

BOLETÍN INFORMATIVO Y DE ANÁLISIS N° 42 / 2025

Santiago, 02 de diciembre de 2025

RADAR RENDEZVOUS Y OPERACIONES DE PROXIMIDAD (RPO) Y RADAR DE ONDA MILIMÉTRICA (mmWave)



Por Álvaro Aguirre. Director de Asuntos Satelitales. 05 Min. de lectura

El último Informe sobre el Entorno de Basura Espacial emitido por la Oficina de Basura Espacial de la ESA publicado el 31/03/2025, con actualizaciones sobre las estadísticas de conjunción durante 2024 y la introducción del umbral de sostenibilidad orbital para el índice de salud del entorno espacial publicado el 21/10/25, da a conocer que el número de objetos estimados en órbita según modelos estadísticos (MASTER-8, población de referencia 08/2024) es de 54.000 objetos espaciales mayores de 10 cm (incluyendo aproximadamente 9.300 cargas útiles activas), 1,2 millones de objetos de desechos espaciales de más de 1 cm a 10 cm, 140 millones de objetos de desechos espaciales de más de 1 mm a 1 cm.



En las últimas décadas, la actividad humana en el espacio ha experimentado un crecimiento exponencial. La proliferación de satélites en la órbita baja terrestre (LEO), impulsada principalmente por las mega-constelaciones de comunicaciones, la expansión de misiones científicas y comerciales, y los frecuentes eventos de fragmentación ha incrementado drásticamente la densidad de objetos espaciales, así como el riesgo de colisiones catastróficas, en especial con los micro-fragmentos menores de 1 cm, que no pueden ser rastreados desde la Tierra, pero que poseen suficiente energía para inutilizar un satélite.

En este escenario, tecnologías como los radares para Operaciones de Rendezvous and Proximity (RPO) y los radares de onda milimétrica (mmWave) para la detección de micro-desechos se han convertido en herramientas esenciales para proteger la infraestructura espacial y garantizar la sostenibilidad del entorno orbital. Estas soluciones no solo mejoran la seguridad operativa de satélites y naves, sino que también constituyen la base tecnológica para futuras capacidades autónomas de navegación y mitigación de riesgos.

Ambas tecnologías, aunque distintas en propósito, convergen en un objetivo común: dotar a las plataformas espaciales de una autonomía creciente en un entorno cada vez más complejo. Dependiendo exclusivamente del seguimiento desde tierra ya no es una estrategia viable, especialmente en un escenario donde miles de nuevos satélites se lanzan cada año y donde un solo evento de fragmentación puede producir decenas de miles de peligrosos fragmentos no rastreables. La incorporación de sensores sofisticados a bordo permitirá transitar de un modelo reactivo a uno preventivo, donde la predicción, la generación local de datos y la toma autónoma de decisiones serán pilares fundamentales.

Radar RPO

El radar RPO se ha consolidado como un instrumento indispensable para misiones que requieren acercamientos controlados, acoplamientos seguros y maniobras finas alrededor de otros objetos en órbita. En contraste con sensores ópticos, cuya efectividad depende de las condiciones de iluminación y orientación, el radar ofrece un desempeño consistente en cualquier entorno. Esto permite obtener mediciones precisas de distancia, velocidad relativa y orientación, elementos fundamentales para operaciones como el reabastecimiento de satélites, la inspección de activos orbitales y el retiro activo de desechos. La creciente apuesta por misiones de servicio en órbita —reparación, extensión de vida útil

BOLETÍN INFORMATIVO Y DE ANÁLISIS N° 42 / 2025

y ensamblaje espacial— refuerza todavía más la necesidad de sensores robustos capaces de garantizar la seguridad durante las fases críticas de aproximación.

