



ACADEMIA DE LAS CIENCIAS
Y LAS ARTES MILITARES

Comunicaciones académicas

Antenas activas con exploración electrónica

Una tecnología dual que está transformando
las comunicaciones y el transporte

Félix Pérez Martínez

Academia de las Ciencias y de las Artes Militares
Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar

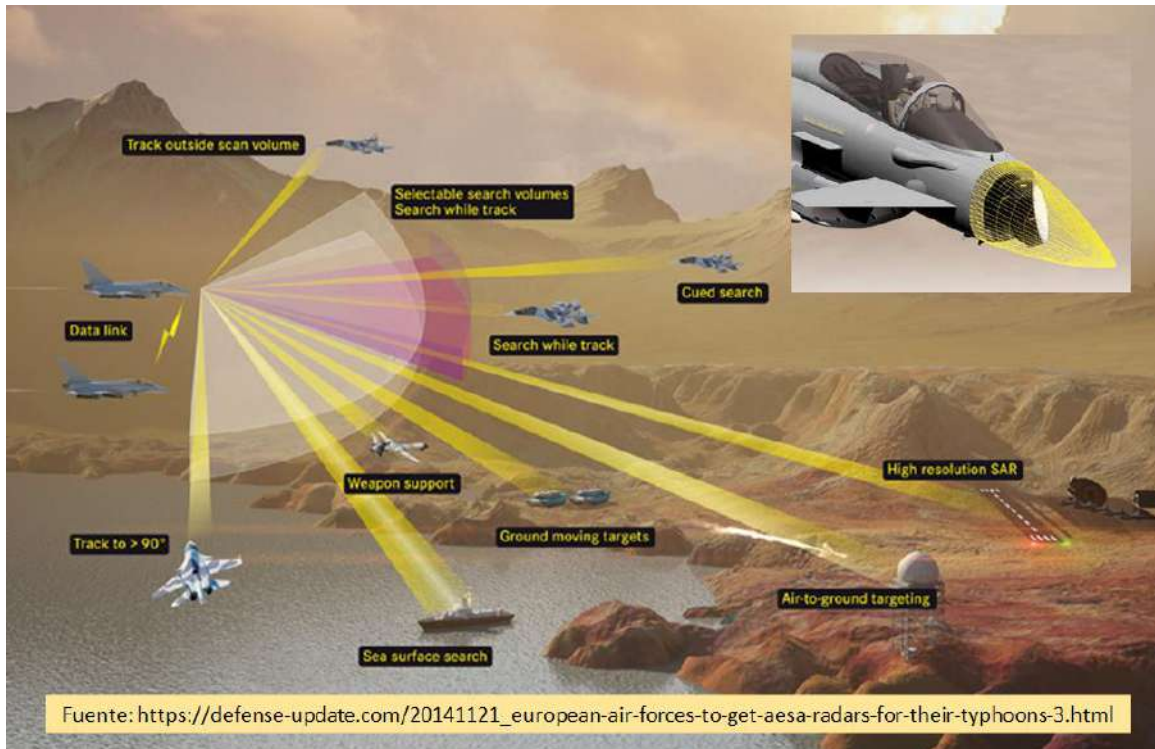
26 de marzo de 2022

Radares de exploración electrónica

Los sensores electromagnéticos son dispositivos y equipos diseñados para extraer información a distancia sobre objetos de interés mediante las propiedades de las ondas electromagnéticas. Han sido y son los «ojos y oídos» que permiten detectar e identificar las amenazas en el ámbito de la Defensa y la Seguridad. Son los elementos básicos de los sistemas militares que garantizan que unas fuerzas combatientes adquieran y mantengan la superioridad en la información y en el armamento y, por lo tanto, en el combate.

Los radares, sensores activos que trabajan en las bandas de microondas, son los más utilizados junto con los sensores electroópticos e infrarrojos. Los radares aportan como principales características su elevado alcance y, sobre todo, el hecho de ser «todo tiempo», es decir trabajar día y noche, incluso con condiciones meteorológicas adversas.

