

Sistema de GPR embarcado en un UAV para la detección de objetos ocultos enterrados

Autores: María García Fernández, Yuri Álvarez López, Ana Arbolea Arbolea, Fernando Las Heras Andrés, Universidad de Oviedo; Borja González Valdés, Yolanda Rodríguez Vaqueiro, Antonio Pino García, Universidad de Vigo.

Palabras clave: *Ground Penetrating Radar (GPR), Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Synthetic Aperture Radar (SAR), detección de explosivos, minas antipersona.*

Metas Tecnológicas relacionadas: MT 2.2.2; MT 2.2.3; MT 3.5.1; MT 5.1.1.

Introducción

Las minas antipersona 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 existen entre 60 y 70 millones de minas antipersona enterradas en el mundo. En 2016 se llevó a cabo la exploración de una superficie de 170 km², decomisándose un total de 232.000 minas antipersona [1].

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

- **Métodos invasivos.** 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, como por ejemplo el desarrollado por MineKafon [2], así como sistemas más robustos, capaces de soportar varias detonaciones a costa de incrementar la complejidad del dispositivo [3]. El principal inconveniente de estos sistemas es su impacto en el terreno explorado. Como ventaja se puede destacar su velocidad, ya que pueden llevar a cabo la exploración de un área de 1 m² por segundo.
- **Métodos no invasivos.** A partir del adecuado procesamiento de un

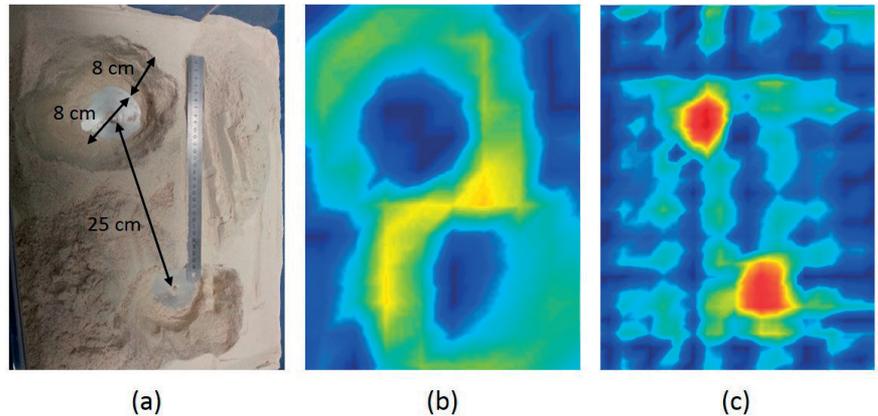


Fig. 1. Imagen GPR de 2 discos metálicos de 8 cm de diámetro enterrados 8 cm en arena. (a) Fotografía del setup. (b) Imagen GPR sin procesado SAR. (c) Imagen GPR con procesado SAR. (Fuente: propia).

conjunto de señales recibidas es posible detectar la presencia de objetos enterrados, sin interactuar con el terreno.

Los métodos no invasivos se pueden clasificar a su vez atendiendo al fenómeno físico en que se basa la detección [4]:

- **Inducción electromagnética.** Se basa en inducir una corriente eléctrica en los objetos metálicos enterrados empleando una bobina transmisora. La ventaja que presenta es su bajo coste y sencillez de funcionamiento, así como la madurez de la tecnología (ej. detectores de metales portátiles o de mano). 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, etc.). Además, no permite detectar explosivos o minas antipersona que no contengan componentes metálicos.
- **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.
- **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 suelo. A partir de las ondas reflejadas es posi-

ble obtener una imagen radar del subsuelo, identificando posibles objetos enterrados [5]. No obstante, es una técnica muy sensible a la composición y al relieve o rugosidad del suelo, requiriendo técnicas de procesamiento de señal para poder eliminar falsos ecos y otros artefactos presentes en la imagen radar (*clutter*).

- **Sistemas acústicos y sísmicos.** Su principio de funcionamiento es similar a 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. Una desventaja es su tiempo de escaneado, que oscila entre 2 y 15 minutos por m².

