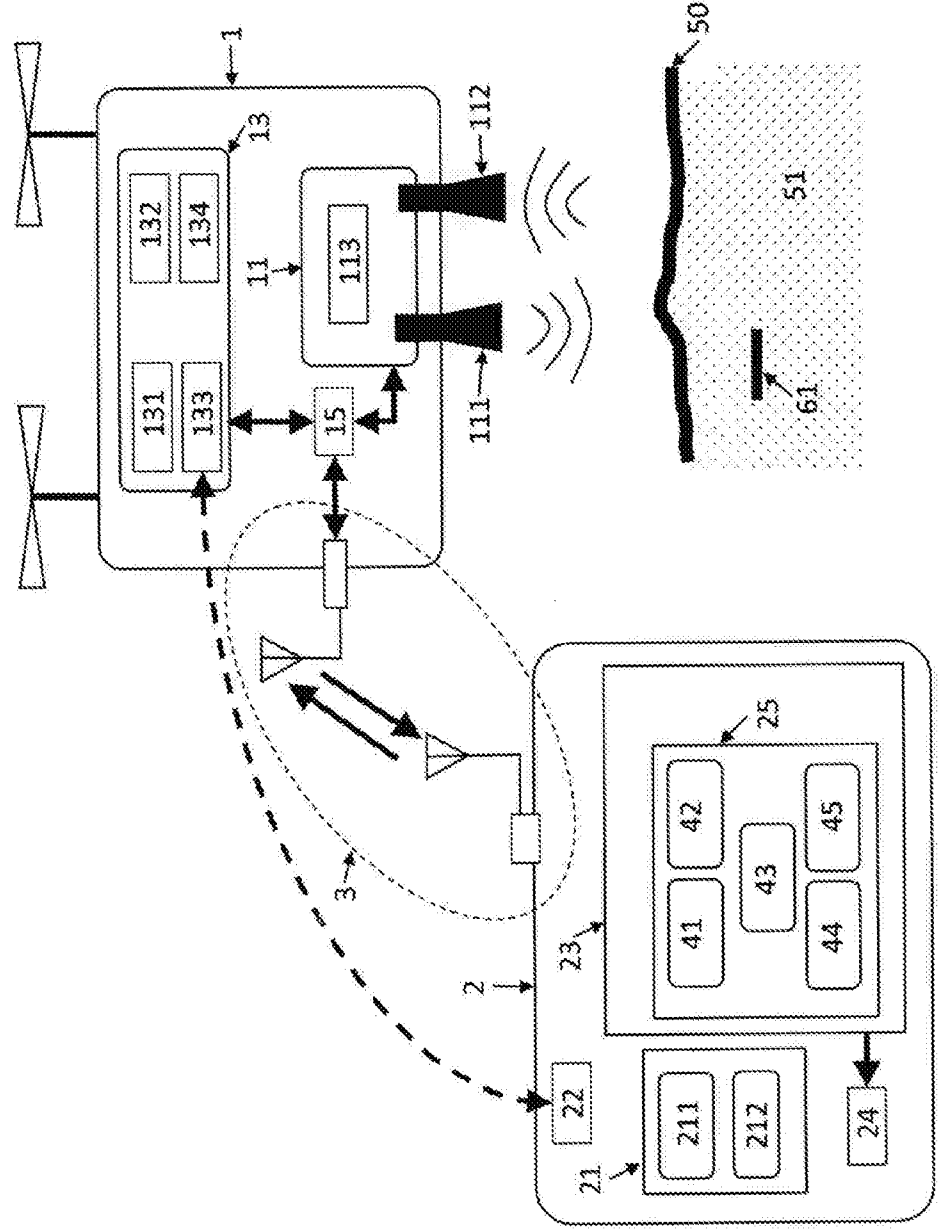
