

En Profundidad

Proyecto SAFEDRONE: Sistema radar de alta resolución embarcado en vehículos aéreos no tripulados para la detección de IED enterrados

Autores: María García-Fernández, Guillermo Álvarez-Narciandi, Yuri Álvarez López, Fernando Las-Heras Andrés, Universidad de Oviedo.

Palabras clave: georradar (*Ground Penetrating Radar, GPR*), vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV*), radar de apertura sintética (*Synthetic Aperture Radar, SAR*), detección de artefactos explosivos improvisados (*Improvised Explosive Devices, IED*).

Líneas I+D+i ETID relacionadas: 2.2.2; 2.2.4; 7.4.2; 10.1.1.

Introducción

En el contexto de las campañas de desminado llevadas a cabo en el ámbito civil o militar, la detección precisa, fiable y segura de minas contrapersonal y de artefactos explosivos improvisados (*Improvised Explosive Devices, IED*) es de vital importancia. Dicha capacidad de detección es también fundamental para garantizar la integridad y seguridad de convoyes militares en zonas de conflicto. A tal fin, se ha considerado el uso de diferentes tecnologías y sensores tales como detectores de metal, magnetómetros, cámaras infrarrojas, y georradars (*Ground Penetrating Radar, GPR*).

Los sistemas de detección de minas contrapersonal e IED deben hacer frente a varios retos, entre los que destacan: 1) los objetos explosivos enterrados pueden estar compuestos por diferentes materiales (metálicos y/o no metálicos), presentar geometrías o formas diversas y estar enterrados a diferentes profundidades; 2) deben garantizar la seguridad de los operadores, ofreciendo una distancia de seguridad entre el dispositivo

encargado de realizar el escaneo y el terreno inspeccionado.

La detección de objetos enterrados con poco o ningún contenido metálico se puede realizar empleando un GPR, cuya capacidad de detección está condicionada principalmente por la frecuencia de operación. En concreto, es necesario establecer una relación de compromiso entre la resolución espacial, que se incrementa al aumentar la frecuencia, y la capacidad de penetración de las ondas electromagnéticas en el terreno, que disminuye al aumentar la frecuencia de operación [1,2].

Para garantizar una distancia de seguridad suficiente con la zona escaneada típicamente se han empleado sistemas *stand-off*, donde las antenas GPR apuntan hacia el suelo con un ángulo muy rasante. Sin embargo, estos sistemas presentan un rango dinámico limitado, dado que no se produce reflexión especular de las ondas electromagnéticas en los objetos enterrados.

En los últimos años, los avances tecnológicos y el incremento de las prestaciones de los vehículos aéreos no tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles, UAV*) junto con las mejoras de los sistemas radar, han posibilitado la integración de sistemas GPR en UAV, permitiendo realizar el escaneo de una determinada zona sin entrar en contacto con el suelo. La mayoría de los prototipos de GPR embarcado en un UAV (véase [3-8]) operan en bandas de frecuencia comprendidas entre 400-600 MHz y 4-5 GHz, dado que así se logra un buen equilibrio entre profundidad de penetración y resolución espacial.

En este contexto, el proyecto SAFEDRONE constituye el primer proyecto de I+D dedicado exclusivamente al desarrollo de prototipos de GPR embarcados en UAV para la detección precisa y segura de minas contrapersonal e IED en España, siendo además pionero a nivel mundial. El proyecto SAFEDRONE ha