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 para evitar que accidentalmente se provoque la detonación de la misma. En sistemas basados en GPR, para lograr este objetivo hay diferentes posibilidades:

- **Sistemas radar stand-off.** En estos sistemas se ilumina el suelo con un ángulo de incidencia tal que se maximiza la cantidad de energía que penetra, a costa de una menor sensibilidad y resolución.
- **Sistemas de incidencia normal.** El suelo se ilumina de forma normal (o perpendicular) a su superficie. Si bien no se logra acoplar la

En profundidad

máxima energía al suelo, al aproximarse más al suelo se capta más energía reflejada y se mejora la resolución [6].

En el caso de sistemas GPR basados en incidencia normal, la dificultad radica en conseguir iluminación perpendicular al suelo guardando la distancia de seguridad. Tradicionalmente un operario es el encargado de desplazar el radar de GPR, lo que puede incrementar la probabilidad de explosión accidental de la mina antipersona. Una solución más avanzada se basa en el empleo de robots terrestres 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. Otra de las limitaciones de esta solución es que se trata de un sistema muy lento para llevar a cabo el proceso de inspección.

Una alternativa al uso de vehículos terrestres lo constituyen los vehículos aéreos, entre los que se pueden destacar los vehículos aéreos no tripulados (UAV - *Unmanned Aerial Vehicles*). Se han desarrollado sistemas en los que se emplean UAV para detectar minas que no estén enterradas a partir del análisis de fotografías [7], y para detectar minas metálicas enterradas utilizando un detector de metales embarcado en el UAV [2]. No obstante, en los sistemas descritos no existe la posibilidad de obtener una imagen radar de alta resolución empleando apertura sintética (SAR - *Synthetic Aperture Radar*), es decir, combinando coherentemente las me-

didadas radar tomadas en las diferentes posiciones del vuelo del UAV. Esto se debe a que la precisión de posicionamiento y geo-referenciación de las medidas tomadas es insuficiente (error mayor de 40-50 cm). La problemática de no poder emplear este procesamiento coherente radica en que objetos muy próximos entre sí y de tamaño pequeño generan interferencia en las señales recibidas, distorsionando la capacidad de detección. A modo de ejemplo, en la figura 1 se muestra la diferencia en la imagen GPR para detectar dos discos metálicos enterrados a 8 cm de profundidad cuando se aplica procesado SAR a las medidas del GPR y cuando no se aplica. Claramente se comprueba la mejora que aporta el procesado SAR para la detección de los objetos.

Otra limitación de los sistemas descritos es que sólo llevan a cabo detección, no permitiendo identificar correctamente el tipo de objeto detectado (no se podría distinguir entre una mina o una tubería, por ejemplo). Además, en el último caso sólo es posible detectar objetos metálicos y la probabilidad de falsa alarma es alta.

Para solventar las limitaciones existentes se propone emplear un radar GPR embarcado en un UAV, donde las medidas tomadas por el UAV en vuelo pueden combinarse coherentemente, generando imágenes de alta resolución del subsuelo y de posibles objetos enterrados. Además, el empleo de un GPR en vez de un detector de metales permite detectar tanto objetos metálicos como no metálicos.

Descripción del prototipo implementado

Para el desarrollo de un prototipo de GPR embarcado en un UAV se ha integrado un módulo radar con los subsistemas de control y posicionamiento del UAV, de forma que las medidas realizadas se geo-referencian con precisión centimétrica (2-3 cm) y se transmiten inalámbricamente a un equipo de control y procesado. Los principales componentes del prototipo son: el módulo radar; el sistema de comunicación entre el prototipo y el equipo de control; y los subsistemas del UAV involucrados.

Se ha utilizado un radar UWB (*Ultra Wide Band*) en banda C (de 3,1 a 5,3 GHz), que permite obtener una alta resolución en rango (7,5 cm) a costa de una peor penetración en el suelo (a mayor frecuencia, menor profundidad de penetración de las ondas en el suelo). No obstante, su bajo tiempo de adquisición y su gran ancho de banda, unido a sus reducidas dimensiones y peso, lo hacen especialmente adecuado para embarcarlo en un UAV. En cuanto a las antenas, se han empleado antenas de hélice con polarización circular.