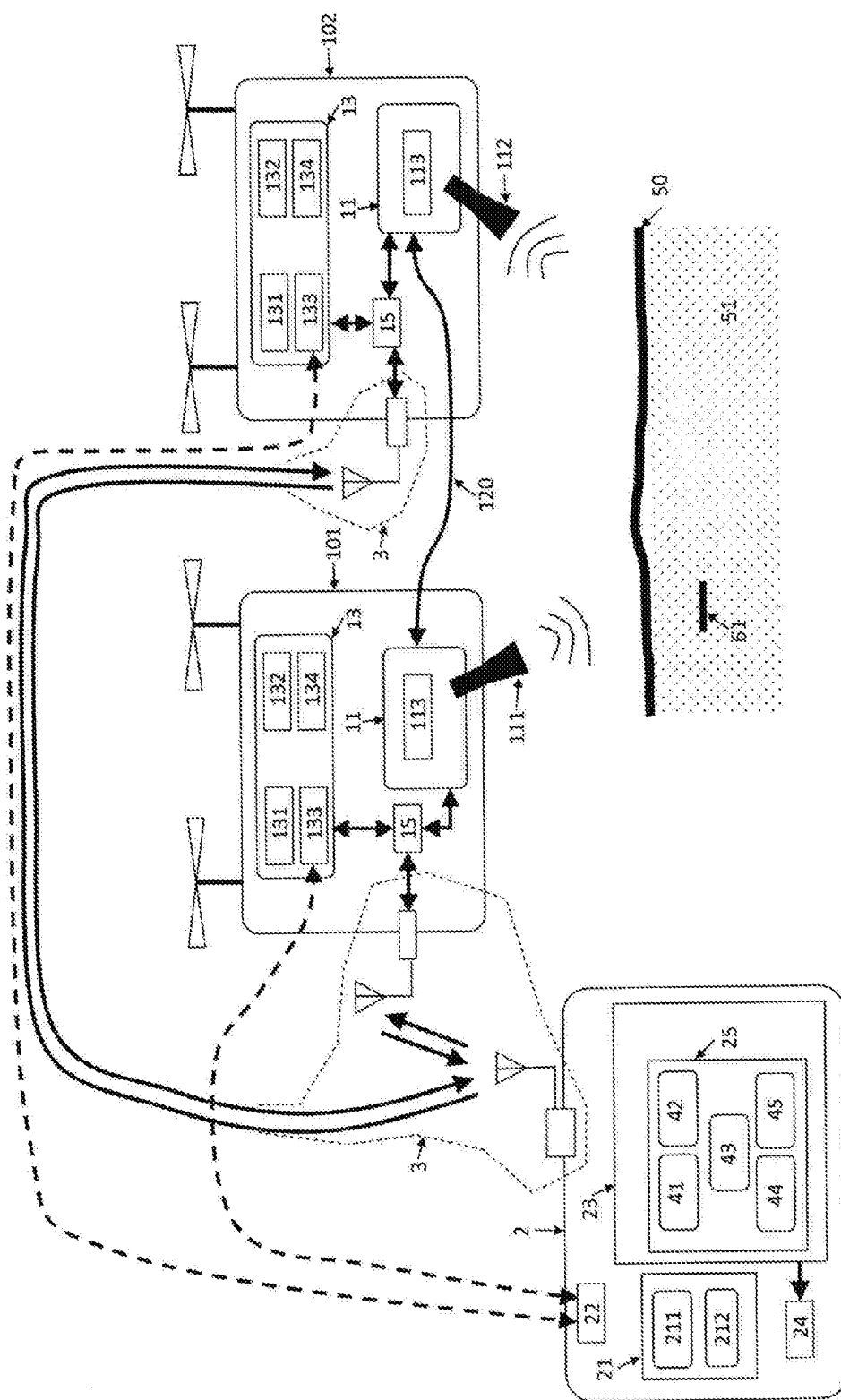