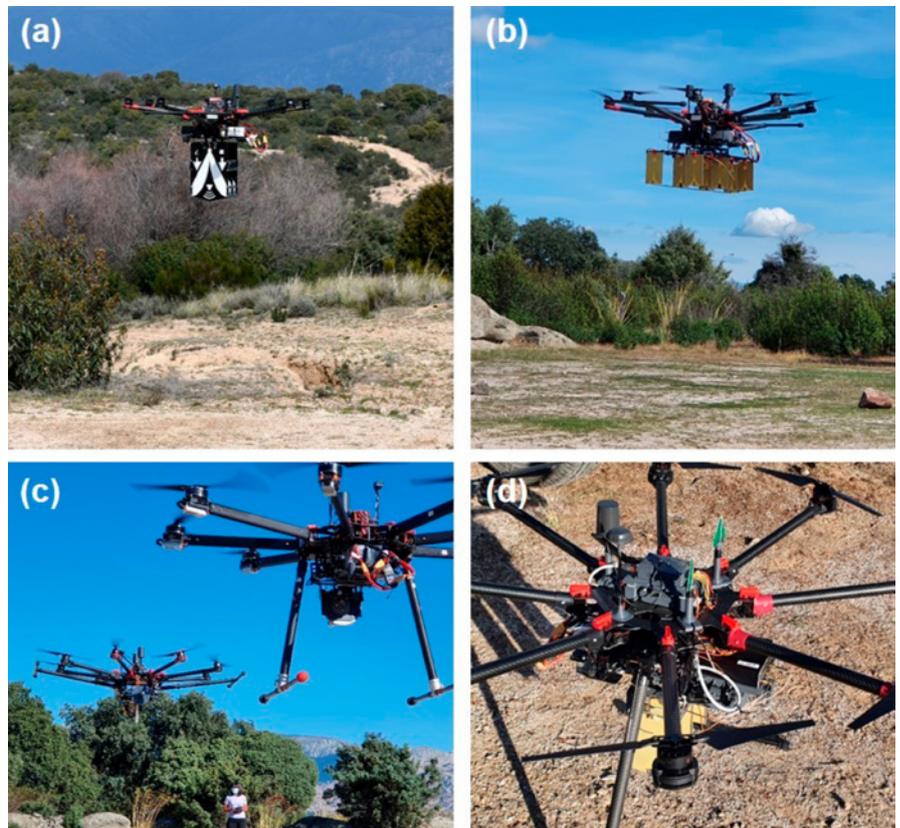


Fig. 1. Fotografías de los prototipos desarrollados en el proyecto SAFEDRONE durante las pruebas de validación finales (octubre de 2021). (a) Arquitectura DL-GPR. (b) Arquitectura DL-GPR con *array* de antenas. (c) Arquitectura FL-DL-GPR. (d) Prototipo con módulo radio de largo alcance para las pruebas BVLOS. (Fuente propia).

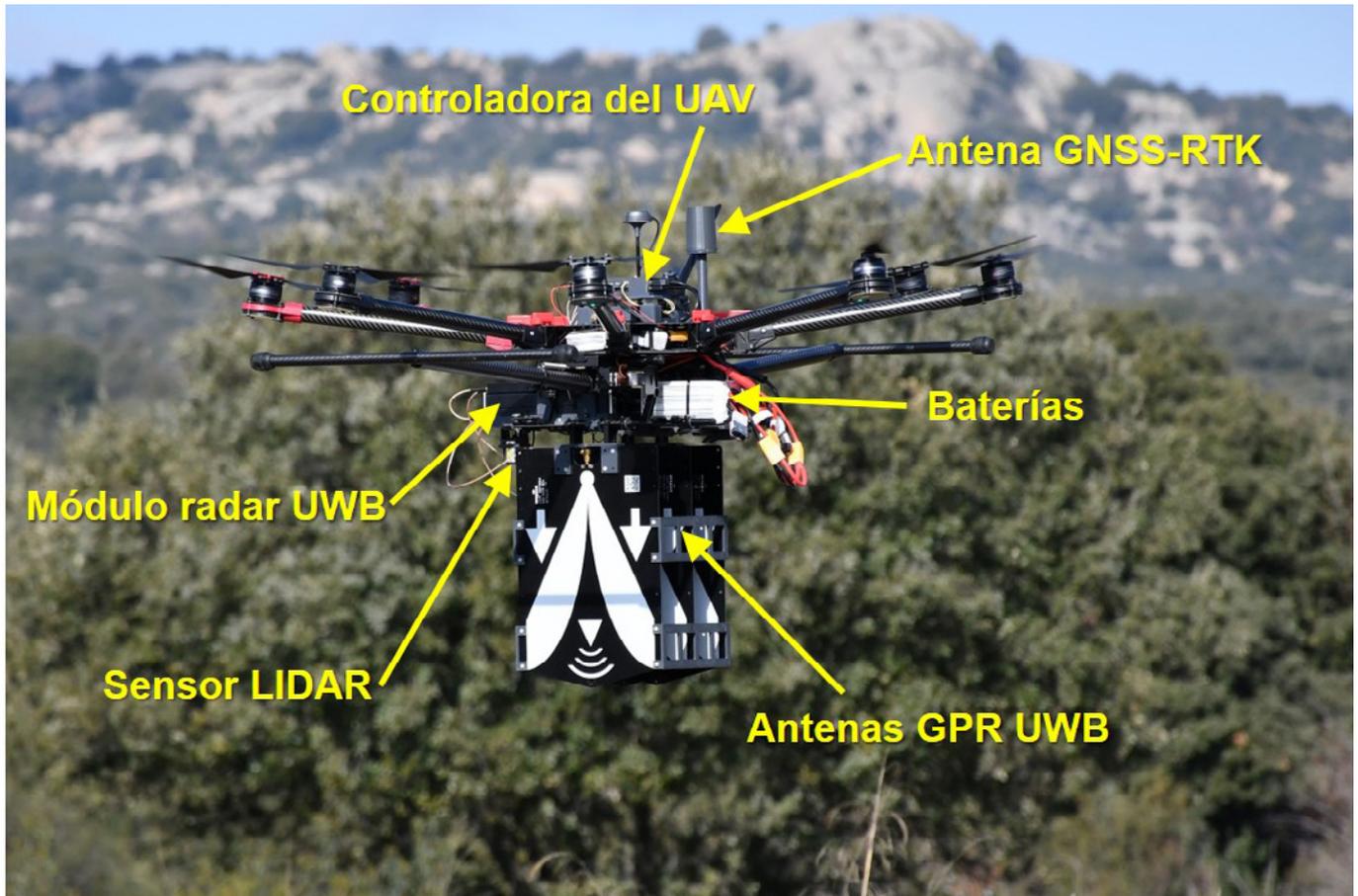


Fig. 2. Fotografía del prototipo con la arquitectura DL-GPR, detallando los principales elementos del mismo. (Fuente propia).

sido seleccionado por el Ministerio de Defensa dentro del programa de I+D COINCIDENTE (Cooperación en Investigación Científica y Desarrollo en Tecnologías Estratégicas) en su convocatoria de 2018, siendo el contratista principal la Universidad de Oviedo. La cuantía financiada ha sido de aproximadamente 470.000 EUR, aportando el 80% el Ministerio de Defensa y el 20% la Universidad de Oviedo.

