

En Profundidad

Capacidades AESA en aviones de combate

José Manuel Muñoz Fuentes,
Dpto. de Aeronaves y Armamento,
Subdirección Gral. de Experimentación
y Certificación, INTA

Palabras clave: AESA, aviones de combate, radar, E-scan

Metas tecnológicas relacionadas:
MT 2.1.1.; MT 2.1.2.; MT 2.1.4.; MT 6.2.7.

La capacidad de los modernos aviones de combate depende de manera esencial de su radar primario (*Fire Control Radar*), situado en la parte frontal de la aeronave y que se puede considerar como el principal de los sensores que lleva embarcados. En la actualidad, los desarrollos más punteros de este tipo de radares están basados en las tecnologías de antenas AESA (*Active Electronically Scanned Array*), que prometen introducir cambios revolucionarios en las capacidades de estos sistemas. En los próximos años, se espera que el progresivo descenso de los costes de fabricación de estos sistemas acentúe esta tendencia y convierta a las AESA en la tecnología dominante en las futuras aplicaciones radar.

En este artículo se describirán brevemente los fundamentos de las tecnologías AESA y las mejoras en capacidad que proporciona para los radares primarios de los aviones de combate. Estos radares son habitualmente radares multifuncionales de pulsos Doppler o *Pulse Doppler Radar* (PDR), operando en banda X de frecuencias (8.0-12.5 GHz), banda I/J si se está empleando terminología OTAN.

Tipos de escaneo

Para la búsqueda de blancos, los radares de los aviones de combate deben realizar un barrido por toda la zona de cobertura, apuntando con su antena a las distintas direcciones del espacio. Este proceso de barrido de la antena o escaneo se puede realizar por medios mecánicos (*M-scan*) o electrónicos (*E-scan*). A continuación se describen brevemente ambos conceptos:

- **M-Scan:** en este tipo de sistemas, el apuntamiento de la antena se consigue gracias a un posicionador mecánico que mueve físicamente a la antena, orientándola a la dirección de interés. En la primera generación de radares de aviones de combate con apuntamiento mecánico la antena era de tipo reflector parabólico. A partir de la década de 1970, se empezaron a utilizar antenas planas de tipo *array*, como los radares multifuncionales de las familias AN/APG-65, 70 y 73, que demostraron su utilidad en diversas versiones del F-15 junto con los clásicos misiles Aire-Aire como el Sparrow o las primeras versiones del Sidewinder. Entre las ventajas de las antenas planas de tipo *array* frente a las antenas parabólicas se puede destacar un mejor diagrama de radiación y una menor *Radar Cross Section* (RCS) o firma radar, lo que dificulta la detección de la aeronave por parte de los radares enemigos. Este tipo de sistemas se conoce como *M S A* (*Mechanically Scanned Array*).
- **E-Scan:** en este tipo de sistemas el apuntamiento de la antena se consigue de manera electrónica, no siendo necesario realizar ningún tipo de movimiento mecánico de la antena. El escaneo electrónico se basa en la utilización de las antenas denominadas *phased array*. Las antenas de tipo *array* son antenas compuestas de varios elementos radiantes (antenas elementales) cuyo funcionamiento conjunto permite sintetizar diagramas de radiación con características específicas. Los *phased array* son antenas *array* en las que cada uno de los elementos radiantes está controlado en fase de manera independiente a los demás. Variando de manera coordinada la fase entre los distintos elementos del *array* se consigue orientar el haz de la antena a las diferentes direcciones del espacio. Esto se debe a que la suma de la señal transmitida por cada uno de los elementos radiantes queda reforzada en la dirección del espacio en que dichas contribuciones se suman en fase. En los sistemas E-Scan, se requiere disponer de un procesador local, o destinar parte del procesador del

radar, para controlar la fase en cada elemento radiante. Dicho procesador suele denominarse *B e a m Steering Controller* (BSC) y actúa controlando el retardo de la señal, a partir de los dispositivos electrónicos destinados a tal efecto denominados desfases. Este tipo de sistemas se conocen también como *ESA* (*Electronically Scanned Array*).