Todo sensor electromagnético requiere una antena o lente que tiene dos funciones básicas: adaptar la energía electromagnética al medio atmosférico y, en la mayor parte de los casos, concentrar/recoger esta energía en/desde direcciones



privilegiadas. La capacidad de concentrar esta energía (directividad de la antena) es inversamente proporcional al tamaño físico de la apertura de la antena medido en longitudes de onda. Los radares son asociados al uso de grandes antenas consecuencia de que requieren que éstas tengan diagramas de radiación con haces muy estrechos –para incrementar su precisión angular y alcance- y no pueden trabajar a frecuencias muy elevadas, donde las longitudes de onda son pequeñas, para asegurar su característica de «todo tiempo».

Para detectar a las amenazas en las zonas de interés o «perseguir» a un blanco de especial relevancia, los primeros radares apuntaban sus antenas por procedimientos mecánicos, bien explorando uniformemente un área de cobertura (función exploración), bien apuntando la antena a un blanco específico (función seguimiento). En cada caso, los requisitos exigidos, y por tanto sus antenas, eran diferentes por lo que se desarrollaron dos tipos diferentes de radares: los de vigilancia y los de seguimiento. Estos últimos fácilmente reconocibles porque su antena es siempre una parábola, antena con un haz tipo pincel que permite discriminar espacialmente el blanco seleccionado del resto.

En muchos casos son sistemas complementarios: el radar de vigilancia detecta los blancos en un área de cobertura, selecciona uno y suministra la información al radar de seguimiento para que éste se «enganche» al blanco y complete la misión. Sin embargo, a partir de los años sesenta del siglo pasado, el incremento del número de blancos en escenarios de conflicto cada vez más complejos puso de manifiesto las limitaciones de esta aproximación y la necesidad de realizar el apuntamiento de las antenas electrónicamente. En estas antenas se mueve el haz de forma casi

instantánea para apuntar a cualquier dirección de su área de cobertura. La técnica es especialmente útil en sistemas de armas que debe detectar y seguir a muchos blancos simultáneos.

Las antenas de exploración electrónica se usan desde hace bastantes décadas y en ellas se sustituyeron las antenas con grandes reflectores por un array de antenas en que se dotaba a cada uno de sus elementos de unos atenuadores y desfasadores variables que permitían combinar las señales adecuadamente para que el haz de la antena apuntase en determinada dirección. Las antenas eran, por tanto, pasivas y se alimentaban con un único transmisor para emitir la señal y uno o varios receptores para detectar los ecos del entorno.

En estos radares, conocidos como radares multifunción, el sistema explora en tiempo compartido una zona de cobertura y sigue a los blancos con diferentes niveles de dedicación en función de su prioridad. Sus ventajas son conocidas y valoradas desde hace muchos años y sus aplicaciones más significativas han estado asociadas a las plataformas navales (normalmente conocidos como MFAR o MPAR y trabajando en bandas S, C y X), en plataformas aéreas operando en banda X (8.0-12.5 GHz) y en plataformas terrestres trabajando en todas las bandas (L, S, C y X). En muchos casos son los sensores básicos del sistema de armas que se incorpora a la plataforma. Sistemas de armas tan conocidos como el Cobra Dane, AEGIS, o el Patriot utilizaron esta tecnología en las últimas décadas del siglo pasado y más modernamente también la incorporó el Eurofighter Typhoon.

