

RADARES “CLÁSSICOS”, PESA E AESA: VANTAGENS E DESVANTAGENS

*Por Olivier Dujardin**



Vista frontal de um caça F-35, que emprega radar do tipo AESA (General Dynamics Mission Systems).

Comparativo dos radares “clássicos”, PESA e AESA, apontando as diferenças, vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

Hoje, a tecnologia AESA (*Active Electronically Scanned Array*) aplicada a radares é amplamente divulgada. Esta tecnologia viria a revolucionar o desempenho e a diferença em relação aos radares das gerações anteriores seria tal que permitiria, por si só, um salto operacional decisivo.

Na realidade, virtudes muito exageradas são atribuídas aos radares AESA. Esse exagero foi alimentado pela promoção das chamadas aeronaves de “quinta geração”: a presença de tal radar a bordo contribuiria para o desempenho revolucionário atribuído a esses dispositivos. Embora a tecnologia AESA tenha vantagens inegáveis, ela não revoluciona o campo e o salto de desempenho entre os radares PESA (*Passive Electronically Scanned Array*) e AESA deve ser colocado em ampla perspectiva.

Cada tecnologia de radar tem suas vantagens e desvantagens. Neste artigo, tentarei explicar como essas diferentes tecnologias funcionam sem entrar em um desenvolvimento muito técnico. Apenas radares de pulso monostáticos serão tratados aqui. Puristas e especialistas da área me perdoarão certos atalhos e certas aproximações feitas para fins educacionais, a fim de facilitar a compreensão da

lógica geral. Sempre poderão recorrer, por exemplo (em francês), às produções de Jacques Darricau¹ que ainda hoje são uma referência.

RADAR “CLÁSSICO”

A operação de um radar “clássico” é bastante simples de entender. Um oscilador (*magnetron*, *klystron*, tubo de onda progressiva para os com cavidade, ou oscilador de estado sólido para os radares mais recentes) gera uma onda que, transportada em um guia de ondas (tubo de metal), é difundida, através de uma “corneta”, em direção a um metal plano (antena) que, pela sua forma, vai focar o feixe. Este feixe será varrido pelo espaço pelos movimentos mecânicos da antena. Alguns radares com varredura eletrônica também permitem despontar o feixe em relação ao eixo da antena ajustando o deslocamento de fase da onda.



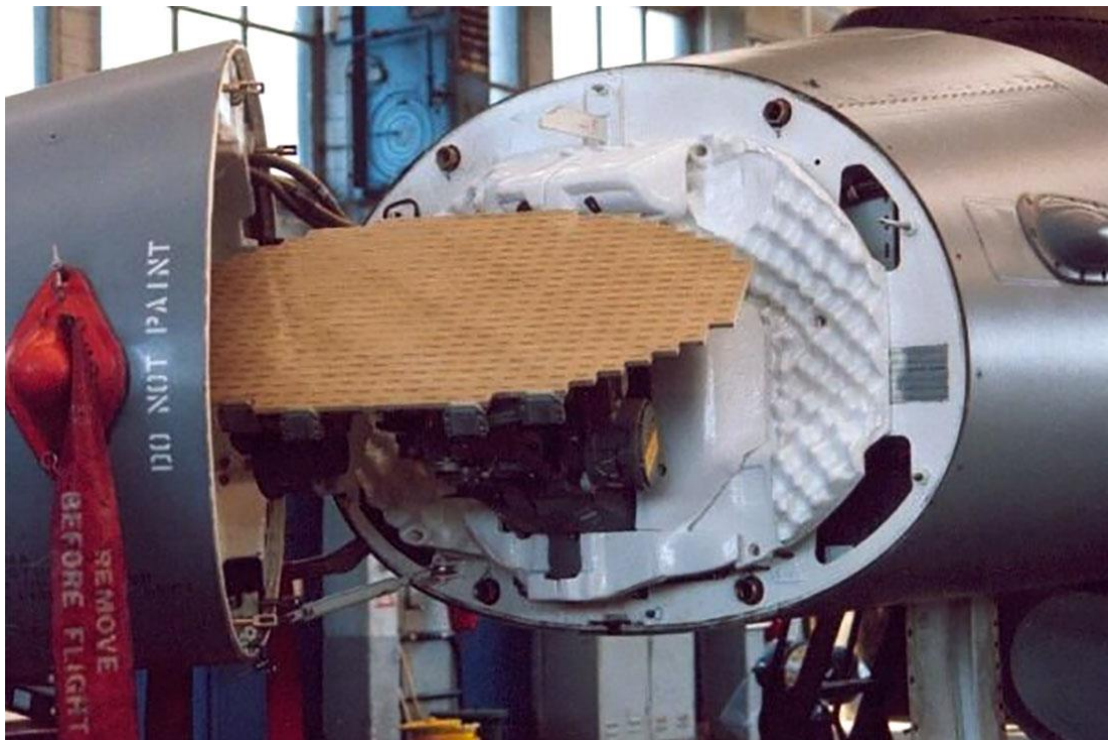
Close nos guias de onda e nas cornetas de emissão de um radar “clássico” usando vários transmissores.