FIG. 2



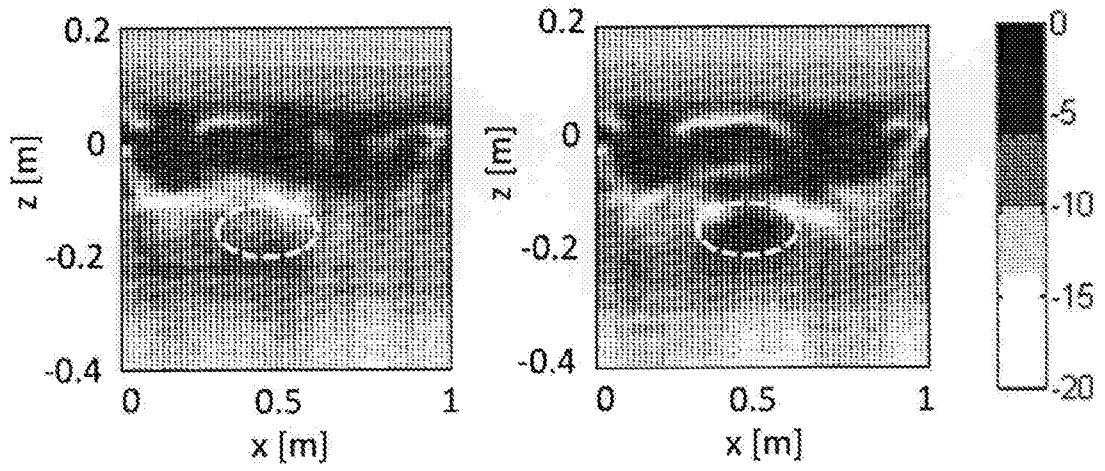
-3/4-

FIG. 3



-4/4-

FIG. 4



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/ES2017/000006

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F41H11/13 (2011.01)

G01S13/88 (2006.01)

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F41H, G01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

EPODOC, INVENES, WPI

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2014062758 A1 (MOHAMADI FARROKH) 06/03/2014,	1,2
A	US 2014125509 A1 (STOLARCZYK LARRY G ET AL.) 08/05/2014,	1,2
A	US 2013082856 A1 (PAGLIERONI DAVID W ET AL.) 04/04/2013,	1,2
A	US 5952954 A (BECKNER FREDERICK L) 14/09/1999,	1,2

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance.	
"E" earlier document but published on or after the international filing date	
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"O" document referring to an oral disclosure use, exhibition, or other means.	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
01/03/2017

Date of mailing of the international search report
(02/03/2017)

Name and mailing address of the ISA/

Authorized officer
M. González Vasserot

OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Facsimile No.: 91 349 53 04

Telephone No. 91 3493087

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/ES2017/000006

Information on patent family members

Patent document cited in the search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US2014062758 A1	06.03.2014	US9322917 B2	26.04.2016
-----	-----	-----	-----
US2014125509 A1	08.05.2014	US2016097879 A1	07.04.2016
		US9541641 B2	10.01.2017
		US2014306839 A1	16.10.2014
		US9024802 B2	05.05.2015
		US2014139224 A1	22.05.2014
		US9207316 B2	08.12.2015
		US2014125508 A1	08.05.2014
		US9207307 B2	08.12.2015
		US2012062408 A1	15.03.2012
		US8847813 B2	30.09.2014
-----	-----	-----	-----
US2013082856 A1	04.04.2013	US2014226850 A1	14.08.2014
		US9086501 B2	21.07.2015
		US2014207810 A1	24.07.2014
		US9361352 B2	07.06.2016
		US8659467 B1	25.02.2014
		US2013085982 A1	04.04.2013
		US9239382 B2	19.01.2016
		US2013082870 A1	04.04.2013
		US8482452 B2	09.07.2013
		US2013082864 A1	04.04.2013
		US8754802 B2	17.06.2014
		US2013082863 A1	04.04.2013
		US8854249 B2	07.10.2014
		US2013082862 A1	04.04.2013
		US8618976 B2	31.12.2013
		US2013082861 A1	04.04.2013
		US8730085 B2	20.05.2014
		US2013082860 A1	04.04.2013
		US8711028 B2	29.04.2014
		US2013082859 A1	04.04.2013
		US8508403 B2	13.08.2013
		US2013082858 A1	04.04.2013
		US8717223 B2	06.05.2014
		US2013082857 A1	04.04.2013
		US8681036 B2	25.03.2014
		US8854248 B2	07.10.2014
-----	-----	-----	-----
US5952954 A	14.09.1999	NONE	
-----	-----	-----	-----

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

PCT/ES2017/000006

A. CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

F41H11/13 (2011.01)

G01S13/88 (2006.01)

De acuerdo con la Clasificación Internacional de Patentes (CIP) o según la clasificación nacional y CIP.