Los radares RPO se diseñan para medir la posición, velocidad relativa, actitud y geometría de un vehículo objetivo durante aproximaciones controladas. Su operación se basa en tres pilares físicos, que el rango mediante tiempo de vuelo (time-of-flight) de pulsos, la velocidad relativa radial mediante desplazamiento Doppler, y la imagen e identificación mediante radar de apertura sintética (SAR) o ISAR para capturar micro-movimientos.

Los radares RPO utilizan típicamente bandas X (8–12 GHz), Ku (12–18 GHz) o Ka (26–40 GHz) por el equilibrio entre resolución, alcance y tamaño de antena. En aproximaciones finales (<200 m), estos sistemas alcanzan precisiones de centímetros, indispensables para acoplamientos autónomos (automatic docking), servicio satelital (refuelling, replacement), inspección de anomalías, y retiro activo de desechos (ADR).

La forma de onda dominante es FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave), debido a la alta sensibilidad a distancias cortas, bajo consumo, y posibilidad de integración en plataformas pequeñas. Las plataformas más avanzadas emplean radar digital de múltiples antenas (MIMO), que permite formar múltiples haces simultáneamente y aumentar la resolución angular sin incrementar área física.

Los radares RPO enfrentan desafíos como saturación por reflexiones intensas en rangos cortos (<5 m), ambigüedad Doppler en maniobras multidireccionales, e interferencia radioeléctrica con sistemas de comunicaciones. Estas limitaciones están siendo mitigadas mediante técnicas de beam-forming adaptativo, calibración dinámica y algoritmos de fusión sensorial (radar + cámaras + LiDAR).

Radar mmWave para detección de micro-desechos

Por otro lado, la detección de micro-desechos representa un desafío técnico de gran relevancia. Las partículas de entre uno y diez milímetros de diámetro son demasiado pequeñas para ser rastreadas desde estaciones terrestres, pero poseen suficiente energía cinética como para perforar componentes sensibles de un satélite o comprometer la integridad de una

nave tripulada. El radar de onda milimétrica ha surgido como una de las soluciones más prometedoras para abordar este problema. Gracias a su elevada frecuencia y su corta longitud de onda, estos radares pueden identificar objetos diminutos a distancias relativamente cortas, proporcionando una conciencia situacional local en tiempo real. Este tipo de capacidad permitirá, en el futuro, que los vehículos espaciales ejecuten maniobras evasivas automatizadas o adopten configuraciones de orientación protectoras frente a amenazas inminentes.



Radar excels en la detección de objetos a largas distancias y de los que se mueven rápidamente.

El radar mmWave opera en frecuencias de 30 a 300 GHz, correspondientes a longitudes de onda entre 1 y 10 mm. Esta característica le confiere la capacidad de detectar partículas diminutas que serían invisibles para sensores convencionales.

A través de la emisión de ondas electromagnéticas y la medición del tiempo de vuelo y el desplazamiento Doppler, el radar puede determinar la distancia, velocidad y tamaño aproximado de los objetos detectados.

Uno de los principales retos en la detección de micro-desechos es la débil señal de reflexión que generan estas partículas. Para superar esta limitación, se emplean técnicas de procesamiento de señal avanzadas, como filtros de pulso, correlación de señales y análisis Doppler, que permiten diferenciar partículas en movimiento de elementos estáticos del entorno.

Además, la utilización de arreglos de antenas phased-array mejora la resolución angular, facilitando la identificación de múltiples partículas cercanas simultáneamente.

BOLETÍN INFORMATIVO Y DE ANÁLISIS N° 42 / 2025

Los micro-desechos de 1 mm a 1 cm constituyen el mayor riesgo no monitorizable en el entorno orbital. Estos objetos viajan a velocidades entre 7 y 14 km/s, y poseen energía cinética suficiente para perforar blindajes o destruir subsistemas críticos.

La longitud de onda del radar mmWave, típicamente en bandas W (75–110 GHz), D (110–170 GHz) o incluso THz, es ideal para detectar objetos cuyo tamaño es de 1 mm a 5 mm.