Na recepção, a onda faz o caminho oposto, volta pelo guia de ondas até o receptor do radar. Como a potência da onda recebida é uma ínfima fração daquela que foi transmitida no início, o receptor, peça muito sensível, deve, portanto, ser protegida durante a transmissão. Ao nível dos guias de ondas existem, portanto, dispositivos de proteção a montante do percurso de transmissão, como circuladores ou centelhadores, que preservam o receptor no momento da transmissão.

¹ <https://radars-darricau.fr/livre/1-Pages/page-01.html>

BENEFÍCIOS

- Esses radares são de tecnologia simples, portanto relativamente baratos, robustos e hoje muito bem dominados;
- As antenas são fáceis de fabricar e reparar, portanto, resistem bem a possíveis danos;
- Esses radares são resistentes a pulsos eletromagnéticos (EMI) de alta potência, em particular graças ao dispositivo de proteção do canal de recepção;
- Esta tecnologia permite transmitir potências muito altas dependendo do tipo de transmissor utilizado;
- As antenas são mecanicamente móveis, portanto, é possível desviá-las para melhorar a furtividade do usuário. Isso é especialmente verdadeiro para aviões de combate e mísseis que podem, assim, ao se privar de radar, reduzir sua seção transversal de radar (RCS, *Radar Cross-Section*). Uma antena de radar é, por definição, um espelho de onda perfeita e, portanto, a principal fonte do RCS frontal de um caça ou míssil. Normalmente, em mísseis antinavio guiados por radar, é comum que o radar permaneça fora do ponto na maior parte do tempo e só se posicione quando estiver operando, a fim de diminuir sua detectabilidade.



Radar AN/APG-66 no F-16 apontado para cima, o que diminui o RCS frontal.

DESVANTAGENS

- A utilização de um oscilador de cavidade (*klystron*, *magnetron* ou tubos de ondas progressivas) limita, se compararmos com transmissores de estado sólido, as capacidades de agilidade de frequência do radar (capacidade de

mudar a frequência de um pulso para o outro). Para compensar, muitas vezes é usado com vários osciladores trabalhando em diferentes frequências, o que aumenta o peso, tamanho e consumo de energia do radar. Esta técnica de multi-transmissor é usada principalmente em radares terrestres ou a bordo de navios por questões de tamanho e peso;

- O desempenho desses radares não é muito alto: há muitas perdas térmicas (aquecimento dos osciladores de cavidade) e ao nível dos conectores de guia de onda, o que reduz a sensibilidade do radar;
- O movimento mecânico dos feixes limita as capacidades de variação das formas de onda. Esses radares podem mudar os modos de operação, mas dificilmente podem misturar modos. Concretamente, o radar de um caça não pode, por exemplo, fazer buscas ar-ar e ar-solo ao mesmo tempo porque os movimentos mecânicos da antena são incompatíveis (não dá para apontar para cima e para baixo ao mesmo tempo);
- Esses radares são considerados mais vulneráveis a interferências, especialmente se usarem apenas um único oscilador. No entanto, isso deve ser muito matizado, dependendo dos radares;
- Os osciladores de cavidade precisam de 10 a 20 minutos de aquecimento para emitir frequências estáveis. Este ponto é particularmente limitante para mísseis de radar ativos, como mísseis antinavio ou mísseis antiaéreos. De fato, não é possível disparar um míssil se ele ainda não estiver ligado. Em zonas de crise, isso exige que os mísseis estejam permanentemente ligados, o que os desgasta prematuramente. Essa restrição, portanto, dificulta sua vida útil. O uso de osciladores de estado sólido permite evitar essa desvantagem, mas sua potência unitária permanece baixa; também não são adequados para radares de alta potência.

Os radares convencionais não vão desaparecer tão cedo, suas qualidades intrínsecas os tornam boas ferramentas que permanecem bastante relevantes para aplicações que não requerem mudanças muito grandes nas formas de onda (radares de vigilância aérea de longo alcance, trajetória, etc.) e exigem altas potências de transmissão.