Objetivos del proyecto SAFEDRONE

El proyecto SAFEDRONE ha tenido como principales objetivos los indicados a continuación:

- Desarrollo de un sistema georradar embarcado en un UAV capaz de proporcionar imágenes del subsuelo y de los objetos enterrados en el mismo con resolución centimétrica. Este objetivo se ha logrado mediante la integración de subsistemas y sensores capaces de proporcionar posicionamiento y georreferenciación con precisión igual o mejor a 2-3 cm, y el empleo de un subsistema radar

de gran ancho de banda (*Ultra Wide Band*, UWB), junto con el desarrollo de técnicas de radar de apertura sintética (*Synthetic Aperture Radar*, SAR). Estas técnicas se complementan con técnicas de mitigación de *clutter* radar con el fin de maximizar la probabilidad de detección de minas e IED enterrados.

- Diseño e implementación de diferentes arquitecturas de georradar embarcado en un UAV, con el fin de evaluar sus prestaciones y limitaciones en términos de capacidad de detección y área inspeccionada. Las arquitecturas desarrolladas, mostradas en la figura 1, fueron: i) sistema GPR con las antenas perpendiculares al suelo (*Down-Looking GPR*, DL-GPR), figura 1 (a); ii) sistema DL-GPR que emplea un *array* de antenas, figura 1 (b); y iii) sistema GPR formado por dos UAV, portando uno de ellos la antena transmisora, que ilumina el suelo con incidencia casi rasante, y ubicándose la antena receptora, perpendicular al suelo, en el otro UAV (*Forward Looking-Down Looking GPR*, FL-DL-GPR), figura 1 (c).

- Validación de los prototipos desarrollados en el proyecto SAFEDRONE en escenarios realistas, de forma lo más similar posible a las condiciones operativas. A tal fin, se han considerado diferentes tipos de escenarios en los ensayos de validación realizados durante el proyecto SAFEDRONE, tales como terrenos pedregosos, caminos, zonas húmedas, terrenos en pendiente, etc. Asimismo, durante los ensayos el equipo investigador a cargo del manejo de los prototipos y la detección de potenciales amenazas desconocía la posición de las distintas minas e IED, que fueron enterrados con anterioridad por expertos del Centro de Excelencia contra IED (C-IED CoE) y del Ministerio de Defensa.

- Implementación e integración de un subsistema de comunicaciones de largo alcance para permitir la transmisión de datos más allá de la línea de visión (*Beyond Visual Line of Sight*, BVLOS) entre el UAV y la estación terrestre que recibe y procesa las medidas.

En profundidad

Arquitecturas desarrolladas

Arquitectura Down-Looking GPR (DL-GPR)

Con anterioridad al proyecto SAFEDRONE, el grupo de investigación Área de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad de Oviedo (TSC-UNIOVI) había desarrollado un primer prototipo de GPR embarcado en un UAV [9] el cual operaba en la banda de 3 a 5 GHz. En el diseño e implementación de dicho prototipo se seleccionó una arquitectura DL-GPR dado que, de esta forma, se incrementa el rango dinámico, pudiendo captar señales de baja intensidad reflejadas en los objetos enterrados. Como contrapartida, esta arquitectura presenta un nivel de *clutter* elevado debido a la reflexión en la interfaz entre el aire y el suelo.

En el marco del proyecto SAFEDRONE se mejoró la arquitectura DL-GPR desarrollada por el grupo TSC-UNIOVI, tanto en términos de *hardware* como de *software*. En la figura 2 se muestra una fotografía del prototipo DL-GPR implementado, indicándose sus principales componentes y subsistemas. En lo referente al subsistema GPR, se ha integrado un nuevo módulo radar y antenas UWB que permiten abarcar la banda

de frecuencias de 600 MHz a 6 GHz. Dicho módulo radar dispone además de 2 canales receptores con lo que, al poder emplear dos antenas receptoras y combinar coherentemente las medidas recibidas en ambas (es decir, disponer de diversidad espacial), se consigue una mayor reducción del nivel de *clutter* [6].

En un sistema GPR las antenas constituyen el elemento más crítico en lo que a capacidades de detección se refiere. Por ello, una de las tareas llevadas a cabo en el proyecto SAFEDRONE ha sido el análisis e intercomparación de diferentes tipos de antena UWB con el fin de evaluar su impacto en las capacidades de detección del sistema. Los resultados obtenidos se pueden consultar en [8].