B. SECTORES COMPRENDIDOS POR LA BÚSQUEDA

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

F41H, G01S

Otra documentación consultada, además de la documentación mínima, en la medida en que tales documentos formen parte de los sectores comprendidos por la búsqueda

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda internacional (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

EPODOC, INVENES, WPI

C. DOCUMENTOS CONSIDERADOS RELEVANTES

Categoría*	Documentos citados, con indicación, si procede, de las partes relevantes	Relevante para las reivindicaciones nº
A	US 2014062758 A1 (MOHAMADI FARROKH) 06/03/2014,	1,2
A	US 2014125509 A1 (STOLARCZYK LARRY G ET AL.) 08/05/2014,	1,2
A	US 2013082856 A1 (PAGLIERONI DAVID W ET AL.) 04/04/2013,	1,2
A	US 5952954 A (BECKNER FREDERICK L) 14/09/1999,	1,2

☐ En la continuación del recuadro C se relacionan otros documentos

☒ Los documentos de familias de patentes se indican en el anexo

* Categorías especiales de documentos citados:	"T"	documento ulterior publicado con posterioridad a la fecha de presentación internacional o de prioridad que no pertenece al estado de la técnica pertinente pero que se cita por permitir la comprensión del principio o teoría que constituye la base de la invención.
"A" documento que define el estado general de la técnica no considerado como particularmente relevante.	"X"	documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse nueva o que implique una actividad inventiva por referencia al documento aisladamente considerado.
"E" solicitud de patente o patente anterior pero publicada en la fecha de presentación internacional o en fecha posterior.	"Y"	documento particularmente relevante; la invención reivindicada no puede considerarse que implique una actividad inventiva cuando el documento se asocia a otro u otros documentos de la misma naturaleza, cuya combinación resulta evidente para un experto en la materia.
"L" documento que puede plantear dudas sobre una reivindicación de prioridad o que se cita para determinar la fecha de publicación de otra cita o por una razón especial (como la indicada).	"&"	documento que forma parte de la misma familia de patentes.
"O" documento que se refiere a una divulgación oral, a una utilización, a una exposición o a cualquier otro medio.		
"P" documento publicado antes de la fecha de presentación internacional pero con posterioridad a la fecha de prioridad reivindicada.		

Fecha en que se ha concluido efectivamente la búsqueda internacional.
01/03/2017

Fecha de expedición del informe de búsqueda internacional.
02 de marzo de 2017 (02/03/2017)

Nombre y dirección postal de la Administración encargada de la búsqueda internacional
OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS
Paseo de la Castellana, 75 - 28071 Madrid (España)
Nº de fax: 91 349 53 04

Funcionario autorizado
M. González Vasserot
Nº de teléfono 91 3493087

INFORME DE BÚSQUEDA INTERNACIONAL

Solicitud internacional nº

Informaciones relativas a los miembros de familias de patentes

PCT/ES2017/000006

Documento de patente citado en el informe de búsqueda	Fecha de Publicación	Miembro(s) de la familia de patentes	Fecha de Publicación
US2014062758 A1	06.03.2014	US9322917 B2	26.04.2016
-----	-----	-----	-----
US2014125509 A1	08.05.2014	US2016097879 A1	07.04.2016
		US9541641 B2	10.01.2017
		US2014306839 A1	16.10.2014
		US9024802 B2	05.05.2015
		US2014139224 A1	22.05.2014
		US9207316 B2	08.12.2015
		US2014125508 A1	08.05.2014
		US9207307 B2	08.12.2015
		US2012062408 A1	15.03.2012
		US8847813 B2	30.09.2014
-----	-----	-----	-----
US2013082856 A1	04.04.2013	US2014226850 A1	14.08.2014
		US9086501 B2	21.07.2015
		US2014207810 A1	24.07.2014
		US9361352 B2	07.06.2016
		US8659467 B1	25.02.2014
		US2013085982 A1	04.04.2013
		US9239382 B2	19.01.2016
		US2013082870 A1	04.04.2013
		US8482452 B2	09.07.2013
		US2013082864 A1	04.04.2013
		US8754802 B2	17.06.2014
		US2013082863 A1	04.04.2013
		US8854249 B2	07.10.2014
		US2013082862 A1	04.04.2013
		US8618976 B2	31.12.2013
		US2013082861 A1	04.04.2013
		US8730085 B2	20.05.2014
		US2013082860 A1	04.04.2013
		US8711028 B2	29.04.2014
		US2013082859 A1	04.04.2013
		US8508403 B2	13.08.2013
		US2013082858 A1	04.04.2013
		US8717223 B2	06.05.2014
		US2013082857 A1	04.04.2013
		US8681036 B2	25.03.2014
		US8854248 B2	07.10.2014
-----	-----	-----	-----
US5952954 A	14.09.1999	NINGUNO	
-----	-----	-----	-----