Radars AESA (Active Electronically Scanned Array)

En la actualidad se tiende a hacer los *arrays* activos. Como su nombre indica, un radar AESA es un radar primario, generalmente de impulsos, que utiliza una antena de exploración electrónica activa, es decir, que cada elemento del *array* o *subarray* dispone de su propio módulo transmisor y receptor (denominado módulo T/R), lo que permite generar las señales transmitidas y recibir los ecos de forma distribuida a lo largo de los elementos del array. Esta arquitectura permite obtener dos ventajas muy importantes: evitar las pérdidas asociada a la red de formación de haces, que reducen sensiblemente el alcance, y facilitar la utilización de tecnología de estado sólido, mucho más barata y fiable, para realizar los elementos transmisores. Nótese que al generar la potencia de forma distribuida es posible encontrar dispositivos de estado sólido capaces de suministrar las potencias requeridas y no emplear tubos electrónicos.

Si en cada uno de estos módulos T/R (o un grupo de ellos cuyas salidas se combinan) se incluyen ya la modulación, la demodulación y las conversiones analógico-digital (ADC y DAC); el proceso de las señales recibidas por los

elementos del array se hace en un procesador digital y se pueden tener múltiples haces reconfigurables simultáneos (técnicas de *beamforming*). Es la última generación de estos equipos -la mayoría en fase de desarrollo- que tiene grandes ventajas, entre las que destacamos las siguientes:

- Conformación mucho más precisa del haz, tanto en la precisión en el apuntamiento como en la forma del haz, al reducir drásticamente el número de componentes analógicos empleados y, por tanto, las variaciones asociadas con el tiempo, la temperatura y otros cambios ambientales.
- Realización mucho más eficiente de las tareas de vigilancia y seguimiento. Consecuencia de lo anterior, se pueden utilizar anchos de haz diferentes para las diversas actividades, tanto en transmisión como en recepción. Por ejemplo, se puede emplear un haz ancho para adquirir blancos y uno muy estrecho para un seguimiento de alta precisión.
- Conformación adaptativa. Controlando digitalmente la ponderación de los elementos del *array*, además de conformar los haces para adaptarlos a los requisitos del escenario, se pueden aplicar técnicas de superresolución (superando las limitaciones asociadas al ancho de banda transmitido y a la apertura de la antena), de procesado espacio-tiempo (para cancelar el *clutter* de una forma muy eficaz).

Todo lo cual se traduce en mejoras muy significativas en las características operativas:

- Se incrementa el margen dinámico en recepción lo que permite detectar pequeñas señales de blancos de baja RCS escondidas en las interferencias, provocadas o no, que caracterizan los densos entornos electromagnéticos en que se trabaja.
- Se incrementa la precisión en la localización de los blancos haciendo más eficaz la acción de los sistemas de armas y obteniendo imágenes de mayor calidad.
- La disponibilidad de haces digitales adaptativos permite eliminar, en su caso, las interferencias de varios perturbadores simultáneos provenientes de diferentes direcciones.
- Mejora de las características en situaciones de multitrayecto y *clutter* intenso, una importante dificultad para sistemas que pretenden detectar blancos a baja cota.
- Se puede operar en modo LPI (baja probabilidad de interceptación), evitando que los adversarios detecten, localicen o identifiquen las señales transmitidas.

Obviamente el empleo de *arrays* activos con capacidad de exploración electrónica también tiene desventajas, la más importante de las cuales es su elevado coste. Sin embargo, el desarrollo de las tecnologías microelectrónicas abaratará los costes en los próximos años. Una interesante descripción de las posibilidades de estos sistemas lo realizó en 1999 M. Skolnik en *Improvements for air-surveillance radar. Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference* <https://ieeexplore.ieee.org/document/767195> en donde se presenta el concepto de radar ubicuo.

Módulos T/R. Una tecnología en rápida evolución

Un módulo T/R consiste básicamente en una combinación de conmutadores de RF, amplificadores de potencia, amplificadores de bajo ruido, desfasadores, atenuadores, circuitos de alimentación, circuitos de control lógico y otros circuitos funcionales. El peso, las dimensiones, el rendimiento y la fiabilidad del módulo T/R afectan a las características de un radar AESA. Además, tiene elevados requisitos: ancho de banda operativo amplio, alta fiabilidad, precisión, alto rendimiento...