El subsistema de control del UAV obtiene información de los sensores de posicionamiento, recibe órdenes del piloto (transmitidas desde la emisora de radiocontrol) y determina las acciones correctivas a realizar. Además de los sensores de posicionamiento habituales, es decir, IMU (*Inertial Measurement Unit*), barómetro y receptor de GNSS (*Global Navigation Satellite System*), ha



Fig. 2. Esquema de los subsistemas y componentes del prototipo implementado consistente en GPR embarcado en UAV. (Fuente: propia)

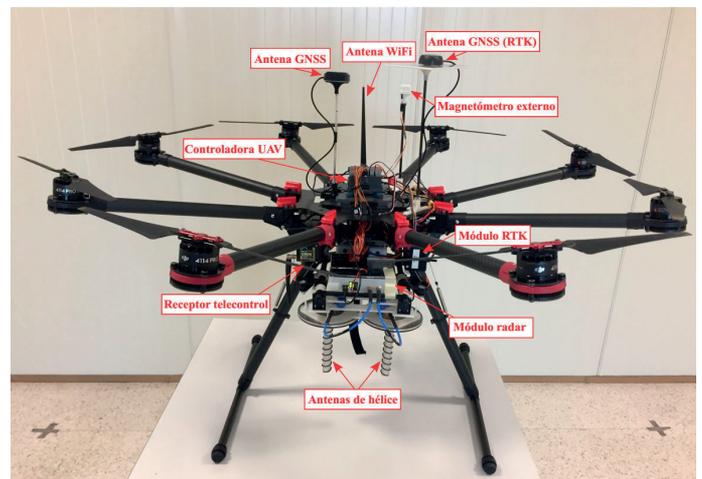


Fig. 3. Fotografía del prototipo implementado con todos los subsistemas y componentes integrados. (Fuente: propia).

sido necesario utilizar un sistema de posicionamiento preciso que complementa a los anteriores. Esto se debe a que, tal y como se ha mencionado anteriormente, para combinar las medidas coherentemente se ha observado que se requiere una precisión de geo-referenciación de en torno a 2 cm. En concreto, se ha empleado un sistema diferencial de GNSS con corrección de errores, compuesto por un receptor que actúa como estación base (en una posición conocida) y otro como móvil (en el UAV). La estación base estima las correcciones que haría falta realizar a las señales de GNSS recibidas y las envía a la estación móvil. El sistema empleado, denominado RTK (*Real Time Kinematic*), emplea información de fase de la portadora para conseguir mayor precisión y resuelve las ambigüedades existentes en tiempo real [8].

En la figura 2 se representan de forma esquemática los subsistemas que componen el prototipo implementado, mientras que en la figura 3 se muestra una fotografía del prototipo de GPR embarcado en UAV.

Métodos de procesado de las medidas

Los métodos de procesado de la señal radar permiten obtener imágenes electromagnéticas del área inspeccionada. Se emplean conjuntamente dos tipos de métodos: los de enfoque, que combinan las medidas, y los de eliminación de los ecos radar no deseados o *clutter*.

Para obtener imágenes de alta resolución se toman sucesivas medidas a lo largo de la región de interés (generando una apertura sintética), que se combinan coherentemente. En particular, se ha empleado un algoritmo de SAR basado en sumar coherentemente las medidas del radar ponderadas por un factor de compensación de fase [9]. La principal ventaja de emplear este método es que permite que las medidas se tomen en posiciones arbitrariamente distribuidas (siempre y cuando se cumpla el criterio de muestreo de *Nyquist*). Es decir, a diferencia de otros métodos (como, por ejemplo, *Phase-Shift Migration*) no es necesario que los puntos de medida estén uniformemente distribuidos. Esta característica hace especialmente adecuado al método SAR para procesar las medidas tomadas con el prototipo.