KLYSTRONS DE CATODO FRIO

Este oscilador é um pouco especial, embora seu uso não mude nada em comparação com o que foi explicado nos parágrafos anteriores. No entanto, esta invenção soviética tem uma característica que fez a OTAN suar frio.

O cátodo frio *klystron* tem a particularidade de não necessitar de pré-aquecimento. Isso permite que ele transmita quase instantaneamente de maneira estável. Esta é uma vantagem muito importante para os mísseis radar ativos, pois podem ser disparados a qualquer momento, sem necessidade de serem mantidos sob tensão, o que aumenta sua vida útil, reduz a manutenção e, acima de tudo, confere uma capacidade de reação sem igual.

Foi após a queda da URSS e a integração dos antigos países do Bloco Oriental na Europa que o Ocidente pôde estudar certos sistemas de armas projetados pelos soviéticos e descobriu esse *klystron* muito particular em mísseis recuperados.

Este *klystron* é o resultado da habilidade que a URSS manteve na eletrônica de válvulas, uma tecnologia gradualmente abandonada desde o início dos anos 1960 no Ocidente, em favor dos semicondutores. De fato, a URSS, até a década de 1970, privilegiou a eletrônica de válvulas em detrimento dos semicondutores porque considerava essa tecnologia muito vulnerável a pulsos eletromagnéticos após explosões nucleares. O regime soviético queria que seus sistemas de armas continuassem a funcionar mesmo após um ataque nuclear. Esta escolha teve duas consequências. O primeiro foi um atraso substancial da URSS no campo dos semicondutores. A segunda é que desenvolveu tecnologias para a miniaturização da eletrônica de válvulas com aparência de micro-lâmpadas. É graças, em parte, às habilidades adquiridas neste campo que os russos desenvolveram o *klystron* de cátodo frio, muito compacto e de baixa potência (ideal para buscadores de mísseis) em comparação com os *klystrons* tradicionais.

Os países ocidentais primeiro tentaram, sem sucesso, copiar a tecnologia de *klystrons* recuperados de mísseis antes de tentar negociar a transferência de habilidades para as indústrias russas. No entanto, esta é uma das áreas onde a Rússia conseguiu manter o seu *know-how*, embora as tentativas de negociação durassem praticamente até o início dos anos 2000.

Foi preciso o desenvolvimento do mercado de osciladores de estado sólido que surgiu na década de 1990 para que essa tecnologia deixasse de ser realmente interessante para os ocidentais, pois agora eles tinham uma solução com as mesmas vantagens. E são esses osciladores de estado sólido que, uma vez miniaturizados, serão a base da tecnologia AESA da qual os Estados Unidos serão pioneiros.