Las prestaciones de los módulos TR han mejorado mucho con el desarrollo espectacular de los circuitos monolíticos integrados de microondas, conocidos por su acrónimo en inglés MMIC, que permiten la realización de funciones electrónicas muy complejas en un chip de unas decenas de milímetros cuadrados para lo que se utilizan distintas tecnologías, siendo en estos momentos especialmente interesante el uso de Nitruro de Galio. Además, ya se pueden realizar hasta frecuencias superiores a 100 GHz, lo que ha abierto enormes posibilidades. Una descripción de los mismos puede encontrarse en S. Rathod et al. en *Evolutionary trends in Transmit/Receive Module for Active Phased Array Radars. Defence Science Journal. November 2018* https://www.researchgate.net/publication/329031938_Evolutionary_trends_in_TransmitReceive_Module_for_Active_Phased_Array_Radars.

Otro ámbito de evolución especialmente significativo es la futura digitalización completa de los módulos T/R que permitirá realizar la formación digital de haces numéricamente a partir de las señales a nivel de elemento del array, consiguiendo haces adaptativos de excelentes prestaciones.

En este caso, la parte transmisora se basará en las técnicas de síntesis digital directa en las que la amplitud y la fase de cada módulo se pueden ajustar mediante procesos digitales muy precisos. Se están desarrollando módulos T/R digitales basados en dispositivos de potencia GaN, detectores fotónicos y tecnología ADC de alta velocidad, siendo la distribución de señales una de las dificultades. La modulación de una señal óptica con la de RF es una buena alternativa hasta que

sea posible la implementación de T/R completamente digitales. En estos últimos en recepción se usa un ADC de muestreo de RF directo de alta velocidad. Obviamente la digitalización sincronizada con intervalos de muestreo muy pequeños y la necesidad de procesar el enorme chorro de bits a su salida, son las principales dificultades.

Por último, señalaremos que otra línea de trabajo en el que se tienen grandes esperanzas al objeto de abaratar el coste de los actuales equipos es el empleo de módulos T/R de banda ancha para apertura compartida entre radares, sistemas de comunicaciones y equipos de guerra electrónica (EW). No es nada fácil pues se requerirán elementos radiantes y módulos T/R de bandas muy anchas, de más de una octava.

Tecnología AESA y el sector de comunicaciones

Una de las razones de las extraordinarias prestaciones que suministrarán los futuros sistemas de comunicaciones 5G, en términos de volumen, velocidad de transmisión y latencia de los datos, se debe al despliegue de lo que se conoce técnicas mMIMO (*Massive Multiple-Input Multiple-Output*).

Lo cierto es que este tipo de las técnicas MIMO se utilizan desde hace muchos años en algunos de los *routers* o terminales de telefonía móvil de alta gama. En estos equipos se incorporan dos o cuatro antenas, cuyas salidas se suman una vez se ponderan por unos coeficientes que permiten optimizar el nivel de las señales recibidas. La mejora obtenida es tan significativa que esta técnica forma parte de estándares tan conocidos como el WiFi 802.11n, WiFi 802.11ac, HSPA+ (3G) y 4G LTE.

Sin embargo, el «MIMO masivo» se utilizan hasta 128 antenas, tanto en transmisión como en recepción, cuyas entradas/salidas se procesan con sofisticados algoritmos de proceso de señal que permiten que los paquetes de datos se puedan enviar/recibir simultáneamente desde decenas de terminales cuyas transmisiones son separadas «espacialmente» en base a la posición de cada uno de ellos. El resultado es un incremento muy importante del volumen de datos transmitido en cada estación base. De hecho, las técnicas empleadas no son más que diferentes versiones de las técnicas de conformación de haces desarrollada desde hace años en los radares AESA.