La introducción de las tecnologías ESA en los radares de los aviones de combate a partir de la década de 1980 permitió dotarlos de nuevas capacidades y prestaciones mejoradas, siendo las principales las siguientes:

Agilidad de apuntamiento sin inercias: los sistemas ESA hicieron posible desarrollar sistemas radar con una agilidad de apuntamiento sin precedentes, ya que con escaneo electrónico puede variarse la dirección del haz de forma casi instantánea y sin inercias. Así, un posicionador puede tardar tiempos del orden de un segundo en variar la dirección del haz, mientras que mediante apuntamiento electrónico esto puede conseguirse en tiempos menores de un milisegundo. Este hecho introdujo sustanciales mejoras en las prestaciones de los radares de los aviones de combate:

- Al haber eliminado prácticamente los tiempos de barrido, se dispone de mayor tiempo para integrar un mayor número de pulsos radar en el proceso de detección, aumentando así la probabilidad de detección de los blancos.
- Gracias a la agilidad y si se tienen suficientes recursos computacionales, se puede determinar si las hipótesis de partida de los modelos de procesado adaptado que emplean estimación paramétrica son ciertas o deben modificarse convenientemente, lo que resulta en una mejora de las técnicas de supresión de *clutter* ("ruido radar") o la obtención de imágenes del terreno mediante *Synthetic Aperture Radar* (SAR) o *Inverse Synthetic Aperture Radar* (ISAR).
- El intervalo de tiempo durante el cual los datos están siendo procesados para la detección o la obtención de un conjunto de medidas o *dwell time*, puede optimizarse en función

en profundidad

de las necesidades de detección y seguimiento en cada escenario como pueden ser la identificación no cooperativa (en inglés, NCI) o *raid assessment*. Pueden iluminarse blancos para guiado de misiles incluso cuando éstos se encuentren fuera del volumen de búsqueda.

- El seguimiento de un blanco puede realizarse de forma estable desde el instante en que es detectado. Pueden conseguirse precisiones propias de *Single Target Track* (STT) para múltiples blancos al mismo tiempo. Una forma de conseguirlo es incrementar el número de pulsos cuando se detecta un blanco para obtener valores estables de sus parámetros.

Capacidad multihaz: las antenas ESA permiten la síntesis de varios haces independientes del diagrama de radiación. Esta característica, unida a la rapidez de apuntamiento, hace posible que los radares que utilizan antenas ESA puedan realizar el seguimiento casi simultáneo de un gran número de objetivos, o bien que puedan emplear cada haz en distintas funciones radar (exploración, seguimiento, etc.) o incluso otro tipo de funciones como ataque electrónico (*jamming*) (ver fig. 1b).

Reducción de firma radar: en segundo lugar, el apuntamiento electrónico facilita la reducción de RCS del sistema de armas. Por ejemplo, las reflexiones directas de la antena de la propia plataforma al ser iluminada

por un radar enemigo, pueden reducirse inclinando un poco la antena, lo que se conoce como *tilting*, corrigiendo dicha inclinación por métodos electrónicos.

Alta fiabilidad: la ausencia de partes móviles en los arrays de apuntamiento electrónico mejora sustancialmente la fiabilidad del sistema completo de antena.

A pesar de estas ventajas, el escaneo electrónico presenta un importante inconveniente frente al escaneo mecánico: las antenas ESA sufren el ensanchamiento de su haz a medida que la dirección de escaneo se aleja de la dirección perpendicular del plano de la antena, siendo especialmente grave cuando se superan inclinaciones de 60°. Este ensanchamiento del haz reduce la zona efectiva de cobertura de la antena, imponiendo la necesidad de emplear un posicionador mecánico o varios planos de antenas para conseguir un campo de visión (FoR – Field of Regard) suficientemente amplio.

Arquitectura de los sistemas eScan: PESA vs AESA

Las primeras arquitecturas de antenas ESA estaban basadas en el esquema representado en la parte izquierda de la fig. 2. En esta configuración, denominada PESA (*Passive Electronically Scanned Array*), la potencia radiada es generada por un transmisor central que distribuye la señal a todos los elementos del array. El apuntamiento del haz se consigue por medio de

desfasadores situados detrás de cada elemento (o grupo de elementos) del array. En recepción, la señal sigue el camino inverso, combinándose las salidas de todos los elementos del array hacia el amplificador de bajo ruido (LNA) de un receptor central. En este tipo de antenas, no es posible controlar la amplitud de manera independiente para cada elemento.