Otro elemento diferenciador de los prototipos desarrollados en el proyecto SAFEDRONE es el uso de subsistemas de posicionamiento con precisión centimétrica, que han permitido la implementación de técnicas de procesado GPR-SAR. Los prototipos desarrollados hacen uso de un receptor *Global Navigation Satellite System - Real Time Kinematics (GNSS-RTK)* multi constelación de triple banda, que tiene una precisión aproximada de 0,5 cm en el plano horizontal, y de

1 cm en el plano vertical. El receptor GNSS-RTK se complementa con un sensor láser para la medida precisa de la altura del UAV sobre el terreno. El microcontrolador del UAV se encarga, entre otras tareas, de georreferenciar las medidas proporcionadas por el subsistema radar con la información de posicionamiento, enviando en tiempo real las medidas georreferenciadas a la estación base.

La conectividad inalámbrica entre el UAV y la estación base se realiza mediante una red wifi desplegada *ad-hoc*, siempre que se pueda operar en condiciones de línea de visión (*Line of Sight, LOS*).

Mejoras en la velocidad de escaneo

Los prototipos desarrollados en proyecto SAFEDRONE realizan el escaneo en base a la definición de una trayectoria en zig-zag sobre la zona de interés. Para poder llevar a cabo el procesado GPR-SAR cumpliendo el criterio de muestreo de *Nyquist*, que garantiza que se realiza un muestreo adecuado de la zona bajo investigación, los barridos longitudinales han de estar equiespaciados una distancia no superior a media longitud de onda a la máxima frecuencia de trabajo. En el marco del proyecto SAFEDRONE se

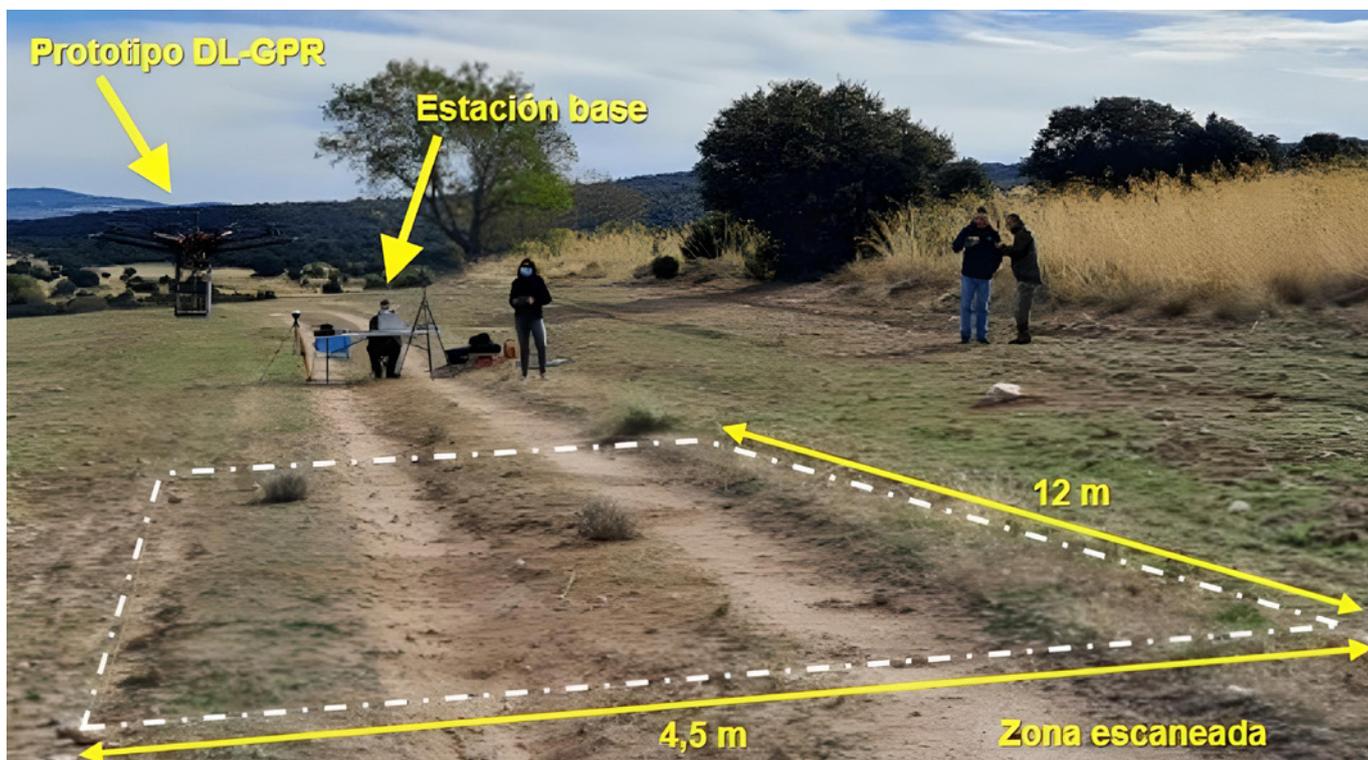


Fig. 3. Fotografía de una de las zonas seleccionadas para la evaluación de los prototipos del proyecto SAFEDRONE, situado en una zona llana de una pista de tierra. (Fuente propia).