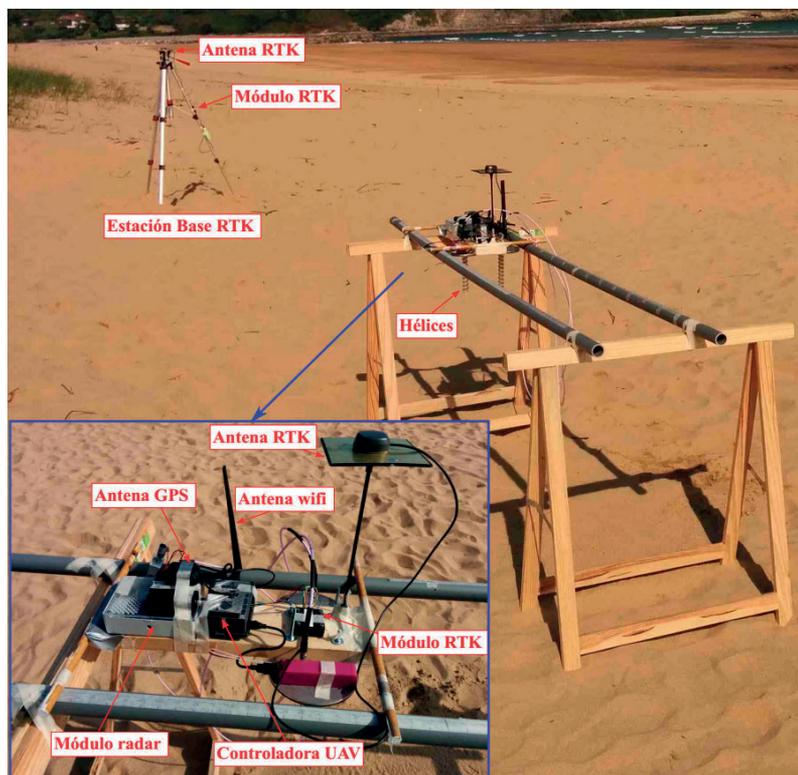


Fig. 4. Fotografía de setup para la validación experimental del GPR y del sistema de posicionamiento con precisión centimétrica basado en RTK. (Fuente: propia).

Para poder reconstruir la imagen radar de forma precisa es necesario conocer la composición del suelo. Como se pretende utilizar únicamente el equipamiento de GPR, se ha empleado una técnica sencilla que consiste en estimar la permitividad del suelo enterrando un objeto de referencia a una distancia conocida [10].

En la interfaz que separa ambos medios se produce una fuerte reflexión debido a la desadaptación de impedancias, la cual puede llegar a enmascarar los blancos correspondientes a los objetos enterrados. Con el fin de mitigar dicha reflexión, se ha implementado un método de mitigación de *clutter*. Este método combina el empleo de una ventana temporal (*time-gating*) con la eliminación de la media de las medidas antes de aplicar el procesado SAR. Para mitigar aún más la reflexión en la interfaz aire-suelo, puede aplicarse también un método de proyección en subespacios (basado en la Descomposición en Valores Singulares) a la imagen SAR resultante [11].

Validación experimental

La validación experimental de los métodos propuestos y del prototipo se

ha llevado a cabo en varias etapas. En las primeras etapas se han validado tanto los métodos como los componentes del prototipo, antes de proceder a la construcción del mismo. Posteriormente se han realizado pruebas en vuelo del prototipo para evaluar su capacidad para obtener imágenes SAR de alta resolución.

Validación inicial de la carga útil del UAV

Se ha realizado una validación inicial del funcionamiento de la carga útil del prototipo diseñado (subsistema radar y de posicionamiento RTK), aplicando los métodos de procesado implementados a las medidas realizadas. Se ha empleado un sistema de medida manual (consistente en unos caballetes de madera y dos tubos de PVC, sobre los que se desliza el radar) en una playa de arena (playa de Rodiles, en Asturias), el cual se muestra en la figura 4. Para geo-referenciar las medidas se han utilizado las coordenadas obtenidas del subsistema de control del UAV (que proceden del RTK). Es decir, se ha validado el correcto funcionamiento de la carga útil que incorporaría el UAV, teniendo en cuenta, por tanto, los posibles errores de posicionamiento.