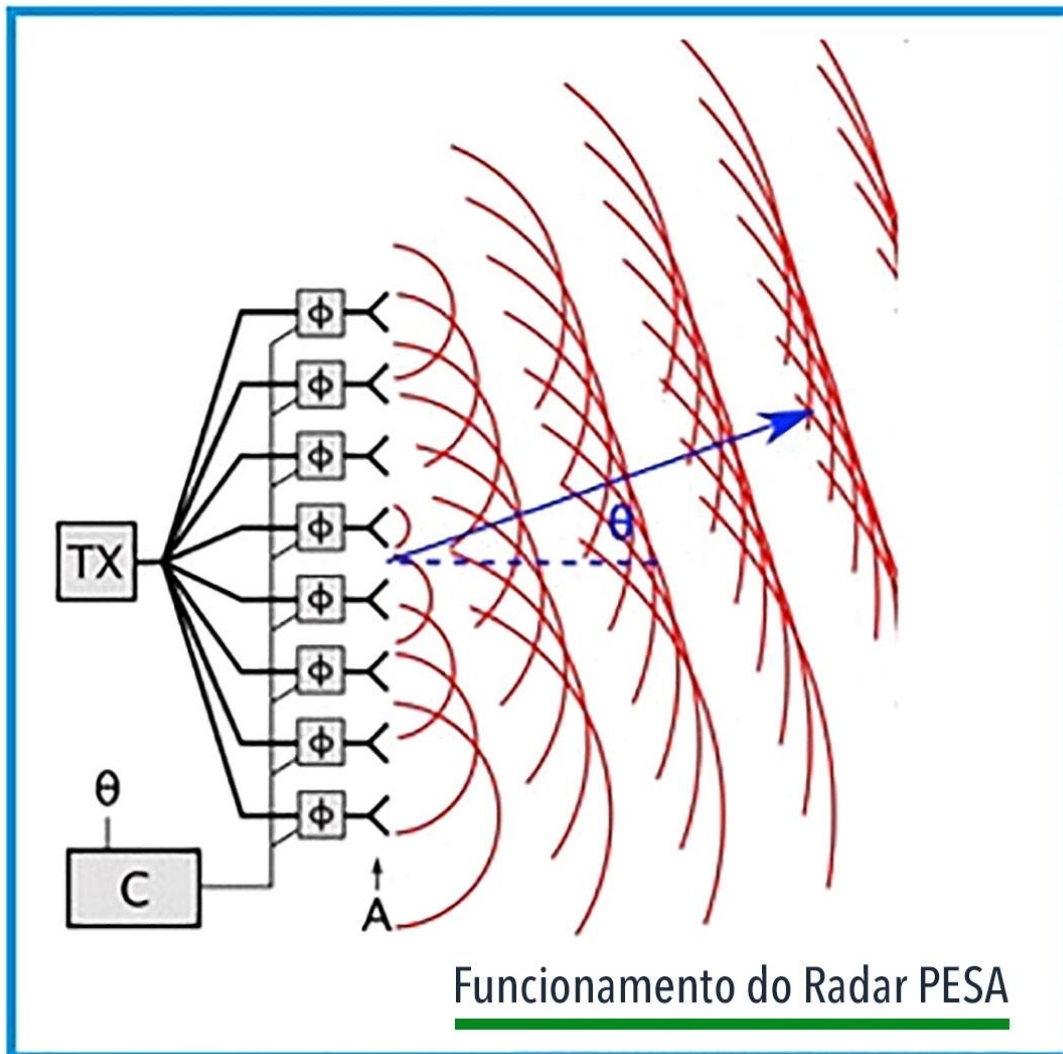
RADAR PESA (MATRIZ DE VARREDURA ELETRÔNICA PASSIVA)

A parte de transmissão de um radar PESA é semelhante à de um radar convencional. Um oscilador gera uma onda que é enviada, por meio de um guia de onda, para deslocadores de fase que também atuam como receptores.

Nesse tipo de radar, são os deslocamentos de fase aplicados por cada deslocador de fase que formam o feixe do radar e determinam sua direção². Quanto maior o número de defasadores, maior será a área da antena e mais fino será o feixe do radar, o que aumenta a precisão angular do radar e também seu alcance, pois a energia eletromagnética é mais concentrada.

²

<https://www.radartutorial.eu/06.antennas/Antenne%20r%C3%A9seau%20%C3%A0%20commande%20de%20phase.fr.html>



Funcionamento de uma antena de radar tipo PESA.

VANTAGENS EM RELAÇÃO AO RADAR CONVENCIONAL

- O direcionamento dos feixes é independente da varredura mecânica da antena, o que facilita a mistura dos modos do radar independentemente das restrições do movimento mecânico. É esta tecnologia que tornou possível produzir os primeiros verdadeiros radares multifuncionais;
- A precisão angular é melhor porque o uso de defasadores permite medir com mais precisão a direção de chegada de cada eco de radar do mesmo feixe. Isso é chamado de Computational Beamforming (CBF);
- O desempenho do radar é melhor porque não há perdas ao nível dos guias de onda na recepção. Isso significa que, com a mesma potência emitida, o alcance de detecção é maior.