Sin embargo, la configuración PESA presenta un importante inconveniente: entre los elementos radiantes y el amplificador LNA se producen muchas pérdidas de energía, que se traducen en un aumento del ruido en la señal recibida que degrada notablemente la sensibilidad del sistema. Esta menor sensibilidad significa que el radar tendrá mayor dificultad para detectar los objetivos, por lo que se reducirá su alcance efectivo.

No ha sido sino hasta los últimos años cuando los avances tecnológicos han hecho posible la implementación práctica del concepto teórico que soluciona estos inconvenientes: las antenas AESA (*Active Electronically Scanned Array*). En este tipo de configuración (parte derecha de la fig. 2), no existe un transmisor y receptor central, sino que cada elemento del array dispone de su propio módulo transmisor y receptor (denominado módulo T/R), que integra las funciones de desfasaje, amplificación de potencia en transmisión, amplificación de bajo ruido en recepción, conmutación transmisión/recepción, etc. (ver fig. 3). Al situarse



Fig. 1a. Radar AESA RACR (Raytheon's Advanced Combat Radar), integrado en versiones del F-16 de la USAF. Primer vuelo en la base de Edwards, California en julio de 2010. (Fuente: <http://www.raytheon.com>).

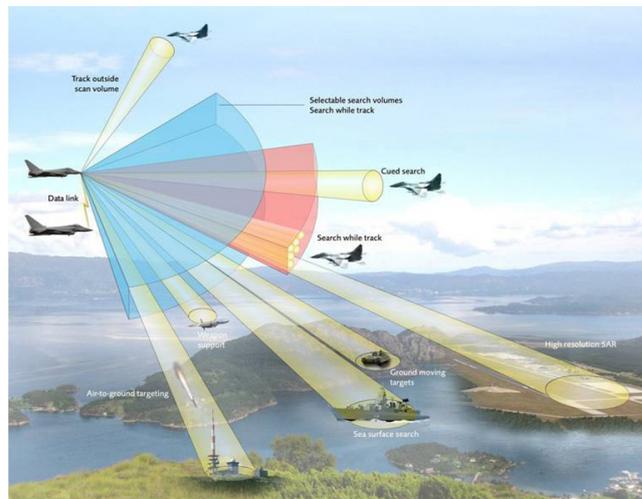


Fig. 1b. La agilidad de apuntamiento de las antenas ESA, unido a su capacidad multihaz, hace posible que los radares multifuncionales puedan entrelazar en el tiempo las distintas funciones radar (búsqueda, seguimiento, iluminación de objetivos, etc.) (Fuente: www.eurofighter.com).

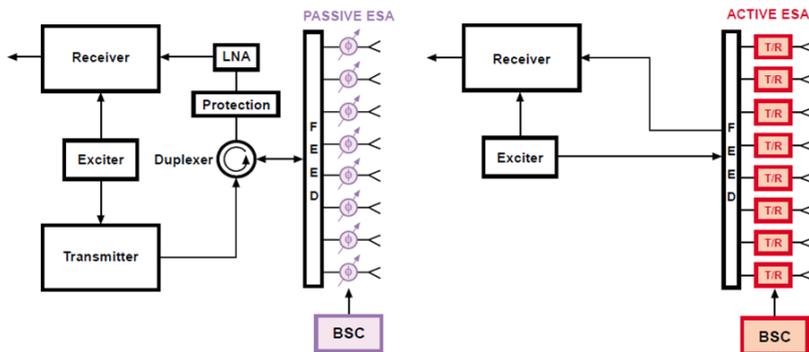


Fig. 2. Arquitecturas de antena en PESA y AESA. (Fuente: Stimson, G.W. Introduction To Airborne Radar. 2nd Ed. Scitech. 1998.).

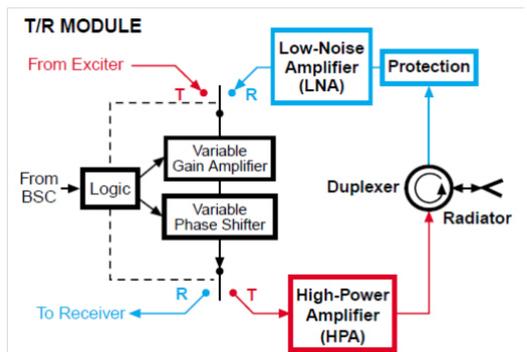


Fig. 3. Elementos funcionales básicos en un módulo T/R. (Fuente: Stimson, G.W. Introduction To Airborne Radar. 2nd Ed. Scitech. 1998.).

los módulos T/R junto con los elementos radiantes, se reducen drásticamente las pérdidas de energía de la señal, aumentando por lo tanto la sensibilidad del sistema.