En profundidad

Se enterró un disco metálico de 8 cm de diámetro a 15 cm de profundidad. Aplicando el método de mitigación del *clutter* (incluyendo el método de proyección en subespacios), se han obtenido las imágenes del subsuelo, distinguiéndose la presencia del objeto en la posición en la que se encontraba enterrado. En la figura 5 se muestran las imágenes radar correspondientes a la reflectividad (amplitud normalizada, en decibelios [dB]) obtenidas cuando el objeto se enterra en la región derecha del dominio de observación, antes de aplicar el método de mitigación del *clutter* (figura 5 (a)) y después de aplicarlo (figura 5 (b)). En esta última imagen el disco metálico enterrado en la arena se detecta con gran nitidez.

Pruebas en vuelo del prototipo implementado

Una vez validada la carga útil, se ha procedido a evaluar el prototipo formado por el radar GPR embarcado en el UAV, con el fin de analizar la capacidad de obtener imágenes a partir de las medidas tomadas en vuelo.

Las pruebas en vuelo se han realizado en la parcela de vuelo de la Universidad de Oviedo habilitada por la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), situada en el campus de Gijón. En las primeras pruebas realizadas se ha emplazado una barra metálica de 6 cm de anchura y 1,5 m de longitud sobre la hierba de la parcela de vuelo. Se han realizado varios vuelos con el UAV volando a unos 70-80 cm de altura sobre el terreno, a lo largo de una trayectoria perpendicular a la barra metálica, tal y como se observa en la figura 6 (a). Las medidas proporcionadas por el GPR, debidamente geo-referenciadas, son procesadas mediante los métodos descritos, resultando en la imagen SAR mostrada en la figura 6 (b). En el corte resultante se observa claramente la posición de la barra metálica sobre la hierba de la parcela (interfaz indicada con línea negra discontinua). Posteriormente, se enterró la barra a 5 cm de la interfaz. En este caso, también es posible detectar la barra en la imagen SAR, mostrada en la figura 6 (c), a pesar de la elevada humedad del terreno (que implica una gran atenuación de las ondas electromagnéticas).

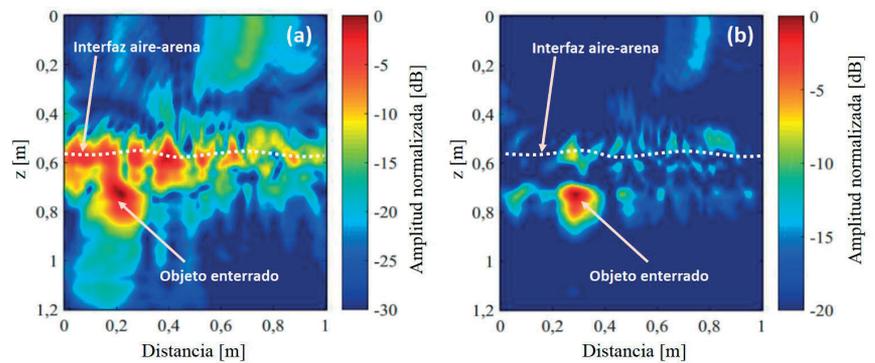


Fig. 5. Imágenes SAR (reflectividad, amplitud normalizada, en dB) de un objeto enterrado 15 cm en la arena. (a) Antes de aplicar el método para eliminación de clutter. (b) Tras aplicar el método de eliminación de clutter. (Fuente: propia).

En las pruebas realizadas, se ha constatado que el prototipo implementado cuenta con una autonomía de vuelo de 12-14 minutos. La resolución en rango o distancia evaluada experimentalmente es de aproximadamente 8 cm, mientras que la resolución lateral en las imágenes SAR se ha estimado en 5-6 cm.