DESVANTAGENS EM RELAÇÃO AO RADAR CONVENCIONAL

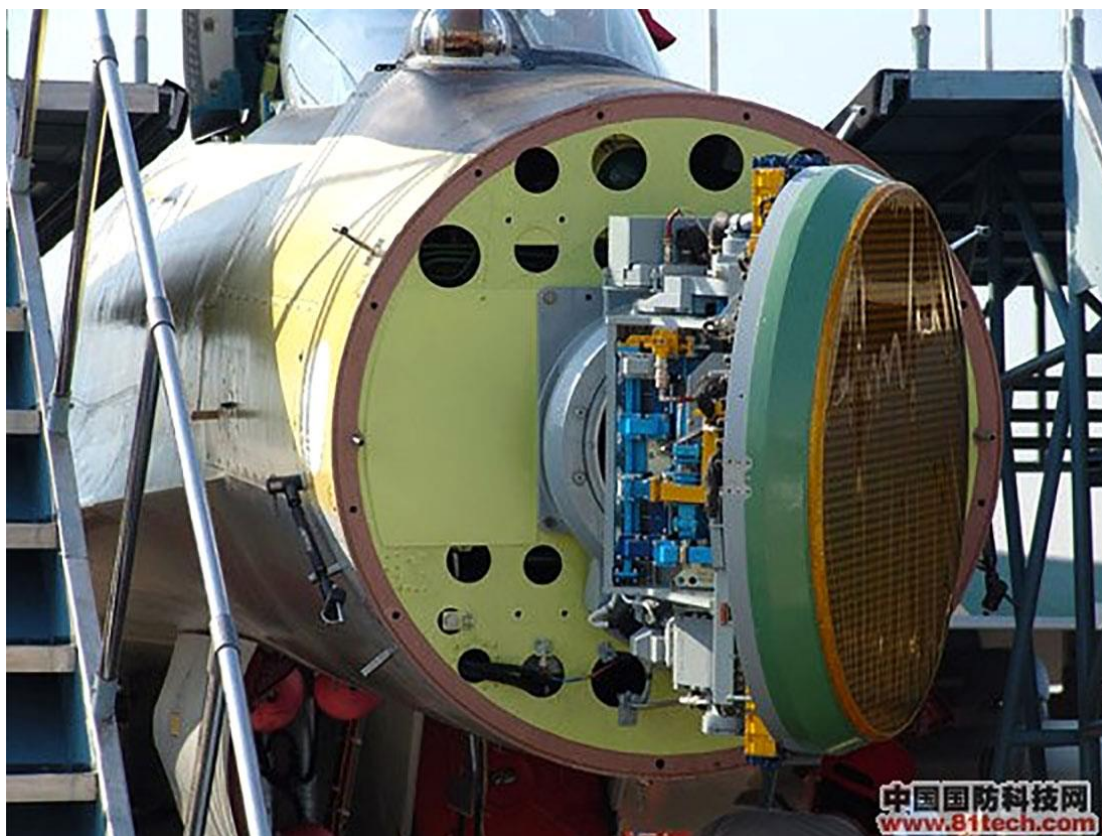
- Como os receptores estão localizados diretamente na antena sem proteção, isso torna esses radares mais vulneráveis a pulsos eletromagnéticos de alta potência em comparação com os radares “clássicos”;
- A teoria permite despontar o feixe até cerca de 60° do eixo da antena, mas isso é feito à custa de uma redução significativa no alcance de detecção e na precisão angular. Quanto maior o desalinhamento, mais o desempenho degrada exponencialmente. Empiricamente, podemos considerar que, em *depointing* máximo (60°), o alcance de detecção é dividido por dois. Essa limitação é especialmente sensível para radares de caças e, portanto, duas escolhas são possíveis.

A primeira escolha passa por nos contentarmos com uma antena fixa sabendo que estamos reduzindo o diagrama de detecção lateral: isto permite ultrapassar completamente o movimento mecânico das antenas, o que representa um ganho de massa e não condiciona os modos de busca (todo o diagrama de detecção está permanentemente acessível). É o que observamos no radar BRLS-8B Zaslon-M do MiG-31, primeiro caça do mundo equipado com esse tipo de radar, ou no RBE2 do Rafale.

A segunda opção consiste em manter a capacidade de movimento mecânico da antena (menor que em um radar “convencional”) para não degradar o alcance de detecção lateral e aumentar a cobertura total monitorada. Esta escolha é tecnologicamente mais complexa e pesada. No entanto, isso não permite acesso a todo o diagrama de detecção ao mesmo tempo. É a opção escolhida no radar Captor do Eurofighter ou no radar Irbis-E do Su-35.



Radar PESA fixo BRLS-8B “Zaslon-M” do MiG-31.



Radar PESA móvel Irbis-E do Su-35.

- Esses radares, principalmente quando utilizados em caças ou como buscadores de mísseis, não permitem, quando fixados, atuar no RCS frontal;
- Estes radares requerem uma calibração das antenas de forma a obter um centro monofásico em toda a banda de frequência utilizada;
- Esses radares são tecnologicamente mais complexos, caros e exigem maior poder computacional para o gerenciamento da geração do feixe e para o controle dos lóbulos secundários, potencialmente mais importantes do que em um radar “convencional”. Este último ponto depende muito da qualidade do projeto mecânico da antena e do posicionamento dos defasadores. Deve-se notar que as antenas de design russo são mecanicamente mais eficientes, o que lhes permite melhorar significativamente o desempenho (menos lóbulos secundários = menos energia dispersa), com a outra vantagem de exigir menos poder de computação, o que compensa o menor desempenho de sua eletrônica.