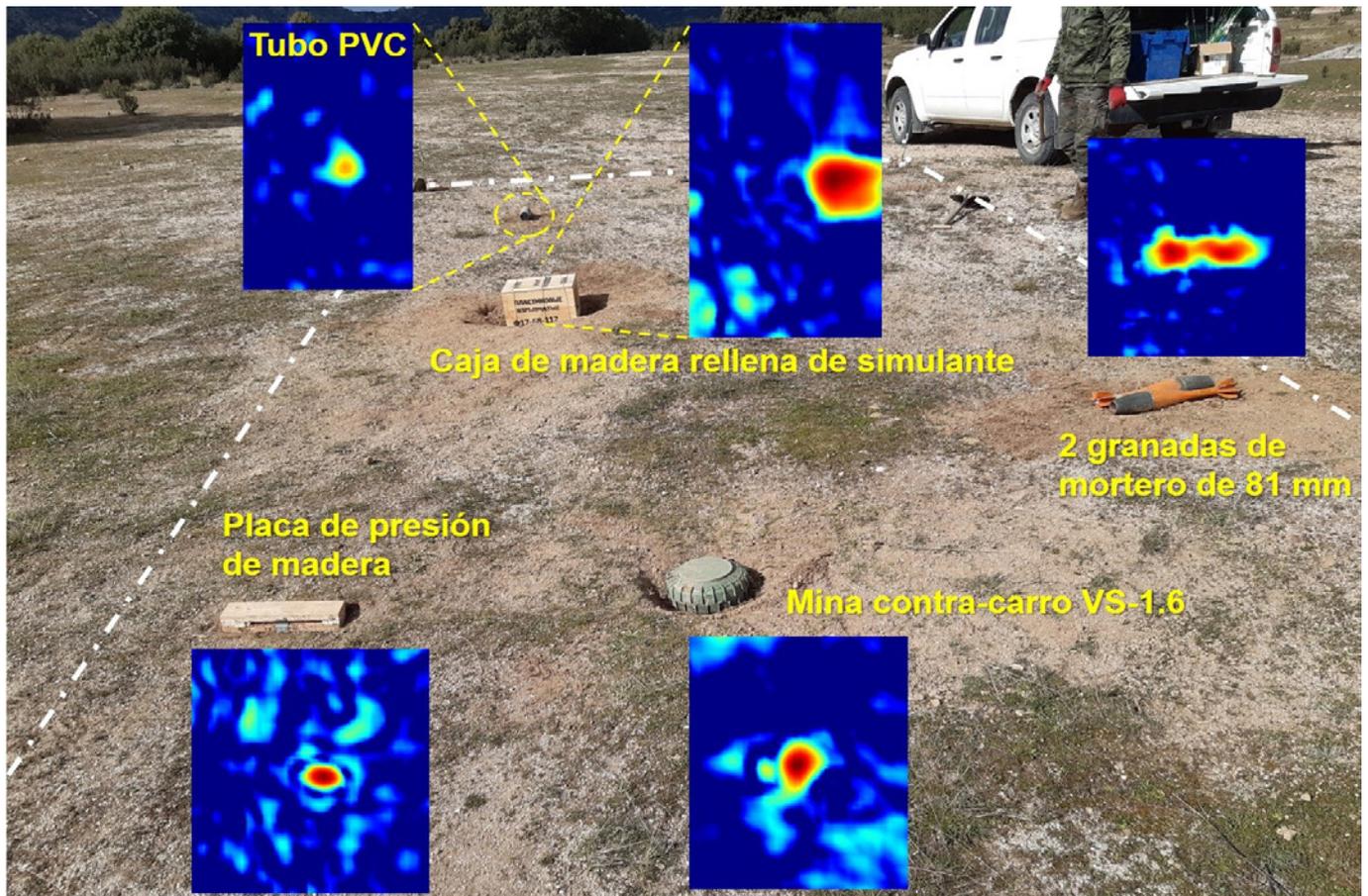


Fig. 4. Fotografía de algunos de los objetos enterrados en una de las zonas seleccionadas para la evaluación de los prototipos. Sobreimpresa a la fotografía se muestran partes de la imagen GPR-SAR obtenida tras el procesamiento de las medidas realizadas con el prototipo DL-GPR. (Fuente propia. Fotografía tomada por personal del C-IED CoE).

ha considerado una máxima frecuencia de procesamiento de las medidas de 3 GHz, por lo que el espaciado entre barridos longitudinales debe ser igual o inferior a 5 cm. Ello implica que, para escanear un área de 4,5 m x 12 m, se necesitan 91 barridos longitudinales de 12 m cada uno, lo que limita la autonomía del UAV.

Con el fin de aumentar la capacidad de escaneo del sistema, se decidió emplear un *array* de antenas. Teniendo en cuenta las restricciones en cuanto a peso y tamaño para la integración del *array* a bordo del UAV, el diseño resultante del *array* consistió en un *subarray* de 3 antenas transmisoras, y otro *subarray* de 4 antenas receptoras (véase Figura 1 (b)). El uso de este *array* permite aumentar el espaciado entre barridos longitudinales de 5 cm a 20 cm (se aumenta la capacidad de escaneo por 4).