Para que las antenas AESA se hayan convertido en una realidad han sido fundamentales los avances en la tecnología de circuitos MMIC (*Monolithic Microwave Integrated Circuits*) de arseniuro de galio (GaAs), que permitió el desarrollo de las primeras antenas AESA y sigue siendo fundamental hoy en día, al presentar propiedades excelentes para ser empleados como amplificadores de estado sólido en altas frecuencias, controlando la fase y amplitud de forma muy precisa en frecuencias suficientemente altas. Aunque en los últimos años el GaAs se ha visto superado por el nitruro de galio (GaN) y el carburo de silicio (SiC) en aplicaciones electrónicas de alta potencia y alta frecuencia (debido a las excelentes propiedades de estos materiales), la utilización de MMIC de GaN en antenas AESA se encuentra aún en fase de investigación y desarrollo.

Otro factor importante para la implantación de las AESA en el ámbito de los radares de combate ha sido la disponibilidad de procesadores capaces de asumir el coste computacional necesario para explotar adecuadamente sus capacidades. Actuar de forma independiente sobre cada módulo T/R conlleva un alto coste computacional, dado el gran número de elementos que se tienen que gestionar. Por ejemplo, un valor habitual en aviones de combate podría situarse entre los 1.000 y 2.000 elementos¹, si bien depende de cada caso particular. En multitud de ocasiones, se subdivide todo el conjunto de elementos radiantes en varios

subconjuntos sobre los que se actúa de forma independiente.

Prestaciones de los radares AESA

Las ventajas que ofrecen los radares AESA son muy significativas en términos de capacidades de un sistema de armas, como se explica detalladamente en los siguientes párrafos:

Transmisión y recepción en la propia antena: como ya se ha comentado anteriormente, la primera ventaja de las antenas AESA frente a las PESA, viene dada por el hecho de que la transmisión y recepción se realiza en el propio elemento radiante, lo que hace que las antenas AESA presenten menos pérdidas de señal y mayor sensibilidad. A este hecho hay que añadir que los desfases utilizados en las PESA y basados en unión metal semiconductor (*Metal Semiconductor Field Effect Transistor* o MESFET) de GaAs introducen más pérdidas de señal que sus componentes análogos en circuitos MMIC de GaAs, GaN o SiC.

Control de amplitud y fase: como se ha visto anteriormente, el hecho distintivo de la capacidad AESA es la posibilidad de controlar la amplitud, no sólo la fase, gracias a la existencia de los módulos T/R. Si se considera este nuevo grado de libertad de manera conjunta con la agilidad de apuntamiento sin inercias, asumiendo que se disponen de recursos computacionales suficientes, se tiene la capacidad de adaptar el diagrama de radiación a cada escenario de forma casi instantánea. Este hecho tiene importantes consecuencias desde el punto de vista operacional y revoluciona el concepto clásico de *moding* de radar multifuncional en aviones de combate, posibilitando la implementación

de nuevas técnicas y filosofías de procesamiento de señal. A continuación se listan las principales ventajas, que habría que añadir a las ya inherentes al apuntamiento electrónico:

- El intercalado o *interleaving* entre modos aire-aire y aire-superficie puede realizarse de forma casi instantánea. Pueden emplearse diferentes modos radar de forma simultánea o casi, como diferentes modos de seguimiento y bloqueo de blancos. De hecho, pueden destinarse parte de los canales de forma independiente a la realización de otras funciones como: calibración, medidas de apoyo electrónico (*Electronic Support Measures*, ESM), eliminación de lóbulos laterales, enlace de datos tácticos (*data-link*) para apoyo al guiado de misiles, etc.
- Pueden implementarse nuevas técnicas de seguimiento de blancos, como incrementar el *data rate* (número de pulsos) cuando se detecta una maniobra del blanco para poder realizar el seguimiento. El clásico *Track-While-Scan* (TWS), tradicionalmente basado en filtros de Kalman y aproximaciones estadísticas, cambia de filosofía empleando técnicas de seguimiento del tipo monopulso.
- Permite implementar técnicas de procesamiento de señal adaptativas basadas en métodos dinámicos de estimación paramétrica o métodos de superresolución, típicamente:
 1. *Adaptive Beam Forming* (ABF): creando ceros en el diagrama de radiación, para evitar fuentes de perturbación.
 2. *Space Time Adaptive Processing* (STAP): mejorando las capacidades



Fig. 4. F22 Raptor del Ala 3 de USAF en Elmendorf, Alaska. Incorpora el radar AN/APG-77, uno de los primeros radar AESA que se fabricó a gran escala (© 2010, Jeroen Oude Wolbers).