Lo que sí es cierto es que el despliegue de estas técnicas en el campo de las comunicaciones móviles supondrá un volumen de negocio muy superior al realizado hasta ahora en el campo de la Defensa. Conviene no olvidar que, en los próximos años, además de las comunicaciones personales, está prevista la

conexión a internet de decenas de miles de millones de «objetos» a través de los sistemas de comunicaciones móviles. Los volúmenes y velocidades de datos necesarios serán enormes y estarán limitados por la capacidad de la conectividad disponible.

Tecnología AESA y sector del transporte

La utilización de radares anticolidión en automóviles comenzó en los primeros años de este siglo y se ha desarrollado exponencialmente en los últimos años. Por ejemplo, se calcula que, sólo en China, el mercado actual de estos componentes es superior a los mil quinientos millones de euros. Son radares de onda continua y frecuencia modulada que utilizan las bandas milimétricas (24 GHz y 77 GHz, típicamente). Están realizados en tecnología de estado sólido, son de bajo peso y volumen e implementan diversas funciones: control de crucero adaptativo, advertencia de colisiones, frenado de emergencia, detección de punto ciego, cambio de carril asistido... Sin embargo, la auténtica disrupción vendrá asociada a las necesidades del coche autónomo y a la incorporación de técnicas de formación de haces, descritas en párrafos anteriores. De hecho, ya existen chips de muy bajo coste capaces de realizar estas funciones trabajando en bandas que llegan a 110 GHz.

El elemento clave de la conducción autónoma es el LIDAR, un radar trabajando en bandas electroópticas realizado con láseres de impulsos. El incremento de sus prestaciones y el abaratamiento de su coste ha sido espectacular en los últimos años de la mano de su aplicación al «coche sin conductor» y al desarrollo de las plataformas aéreas autónomas o remotamente tripuladas. El LIDAR permite obtener una imagen muy precisa del entorno que rodea a una plataforma móvil, pero tiene algunos inconvenientes como son su sensibilidad a las condiciones meteorológicas, los tiempos de refresco de la información, la dificultad para clasificar a los blancos y su precio.

Justo estos inconvenientes son los que no tienen los radares de milimétricas por lo que la integración de estos dos tipos de sensores mediante técnicas de fusión de datos permitirá desarrollar sistemas muy precisos, todo tiempo y redundantes. Los sistemas que requerirán en los próximos años los «coches sin conductor» y, posteriormente, en general las plataformas terrestres, navales y aéreas autónomas e inteligentes que revolucionarán el sector del transporte en las próximas décadas. Las técnicas empleadas serán similares a los de los actuales radares AESA.

A modo de conclusión

Los párrafos anteriores demuestran la dualidad de la tecnología AESA que, desarrollada inicialmente para satisfacer una necesidad militar, se está transfiriendo al campo civil cuando su grado de madurez y abaratamiento lo permitan. Su utilización masiva en sectores económicos con grandes volúmenes de negocio, como los comentados en párrafos anteriores, con el objetivo de implementar aplicaciones disruptivas garantiza esta transferencia.

Lo que cabe esperar ahora es fácil de imaginar, en los próximos años se realizarán fuertes inversiones para desarrollar circuitos MMIC, con un nivel de digitalización cada vez más elevado, fiables y baratos, que cubrirán todas las bandas. Así mismo, se desarrollarán nuevos elementos radiantes más pequeños e integrados. De este modo se podrán satisfacer las necesidades de las aplicaciones emergentes indicadas. Posteriormente, se sustituirán los actuales sistemas radiantes por las antenas tipo AESA en numerosas aplicaciones. El abaratamiento de la tecnología permitirá utilizarlas en sistemas militares donde ahora no es posible y serán las aplicaciones civiles las que faciliten el desarrollo de equipos militares y el motor de su desarrollo. Un proceso que ya ha ocurrido con numerosas tecnologías.

¿Cuándo? No lo sabemos, quizás más tarde de lo que pensamos los ingenieros y tecnólogos que trabajamos en este ámbito, pero lo cierto es que, una vez más, la tecnología de uso militar será la responsable de que existan nuevos productos y servicios que incrementan el bienestar de la humanidad.