Técnicas de procesamiento GPR-SAR

Otro de los ámbitos abarcados por el proyecto SAFEDRONE ha sido

el desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento GPR-SAR, para mejorar tanto las capacidades de detección como para minimizar la probabilidad de falsas alarmas. Los sistemas GPR embarcados en los UAV desarrollados en el proyecto SAFEDRONE hacen uso del procesamiento GPR-SAR para obtener imágenes con resolución centimétrica del subsuelo y de los posibles objetos enterrados. Este tipo de procesamiento es posible gracias a que el subsistema de posicionamiento permite georreferenciar las medidas del GPR con precisión suficiente como para combinar coherentemente las medidas adquiridas en el escaneo de la zona de interés [6], [8]. Es importante destacar que otros sistemas GPR embarcados en los UAV (por ejemplo, los presentados en [4],[5]) no incorporan procesamiento GPR-SAR, con lo que las imágenes proporcionadas por dichos sistemas tienen una resolución significativamente peor que la que proporcionan los prototipos desarrollados en el proyecto

SAFEDRONE (lo que dificulta la identificación de los objetos enterrados).

Uno de los factores que más contribuye al *clutter*, que limita la capacidad de detección del sistema, es la reflexión de las ondas electromagnéticas emitidas por el radar que tiene lugar en la interfaz aire-suelo. Dicha reflexión puede enmascarar las reflexiones de las señales en objetos enterrados superficialmente, como es el caso de muchas minas e IED.

Para minimizar el *clutter* proveniente de dicha reflexión en la interfaz aire-suelo, en el proyecto SAFEDRONE se han desarrollado técnicas de filtrado basadas en descomposición de valores singulares (*Singular Value Decomposition*, SVD) [10].

Arquitectura Forward Looking-Down Looking GPR (FL-DL-GPR)

En el proyecto SAFEDRONE se ha implementado y validado una arquitectura GPR totalmente disruptiva, consistente en la combinación de

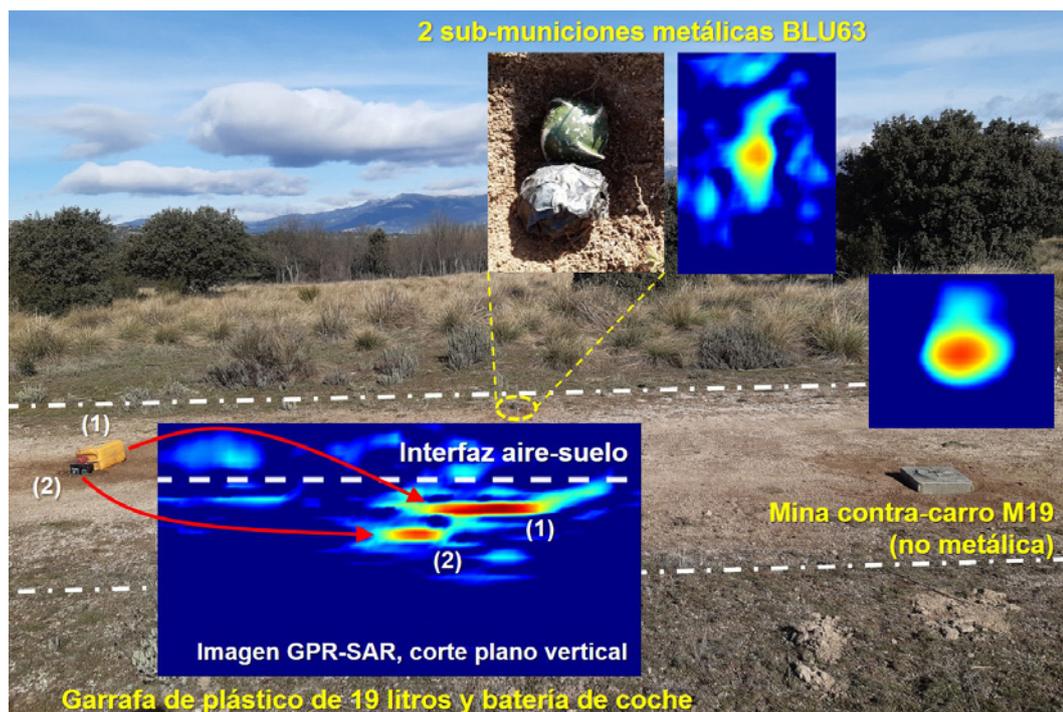


Fig. 5. Fotografía de algunos de los objetos enterrados en una de las zonas seleccionadas para la evaluación de los prototipos, situada en un tramo llano de la pista de tierra. Sobreimpreso a la fotografía se muestran partes de la imagen GPR-SAR obtenida tras el procesamiento de las medidas obtenidas con el prototipo DL-GPR. (Fuente propia).

las arquitecturas FL-GPR (empleada típicamente en sistemas GPR embarcados en vehículos terrestres) y DL-GPR. La arquitectura FL-GPR permite minimizar el *clutter* proveniente de la reflexión aire-suelo al evitar la reflexión especular de las ondas electromagnéticas en dicha interfaz, mientras que la arquitectura DL-GPR proporciona mayor rango dinámico. A lo largo del proyecto SAFEDRONE se realizó una campaña exhaustiva de evaluación de la arquitectura FL-DL-GPR, presentándose algunos resultados obtenidos en la publicación [11]. Se comprobó que, efectivamente, esta arquitectura híbrida minimiza la contribución del *clutter* proveniente de la interfaz aire-suelo.