RADAR AESA (MATRIZ DE VARREDURA ELETRÔNICA ATIVA)

Quanto aos radares AESA, em vez de defasadores/receptores, eles usam elementos transmissores/receptores de estado sólido miniaturizados. A formação do feixe é feita da mesma forma que nos radares PESA. Deve-se notar também que os Estados Unidos passaram diretamente, em suas aeronaves de combate, do radar “clássico” para o radar AESA sem passar pelo *case* PESA.

A potência da transmissão, e, portanto, o alcance de detecção, será a soma das potências de cada um dos transmissores/receptores que, tomados individualmente, possuem apenas uma potência limitada a algumas dezenas de *watts*. Assim, quanto mais transmissores/receptores um radar AESA tiver, mais longe ele enxergará, mais o feixe estará concentrado e maior será sua antena (o ganho da antena é proporcional ao seu tamanho). Claro que isso implica que cada transmissor/receptor transmite, de forma totalmente sincronizada, a mesma forma de onda na mesma frequência. Este ponto permite desmascarar certas “lendas” que rondam os radares AESA:

- Não é coerente imaginar operar um radar AESA em uma infinidade de frequências simultaneamente porque a formação dos feixes seria impossível. De um ponto de vista puramente técnico, seria viável, mas totalmente inútil. Além disso, a dispersão de energia seria proporcional ao número de frequências usadas, reduzindo o alcance de detecção de acordo;
- Se, em teoria, é possível subdividir um radar AESA em vários radares independentes, na prática isso não é relevante. Cada “sub-radar” veria seu alcance de detecção extremamente reduzido (é a soma das potências dos transmissores/receptores que dá o alcance de detecção) e o foco dos feixes seria fraco, o que daria uma precisão angular bem menor. Pela mesma razão, um radar AESA não pode travar simultaneamente. Eventualmente poderá fazer *jamming* direcional, mas, durante esse tempo, não será utilizado como radar; ele deve, portanto, escolher um ou outro. É um pouco o mesmo com seu uso como meio de transmissão de rádio. A Marinha dos EUA fez um teste com o radar AESA AN/APG-79 do F-18E/F, mas isso prejudicou muito o desempenho do radar; além disso, o uso contínuo do modo rádio tem levado a superaquecimento excessivo, comprometendo seriamente a vida útil dos transmissores/receptores. Por outro lado, pode-se imaginar que a multiplicação de antenas AESA em uma superfície possibilita o uso dessas antenas independentemente como radar, *jammer* ou meio de transmissão de rádio, conforme a necessidade, desde que as faixas de frequência utilizadas sejam idênticas. No entanto, multiplicar as antenas equivale potencialmente a aumentar o RCS e, portanto, a perder furtividade;
- Os radares AESA não são particularmente eletromagneticamente discretos. Se os feixes de radar podem ser mais finos e, portanto, “mais discretos”, ao nível dos sistemas de guerra eletrônica a diferença é quase imperceptível na prática.

Assim como os radares PESA, dos quais estão muito próximos, esses radares costumam ser fixados em aviões de combate. No entanto, como o radar AESA foi erguido como equipamento essencial para que uma aeronave reivindique o título de caça de quinta geração, o RCS gerado por uma antena fixa é um problema para essas aeronaves supostamente mais ou menos “furtivas”. No entanto, o problema não afeta apenas as aeronaves de quinta geração, mas todas as aeronaves de combate cujo RCS se deseja limitar.

Existem três abordagens diferentes para este problema:

- A primeira consiste em sacrificar o RCS, é a opção escolhida no Rafale francês cuja versão AESA do RBE2 que equipa o avião mantém a posição vertical. Como o Rafale não tem a pretensão de ser uma aeronave “stealth”, esse sacrifício é muito relativo, mas é preciso ter em mente que, de frente, é a antena do radar que gera a maior parte do RCS da aeronave fora o armamento transportado sob as asas. Durante suas missões, um Rafale sistematicamente carrega armas sob as asas, então isso não muda muito na prática em termos de sua assinatura de radar;



Vista frontal do radar RBE2 do Rafale.