El retorno de micro-desechos depende de la RCS (Radar Cross Section), y el menor tamaño de estos fragmentos explica por qué los radares tradicionales son incapaces de detectarlos y por qué las longitudes de onda milimétricas y sub-milimétricas son necesarias.

Se han propuesto dos arquitecturas principales: Radar activo a bordo (monostático o bistático) que Emite señales FMCW o pulsadas. Y Capaz de crear un volumen de vigilancia alrededor del satélite (10–200 m). Sistemas pasivos o ISAC (Integrated Sensing and Communication) que Reutilizan señales de comunicaciones en banda Ka, V o W, No requieren un transmisor dedicado. Y Reducen la carga energética y el volumen del sistema.

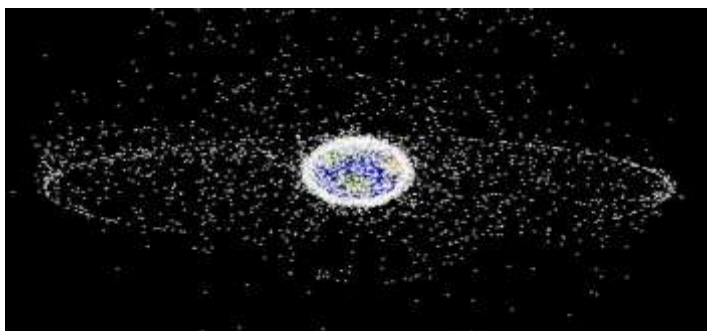


Imagen generada por computadora de objetos en la órbita de la Tierra que actualmente están siendo rastreados.

Crédito: NASA

El procesamiento moderno emplea: micro-Doppler para estimar rotación y trayectoria del micro-fragmento, machine learning (SVM, LSTM, CNN 1D) para clasificar ruido vs. fragmentos reales, y tracking multi-objetivo con filtros Kalman extendidos o filtros de partículas.

Conclusión

Los radares RPO y los radares mmWave se perfilan como componentes esenciales de la infraestructura

espacial del siglo XXI. A medida que el entorno orbital se vuelve más denso y peligroso, las plataformas espaciales deben evolucionar desde sistemas pasivos dependientes del seguimiento terrestre hacia sistemas autónomos capaces de detectar amenazas invisibles, maniobrar sin intervención humana, cooperar entre sí y ejecutar operaciones de proximidad con precisión milimétrica.

Estas tecnologías no solo mejoran la seguridad operativa, sino que se convierten en requisitos fundamentales para la sostenibilidad del entorno orbital y para garantizar la continuidad de la economía espacial. Tanto los radares RPO como los sistemas mmWave dedicados a la detección de microdesechos constituyen capacidades críticas para enfrentar los desafíos derivados de la congestión orbital y la proliferación de desechos espaciales.

Su desarrollo e integración en futuras misiones representan un paso indispensable hacia un ecosistema espacial más seguro, sostenible y resiliente.

A medida que la presencia humana en el espacio se expanda, la adopción de estos sistemas dejará de ser una elección tecnológica para convertirse en una responsabilidad necesaria para proteger el acceso y la estabilidad del entorno orbital.

Para enfrentar la congestión orbital, la tendencia apunta hacia sistemas autónomos dotados de fusión sensorial multibanda, radar cognitivo con control dinámico de forma de onda, modelos de predicción basados en IA, y actuación automatizada frente a amenazas.

El concepto más avanzado es el de Navegación y Consciencia Orbital Autónoma Distribuida (DAOAN), donde múltiples satélites comparten detecciones y modelos predictivos en tiempo real.

AAW, adaptación con información de fuentes abiertas, internet.

<https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/UNIDIR> → Building a more secure world.+1

Preliminary concept of a space-based radar ESA Proceedings Database

<https://spacenews.com/the-next-generation-of-radar-needed-to-detect->