Una característica de esta arquitectura es el empleo de dos UAV, tal y como se observa en la figura 1 (c), embarcándose un módulo radar y la antena transmisora en un UAV, y otro módulo radar y la antena receptora en el otro UAV. Ambos módulos radar se sincronizan inalámbricamente.

Validación de los prototipos

En el marco del proyecto SAFEDRONE se han realizado varias campañas de validación para evaluar las prestaciones de los prototipos desarrollados en

condiciones lo más similares a escenarios de operación reales.

La selección y preparación de los escenarios de validación ha sido realizada por el personal del Centro de Excelencia contra IED (*Counter IED Center of Excellence*, C-IED CoE) y del Ministerio de Defensa. Las pruebas de validación se realizaron en marzo y octubre de 2021, en el Campo de Maniobras y Tiro de El Palancar, situado en Hoyo de Manzanares (Madrid).

En las primeras pruebas de validación (marzo de 2021), se seleccionaron siete zonas de 12 m de largo por 4,5 m de ancho, situadas en diferentes escenarios. Dos de las zonas se ubicaron en secciones planas de una pista de tierra (véase figura 3), otras dos en secciones irregulares y en pendiente de dicha pista de tierra, y las tres zonas restantes en terrenos más o menos planos, sin y con cubierta vegetal.

Se enterraron aproximadamente 80 objetos consistentes en IED, minas contracarro y contrapersonal, placas de presión, granadas de mortero, y obuses. Algunos de los objetos enterrados en una de las siete zonas se muestran en la figura 4 y en la figura 5.

En las pruebas de marzo se evaluó el prototipo con la arquitectura DL-GPR (figura 2). Una vez realizadas las medidas, el equipo investigador del grupo TSC-UNIOVI procesó los resultados y procedió a la identificación de los posibles objetos enterrados en las imágenes GPR-SAR obtenidas. Con el fin de ilustrar de forma cualitativa la resolución del sistema GPR embarcado en un UAV, en la figura 4 y en la figura 5 se muestran ejemplos de cómo se ven algunos objetos enterrados en las imágenes GPR-SAR, en las que las zonas con colores cálidos indican áreas con una alta reflectividad, es decir, zonas en las que se detecta una anomalía que podría corresponder con un objeto enterrado.

En el caso de la figura 5, se incluye un corte vertical de la imagen GPR-SAR centrado en la posición del IED formado por una garrafa plástica (etiquetada como (1) en la figura 5) con una batería de coche adosada (etiquetada como (2) en la figura 5). En dicha imagen se aprecia claramente la reflexión que se produce en la parte superior de la garrafa y de la batería.

En las pruebas de validación finales (octubre de 2021) se seleccionaron 6 zonas, puesto que, además de la arquitectura DL-GPR, también se evaluaron los prototipos con las arquitecturas DL-GPR con *array*, FL-DL-GPR y el prototipo equipado con los módulos radio para las pruebas en condiciones BVLOS.

En todas las pruebas de validación se siguió un procedimiento de evaluación de las capacidades de detección de tipo *doble-ciego*. La posición de los objetos enterrados era únicamente conocida por el personal del C-IED CoE y del Ministerio de Defensa. Una vez procesadas las medidas y analizadas las imágenes GPR-SAR, el equipo investigador del grupo TSC-UNIOVI remitió al personal del C-IED CoE y del Ministerio de Defensa un listado con los objetos detectados en dichas imágenes, comparándolas con la ubicación

real de los objetos enterrados. Finalmente, el C-IED CoE y el Ministerio de Defensa remitió al personal investigador del grupo TSC-UNIOVI un informe de resultados en el cual se indicaban las probabilidades de detección, de falsa alarma y de pérdida, alcanzadas en las diferentes pruebas y escenarios.

Tras el análisis de las capacidades de detección de las diferentes arquitecturas desarrolladas en el proyecto SAFEDRONE, se pueden extraer las siguientes conclusiones: para objetos de tamaño mediano o grande (garrafas de plástico, minas contracarro, granadas de mortero, obuses de artillería) se ha conseguido una probabilidad de detección ligeramente superior al 90 %, que era el objetivo perseguido al inicio del proyecto. En lo que se refiere a falsas alarmas, la probabilidad fue del 27 % en las pruebas de validación de octubre, cifra que constituye una mejora significativa con respecto a las pruebas de validación de marzo (> 60 %).

Conclusiones

El proyecto SAFEDRONE ha constituido un importante hito para la I+D española en el ámbito del desarrollo de sistemas GPR de alta resolución embarcados en UAV. Los prototipos desarrollados incorporan, tanto a nivel de *hardware* como de *software*, elementos altamente innovadores que permiten obtener imágenes del subsuelo con resolución centimétrica, pudiendo afirmar que dichos sistemas GPR embarcados en los UAV se encuentran entre los más avanzados de su categoría a nivel mundial para detección de IED a fecha de finalización del proyecto (diciembre de 2021).