Un vídeo demostrativo del prototipo en operación se puede visualizar en el siguiente enlace: <https://youtu.be/w2bnHWOOLQU>. En dicho vídeo se puede observar la capacidad del prototipo para generar una imagen radar.

Innovación y aplicabilidad

El valor añadido del sistema propuesto al compararlo con sistemas similares ideados para la detección de minas antipersona proviene del hecho de que el sistema GPR ha sido desarrollado para embarcarlo en un UAV con precisión de posicionamiento centimétrica.

Las principales ventajas que conlleva son:

- Mayor velocidad de escaneo con respecto a soluciones existentes en el mercado basadas en robots terrestres autónomos.
- Posibilidad de inspección en zonas de difícil acceso.
- Mayor seguridad en el proceso de exploración al evitar el contacto con el suelo (a diferencia de equipos manuales o a bordo de vehículos terrestres).
- Detección de objetos tanto metálicos como dieléctricos (al emplear un radar GPR en lugar de un detector de metales).

- Obtención de imágenes del subsuelo de gran resolución (al poder emplear procesado SAR y tomar las medidas más cerca del suelo).

Por otro lado, en cuanto a la aplicabilidad, la detección de objetos ocultos en un medio no transparente a la luz visible empleando técnicas no invasivas es de gran interés en múltiples sectores, como en seguridad y defensa (detección de minas antipersona, localización de túneles), construcción y obra civil (detección de daños estructurales y de tuberías), arqueología, tareas de rescate, entre otras.

La innovación aportada por el sistema y métodos descritos en la presente comunicación ha dado lugar a una patente [12].

Conclusiones

En esta contribución se propone un nuevo sistema para la detección de objetos ocultos enterrados en el suelo (como minas antipersona) basado en la integración de un radar GPR en un UAV. El sistema propuesto solventa diversas problemáticas presentes en los sistemas actuales, fundamentalmente en relación a rapidez, coste, seguridad y capacidad de detección de objetos tanto metálicos como plásticos.

Para procesar las medidas tomadas con el sistema propuesto se han implementado métodos de enfoque SAR y de eliminación de *clutter*, que han sido validados experimentalmente tanto en condiciones controladas (en laboratorio) como en escenarios realistas (en una playa). Se ha comprobado que, con estos