Fig. 5. Radar AESA CAPTOR-E, desarrollado por el consorcio EuroRadar para el Eurofighter. Para aumentar el campo de visión, del radar dispone también de la capacidad de reposicionamiento mecánico (Fuente: www.eurofighter.com).

como radar *Ground Moving Target Indicator* (GMTI), es decir, posibilitando la detección de blancos lentos terrestres o en presencia de fuerte *clutter*.

3. Obtención de imágenes SAR de alta resolución.
- Puede realizarse *jamming* o ataques electrónicos de una forma mucho más elaborada que la que permiten las antenas PESA.
 - Disminuye la probabilidad de que sus emisiones radar sean interceptadas (LPI – *Low Probability of Intercept*), lo que resulta esencial en los actuales y futuros escenarios de combate. Se posibilita el empleo de diferentes técnicas para LPI, definiendo mejor el haz, controlando los tiempos de iluminación o barrido y reduciendo la potencia transmitida a lo mínimos necesarios.

Más fiabilidad: cuando un módulo T/R deja de funcionar, las prestaciones del sistema no se degradan de manera importante. A medida que se van produciendo fallos en otros módulos, las prestaciones del sistema se siguen degradando paulatinamente, pero la antena sigue funcionando (lo que se conoce como *graceful degradation*). Esta característica supone

una diferencia fundamental con las antenas PESA, en las que cualquier fallo en el único transmisor/receptor que poseen provoca que la antena deje de funcionar completamente (en concreto, el HPA –*high power amplifier*– es uno de los componentes en radares M-Scan o PESA con menor vida útil y más número de fallos). Se destaca además que los módulos T/R son todavía más fiables que los desfasadores de las PESA.

A pesar de estas ventajas, las antenas AESA presentan también diversos inconvenientes cuya resolución exigirá enfrentarse a importantes desafíos tecnológicos:

Disipación de calor. La principal desventaja de las AESA, sin considerar factores económicos, la constituye la baja conductividad térmica de los MMIC de GaAs, GaN o SiC, lo que obliga a disponer de mecanismos para la disipación del elevado calor generado en los módulos. Este hecho limita la potencia de operación y en consecuencia el alcance del radar.

Peso de la antena. Actualmente, el elevado peso de las antenas AESA hace necesario contrabalancear el avión con lastres, con las implicaciones negativas que supone dicho

incremento del peso en cualquier plataforma aérea.

Factores económicos. El coste de fabricación de los módulos T/R es aún muy elevado, por lo que dotar a un avión de combate de capacidad AESA obliga a realizar una inversión muy costosa.

Conclusiones

En este artículo se ha pretendido mostrar, de manera no categórica, cuáles son las características de los radares AESA y cómo estas influyen positivamente en las capacidades de los aviones de combate armas, hasta el punto de conseguir que progresivamente estén desplazando a los radares MSA y PESA como radares primarios en dichos aviones. Como ejemplo cercano de esta tendencia se puede citar al Eurofighter, para el que está prevista la dotación de la capacidad AESA en los próximos años (radar CAPTOR-E, ver fig. 5). Actualmente, disponer o no de un sistema AESA puede considerarse el punto de partida para el análisis del estado del arte de los sistemas radar como sensor primario en aviones de combate, hasta el punto de poder considerar como aviones de altas capacidades sólo aquellos que lo incorporan.

¹ Por ejemplo, el radar AESA AN/APG-77 desarrollado por Northrop Grumman para el F-22, está constituido por 1500 elementos, el AN/APG-81 también de Northrop Grumman para el F-35 JSF por 1200, el APG-79 de Raytheon para nuevas upgrade del F-18, por 1.100 elementos. Fuente: <http://www.microwavejournal.com>.