- A segunda possibilidade consiste em “inclinarmos” a antena para cima de modo a desviar as ondas recebidas pela frente. Esta é a opção escolhida na maioria das aeronaves de combate, sejam elas “stealth” ou não. É o caso do F-22, F-18E/F, F-16 Block 60, F-35, Su-57, JF-17 Block III, J-20 etc. Entretanto, esta opção tem a desvantagem de degradar o desempenho do radar no modo ar-solo, pois o desalinhamento a ser realizado neste modo é ainda maior. O fato de o Rafale ter mantido uma antena reta talvez seja uma vantagem aqui, principalmente para uma aeronave que quer ser multifunção. Por fim, inclinar a antena é especialmente interessante no caso de confronto em combate aéreo contra outros caças para reduzir a distância de detecção do adversário;



Antena do radar AN/APG-81 instalada no F-35 orientada "inclinada" para cima.

- A terceira consiste, como em alguns radares PESA, em manter um movimento mecânico que permite tanto ampliar o diagrama de detecção quanto "esconder" sua antena de um potencial adversário. Atualmente, esta solução é usada apenas para o radar Captor-E que equipam os Eurofighters modernizados.

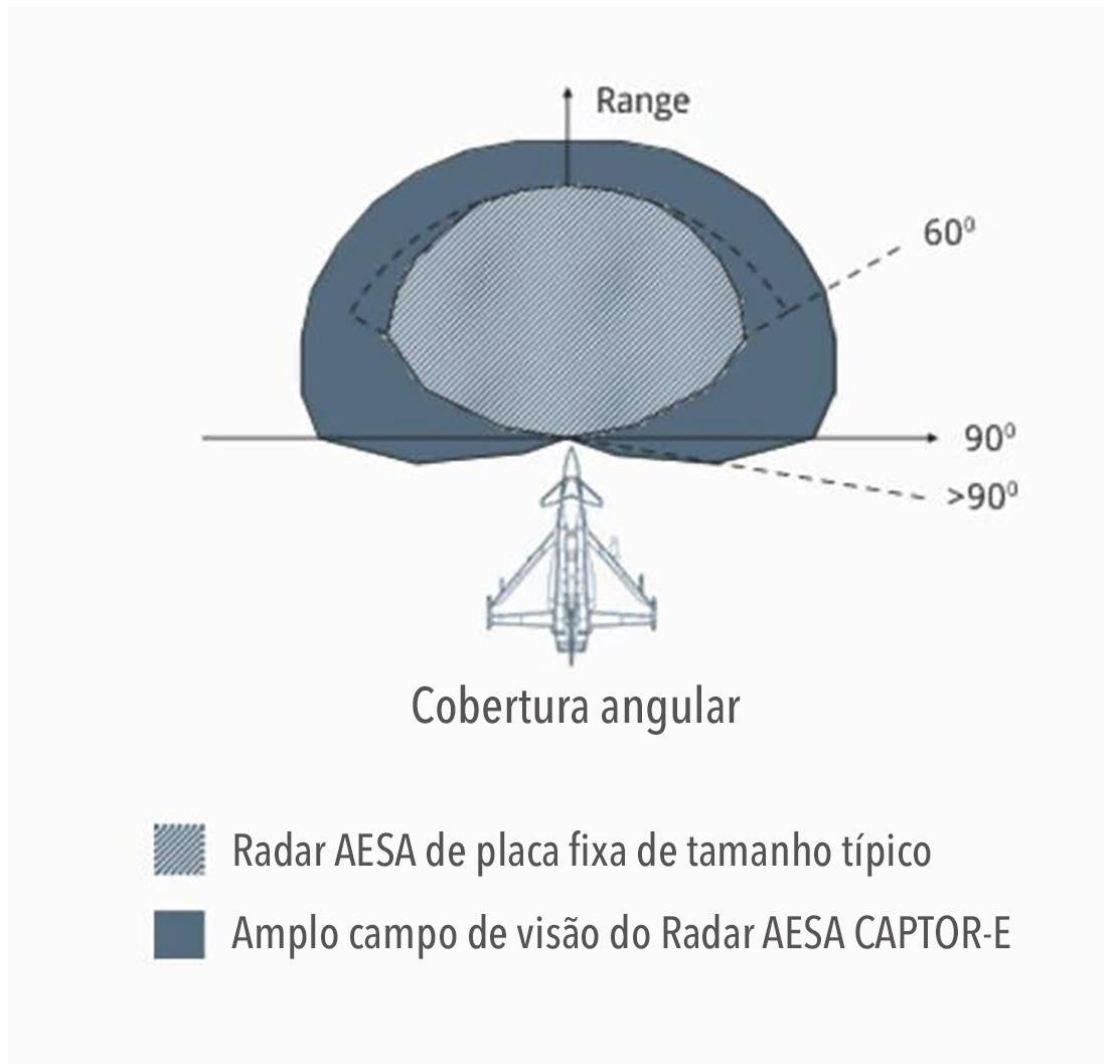
Se a mobilidade da antena é uma solução para manter um diagrama de detecção mais amplo, outra solução consiste em ter antenas laterais que serão responsáveis pela detecção nas laterais. Isso permite obter uma capacidade de detecção muito grande, muito maior do que a obtida pela simples mobilidade da antena, mas tem um custo e representa peso adicional. Esta solução é, portanto, viável apenas em caças de grande porte. Hoje apenas duas aeronaves possuem radares laterais, são o J-20 e o Su-57. O F-22 deveria ser originalmente equipado com ele, mas a economia orçamentária decidiu o contrário.