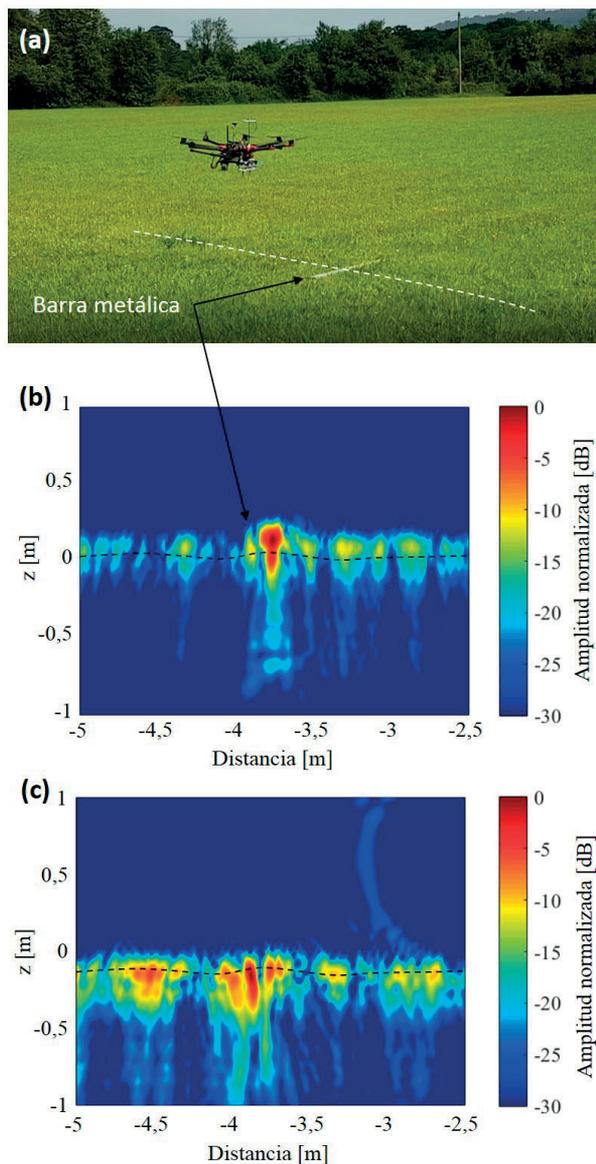


Fig. 6. (a) Fotografía del prototipo implementado durante la realización de los test de vuelo. (b) Imagen SAR obtenida (reflectividad, amplitud normalizada, en dB) con una barra sobre el suelo. (c) Imagen SAR obtenida (reflectividad, amplitud normalizada, en dB) con la barra enterrada a 5 cm. (Fuente: propia).

métodos, se pueden detectar objetos próximos entre sí, así como objetos de bajo contenido metálico (incluso dieléctricos). A continuación, se ha validado la carga útil del sistema propuesto en un escenario realista, así como el prototipo implementado para verificar su capacidad para obtener imágenes SAR de alta resolución. Actualmente, se continúan realizando diversas pruebas con dicho prototipo para seguir evaluando, en escenarios realistas, las prestaciones del sistema.

Referencias

[1] Landmine monitor 2017 from monitoring and research committee, ICBL-CMC governance board. [Online]. <http://www.the-monitor.org/media/2615219/Landmine-Monitor-2017-final.pdf>. Último acceso: 12/01/2018.

[2] Massoud Hassani. Minekafon [Online]. <http://minekafon.org/>. Último acceso: 20/02/2018.

[3] Way Industries A. S, Slovakia. Bozena System [Online]. <http://www.bozena.eu/common/file.php?file=44>. Último acceso: 20/02/2018.

[4] L. Robledo, M. Carrasco y D. Mery, "A survey of land mine detection technology," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 30, no. 9, pp. 2399-2410, 2009.

[5] D. J. Daniels, *Ground Penetrating Radar*, 2nd Ed. London, U.K.: IET, 2004.

[6] E. M. Rosen y E. Ayers, "Assessment of down-looking GPR sensors for landmine detection," en *Defense and Security of International Society for Optics and Photonics*, pp. 423-434, 2005.

[7] J. Rodriguez, C. Castiblanco, I. Mondragon y J. Colorado, "Low-cost quadrotor applied for visual detection of landmine-like objects," en *IEEE 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, pp. 83-88, 2014.

[8] A. El-Rabbany, *Introduction to GPS: The Global Positioning System*, Artech House, 2002.

[9] J. A. Martinez-Lorenzo, C. M. Rappaport y F. Quivira, "Physical Limitations on Detecting Tunnels Using Underground-Focusing Spotlight Synthetic Aperture Radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 1, pp. 65-70, 2011.

[10] B. Gonzalez-Valdes, Y. Alvarez-Lopez, J. A. Martinez-Lorenzo, F. Las Heras y C. M. Rappaport, "SAR Processing for Profile Reconstruction and Characterization of Dielectric Objects on the Human Body Surface," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 138, pp. 269-282, 2013.

[11] M. Garcia-Fernandez, Y. Alvarez-Lopez, A. Arboleya-Arboleya, F. Las-Heras, Y. Rodriguez-Vaqueiro, B. Gonzalez-Valdes, A. Pino, "SVD-based clutter removal technique for GPR," en *2017 IEEE Antennas and Propagation Symposium (APSURSI)*, pp. 2369-2370, 2017.

[12] B. González, Y. Álvarez, M. García, A. Arboleya, Y. R. Vaqueiro, F. Las-Heras y A. Pino, "Sistemas aerotransportados y métodos para la detección. Localización y obtención de imágenes de objetos enterrados y la caracterización de la composición del subsuelo," Patente ES2577403B2 / WO2017125627A1. Fecha de prioridad 21/01/2016. <http://patentscope.wipo.int/search/en/WO2017125627>