Algunos aspectos a desarrollar en futuros proyectos de I+D como continuación del SAFEDRONE son, entre otros, la mejora de los algoritmos de mitigación de *clutter* de las imágenes GPR-SAR obtenidas, la integración de otros sensores para mejorar la probabilidad de detección de objetos pequeños a la vez que se reduce la ratio de falsas alarmas y el desarrollo de técnicas de reconocimiento de blancos para automatizar el proceso de detección. Asimismo, también existe margen de mejora en lo referente a la autonomía de la plataforma aérea, así como en lo que respecta a los sistemas de comunicaciones para operar a mayores distancias.

Parte de la tecnología y propiedad intelectual empleada en el desarrollo del proyecto SAFEDRONE se encuentra protegida por la familia de patentes citada en [12].

Otros aspectos del proyecto SAFEDRONE

El coronel José Luis Mingote Abad se ha encargado de la coordinación y asesoramiento técnico del proyecto SAFEDRONE por parte del C-IED CoE.

El director técnico del proyecto SAFEDRONE por parte de la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) del Ministerio de Defensa ha sido el capitán Santiago García Ramos.

El capitán Santiago García Ramos y el coronel José Luis Mingote Abad, junto con el personal del C-IED CoE, se han encargado de la planificación y preparación de las pruebas de validación del proyecto SAFEDRONE en el Campo de Maniobras y Tiro «El Palancar», así como de la revisión *doblegado* de los resultados de detección proporcionados por el equipo investigador TSC-UNIOVI.

El diseño y fabricación del *array* de antenas se subcontrató a la Universidad de Vigo, y el diseño y configuración del sistema de comunicaciones de largo alcance en condiciones BVLOS se subcontrató a la empresa Instster Tecnología y Comunicaciones S.A.U.

Referencias

- [1] Daniels, D. J.. (2006). *A review of GPR for landmine detection. Sensing and Imaging: an International Journal*. Volume 7, pp 90-123.
- [2] Jol, H. (2008) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Amsterdam, Elsevier Science.
- [3] García-Fernández, M. y otros (2º trimestre de 2018). Sistema de GPR embarcado en un UAV para la detección de objetos ocultos enterrados, Sección en profundidad. *Boletín de Observación Tecnológica en Defensa*. N.º 57.
- [4] Schreiber, E., Heinzl, A., Peichl, M., Engel, M. y Wiesbeck, W. (2019). *Advanced Buried Object Detection by Multichannel, UAV/drone Carried Synthetic Aperture Radar*. En: *European Conference on Antennas and Propagation* (13th. 2019. Krakow, Poland). *Proceedings of the 2019 13th European Conference on*

- Antennas and Propagation (EuCAP)*. Piscataway (U.S.A.), IEEE. Pp. 1-5.
- [5] Šipoš, D. y Gleich, D. (2020). *A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection*. *Sensors*. Vol. 20, p. 2234, DOI: 10.3390/s20082234
- [6] García-Fernández, M, Alvarez-Lopez, Y., Las-Heras, F. (2020). *Airborne multi-channel ground penetrating radar for improvised explosive devices and landmine detection*. *IEEE Access*. Volume 8, pp. 165927-165943.
- [7] Burr, R., Schartel, M., Grathwohl, A., Mayer, M., Walter, T. y Waldschmidt, C. (2021). *UAV-borne FMCW InSAR for focusing buried objects*. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, pp. 1-5.
- [8] García-Fernández, M., Álvarez-Narciandi, G., Arboleya, A., Vázquez-Antuña, C., Las Heras, F., Álvarez-López, Y. (2021). *Development of an Airborne-Based GPR System for Landmine and IED Detection: Antenna Analysis and Intercomparison*. *IEEE Access*. Vol. 9, pp. 127382-127396.
- [9] García Fernández, M. y otros. (2018). *Synthetic Aperture Radar Imaging System for Landmine Detection Using a Ground Penetrating Radar on Board a Unmanned Aerial Vehicle*. *IEEE Access*. Vol. 6, pp. 45100-45112.
- [10] García-Fernández, M. y otros. (2017). *SVD-based clutter removal technique for GPR*. En: *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation* (2017. San Diego, U.S.A.). *Proceedings of the 2017 IEEE AP-S Symposium on Antennas and Propagation*, pp. 2369-2370.
- [11] García-Fernández, M., Álvarez-Narciandi, G., Álvarez-López, Y. y Las Heras, F. (2021). *Analysis and Validation of a Hybrid Forward-Looking Down-Looking Ground Penetrating Radar Architecture*. *Remote Sensing*. Vol. 13, p. 1206.
- [12] Gonzalez, B., Álvarez, Y., Arboleya A., Vaquero, Y.R., García, M., Las-Heras, F. y Pino, A.G. (2017). Sistema aerotransportado y métodos para la detección, localización y obtención de imágenes de objetos enterrados y la caracterización de la composición del subsuelo. Familia de patentes: ES2577403B2, EP3407007B1, CN109073348B, y US10895636B2. [Consulta: 2022]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/ES2577403B2/es>