Radar AESA Móvel Captor-E.



Sistema de radar do caça chinês J-20 com a antena lateral visível.



Diferença no padrão de detecção entre uma antena AESA fixa e uma antena AESA móvel.

VANTAGENS EM RELAÇÃO AO RADAR PESA

- Alta confiabilidade porque a falha de alguns transmissores/receptores não compromete o funcionamento do radar;
- Eficiência melhorada que aumenta o alcance de detecção na potência equivalente. Como os transmissores/receptores estão na cabeça da antena, não há mais perdas;
- Em um tamanho de antena equivalente em comparação com um radar PESA, a potência cumulativa dos transeptores às vezes é maior do que a disponível no mesmo radar PESA equipado com um único oscilador;
- Esses radares se beneficiam de uma melhor abertura angular (padrão de radiação ligeiramente maior do que em um radar PESA) e melhor rejeição de interferência (ruído) possibilitada pelo processamento adaptativo multicanal;
- A utilização de transmissores de estado sólido permite, em teoria, operar o radar em uma faixa de frequência mais ampla com maior agilidade de

frequência, o que permite maior resistência a interferências. Esta vantagem só existe se compararmos com um radar PESA que utiliza um oscilador de cavidade e não um transmissor de estado sólido. Neste último caso, não haverá diferença.

DESVANTAGENS EM COMPARAÇÃO AO RADAR PESA

- O custo e o poder de computação exigidos por esses radares são significativos;
- Os transmissores/receptores são feitos com ligas à base de gálio, nitreto de gálio ou arsenieto de gálio. Como a China sozinha responde por mais de 80% da produção mundial de gálio refinado³, há risco de abastecimento e dependência para a fabricação desses elementos.

* * * * *

Embora a tecnologia AESA seja frequentemente apresentada como o ápice da evolução do radar, ela não é, de forma alguma, a “virada do jogo” que gostaríamos que fosse. O radar AESA é a evolução natural da tecnologia de radar, mas não uma revolução que cause mudanças brutais na área. É possível encontrar um radar PESA com desempenho superior a alguns radares AESA. Da mesma forma, o AESA não traz uma revolução na operação do radar. O radar AESA RBE2 do Rafale usa, exceto por alguns detalhes, exatamente as mesmas formas de onda que o RBE2 PESA. As diferenças operacionais são mínimas. Existem até semelhanças muito fortes nas formas de onda entre um radar AESA AN/APG-80 e seu ancestral “clássico” AN/APG-68 ou AN/APG-66, instalados nas diferentes versões do F-16.

Como qualquer radar, o AESA é o resultado de certos compromissos, com as vantagens e desvantagens que isso implica. Como tal, o radar “clássico” continuará a existir para certas aplicações porque ainda tem certas vantagens. Em hipótese alguma o resultado de um combate aéreo pode ser previsto apenas pela presença de um radar AESA em uma das aeronaves. A diferença se dará de acordo com muitos outros parâmetros.

O autor gostaria de agradecer a Jean-François Legendre e Stéphane Meric do Instituto de Eletrônica e Telecomunicações de Rennes (IETR) pela revisão cuidadosa, bem como a vários engenheiros e pesquisadores da área que, por vários motivos, desejam permanecer anônimos.

Publicado no [Cf2R](#).

**Olivier Dujardin tem 20 anos de experiência em guerra eletrônica e processamento de sinais de radar. Exerceu sucessivamente funções operacionais em guerra eletrônica, no estudo de sistemas de radar e guerra eletrônica, e na análise e coleta de sinais. Também atuou como especialista técnico em sistemas de coleta de dados.*

³ <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-60582-FR.pdf>